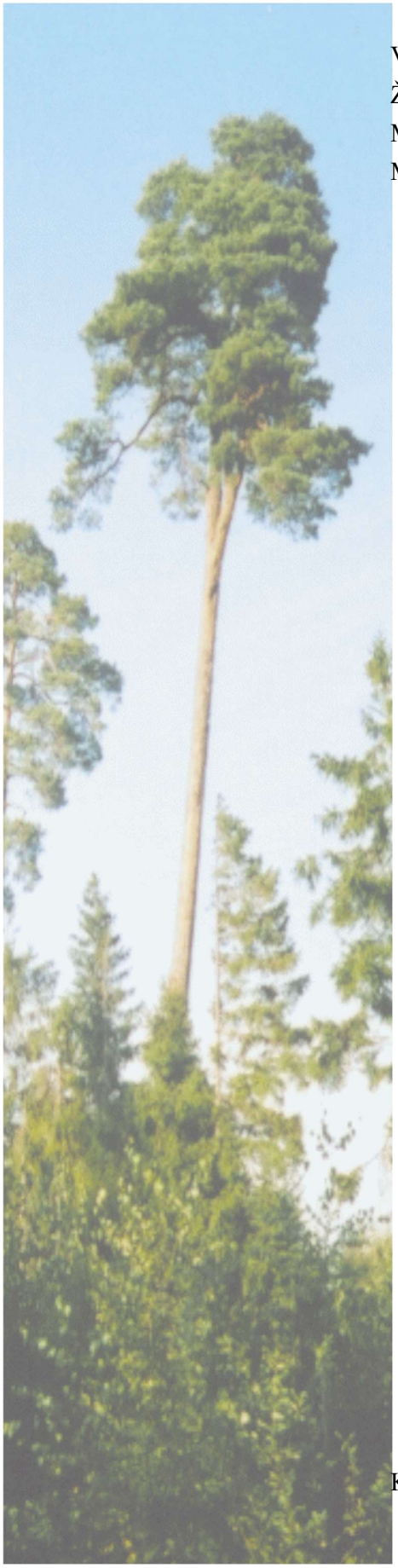


Vytauto Didžiojo universitetas
Žemės ūkio akademija
Miškų ir ekologijos fakulteto
Miškų monitoringo laboratorija

TOLIMŲJŲ ORO TERŠALŲ PERNAŠŲ POVEIKIO SĄLYGIŠKAI NATŪRALIOMS EKOSISTEMOMS IR LIETUVOS ORO BASEINUI VERTINIMO PASLAUGOS

I PIRKIMO DALIES:

TOLIMŲJŲ ORO TERŠALŲ PERNAŠŲ POVEIKIO SĄLYGIŠKAI NATŪRALIŲ EKOSISTEMŲ BŪKLEI VERTINIMO PASLAUGŲ

A T A S K A I T A

Sutarties Nr. 28T-2026-15.
VDU-S-248 (M-10-02/26).

Kaunas 2026 m.

Vytauto Didžiojo universitetas
Žemės ūkio akademija

TVIRTINU:

Kancleris:

VDU Žemės ūkio akademijos
kancleris
prof. dr. Vigilijus Jukna

TOLIMŲJŲ ORO TERŠALŲ PERNAŠŲ POVEIKIO SĄLYGIŠKAI NATŪRALIOMS EKOSISTEMOMS IR LIETUVOS ORO BASEINUI VERTINIMO PASLAUGOS

I PIRKIMO DALIES:

TOLIMŲJŲ ORO TERŠALŲ PERNAŠŲ POVEIKIO SĄLYGIŠKAI NATŪRALIŲ EKOSISTEMŲ BŪKLEI VERTINIMO PASLAUGŲ

A T A S K A I T A

Sutarties Nr. Nr. 28T-2026-15.
VDU-S-248 (M-10-02/26).

Darbo vadovas: .....Algirdas Augustaitis

Kaunas - Akademija

Santrauka

2026-02-13 dienos projekte Nr. VDU-S-248 numatyta, vadovaujantis VAMP 2024-2029 m. 7-u priedu, pateikti Aplinkos apsaugos agentūrai (toliau AAA) 2025 m. duomenis ir informaciją pagal 1 uždavinio „Rinkti, vertinti ir prognozuoti pagal Oro taršos poveikio ekosistemoms integruoto monitoringo tarptautinio bendradarbiavimo ICP KM programą sąlygiškai natūralių miško ekosistemų būklę ir jos ilgalaikius pokyčius vertinant oro teršalų (ypač sieros ir azoto junginių) pernašų iš Vakarų ir Vidurio Europos valstybių srautų, pažemio ozono, šiltnamio efektą sukeliančių dujų ir sunkiųjų metalų kaitą, kompleksišką poveikį biologiniams ir geocheminiams procesams, vykstantiems ekosistemose, atsižvelgiant į regioninius ypatumus ir klimato pokyčius“ priemonių 1.1, 1.3, 1.4, 1.5, 1.6 vertinimo kriterijus.

Vadovaujantis VAMP 2024-2029 m. 7-u priedu, atlikti oro taršos poveikio vertinimą ir prognozę 1994-2025 m. pagal 1 uždavinio „Rinkti, vertinti ir prognozuoti pagal Oro taršos poveikio ekosistemoms integruoto monitoringo tarptautinio bendradarbiavimo ICP KM programą sąlygiškai natūralių miško ekosistemų būklę ir jos ilgalaikius pokyčius vertinant oro teršalų (ypač sieros ir azoto junginių) pernašų iš Vakarų ir Vidurio Europos valstybių srautų, pažemio ozono, šiltnamio efektą sukeliančių dujų ir sunkiųjų metalų kaitą, kompleksišką poveikį biologiniams ir geocheminiams procesams, vykstantiems ekosistemose, atsižvelgiant į regioninius ypatumus ir klimato pokyčius“ priemonių 1.7 ir 1.8 vertinimo kriterijus ir pateikti jo rezultatus ataskaitoje.

Parengti ir AAA pateikti duomenis ir informacija už 2025 m., skirta pateikti ICP KM programai vadovaujančiam Švedijos žemės ūkio mokslų universitetui (SLU), remiantis ICP KM Vadovo kompleksiniam monitoringui (*angl. International Cooperative Programme on Integrated Monitoring of Air Pollution Effects on Ecosystems (2022). Manual for Integrated Monitoring. Edition 7. The Swedish University of Agricultural Sciences* atitinkamoms paprogramėms.

2025 m. atlikti visi numatyti kasmetiniai ir papildomai kas 5 metus vykdomi detalūs miško ekosistemų tyrimai Aukštaitijos ir Žemaitijos KM stočių uždaruose upelių baseinuose, atnaujinta, pagal galimybes, visa privaloma įranga Dzūkijos KMS baseine tolesnei veiklai vykdyti ir pratęsti visi rėžiminiai stebėjimai Aukštaitijos KM stotyje.

Vykdant sutartį surinkti duomenys ir informacija bei įvertintas oro taršos poveikis sąlygiškai natūralių ekosistemų komponentams, remiantis Jungtinių Tautų Tolimųjų tarpvalstybinių oro teršalų pernašų konvencijos (toliau – TTOTPK) įgyvendinimui skirtos Tarptautinės bendradarbiavimo programos integruoto monitoringo srityje (*angl. International Cooperative Programme on Integrated Monitoring*) (toliau – ICP KM programa) reikalavimais Aukštaitijos integruoto monitoringo stotyje, Rūgšteliškio k., Utenos r. (stoties koordinatės 26735, 6149408 (LKS), 55.463324, 26.004108 (WGS)), Žemaitijos integruoto monitoringo stotyje, Plokštinės k., Plungės r. (stoties koordinatės 368219, 6210280 (LKS), 56.008478, 21.88682 (WGS)), Dzūkijos integruoto monitoringo stotyje, Dubininko k., Varėnos r. (stoties koordinatės 518818, 5995189(LKS), 54.093741, 24.287670 (WGS)); užtikrinti ICP KM programos bei Europos Parlamento ir Tarybos direktyvų 2004/107/EB dėl arseno, kadmio, gyvsidabrio, nikelio ir policiklinių aromatinių angliavandenilių aplinkos ore, 2008/50/EB dėl aplinkos oro kokybės ir švaresnio oro Europoje ir (ES) 2016/2284 dėl tam tikrų valstybėse narėse į atmosferą išmetamų teršalų kiekio mažinimo, kuria iš dalies keičiama Direktyva 2003/35/EB ir panaikinama Direktyva 2001/81/EB reikalavimus ir vadovaujantis Valstybine aplinkos monitoringo 2024-2029 metų programos 7-u skyriumi (toliau (VAMP 2024-2029 m.).

Bendradarbiaujant su tarptautiniu projektu „Foest – 4.0“ LIDAR technologijomis ištirti Aukštaitijos, Žemaitijos ir Dzūkijos baseine augantys miškai medžio lygmenyje, patikslintas jų reljefo modelis. Toliau tiriamos medžių ekofiziologinės reakcijos – transpiracija ir augimas, vandens naudojimo efektyvumui nustatyti ir medžių prisitaikymui prie nepalankių sąlygų vertinti Aukštaitijos KMS, 2025 m. pradėti tyrimai Žemaitijos KMS. Galiausiai įkurta stotis ŠESD emisijoms iš dirvožemio skirtingose mikro buveinėse matuoti ir jų poveikį CO2 balansui ore vertinti. Pradėti tiesioginiame režime matuoti SO2 ir NOx oksidų koncentracijos Aukštaitijos KMS.

1 užduotis: Atlikti šie paslaugų sutarties techninėje specifikacijoje numatyti VAMP 7-to skyriaus šių priemonių tyrimai ir darbai:

1.1. Priemonė: atliktas oro ir kritulių sąlygiškai natūraliose miško ekosistemose monitoringas siekiant įvertinti veiksnius, lemiančius ekosistemų būklės kaitą.

- mišku apaugusioje teritorijoje atlikti kritulių kiekio, oro, dirvožemio ir paviršinio vandens temperatūros įvairiame atmosferos aukštyje (2, 8, 22 m) ir dirvožemyje (5, 10, 20 cm gylyje), oro santykinės drėgmės, vėjo greičio ir krypties matavimai;
- atlikti saulės bendrosios ir fotosintetinės saulės aktyvumas (FAR), ultravioletinės A saulės spinduliuotės (UVA) ir ultravioletinės B saulės spinduliuotės (UVB), pažemio ozono koncentracijų matavimai, bendrojo ozono kiekio ir ultravioletinės A saulės spinduliuotės (UVA) ir ultravioletinės B saulės spinduliuotės (UVB) monitoringą;
- atlikti oro cheminiai matavimai – sieros dioksido (SO2), aerozolinių sulfatų (SO42-), azoto dioksido (NO2), aerozolinių nitratų ir azoto rūgšties (NO3-+HNO3), aerozolinio amonio ir amoniako NH (NH4++NH3) kiekis ore;
- atlikti kritulių ir polajinių kritulių cheminiai matavimai, nustatytas kritulių kiekis, rūgštingumas (PH); ištirpusių nitratų (NO3-), amonio (NH4+), sulfatų (SO4 2-), chloro (Cl-), šarminių metalų (kalcis (K+), natris (Na+), kalcis (Ca2+), magnis (Mg2+)) kiekis krituliuose, specifinis elektros laidumas;
- atlikti sunkiųjų metalų (kadmis (Cd), varis (Cu), švinas (Pb), nikelis (Ni), manganas (Mn), geležis (Fe), chromas (Cr), cinkas (Zn), arsenas (As) ir gyvsidabris (Hg)) ir policiklinio aromatinio angliavandenilio benzo(a)pireno tyrimai iškritose atvirose vietose ir po medžių lajomis (papildo aplinkos oro monitoringą);
- įvertinta klimato, pažemio ozono, FAR ir ultravioletinės saulės spinduliuotės sąveika ir nustatytas galimas poveikis miško ekosistemoms.

1.3. Priemonė: atliktas dirvožemio būklės sąlygiškai natūraliose miško ekosistemose monitoringas, siekiant išsiaiškinti pagrindinių maistinių medžiagų ir teršiančiųjų komponenčių kaitą lemiančius veiksnius, įvertinti jų poveikį dirvožemio biotos įvairovei ir gausai;

1.4. Priemonė: atliktas paviršinio (upės) ir požeminio (dirvožemio ir gruntinio) vandens būklės sąlygiškai natūraliose miško ekosistemose monitoringas, siekiant nustatyti pagrindinių maistinių medžiagų ir teršiančiųjų komponenčių balansą, atsižvelgiant į jų patekimo, transformacijų ekosistemoje ir išplovimo iš jos procesų intensyvumą;

1.5. Priemonė: atliktas augalijos (įvairių biotos komponenčių) rūšių įvairovės, būklės ir gausumo sąlygiškai natūraliose miško ekosistemose monitoringas siekiant nustatyti klimato kaitos, tolimųjų oro teršalų pernašų srautų, šiltnamio efektą sukeliančių dujų, pažemio ozono kompleksinį poveikį ir įvertinti bendrą miško ekosistemų tvarumą prisitaikant ir švelninant globalios klimato kaitos grėsmes;

1.6. Priemonė: nustatyti maistinių, teršiančių ir sunkiųjų metalų koncentracijų kaitą biologiniuose preparatuose, siekiant įvertinti jų galimą grėsmę sąlygiškai natūraliose ekosistemose;

1.7. Priemonė: nustatyti maistinių, teršiančių ir sunkiųjų metalų koncentracijų kaitą biologiniuose preparatuose, siekiant įvertinti jų galimą grėsmę sąlygiškai natūraliose ekosistemose;

1.8. Priemonė: nustatyti sąlygiškai natūralių ekosistemų tvarumą lemiantys veiksniai skirtinguose Lietuvos klimatiniuose regionuose siekiant įvertinti naujas grėsmes ir neigiamus pokyčius, politiniams sprendimus dėl aplinkos kokybės gerinimo priimti.

2 užduotis. 2025 m. užtikrintas oro, kritulių, vandens ir kitų aplinkos elementų būklės tyrimų atlikimas Aukštaitijos KM stotyje pagal ICP KM programą, vadovaujantis šios techninės specifikacijos priedėlyje nurodytu Aukštaitijos KM stotyje tiriamų fizikinių, meteorologinių, oro, kritulių, vandens parametrų bei tyrimų apimčių sąrašu ir laikantis ICP KM Vadovo reikalavimų:

2.1. vykdyti aplinkos būklės parametrų (fizikinių, meteorologinių, oro, kritulių ir vandens), privalomų pagal ICP KM programos ir Europos Parlamento ir Tarybos direktyvos 2004/107/EB reikalavimus mėginių paėmimo ir matavimo darbai Aukštaitijos KM stoties ir upelio baseino teritorijoje ir tyrimų poligone;

2.2. užtikrinta ICP KM programos reikalavimus sąlygiškai natūralių ekosistemų tyrimų stotKMS atitinkanti Aukštaitijos KM stoties priežiūra ir eksploatacija, sudarant sąlygas efektyviam tolimųjų oro teršalų pernašų įtakos Lietuvos oro baseino užterštumo lygiui tirti;

2.3. užtikrintas paimtų bandinių ir su jais susijusių duomenų pristatymas atitinkamoms akredituotoms laboratorijoms numatytu laiku specializuotiems tyrimams atlikti;

2.4. užtikrinta stotyje instaliuotos ir naudojamos mokslinės įrangos kvalifikuota priežiūra.

2.5. Įvertinti sąlygiškai natūralių miško ekosistemų įvairių biotos komponentų būklės ilgalaikiai pokyčius, pateiktas paskutinių 25 metų turimų tyrimo rezultatų apibendrinimas.

2.6. Įvertintas klimato kaitos poveikis oro teršalų (ypač sieros ir azoto junginių bei sunkiųjų metalų) pernašų iš Vakarų ir Vidurio Europos srautams bei procesams, vykstantiems ekosistemose, atsižvelgiant į regioninius ypatumus.

2.7. Įvertintas klimato kaitos poveikis pažemio ozono ir ultravioletinės saulės spinduliuotės kaitai miško ekosistemose.

2.8. Paruošti duomenys ir informacija, skirta pateikti ICP KM programai vadovaujančiam Suomijos aplinkos institutui (SYKE), Perkančiajai organizacijai parengti ir pateikti duomenys ICP KM Vadove atitinkamoms paprogramėms nustatyta duomenų pateikimo forma.

Bendradarbiavimas su projektu „Forest – 4.0“:

2025 m. stotyje instaliuota LICOR aparatūra šiltnamio dujų emisijų iš dirvožemio stebėti bei CO2 koncentracijų priežemyje vertinti.

Instaliuota nuolatinio veikimo SO2 ir NOx dujų koncentracijų ore stebėjimo įranga.

Instaliuota nuolatinio veikimo O3 koncentracijų miške stebėjimo įranga;

Pradėtos tirti ŠESD emisijos iš skirtingų mikro buveinių dirvožemių ir jų įtaka bendram CO2 fonui miško ekosistemose.

Pradėjo veikti ekofiziologinių reakcijų tyrimo objektai Aukštaitijos ir Žemaitijos KM stotyse.

Atliktas lazerinis tyrimo baseinų skenavimas LIDAR technologijomis.

„Forest 4.0“ padeda VDU mokslininkams siekti VAMP 2024-2029 VII priemonės tikslus, stiprinant duomenimis grįstos Lietuvos miškų stebėsenos reikšmingumą

Ekscelencijos centro „Forest 4.0“ pagrindinis tikslas – telkti aukšto lygio mokslinių tyrimų, technologijų ir miškų sektoriaus kompetencijas, kuriant skaitmeninius sprendimus tvariam, klimato kaitai atspariam ir duomenimis grindžiamam miškų valdymui. Centro veiklos apima dirbtinio intelekto, daiktų interneto, nuotolinių tyrimų, LiDAR, bepiločių orlaivių, jutiklių sistemų, skaitmeninių dvynių ir sprendimų paramos sistemų vystymą bei taikymą. Siekiama stiprinti mokslinių tyrimų infrastruktūrą, technologijų perdavimą, specialistų rengimą ir valstybės institucijų, mokslo bei verslo bendradarbiavimą, kad moksliniai duomenys ir inovacijos būtų greičiau pritaikomi praktiniams miškininkystės, biologinės įvairovės apsaugos ir aplinkos politikos poreikiams.

Šios veiklos tiesiogiai siejasi su VDU mokslininkų vykdomo Valstybinės aplinkos monitoringo 2024–2029 metų programos tikslu nuolat ir sistemingai rinkti, sisteminti bei vertinti informaciją apie gamtinės aplinkos būklę, nustatyti jos pokyčių tendencijas ir prognozuoti galimas pasekmes. Atskiras dėmesys skiriamas naujausių technologijų panaudojimui miškų būklės kaitai dėl oro teršalų ir kitų stresinių veiksnių poveikio vertinti, Europos Bendrijos svarbos buveinių ir rūšių monitoringui vykdyti, kraštovaizdžio bei kitų gyvosios gamtos komponentų kaitai stebėti. „Forest 4.0“ infrastruktūra ir kuriami automatizuoto duomenų surinkimo, analizės bei dirbtiniu intelektu grindžiami pokyčių nustatymo metodai papildo tradicinius lauko matavimus, didina stebėsenos teritorinę aprėptį, jų detalumą, duomenų palyginamumą bei užtikrina galimų grėsmių bei prognozių operatyvų identifikavimą, politiniams sprendimams priimti.

Centras reikšmingai prisideda ir prie monitoringo duomenų integravimo, analizės bei praktinio panaudojimo, kuriant bendras duomenų platformas, miškų būklės prognozavimo modelius ir sprendimų paramos priemones. Tai sudaro sąlygas efektyviau vertinti klimato kaitos, sausros, audrų, kenkėjų, ligų ir žmogaus veiklos poveikį miškų ekosistemoms, planuoti prevencines bei atkūrimo priemones ir teikti patikimą informaciją valstybės institucijoms bei visuomenei. Tokiu būdu „Forest 4.0“ veikia kaip mokslinių tyrimų ir technologinės kompetencijos partneris, padedantis modernizuoti Valstybinės aplinkos monitoringo programos įgyvendinimą ir stiprinti duomenimis pagrįstą Lietuvos aplinkos bei miškų politiką. Jo pagalba atsiranda galimybė apibendrinti gautus rezultatus naujoms grėsmėms įvardinti ir galimoms ateities prognozėms pažymėti. Naujausiems teiginiams ir tendencijoms miško ekosistemose patvirtinti Centro pagalba formuojamos ir naujausios tyrimų kryptys, užtikrinančios VDU miškų mokslo specialistų konkurencingumą pasauliniame lygmenyje.

In Memoriam:

Gintaras Pivoras

(1958 – 2026)

Ši daugiametė kompleksiško monitoringo ataskaita skiriama

šviesios atminties Aukštaitijos KM stoties steigėjo ir ilgamečio vedėjo,

bendradarbio, draugo ir bičiulio

garbei bei veiklai atminti.

Daugiametės veiklos prasmė:

Supratimui ir santarvei tarp žmogaus ir jį supančios gamtos siekti.

Gintaras Pivoras

Turinys Psl

Įvadas 17

I KLIMATO KAITA IR ATSKIRŲ GEOSISTEMOS KOMPONENTŲ TARPUSAVIO SĄVEIKOS TYRIMAI KMS TERITORIJOSE 19

1.1 Klimato atšilimo intensyvumas 1993-2025 m laikotarpiu. 20

1.1.1. *Vidutinės oro temperatūros kaita pagal KM stočių kaimyninių meteorologinių stočių duomenis* 22

1.1.2. *Vidutinės oro temperatūros kaita KM stočių teritorijose* 23

1.1.3. *Skirtinguose aukščiuose ir skirtinguose gyliuose temperatūrų sąsajos su vidutine oro temperatūra (2 m aukštyje).* 30

1.1.4. *Dirvožemio temperatūros kaita KM stočių teritorijose.* 32

1.1.5. *Dirvožemio drėgnis ir jo kaitos reikšmė Aukštaitijos KMS miško ekosistemose.* 35

1.1.6. *KM stočių upelio vandens temperatūra ir jos kaitos reikšmė* 39

1.1.7. *Ištirpusio deguonies kiekis KM stočių upelio vandenyje ir jų reikšmingumas.* 41

IŠVADOS 44

1.2 Vandens balansas pagrindinėse geosistemos grandyse 50

1.2.1. *Kritulių kiekio dinamika KM stočių teritorijose* 56

1.2.2. *Dirvožemio vanduo* 65

1.2.3. *Gruntinis vanduo* 65

1.2.4. *Paviršinis upelio vanduo* 71

1.2.5. *Vandens balanso sudedamonios* 72

1.2.6. *Vandens balanso sudėdamųjų apibendrinimas* 73

IŠVADOS 80

1.3 Saulės bendrosios, fotosintetiškai aktyvios ir ultravioletinės spinduliuotė, jų kaita ir sąsajos su klimato pokyčiais 80

1.3.1. *Saulės bendrosios ir fotosintetiškai aktyvios spinduliuotės kaita Aukštaitijos KMS* 84

1.3.2. Ultravioletinės spinduliuotė kaita Aukštaitijos KMS 87

1.3.3. *Meteorologinių veiksnių ir saulės spinduliuotės tarpusavio sąveikos* 89

IŠVADOS 91

1.4 Pažemio ozono koncentracijų tyrimai 92

1.4.1. *Ozono koncentracijos pokyčių apžvalga ir prognozė Europoje* 94

1.4.2. *Ozono koncentracijos pokyčių per 2005-2025 metų laikotarpį pagrindinės tendencijos.* 99

1.4.3. *Meteorologinių veiksnių ir ozono koncentracijų tarpusavio sąveikos* 107

1.4.4. Ozono poveikio sukeltų pažeidimų analizė 110

IŠVADOS 112

GALIMOS GRĖSMĖS IR PROGNOZĖS. 114

1.5 Tolimųjų oro teršalų pernašos ir jų sąsajos su meteorologiniais parametrais 115

IŠVADOS 118

1.6 Miško ekosistemų fizinių parametrų tyrimo rezultatų apibendrinimas. . . 119

1.6.1. Bendrosios išvados 134

1.6.2. Galimos bendrosios grėsmės Lietuvos miško ekosistemoms ateityje. . . 136

1.6.3. Bendroji prognozė 137

II MIŠKO EKOSISTEMŲ SUMEDĖJUSIOS AUGMENIJOS MONITORINGAS KOMPLEKSINIO MONITORINGO TERITORIJOSE 139

2.1. Miškų būklės dinamika integruoto monitoringo stočių teritorijose 140

2.1.1. Aukštaitijos KMS medynų būklė ir jos kaitos intensyvumas 141
2.1.2. Dzūkijos IMS medynų būklė ir jos kaitos intensyvumas 146
2.1.3. Žemaitijos KMS medynų būklė ir jos kaitos intensyvumas 148
2.1.4. Vyraujančių medžių rūšių būklės palyginimas tarp KM stočių. 153
2.1.5. Tirtų medžių atkritimas KM stočių baseinuose. 155
IŠVADOS 157
Galimos miškų būklės kaitos grėsmės 158
Miškų būklės prognozės. 159

2.2. Medžių lapijos indekso tyrimai KM stočių baseino teritorijose 160

2.2.1. *Medžių lapijos indeksas Aukštaitijos KMS baseine* 164
2.2.2. *Medžių lapijos indeksas Žemaitijos KMS baseine.* 165
2.2.3. *Medžių LAI, nustatytų hemisferiniu fotoaparatu, pokyčių analizė* . . . 166
2.2.4. *Medžių lapijos indekso (LAI) kaita Aukštaitijos ir Žemaitijos KMS baseinuose* . . . . . .
IŠVADOS 170

2.3. KMS baseinų teritorijose augančių medynų biomasės ir bioelementų pokyčiai bei medienos destrukcija ir prieaugis 171

2.3.1. *Aukštaitijos KMS baseino medynų struktūros, tūrio ir jo prieaugio kaita 1993-2025 m.* 174
2.3.2. *Aukštaitijos KMS medynų biomasė ir pagrindinių bioelementų kiekiai*. 179
2.3.3. *Žemaitijos KMS baseino medynų struktūros, tūrio ir jo prieaugio kaita 1993-2025 m. laikotarpiu* 185
2.3.4. *Žemaitijos medynų biomasė ir ir pagrindinių bioelementų kiekiai.* . . 190
2.3.5. *Dzūkijos KMS baseino medynų struktūros, tūrio ir jo prieaugio kaita 1993-2025 m. laikotarpiu* 196
2.3.6. *Dzūkijos medynų biomasė ir ir pagrindinių bioelementų kiekiai.* . . . 198
2.3.7. *KMS medynų būklės ir biomasės kaitos palyginamoji analizė* 204
IŠVADOS 206
Galimos grėsmės ir prognozės 207

2.4. Medžių pažeidimai KMS teritorijose. 208

2.4.1. *Aukštaitijos KMS medžių pažeidimai bei pagrindinės priežastys.* . . . 210
2.4.2. *Žemaitijos KMS medžių pažeidimai bei pagrindinės priežastys* 212
2.4.3. *KM stočių teritorijose augančių medžių pažeidimų ir pagrindinių priežasčių kaita* 214
4.4.4. *Medžių pažeidimų rezultatų apibendrinimas* 218
IŠVADOS 220
Medžių pažeidimų grėsmės ir prognozės 220

2.5. Medynų būklė augalijos tyrimų stacionaruose 222

2.5.1. *Medynų būklė Aukštaitijos KMS stacionaruose.* 224
2.5.2. *Medyno būklė Žemaitijos KMS stacionare* 232
2.5.3. *Medyno būklė Dzūkijos KMS stacionare* 234
2.5.4. *Medžių dendrometrinių parametrų ir tūrio prieaugio kaita 1994-2025 m. KMS stacionaruose.* 237
2.5.5. *KMS stacionaruose augančių medžių produktyvumas 1994-2025 m. laikotarpiu.* 242
IŠVADOS 246
Galimos grėsmės ir prognozės 248

2.6. Pagrindinių medžių rūšių kamienų radialusis prieaugis KMS baseinuose... 249
2.6.1. *Pušų būklę ir prieaugį sąlygojantys veiksniai Aukštaitijos KMS duomenų pagrindu..* 253
IŠVADOS ir galimos grėsmės bei prognozės. 256
2.6.2. *Meteorologinių veiksnių poveikis žievėgraužio tipografo pažeidimų intensyvumui 2021–2025m. Aukštaitijos miškuose* 257
IŠVADOS 260
Galimos grėsmės bei prognozės. 261
2.7. Negyva mediena, jos formavimasis ir destrukcijos greitis bei ypatumai. . 262
2.7.1. *Aukštaitijos KMS baseino negyvoji mediena, jos kiekiai ir destrukcijos greitis.* 264
2.7.2. *Žemaitijos KMS baseino negyvoji mediena, jos kiekiai ir destrukcijos greitis.* 273
2.7.3. *Dzūkijos KMS baseino negyvoji mediena, jos kiekiai ir destrukcijos greitis.* 283
2.7.4. *Medžių lajų būklės ir jų žūties sąveikos palyginamoji analizė* 284
IŠVADOS. 286
Galimos grėsmės. 287
Pagrundinės prognozės 288
2.8. Aplinkos veiksnių kompleksiško poveikio miškų būklei ir produktyvumui vertinimas. **289**
IŠVADOS. 294
Galimos grėsmės bei prognozės 295
Rekomendacijos miškininkystės praktikai 296
2.9. Miško būklės tyrimo rezultatų apibendrinimas. **297**
IŠVADOS 311
Pagrindinės miško ekosistemų būklės grėsmės 313
Galimos Lietuvos miškų ekosistemų raidos prognozės kintančiomis aplinkos sąlygomis. 314
Rekomendacijos miškų valdymo praktikai 316
III KITŲ MIŠKO EKOSISTEMŲ KOMPONENTŲ RŪŠIŲ ĮVAIROVĖS IR GAUSUMO KAITA KMS BASEINŲ TERITORIJOSE. **319**
3.1. Žaliųjų oro dumblių gausa **319**
IŠVADOS 324
3.2. Epifitinių kerpių rūšinė įvairovė ir gausumas **326**
3.2.1. *Epifitinių kerpių rūšinė įvairovė ir gausumas Aukštaitijos KMS kerpių tyrimo stotyje.* 329
3.2.2. *Epifitinių kerpių rūšinė įvairovė ir gausumas Žemaitijos KMS kerpių tyrimo stotyje* 333
3.2.3. *Epifitinių kerpių rūšinė įvairovė ir gausumas Dzūkijos KMS kerpių tyrimo stotyje.* 333
3.2.4. *Makrokerpių rūsių įvairovė ir gausa KM stočių baseinų miško ekosistemose 2015-2025.* 339
IŠVADOS 350
3.3. Dirvožemio pedobiontų rūšinė įvairovė ir gausumas **354**
3.3.1. *Mikroartropodų kompleksų struktūra Aukštaitijos KM stotyje* 357
3.3.2. *Mikroartropodų kompleksų struktūra Žemaitijos KM stotyje.* 360
3.3.3. *Mikroartropodų kompleksų struktūra Dzūkijos KM stotyje.* 362
3.3.4. *Mikroartropodų bendrijų palyginamoji analizė KMS* 362
3.3.5. *Mikroartropodų bendrijų struktūros pokyčiai KMS remiantis ankstesnių tyrimų duomenimis* 365

3.3.5 *Mikroartropodų kaitą sąlygojantys veiksniai* 373
3.3.6. *Dirvožemio mikroartropodų bendrijų ilgalaikės kaitos KMS baseinuose apibendrinimas* 376
IŠVADOS 378
Galimos grėsmės dirvožemio biotos stabilumui klimato kaitos sąlygomis. 379
Dirvožemio biotos kaitos prognozės klimato kaitos sąlygomis 380
3.4. Upelio makrobentoso rūšinė įvairovė ir gausumas 384
3.4.1. *Aukštaitijos KMS Versminio upelio makrobentoso rūšių įvairovė ir gausa 2025 m.* 388
3.4.2. *Žemaitijos KMS Juodupio upelio makrobentoso rūšių įvairovė ir gausa 2025 m..* 391
3.4.3. *Dzūkijos KMS Duburių upelio makrobentoso rūšių įvairovė ir gausa 2025 m..* 393
3.4.4. *Upelio makro bentoso rūšių įvairovės ir gausos palyginimas tarp KM stočių.* 400
IŠVADOS 401
3.5. Miško ekosistemų biotos komponentų rūšių įvairovės ir gausumo tyrimo rezultatų apibendrinimas. 404
Išplėstinės išvados apie bioindikatorių rūšinės įvairovės ir gausumo kaitą Lietuvos kompleksinio monitoringo stotyse 410
Galimos grėsmės biologinės įvairovės ir bioindikatorių bendrijų stabilumui. 412
Tikėtinos bioindikatorių bendrijų kaitos prognozės. 413
IV ŽOLINĖS AUGALIJOS TYRIMAI AUKŠTAITIJOS IR ŽEMAITIJOS KMS AUGALIJOS INTENSYVIŲ TYRIMŲ STACIONARUOSE 415
4.1. Aukštaitija – LT-01_100 418
4.1.1. *Projekcinis padengimas* 419
4.1.2. *Dažnumas* 425
4.1.3. *Fertilumas* 428
4.2. Aukštaitija – LT-01_102 430
4.2.1. *Projekcinis padengimas* 432
4.2.2. *Dažnumas* 439
4.2.3. *Fertilumas* 441
4.3. Žemaitija – LT-03_100 444
4.3.1. *Projekcinis padengimas* 444
4.3.2. *Dažnumas* 449
4.3.3. *Fertilumas* 450
4.4. Dzūkija – LT-02_100 453
4.4.1. *Projekcinis padengimas* 453
4.4.2. *Dažnumas* 455
4.4.3. *Fertilumas* 456
4.5. Žolinės augalijos kaitos KMS baseinuose apibendrinimas 453
IŠVADOS 460
Galimos grėsmės žolinės augalijos stabilumui 462
Tikėtinos žolinės augalijos kaitos prognozės. 463
PRIEDAI 465

V ŽOLINĖS AUGALIJOS TYRIMAI AUKŠTAITIJOS IR ŽEMAITIJOS KMS BASEINŲ MIŠKO EKOSISTEMOSE 479
5.1 Aukštaitija KMS baseino miško ekosistemos 479
5.2 Žemaitijos KMS baseino miško ekosistemos. 485
5.3 Dzūkijos KMS, Duburių upelio baseino miško ekosistemos. 490
5.4 EUNIS augalijos buveinių klasifikacija. 494
5.5 Žolinės augalijos kaitos KMS baseinuose apibendrinimas 496
IŠVADOS 497
Galimos grėsmės žolinės augalijos ir miško ekosistemų stabilumui KMS baseinuose. 462
Žolinės augalijos ir miško buveinių kaitos prognozės KMS baseinuose. 463
PRIEDAI. 502
VI CHEMINIŲ KOMPONENČIŲ KONCENTRACIJOS KRITULIUOSE, LAPIJOJE IR NUOKRITOSE BEI JŲ TRANSFORMACIJOS IR SRAUTAI Į DIRVOŽEMĮ 517
6.1. Pagrindinių cheminių komponenčių koncentracijos ore, krituliuose, srautai su krituliais bei jų transformacijos praėjus pro lajas ir patenkant į dirvožemį 519
6.1.1. *Aukštaitijos kompleksiško monitoringo stotyje* 519
6.1.2. *Žemaitijos kompleksiško monitoringo stotyje.* 524
6.1.3. *Aukštaitijos ir Žemaitijos KMS kritulių cheminės sudėties pokyčių palyginimas ir ekosisteminis įvertinimas.* 528
IŠVADOS 530
Galimos grėsmės. 531
Tikėtinos prognozės. 532
6.1.4. *Medžių lajų poveikis tirtų komponenčių kaitai ir meteorologinių veiksnių reikšmė jų intensyvumui.* 534
6.1.5. *Rezultatų konceptualus naujumas ir jo reikšmė miškų stabilunui* . . . 538
IŠVADOS 541
6.2. Pagrindinių maistinių elementų koncentracijos lapijoje ir jų kaita 2005-2025 m. laikotarpiu 545
6.2.1. *Pagrindinių maistinių komponenčių sudėties lapijoje kaita Aukštaitijos kompleksiško monitoringo stotyje* 547
6.2.2. *Pagrindinių maistinių komponenčių sudėties lapijoje kaita Žemaitijos kompleksiško monitoringo stotyje.* 554
6.2.3. *Pagrindinių maistinių komponenčių sudėti lapijoje Dzūkijos kompleksiško monitoringo stotyje.* 560
6.2.4. *Aukštaitijos ir Žemaitijos KMS medžių lapijos cheminės sudėties pokyčių palyginimas.* 565
6.2.5. *Pagrindinių makro elementų lapijoje kaitos reikšmingumas pagrindinių medžių rūšių stabilumui.* 569
IŠVADOS 571
6.3. Pagrindinių maistinių elementų koncentracijos nuokritose ir jų kaita 2005-2025 m. laikotarpiu 573
6.3.1. *Nuokritų sezoninė dinamika KMS teritorijose* 578
6.3.2. *Nuokritų ilgalaikės kaitos palyginimas Aukštaitijos, Žemaitijos ir Dzūkijos KMS bei nustatytų skirtumų reikšmingumas.* 586
IŠVADOS 588

6.3.3. *Nuokritų destrukcijos greitis KMS teritorijose* 589
IŠVADOS 594
6.3.4. *Pagrindinių maistinių komponenčių sudėties nuokritose kaita Aukštaitijos kompleksiško monitoringo stotyje* 597
6.3.5. *Pagrindinių maistinių komponenčių sudėties nuokritose kaita Žemaitijos kompleksiško monitoringo stotyje* 603
6.3.6. *Pagrindinių maistinių elementų koncentracijų nuokritose kaitos palyginimas Aukštaitijos ir Žemaitijos KMS.* 610
6.3.7. *Elementų transformacijos intensyvumo kaita lapijoje ir nuokritose.* . . 614
6.3.8. *Pagrindinių komponenčių koncentracijų kaita ir transformacijos pagrindinėms tendencijoms ir galimoms grėsmėms išaiškinti.* 623
IŠVADOS. 618
6.4. Pagrindinių maistinių komponenčių srautai su nuokritomis KM stočių teritorijose. **625**
IŠVADOS. 629
6.5. Pagrindinių maistinių elementų koncentracijų žaliojoje lapijoje ir nuokritose kaita bei jų srautų su nuokritomis reikšmė **630**
IŠVADOS. 634
6.6. Cheminių komponenčių koncentracijų kaitos augalijos komponentuose apibendrinimas. **635**
IŠVADOS. 647
BENDROSIOS GRĖSMĖS 650
BENDROSIOS PROGNOZĖS 652
VII DIRVOŽEMIO VANDENS, GRUNTINIO BEI PAVIRŠINIO (UPELIŲ) VANDENS TYRIMAI AUKŠTAITIJOS IR ŽEMAITIJOS KM STOČIŲ UPELIŲ BASEINŲ TERITORIJOSE **656**
7.1. Dirvožemio vandens cheminės savybės KM baseinų teritorijose ir jų reikšmė miško ekosistemų tvarumui. **666**
7.1.1. *Dirvožemio vandens cheminės sudėties ilgalaikių pokyčių apibendrinimas.* 696
IŠVADOS 706
GALIMOS GRĖSMĖS MIŠKO EKOSISTEMOMS. 710
PROGNOZĖS 713
7.2. Gruntinio vandens savybės KM baseinų teritorijose. **715**
7.2.1. *Bendras gruntinio vandens cheminės sudėties kaitos apibendrinimas.* 747
IŠVADOS 748
GALIMOS GRĖSMĖS MIŠKO EKOSISTEMOMS 750
PROGNOZĖS 751
7.3. Paviršinio (upelio) vandens reikšmė miško ekosistemų būklei vertinti. . . **752**
7.3.1. *Upelio vandens cheminės sudėties kaita KMS baseinuose.* 753
7.3.2. *Paviršinio vandens cheminės sudėties pokyčių apibendrinimas.* . . . 773
IŠVADOS 774
GALIMOS GRĖSMĖS PAVIRŠINIO VANDENS KOKYBEI IR MIŠKO EKOSISTEMOMS 775
PAVIRŠINIO VANDENS KOKYBĖS RAIDOS PROGNOZĖS. 776
7.4. Medžiagų balanso išnešimo sudedamosios kaita 1994-2025 m. **778**
IŠVADOS 785
GALIMOS GRĖSMĖS MIŠKO EKOSISTEMOMS, ATSIŽVELGIANT Į MEDŽIAGŲ IŠNEŠIMO POKYČIUS 785
PROGNOZĖS 787

7.5. KMS dirvožemio cheminės sudėties kaita 1995-2025 m. laikotarpiu. . . . 789
7.5.1. *Dirvožemio ėminių rinkimo sąlygų aprašymas ir metodika* 790
7.5.2. Dirvožemių fizikinės ir cheminės savybės 793
7.5.3. *Dirvožemio cheminės sudėties kaitos palyginimas KMS dirvožemio tyrimų stacionaruose* 795
IŠVADOS 802
GALIMOS GRĖSMĖS 803
PROGNOZĖS 804
7.6. Dirvožemio ir dirvožemio, gruntinio, bei paviršinio vandens cheminės sudėties kaitos rezultatų apibendrinimas 805
IŠVADOS 811
GALIMOS GRĖSMĖS 812
PROGNOZĖS 813
VIII SUNKIŲJŲ METALŲ SRAUTAI, KONCENTRACIJOS IR KAUPIMASIS MIŠKO EKOSISTEMOSE. 815
8.1. Sunkiųjų metalų srautai su krituliais miško ekosistemose 822
8.1.1. *Aukštaitijos kompleksiško monitoringo stotis.* 824
8.1.2. *Žemaitijos kompleksiško monitoringo stotis.* 827
8.1.3. *Sunkiųjų metalų metinių srautų palyginimas KM teritorijose.* 829
IŠVADOS 832
GALIMOS GRĖSMĖS 832
8.2. Sunkiųjų metalų koncentracijos medžių lapuose ir spygliuose. 833
8.2.1. *Aukštaitijos kompleksiško monitoringo stotis.* 835
8.2.2. *Žemaitijos kompleksiško monitoringo stotis.* 839
IŠVADOS 840
8.3. Sunkiųjų metalų koncentracijos nuokritose ir jų srautai į dirvožemį 842
8.3.1. *Aukštaitijos kompleksiško monitoringo stotis.* 843
8.3.2. *Žemaitijos kompleksiško monitoringo stotis.* 843
8.3.3. *Aukštaitijos ir Žemaitijos KMS sunkiųjų metalų koncentracijų palyginimas lapijoje ir nuokritose bei jų srautai.* 855
IŠVADOS 856
GALIMOS GRĖSMĖS MIŠKO EKOSISTEMOMS. 859
PROGNOZĖS 859
8.4. Sunkiųjų metalų koncentracijos dirvožemio, gruntiniame ir upelio-paviršiniame vandenyje bei jų srautai 860
8.4.1. *Sunkiųjų metalų koncentracijos dirvožemio vandenyje* 861
8.4.2. *Sunkiųjų metalų koncentracijos gruntiniame vandenyje* 866
8.4.3. *Sunkiųjų metalų koncentracijos paviršiniame vandenyje* 871
8.4.4. *Sunkiųjų metalų migracijos vandenyse palyginamoji analizė KM stočių baseinuose* 874
BENDROSIOS IŠVADOS 875
GALIMOS GRĖSMĖS VANDENS EKOSISTEMOMS 876
PROGNOZĖS 876
8.5. Sunkiųjų metalų koncentracijos dirvožemyje ir jų kaita 1994-2020 m. . . 877
IŠVADOS 882
GALIMOS GRĖSMĖS DIRVOŽEMIO BŪKLEI 882
PROGNOZĖS 882

8.6. Sunkieji metalai samanose 893
IŠVADOS 887
8.7. Sunkiųjų metalų koncentracijų srautų, koncentracijų ir kaupimosi kaitos miško ekosistemose apibendrinimas 888
BENDROSIOS SUNKIŲJŲ METALŲ KAUPIMOSI, KAITOS, MIGRACIJŲ IR TRANSFORMACIJŲ IŠVADOS 893
BENDROSIOS GALIMOS GRĖSMĖS. 894
BENDROSIOS PROGNOZĖS 894
IX ORO, KRITULIŲ, VANDENS IR KITŲ ELEMENTŲ RĖŽIMINIAI TYRIMAI AUKŠTAITIJOS IR DZŪKJOS INTEGRUOTO MONITORINGO STOTYSE . 896
X Report to Finnish Enviroment Institute 929
XI SANTRAUKA 945
XII REKOMENDACIJOS 1017
XIII TRŪKUMAI. 1019
XIV ES PROJEKTAS "FOREST – 4.0". 1020
KMS baseinuose augančių medžių apskaita lazerinio skenavimo LIDAR technologijomis pagrindu . . . . . .
Ekofiziologinių tyrimų stotis medžių vandens naudojimo efektyvumui vertinti Aukštaitijos ir Žemaitijos KMS stotyse . . . .
Šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijų iš dirvožemio matavimas ir bendro anglies ciklo vertinimas kintančiomis sąlygomis . . . . . .

VAMP 2024-2029: „7 priedas:

Sąlygiškai natūralių miško ekosistemų sritis_06_19_LRV.docx

https://www.e-tar.lt/portal/lt/legalAct/810c7c60344d11efbdaea558de59136c

ĮVADAS

Aštuntajame dešimtmetyje vis didėjantis aplinkos užterštumas privertė žmoniją suprasti, kad be objektyvios, pakankamai unifikuotos ir laiku pateiktos informacijos apie gamtinės aplinkos būklę ir pagrindinių jos komponentų antropogeninių pokyčių tendencijas, neįmanoma sukurti efektyvios aplinkos kokybės valdymo sistemos ir racionaliai naudoti gamtos išteklius. Todėl 1979 m. Europos sandraugos valstybės pasirašė "Konvenciją dėl tolimų atmosferos teršalų pernašų" ("*Convention on Long-range Transboundary Air Pollution" – CLRTAP*), tapusią vienu pagrindinių įrankiu, saugant ekosistemas nuo oro teršalų Europoje bei Šiaurės Amerikoje.

Šiaurės šalių Ministrų Taryba 1992 metais pasiūlė visoms trims nepriklausomybę atkūrusioms Baltijos valstybėms prisijungti prie Tarptautinės kompleksinio (integruoto) monitoringo programos ir skyrė tam reikalingą finansinę bei metodinę paramą. 1993 metais ekologinio monitoringo kompleksiškumo principui įgyvendinti pagrindiniuose Lietuvos kraštovaizdžiuose buvo įsteigtos 3 kompleksiško monitoringo stotys (KMS) minimalaus antropogeninio poveikio vietose, derinant jas prie nacionalinių parkų infrastruktūros. Stebėjimai šiuose stotyse traktuojami kaip globalinis foninis monitoringas (Lietuvos gamtinė aplinka, 1994). 1993 metais buvo įsteigtos Aukštaitijos ir Dzūkijos KM stotys, o 1994 m. - trečioji - Žemaitijos KM stotis. Visos šios stotys įsteigtos minėtų NP rezervacinėse zonose. Šiose stotyse kompleksiškai stebimi praktiškai visi gamtinės aplinkos komponentai ir juos jungiantys medžiagų srautai, kas sudaro galimybę įvertinti ne tik jų poveikį biotai, bet ir nustatyti tiriamų nedidelių upelių baseinų įvairių medžiagų balansą.

Pagrindinis Kompleksiško ekosistemų monitoringo tikslas - nustatyti, vertinti ir prognozuoti sąlygiškai natūralių ekosistemų būklę bei jos ilgalaikius pokyčius, įvertinus tolimųjų oro teršalų (ypač sieros ir azoto junginių) pernašų, ozono ir sunkiųjų metalų kaitą bei poveikį procesams vykstantiems ekosistemose, atsižvelgiant į regioninius ypatumus ir klimato pokyčius. Stebėjimų metodika ir stebimi parametrai sudaro galimybes panaudoti kaupiamą informaciją regioninių ir globalinių procesų pasekmėms vertinti bei modeliuoti ekosistemų lygmenyje. Visą tai turi užtikrinti mokslinės ir statistiškai patikimos, nuoseklios ir ilgalaikės aplinkos veiksnių duomenų sekos.

Sąlygiškai natūralių ekosistemų KM programos visapusiškas įgyvendinimas įgalina spręsti uždavinius susijusius ne tik su Tolimų oro teršalų pernašų konvencijos ir jos protokolų reikalavimais, bet ir su Tarpvalstybinių vandentakių ir ežerų apsaugos bei naudojimo konvencijos, Jungtinių Tautų klimato kaitos konvencijos ir Kioto protokolo, Biologinės įvairovės konvencijos bei Vienos konvencijos dėl ozono sluoksnio apsaugos reikalavimais.

Integruoto monitoringo teritorijose Lietuvoje, sąlygiškai natūraliose ekosistemose jau dvidešimt du metus stebima ekosistemų būklė. Sukaupti rezultatai įgalina vertinti su tolimomis pernašomis į Lietuvos teritoriją patenkančių teršalų kaupimasis, transformacijas jiems praeinant per medžių lajas ir poveikį miškų būklei. Todėl sąlygiškai natūralių ekosistemų monitoringo duomenis galima naudoti kaip atskaitos tašką, vertinant regioninę taršą, jungti į globalios taršos vertinimo sistemą.

Utenos rajone Rūgštėliškio kaime esančioje Aukštaitijos kompleksinio monitoringo stotyje ir Ažvinčių sengirės tyrimų poligone buvo atlikti visi sutartyje numatyti, sąlygiškai natūralių ekosistemų kompleksinio monitoringo ICP KM ir EMEP programų reikalavimus atitinkantys, gamtinės aplinkos stebėjimai ir tyrimai; vykdyti kiti Aplinkos apsaugos agentūros inicijuoti gamtinės aplinkos stebėjimo – tyrimo darbai; atlikti reikalingi Stoties priežiūros – eksploatacijos darbai ir su tuo susiję apmokėjimai.

Sutarties vykdymo laikotarpiu buvo užtikrinta ICP KM programos reikalavimus sąlygiškai natūralių ekosistemų tyrimų stotKMS atitinkanti Aukštaitijos kompleksinio monitoringo stoties priežiūra ir eksploatacija, sudarant kokybiškas sąlygas efektyviam tolimųjų oro pernašų įtakos Lietuvos oro baseino kokybei tyrimui. Tai apima elektros sąnaudų, reikalingų tyrimų aparatūros darbui užtikrinti bei patalpų ir vandens šildymui, nesudarant vietinės taršos, apmokėjimą; telekomunikacinių paslaugų apmokėjimą; automobilio eksploataciją; pastatų ir tyrimų įrangos eksploatavimo einamuosius darbus; privalomų mokesčių valstybei, bei administravimo mokesčio Universitetui įvykdymą. Aukščiau išvardintų Stoties priežiūros – eksploatavimo sąlygų užtikrinimas sudarė prielaidas Stotyje ir tyrimų poligone vykdyti kompleksišką ekosistemos tyrimą. Darbų vykdymo laikotarpiu Stotyje buvo sudarytos darbo sąlygos visiems kompleksinio monitoringo programos dalyviams, turintiems atlikti darbus pačioje stotyje arba šiame regione esančiuose tyrimų poligonuose.

2020 m. pakartotinai atlikti visi detalūs miško ekosistemų tyrimo darbai. Tikslesniems ir patikimesniems rezultatams pasiekti buvo panaudoti pradėtų medžių ekofiziologinių tyrimų rezultatai, kuriuos iniciavo LMT finansuojama nacionalinė mokslo programa :Agro, vandens ir miško ekosistemų tvarumas“. *Šios programos rėmuose buvo įgyvendintas projektas „Kompleksiškas klimato ir kitų aplinkos streso veiksnių poveikis miškų gebai adaptuotis ir švelninti globalios kaitos grėsmes“.*

2025 m. pakartotinai atlikti visi detalūs miško ekosistemų tyrimo darbai.

I. KLIMATO KAITA IR ATSKIRŲ GEOSISTEMOS KOMPONENTŲ TARPUSAVIO SĄVEIKOS TYRIMAI KM STOTYSE

Klimato atšilimas, kurį skatina stiprėjantis šiltnamio efektas, yra vienas iš svarbiausių XXI amžiaus aplinkos iššūkių. Nuolatinis vidutinės pasaulinės temperatūros kilimas, plačiai apibūdinamas kaip visuotinio atšilimo sąvoka, jau lėmė esminius sausumos ekosistemų pokyčius, ypač šiaurinėse platumose (IPCC, 2021). Borealiniai ir hemiborealiniai miškai yra vieni jautriausių šiems pokyčiams dėl stiprios klimato kaitos ir santykinai mažo šių miškų prisitaikymo.

Klimato kaitos ir jos poveikio ekosistemoms tyrimai pastaruoju laikotarpiu tampa viena iš prioritetinių tyrimų sričių. Šis poveikis nevienareikšmis. Ekosistemos, kisdamos dėl klimato atšilimo keliamų veiksnių, turi grįžtamąjį poveikį pačiam klimatui per anglies kaupimosi ekosistemoje pokyčius, taip pažeisdamos bendrą anglies balansą. CO_2, susikaupęs miško ekosistemose dėl augalų fotosintezės, augalams kvėpuojant ir vykstant organinių medžiagų irimo procesui dirvožemyje, grįžta atgal į atmosferą. Nuo šių procesų intensyvumo priklauso anglies koncentracijos ore ir anglies kiekio sausumos ekosistemoje santykis. Šiuos procesus ypač veikia temperatūrų ir drėgmės režimai, vegetacinio laikotarpio pradžia ir trukmė bei daugelis kitų meteorologinių veiksnių, sąlygojamų klimato kaitos. Pateikti IPCC, kaip ir USGCRP dokumentai ir išvados, byloja, kad pastovūs ir greiti klimato pokyčiai gali ypač sutrikdyti nusistovėjusį konkurencinį rūšių balansą miškuose. Tai gali būti miškų degradacijos, o kai kuriuose rajonuose net jų žūties priežastis. Miškų džiūvimas savo ruožtu pakeistų anglies absorbcijos ir išmetimų teritorinį balansą. Tačiau foninės CO_2 koncentracijos ore Lietuvoje dar iki šiol netiriamos, nors tai yra viena iš aktualiausių pastarojo laikotarpio pasaulinių problemų. Miško ekosistemų, taršos ir meteorologiniai duomenys, papildyti CO_2 koncentracijų ore tyrimų rezultatais, sudarytų galimybę pradėti CO_2 poveikio miško ekosistemoms efektyvumo bendrame aplinkos natūralių ir antropogeninių veiksnių poveikyje tyrimus, taip pat ir sąlygiškai natūralių miško ekosistemų anglies balanso tyrimus kintančiomis klimato sąlygomis.

Dėl vegetacijos laikotarpio terminų kaitos vis aktualesni tampa ir priežemio ozono fitotoksinio poveikio augalijai tyrimai. Tai vienas pagrindinių fitotoksikantų, turinčių reikšmingą įtaką fotosintezei vykti, augalams kvėpuoti, medžiagoms pasiskirstyti ir galiausiai fitomasė kiekiui bei produktyvumui. Ženklią įtaką priežemio ozonas turi ir dirvožemio faunai, ypač jos rūšių įvairovei, o būtent jos rūšinė sudėtis ir gausa lemia organinių medžiagų irimo greitį, t.y. CO_2 kiekio grįžimą į atmosferą. Todėl ozonas, sąlygodamas visas pagrindines anglies balansą formuojančias funkcijas, išlieka pagrindinis miško ekosistemų ir klimato kaitos tyrimų objektas.

Tolimosios užteršto oro pernašos, lemiančios aplinkos rūgštėjimo procesą, o kartu ir visos ekosistemos kaitą, neprarado savo aktualumo net ir įgyvendinus Geteborgo protokolo ir kitų tarptautinių įsipareigojimų reikalavimus. KM stočių oro teršalų ir iškritų iš oro duomenys įgalina vykdyti oro foninės taršos kaitos analizę ir atskleisti su klimato kaita susijusių rodiklių, tokių kaip kritulių, temperatūros bei skirtingos kilmės oro masių įtaką foninei taršai.

Pastaruoju laikotarpiu daugelis mokslininkų sutinka su nuomone apie išskirtinę klimato reikšmę miškų gebėjimui prisitaikyti prie naujai besiformuojančių sąlygų, o taip pat jų atsparumui kitiems lydintiesiems veiksniams, tokiems kaip aplinkos užterštumas ir miško kenkėjai. Todėl pirmajame tyrimų etape išnagrinėjome oro vidutinės temperatūros ir kritulių kiekio dinamika KM stotyse.

1.1. Klimato atšilimo intensyvumas 1993-2025 m laikotarpiu

Klimatas yra vienas pagrindiniu veiksnių sąlygojančių rūšių bei augalų bendrijų geografinį paplitimą. Per pastarąjį šimtmetį stebimas globalinės vidutinės metinės oro temperatūros kilimo tendencija nuo 1°C iki 4°C (literatūra *The European Environment/State and outlook 2005, EEA Copenhagen 2005, p.p.62-69*), matomai, turės reikšmingos įtakos rūšių kaitai ateityje. Šiauriniame pusrutulyje tai turėtų pasireikšti per šiltesnių kraštų augalų migraciją šiaurės kryptimi (Malcom , Pitelka, 2000).

Borealiniai miškai, kuriuose vyrauja tokios rūšys kaip paprastoji pušis, paprastoji eglė ir sidabrinis beržas, istoriškai susiformavo šaltomis ir gana stabiliomis klimato sąlygomis (Bonan, 2008). Hemiborealiniuose regionuose, kur kartu egzistuoja borealiniai ir vidutinio klimato elementai, miško ekosistemas papildomai formuoja pereinamieji klimato gradientai ir edafiniai apribojimai, įskaitant oligotrofinių dirvožemių paplitimą. Dėl šių savybių tokios sistemos yra ypač pažeidžiamos temperatūros ir kritulių režimo pokyčiams. Svarbu tai, kad šiuos regionus taip pat veikia tolimojo atmosferos teršalų pernešimas, kuris dešimtmetį gali žymiai pakeisti maistinių medžiagų ciklą ir dirvožemio chemiją.

Tolimosios oro teršalų pernašos, ypač susijusios su azoto ir sieros junginiais, yra papildomas ekosistemos pokyčių skatinantysis veiksnys. Šis procesas pakeičia natūralų maistinių medžiagų balansą, dažnai prisodrindamas miško ekosistemas azotu, kurio dažnai miškai stokoja (Matson ir kt., 2002; Bobbink ir kt., 2010). Oligotrofiniuose pusiau borealiniuose miškuose vidutinis azoto nusėdimas gali laikinai sustiprinti medžių augimą; tačiau dėl nuolatinių sąnaudų gali sutrikti maistinių medžiagų pusiausvyra, parūgštindamas dirvožemį ir sumažindamas biologinę įvairovę. Padidėjęs

azoto kiekis gali padidinti lapų plotą ir produktyvumą per trumpą laiką, bet taip pat gali sumažinti šaknų paskirstymą ir atsparumą sausrai, taip padidindamas pažeidžiamumą ekstremalioms klimato sąlygoms. papildomai, sieros iškritos, skatindamos dirvožemio rūgštėjimo, turi įtakos bazinių katijonų prieinamumui ir dar labiau riboja medžio fiziologinį funkcionavimą.

Viena iš pagrindinių klimato atšilimo borealiniuose ir hemiborealiniuose miškuose pasekmių yra augimo sąlygų pasikeitimas. Nors kylanti temperatūra gali pailginti auginimo sezoną ir potencialiai sustiprinti fotosintezės aktyvumą, šį teigiamą poveikį vis labiau kompensuoja drėgmės ir maistinių medžiagų apribojimai (D'Orangeville ir kt., 2018; Babst ir kt., 2019). Riboto vandens sąlygomis aukštesnė temperatūra padidina evapotranspiraciją, todėl dirvožemyje trūksta drėgmės ir padidėja fiziologinis stresas. Todėl medžių augimo reakcijos tampa vis įvairesnės ir jas vis labiau lemia ekstremalūs klimato reiškiniai, o ne vidutinės sąlygos.

Klimato atšilimas buvo susijęs su padidėjusiu biotinių veiksnių, tokių kaip eglės žievėgraužio tipografo, aktyvumu, ar vėjo pažeidimų pasireiškimu (Seidl ir kt., 2017). Šie pažeidimai sąlygoja didelius miškų struktūrinius pokyčius, kuriems dažnai būdingas didesnis erdvinis mastas, didesnis intensyvumas ir trumpesni pasikartojimai. Tokie pokyčiai gali viršyti miško ekosistemų atsigavimo pajėgumus ir gali sukelti ilgalaikius rūšių sudėties ir ekosistemų funkcionavimo pokyčius. Oro tarša gali toliau sąveikauti su šiais pažeidimais, susilpnina medžių apsaugos mechanizmus, keisdama lapijos chemiją ir padidindama jautrumą kenkėjams ir patogenams. Šie aplinkos veiksniai dažnai veikia sinergetiškai, todėl miškui daroma sunkesnė ir platesnė žala.

Kitas svarbus aspektas yra anglies ir maistinių medžiagų ciklų destabilizavimas. Borealiniai miškai šiuo metu yra pagrindinis pasaulinis anglies absorbentas; tačiau dėl atšilimo padidėjęs kvėpavimas, organikos irimas ir su trikdžiais susijusios emisijos gali sumažinti ar net pakeisti šią miškų funkciją (Pan ir kt., 2011; Pugh ir kt., 2019). Šiauriniuose regionuose amžinojo įšalo atšilimas dar labiau prisideda prie šiltnamio efektą sukeliančių dujų išmetimo, sukuriant teigiamą grįžtamąjį ryšį, kuris sustiprina klimato atšilimą. Pusiau borealiniuose miškuose, esančiuose oligotrofiniuose dirvožemiuose, maistinių medžiagų apribojimai riboja medžių gebėjimą naudoti aukštesnę temperatūrą augimui ir taip riboja anglies sekvestracijos potencialą, ko pasėkoje gali didėti ir medžių mirtingumo laipsnis (McDowell ir kt., 2020).

Apibendrinus galima teigti, kad klimato atšilimas veikdamas kaip „grėsmės daugiklis“ borealiniuose ir pusiau borealiniuose miškuose, reikšmingai sąlygoja ekofiziologinius procesus, pažeidimų intensyvumus ir biogeocheminius ciklus. Šių veiksnių kompleksišką sąveika lemia sudėtingus ir dažnai netiesinius ekosistemų atsakus, mažina atsparumą ir padidina pažeidimų tikimybę. Todėl norint nuspėti būsimą dinamiką ir informuoti apie tvarios miškų valdymo strategijas,

būtina suprasti dominuojančių medžių rūšių ir miško ekosistemų gebėjimą prisitaikyti prie didėjančių meteorologinių ekstremalių situacijų. Dėl šios priežasties klimato kaitos pagrindinėms dedamosioms pateiktoje ataskaitoje buvo išskirtas ypatingas dėmėsis, siekiant išaiškinti tiriamojo laikotarpio palankiausius miško ekosistemoms periodus, taip pat kaip ir galimas grėsmes joms toliau tvariai vystytis.

1.1.1. Vidutinės oro temperatūros kaita pagal KM stočių kaimyninių meteorologinių stočių duomenis

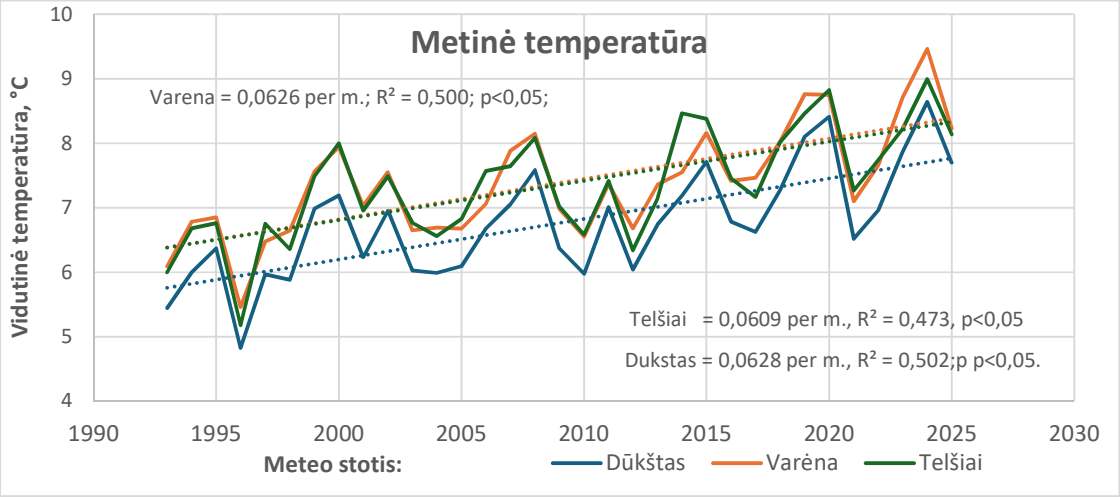
Analizuojant meteorologinių parametrų kaitą, pirmiausiai buvo nustatyti temperatūros kaitos trendai kaimynystėje įkurtų meteorologinių stočių duomenų pagrindu. Tyrimams panaudota Dūkšto, Varėnos ir Telšių meteorologinių stočių duomenys, kurie reprezentuoja Aukštaitijos, Dzūkijos ir Žemaitijos kompleksiško monitoringo stočių teritorijas.

Daugiametė metinė vidutinės temperatūros kaitos analizė parodė, kad per tiriamąjį laikotarpį reikšmingiausiai didėjo metinė oro temperatūra Aukštaitijos ir Dzūkijos regiono MS. Čia registruojamas reikšmingas virš 0,62 °C augimas per dešimtmetį. Tokio augimo rezultatas būtų 6 °C per šimtmetį, kas viršytų bet kokias pastarojo laikotarpio prognozes. Toks reikšmingas temperatūros kilimas sudarė unikalias sąlygas tirti visus ekosistemoje vykstančio bio- geo- cenotinius procesus, aiškinant galimas grėsmes ekosistemai.

Kiek mažesniu temperatūros augimu pasižymėjo Vakarinis Lietuvos regionas, kur Telšių MS buvo registruojamas apie 0,6 °C augimas per dešimtmetį. Šio augimo reikšmingumo lygmuo buvo taip pat nors ir ne ženkliai, tačiau mažesnis nei Dzūkijoje ir Aukštaitijoje.

Išskirtinis skirtumas tarp tirtų regionų yra reikšmingai žemesnė temperatūra Aukštaitijos regione, kuri siekia vidutiniškai iki 0,5 °C lyginant su Pietiniu ir Vakarinių Lietuvos regionu. Tai gali būti vienas iš reikšmingesniu aplinkso veiksnių vertinant bendrą miško ekosistemų tvarumą intensyvios kaitos sąlygomis.

Šilčiausi metai kartojosi kas maždaug 5-8 metus, o šalčiausi metai kartojosi kas maždaug 8-12 metų.



1.1. pav. Vidutinės metinės (I-XII) temperatūros kaitos reikšmingumas meteorologinėse stotyse 1993(94)–2025 m.

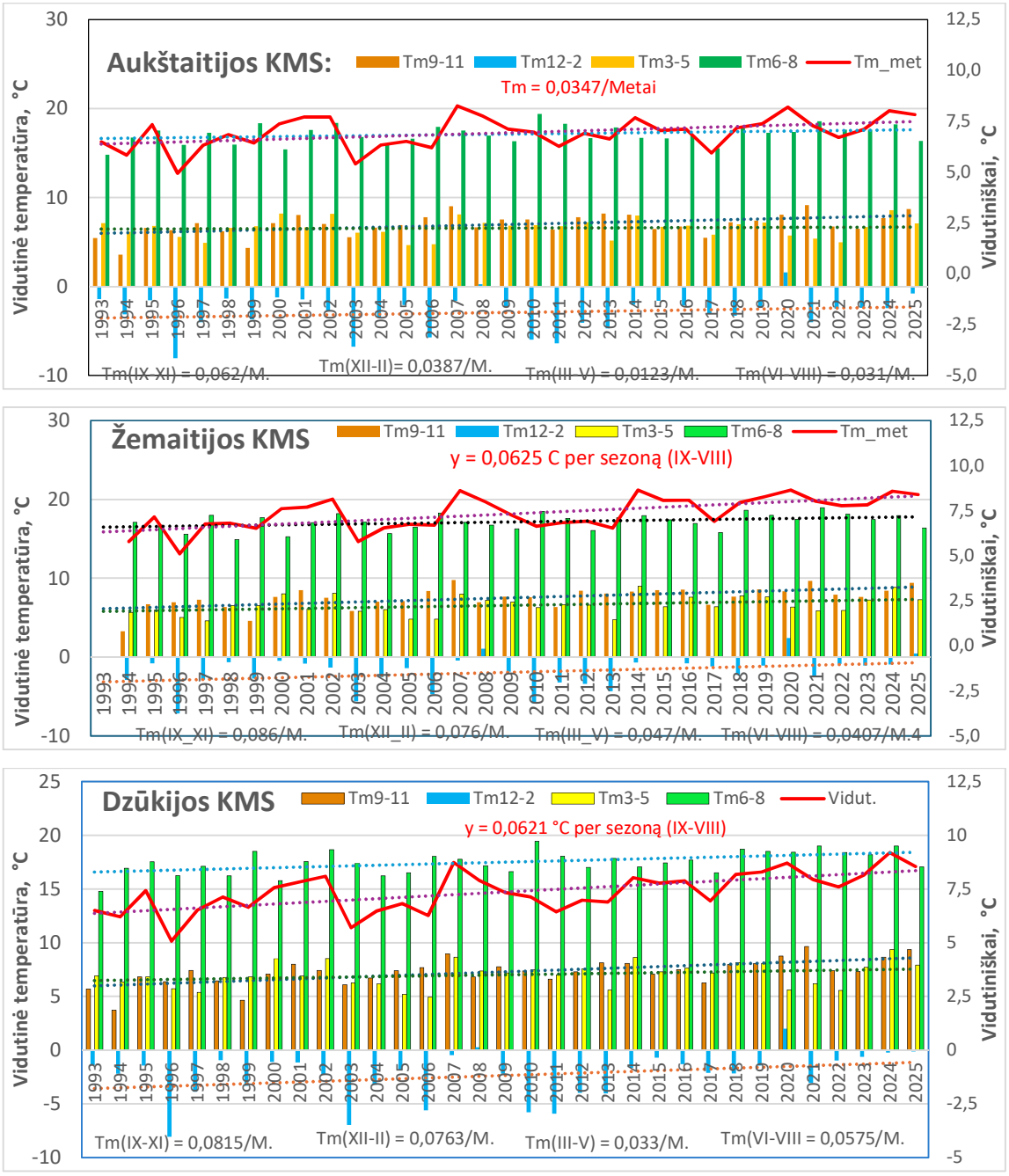
Toks intensyvus temperatūros kilimas leidžia teigti kad tik per tiriamąjį 32 m. laikotarpį oro temperatūra pakilo vidutiniškai apie jau 2,0° C. ***Tokius meteorologinius pokyčius Lietuvoje būtų galima vertinti kaip intensyviausios klimato kaitos scenarijų, o miško ekosistemų atskirų biotos komponentų reakcijas, kaip jų prisitaikymo prie tokių naujų sąlygų galimybes ir išgyvenimo perspektyvas ateityje.***

1.1.2. Vidutinės oro temperatūros kaita KM stočių teritorijose

Vertinant aplinkos šiltėjimo intensyvumą konkrečiose stotyse nustatyta, kad Aukštaitijos KM stotyje temperatūros kilimas buvo kiek tai žemesnis negu Dūkšto MS ir siekė apie 0,35 ° C per dešimtmetį. Tai galimai miško medžių poveikis temperatūrų kaitai.

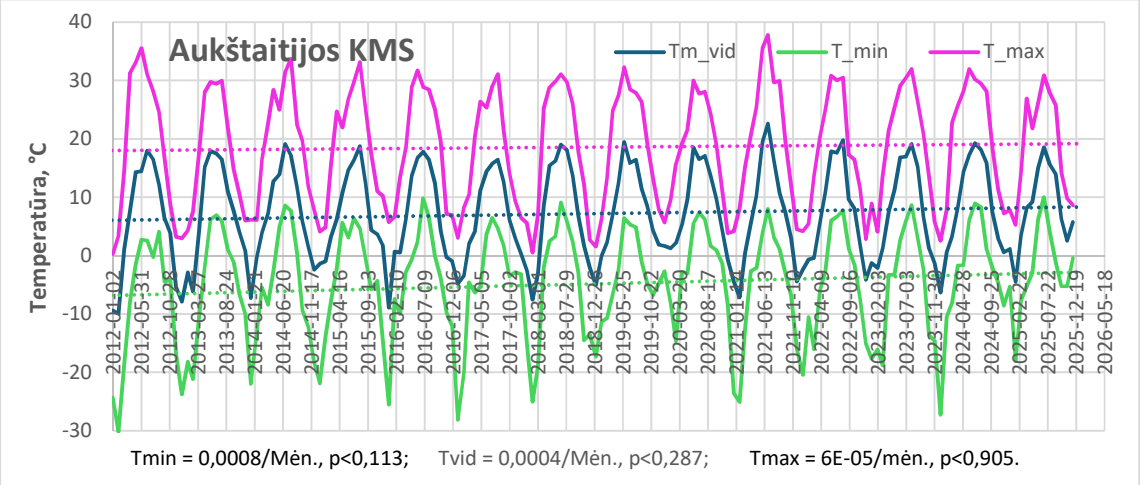
Lyginant atskirų sezonų oro temperatūros kaitą nustatyta, kad Aukštaitijos KMS rudens laikotarpiu šiltėjimo intensyvumas išlaiko maksimalią ir reikšmingą reikšmę, nors kiek tai žemesnę negu buvo nustatyta 2020 m. T.y. vidutinės temperatūros augimas rudenį sumažėjo nuo +0,66°C per 10 m. laikotarpį iki 0,62°C per 10 m. laikotarpį. Kiek mažiau šilo žiemos ir vasaros laikotarpiai, po maždaug +0,32 ir +0,38 °C per 10 m. laikotarpį atitinkamai. Lyginant su 2020 m., šis šilimo intensyvumas kiek tai viršija nustatytą intensyvumą prieš 5 metus. Mažiausiu atšilimu pasižymi ir toliau pavasario laikotarpis, nors šilimo intensyvumas per paskutiniuosius 5 metu padidėjo nuo +0,09°C iki 0,12°C per 10 m. laikotarpį. Šie rodikliai rodo, kad ir toliau Aukštaitijos regiono temperatūra turi tendencija didėti, taip sąlygodama augantį pavojų visai miško ekosistemai.

Apibendrinus metinius temperatūrų parametrus, nustatyta, kad šalčiausi per tiriamąjį laikotarpį buvo 1996, 2003, 2006, 2010, 2017 ir 2022 metai, kada oro vidutinė temperatūra žiemą nukrisdavo žemiau -5°C. Tokiam temperatūros sumažėjimui didžiausios įtakos turėjo žemiausios gruodžio – vasario mėn. temperatūros, kurios buvo žemesnės nei -7°C.



1.2. pav. Vidutinės sezoninės ir viso sezono (IX-VIII) temperatūros kaitos intensyvumas KM stotyse 1993(94)–2025 m.

Šilčiausi 2001-2002, 2007, 2014, 2024 ir ypač 2020 m., kai vidutinė oro temperatūra viršijo net 8 °C, kurią reikšmingiausiai sąlygojo rudens ir vasaros mėnesių temperatūros.



1.4 pav. Vidutinės, minimalios ir maksimalios mėnesio temperatūros kaita Aukštaitijos KMS.

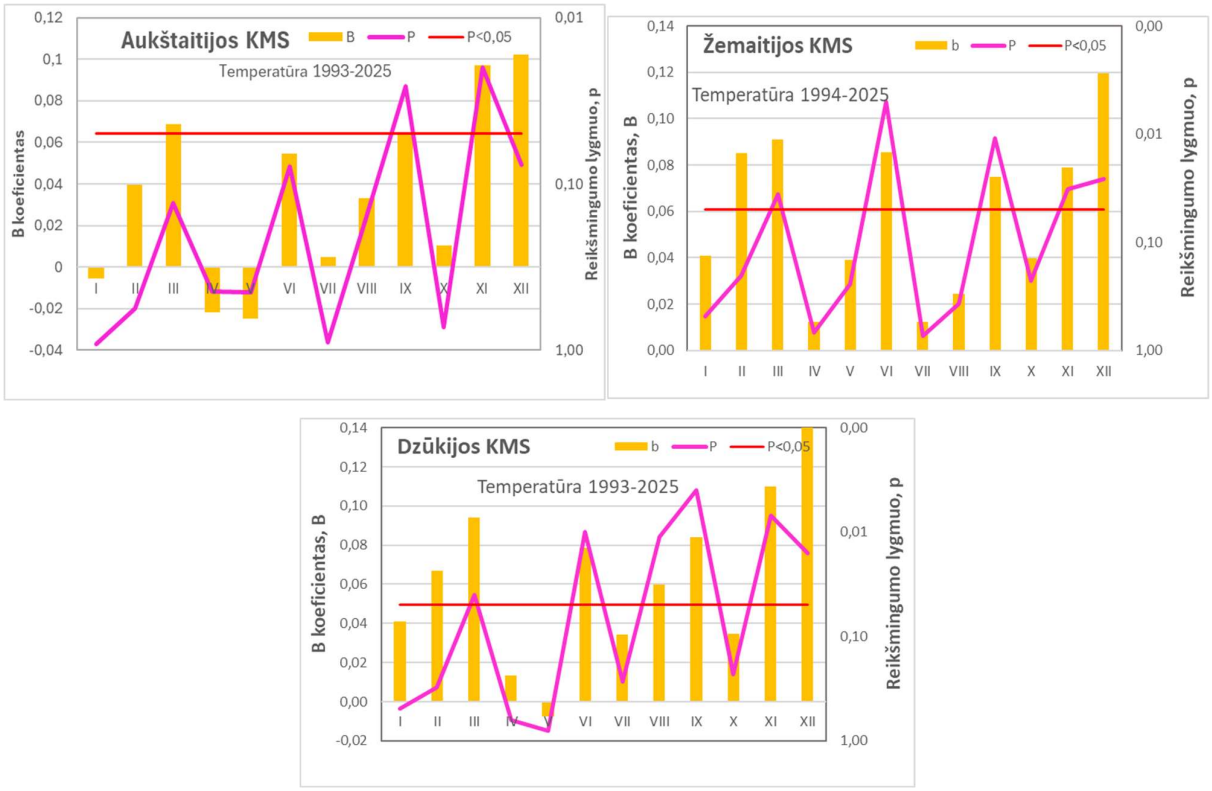
Minimalios ir maksimalios mėnesio temperatūros kaitos analizė parodė, kad Aukštaitijos KMS intensyviausiai kyla minimali mėnesio temperatūra, du kartus lėčiau vidutinė mėnesio temperatūra ir stabili išlieka maksimali mėnesio temperatūra. Tai esminiai veiksniai sąlygojantys sėkminga biotos peržiemojimo tikimybę pastaruoju laikotarpiu, kai ypač šylą ramybės laikotarpis.

Žemaitijos NP atskirais metų sezonais pagal oro temperatūros daugiametę kaitą Telšių meteorologinėje stotyje (1994-2025 m.) vidutinė temperatūra rudens ir žiemos laikotarpiu didėjo intensyviausiai, po +0,06°C per 10 m. laikotarpį, kiek mažiau šilo pavasaris ir vasara, po maždaug +0,47 ir +0,41 °C per 10 m. laikotarpį atitinkamai. Lyginant su 2020 m. duomenimis, šiltėjimo intensyvumas reikšmingai slobo ir tik vasaros sezone išliko nepakitęs.

2020 ir 2024 m. Žemaitijos KM stotyje išskirtiniai. Vidutinė metinė oro temperatūra šioje stotyje pasiekė maksimalią reikšmę per visą tiriamąjį laikotarpį, t.y. 8,6 °C.

Dzūkijos regione oro temperatūra šilo analogiškai Vakariniam regionui. Intensyviausiai šilo rudens ir žiemos mėnesiai, kai oro temperatūra kilo po 0,82 ir 0,76 °C per dešimtmetį. Kiek silpniau šilo vasaros sezonas – po 0,57 °C per dešimtmetį ir silpniausiai šilo pavasaris – po 0,033 °C per dešimtmetį. Išskirtiniai metai, kaip ir Žemaitijos regione: 2002, 2007, 2014, 2020 ir 2024 m., kai oro temperatūra nuo 8 pakilo iki 9,2 °C. Paskutiniuoju 2020-2025 m. laikotarpiu oro vidutinė temperatūra praktiškai išliko stabili Aukštaitijos ir Žemaitijos regione, Dzūkijos MS duomenimis šiuo laikotarpiu oro temperatūra turėjo nereikšminga tendencija didėti.

Apibendrinus mėnesio vidutinės temperatūros kaitos tendencijas nustatyta, kad Aukštaitijos KMS jau ir toliau registruojami atskirų mėnesio temperatūrų mažėjimo procesas***. 2020 m. išaiškinta, kad palaipsniui pradeda mažėti sausio, balandžio, liepos mėnesių vidutinės temperatūros, nors toks intensyvumas dar buvo nereikšmingas.*** 2025 m. vidutinė temperatūra toliau mažėjo tik sausio, balandžio ir gegužės mėnesių neartėdama prie reikšmingumo lygmens. Liepos mėnesio temperatūra po paskutiniojo 5 metų laikotarpio pradėjo didėti. Kaip ir toliau kyla vasario – kovo, birželio, rugpjūčio mėnesių oro temperatūros. Tačiau ir šis pokytis yra dar nereikšmingas. Intensyviausiai ir reikšmingai pastaruoju laikotarpiu šyla rugsėjis, lapkritis ir gruodis. Šilimo intensyvumas kiek tai sumažėjo lyginant su praėjusių 5 metų laikotarpiu, bet vis dar viršija 0,06 ℃ per metus.

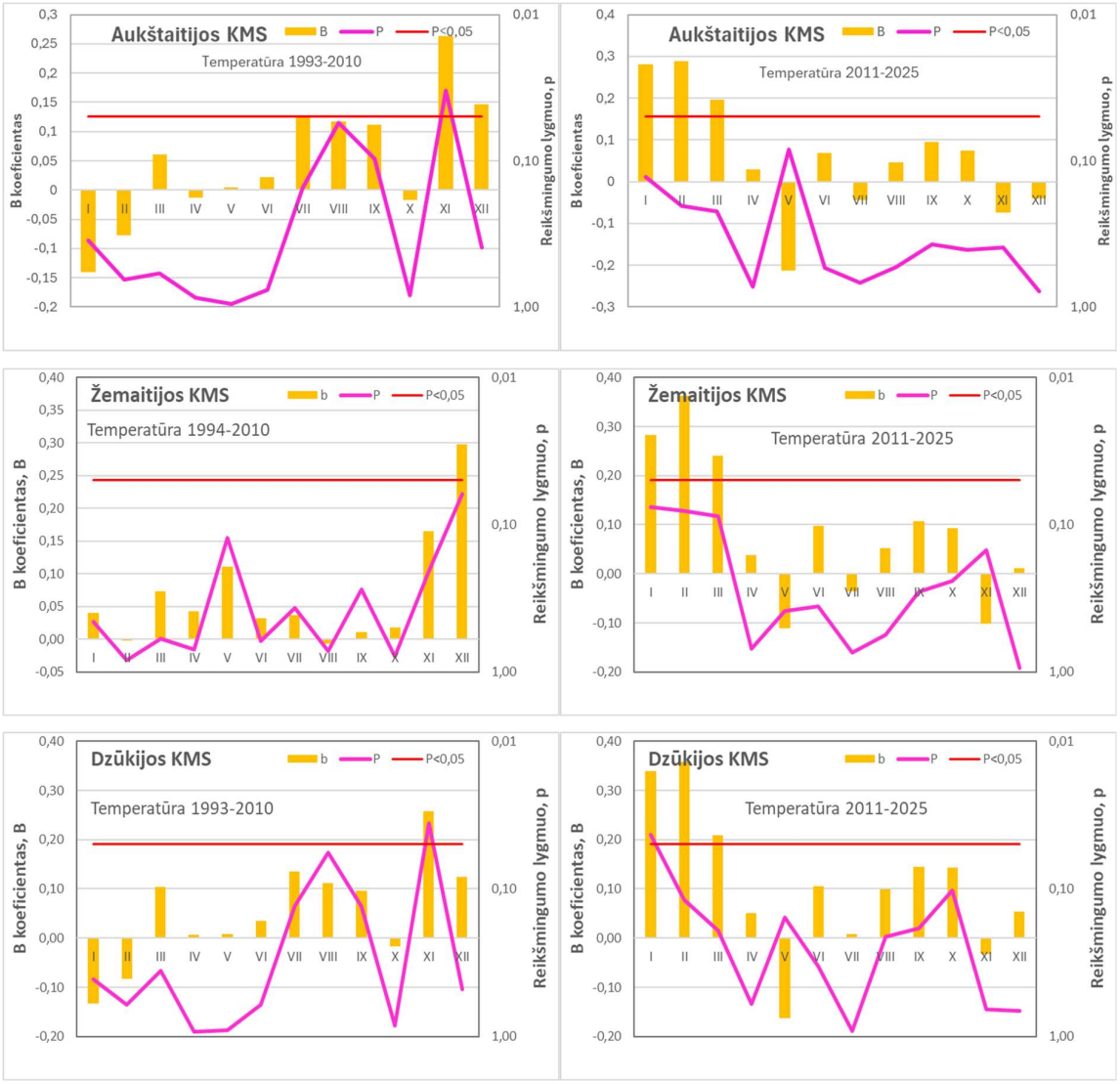


1.5 pav. Vidutinės mėnesio temperatūros ir kritulių kaitos reikšmingumas KM stotyse 1994 – 2025 metų laikotarpiu. B koeficientas nurodo kaitos intensyvumą per metus, o p reikšmė kaitos reikšmingumą.

Išskirtinis vidutinės mėnesio temperatūros kitimo bruožas Žemaitijos ir Dzūkijos stotyse – nenustatytas temperatūros žemėjimo reikšmingesnis trendas nei vieną mėnesį. Visais mėnesiais vidutinė temperatūra per visą tiriamąjį laikotarpį turi tendencija didėti.

Žemaitijos ir Dzūkijos stotyse reikšmingai didėja kovo, birželio rugsėjo ir lapkričio-gruodžio mėnesių vidutinė temperatūra. Abiejose stotyse šis didėjimo trendas siekė ir viršijo 0,08 ℃ per metus.

Klausimas: ar nustatytas vidutinių mėnesio temperatūrų trendas per visą tiriamąjį laikotarpį išlika stabilus? Atsakant į šį klausimą 32 m. tiriamasis laikotarpis, atsižvelgiant į temperatūros kaitos grafiką buvo suskirstytas į dvi dalis: pirmasis laikotarpis nuo tyrimų pradžios iki 2010 metų; antrasis laikotarpis: nuo 2011 m. iki 2025.



1.6 pav. Vidutinės mėnesio temperatūros kaitos reikšmingumas KM stotyse skirtingais laikotarpiais. B koeficientas nurodo kaitos intensyvumą per metus, o p reikšmė kaitos reikšmingumą.

Analizuojant mėnesio vidutinių temperatūrų kaitą skirtingais laikotarpiais nustatyta reikšmingą jų kaitos tendencija paskutiniuoju 15 metų laikotarpiu. Būtent apie 2010 m. aplinkoje įvyko reikšminga aplinkos temperatūrų kaita. Jeigu iki pastarojo laikotarpio tirtiems regionams buvo būdinga nereikšminga temperatūrų žemėjimo kaita sausio – vasario mėnesiais, tai jau po 2010 metų šių mėnesių vidutinė temperatūra didėja siekdama 0,3℃ per metus, o Dzūkijos KM stotyje siekia net ir reikšminga didžiausią lygį sausio mėnesį – po 0,33 ℃ per metus. Tai ypač intensyvus šio mėnesio šilimas.

Vegetacijos pradžioje pradeda arti reikšmingo lygmens pradeda šalti gegužės mėnesis, kuris gali neigiamai sąlygoti visus gyvybinius procesus miško ekosistemų biotos ir ypač augalų ir medžių būklę ir prieaugį. Reikšmingiausias pokytis registruotas Žemaitijos stotyje, kur iki 2010 m. gegužės mėnesio vidutinė temperatūra didėjo po beveik 0,1 ℃ per metus, o jau po 2011 metų tokiu pat intensyvumu bet jau mažėja.

Viduryje vegetacijos sezono ryškėja intensyvėjantis birželio mėnesio šilimas, kai tuo tarpu likusiais mėnesiais – liepą ir rugpjūtį, vidutinės temperatūros augimas sulėtėjo ir stabilizavosi arti neutralaus lygio, t.y. apie 0℃ per metus.

Reikšmingai pakito ir rudens mėnesių vidutinės temperatūros kaita. Jeigu iki 2010 m. šių mėnesių vidutinė temperatūra reikšmingai didėjo, tai po 2010 m toks šilimas baigėsi, o lapkričio mėnesio temperatūra net pradėjo žemėti.

Tokia atskirų mėnesių vidutinės temperatūros kaita turėjo turėti reikšmingos įtakos visiems bio- geo- cenotiniams ryšiams ir kaitai, sąlygodami bendrą miško ekosistemų vystymosi kaitą.

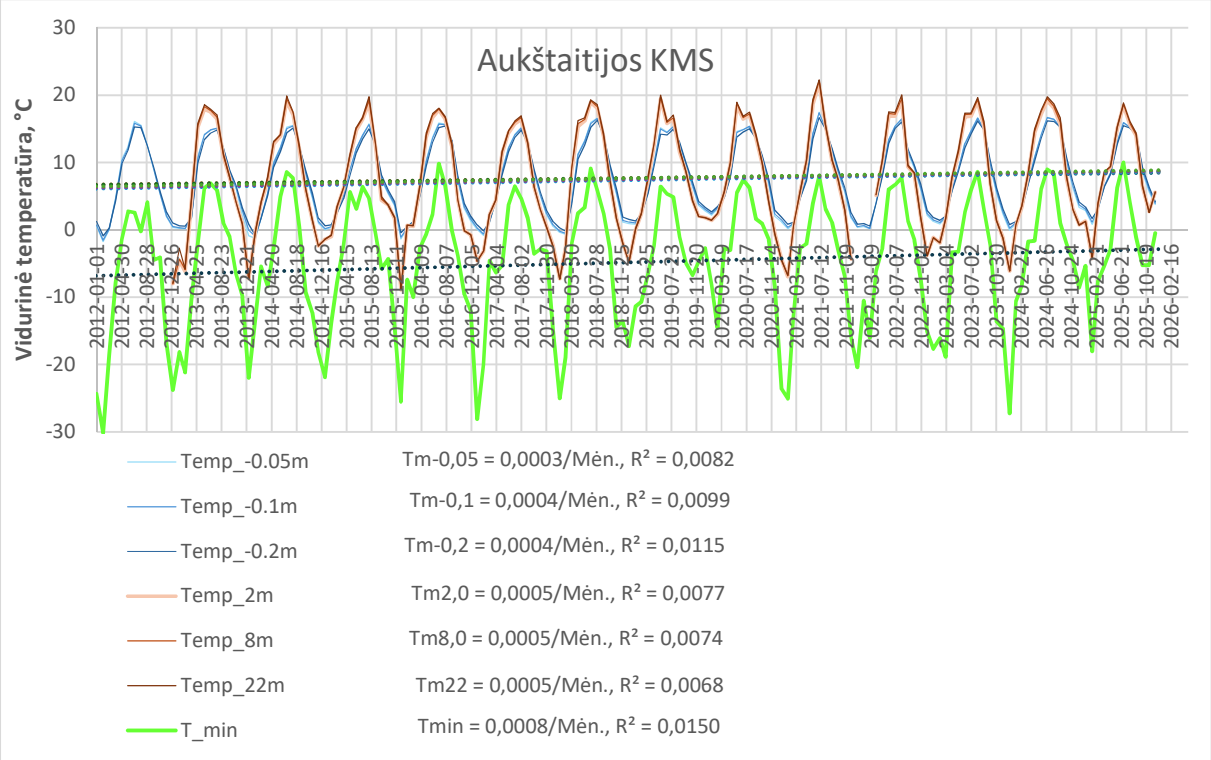
Visoms stotims būdinga tendencija temperatūros kaitoje – tiriamuoju laikotarpiu reikšmingai didėja vidutinė metinė temperatūra, viršydama 0,6°C per 10 metų. Mišku apaugusiame plote temperatūros augimo intensyvumas yra iki dviejų kartu silpnesnis.

Paskutiniuoju 15 m. laikotarpiu pakankamai reikšmingai šylą sausio-kovo mėnesiai, taip pat birželio ir rugsėjo-spalio mėnesiai. Šalti pradėjo gegužės ir lapkričio mėnesiai. Tokios kaitos poveikio miško ekosistemoms įvertinimas tapo pagrindiniu uždaviniu vykdant VAMP programos 2024-2029 m. VII skirsnio priemones.

Kokią įtaką išskirtinis ramybės laikotarpio atšilimas turės medžių būklei ir prieaugiui parodys ateities tyrimai, kurie pradėti įsigijus aukštos skiriamosios gebos medžių prieaugio bei automatinius transpiracijos matuoklius. Ar tai bus nauja grėsmė Lietuvos miškams, ar atvirkščiai, naujos klimatinės sąlygos, skatinančios medžių intensyvų augimą bus galima atsakyti tik pratęsus tyrimus dar bent mažiausiai 5 m laikotarpiu, t.y. iki 2030 m.

1.1.3. Skirtinguose aukščiuose ir skirtinguose gyliuose temperatūrų sąsajos su vidutinę oro temperatūra (2 m aukštyje)

Intensyviai keičiantis oro temperatūrai vis aktualesnė tampa vidutinės oro temperatūros (2 m aukštyje) sąsajos su oro temperatūra skirtingame priežemio aukštyje bei dirvožemio gylyje. Nuo jos kintamumo skirtinguose lygiuose reikšmingai priklauso visi augalų ekofiziologiniai procesai bei likusios biotos rūšių įvairovė ir individų gausa. Ši analizė atlikta Aukštaitijos KM stoties pavyzdžiu, kadangi tik šioje stotyje reguliariai matuojama oro temperatūra 2, 8 ir 22 m aukštyje bei dirvožemio temperatūra 5, 10 ir 20 cm gylyje. Gauti rezultatai pateikti 1.7 pav.

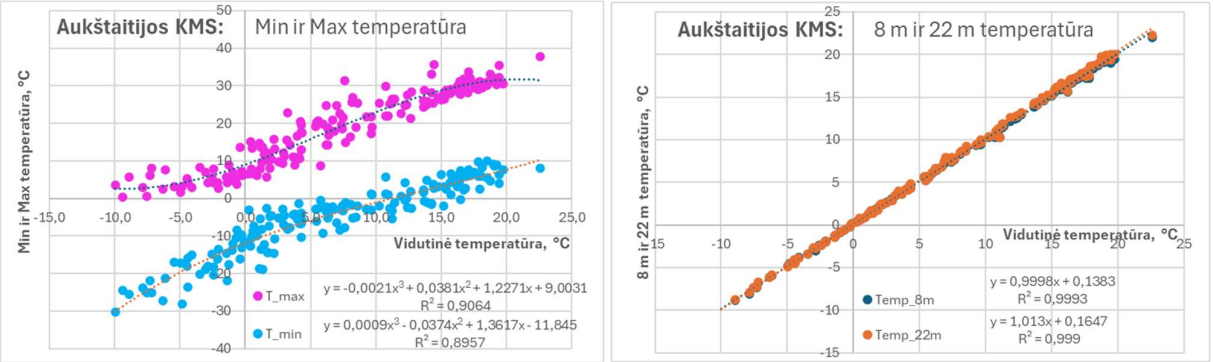


1.7 pav. Skirtinguose aukščiuose ir skirtinguose gyliuose temperatūrų kaita Aukštaitijos KMS.

Rezultatai parodė, kad skirtingai nei tikėtasi lėčiausiai šyla paviršinio sluoksnio dirvožemis, t.y. 5 cm gylyje. Gyliui didėjant šilimo procesas pasireiškia intensyviau.

Skirtingai taip pat negu dirvožemyje, skirtingame aukštyje oro temperatūros augimo intensyvumas išlieka tas pats, po maždaug 0,0005 C per mėnesį, ar 0,06 C per metus, ką parodė ir vidutinių metinių temperatūrų kaitos intensyvumo rezultatai.

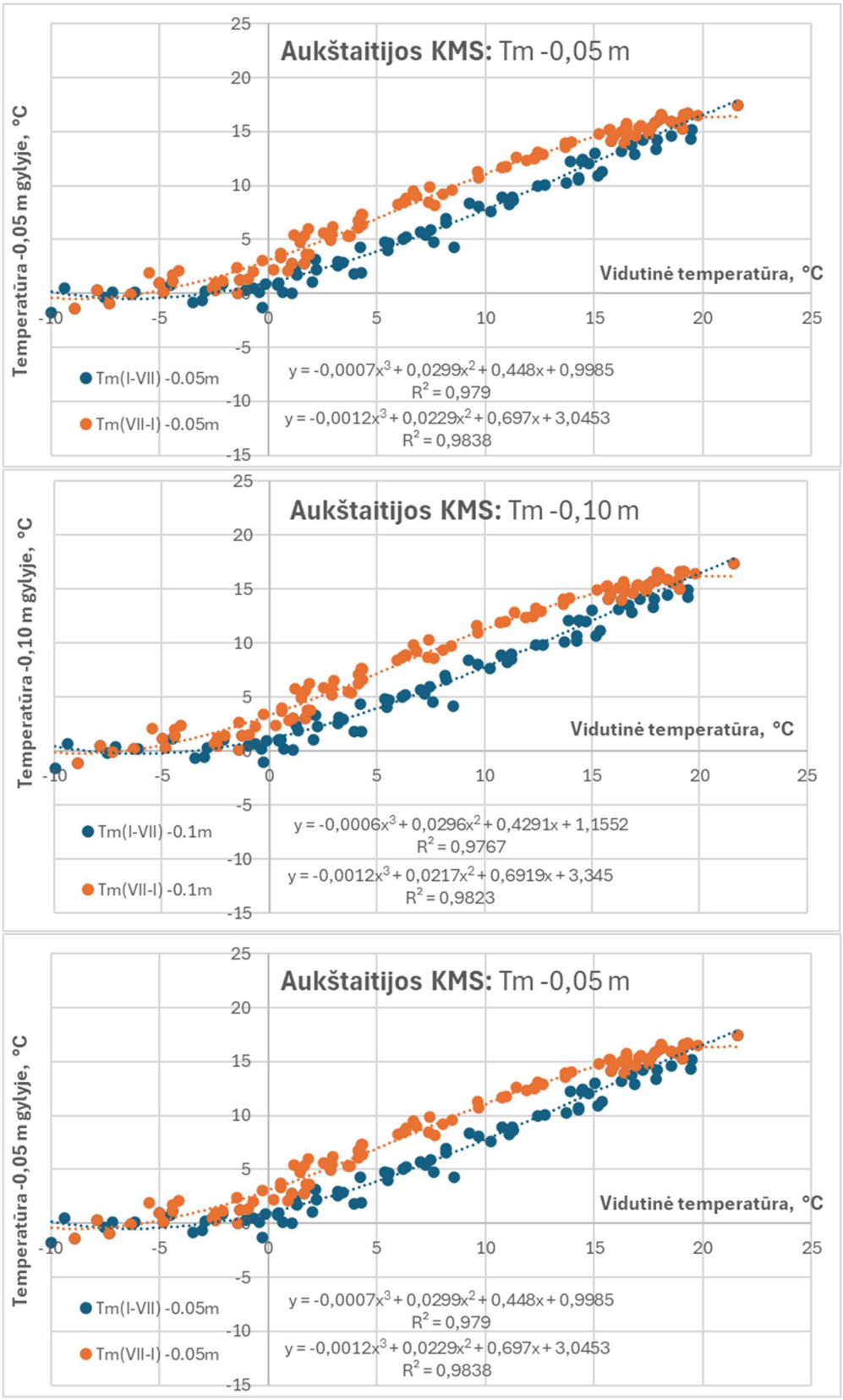
Vidutinės ir minimalios bei maksimalios temperatūros sąveikos rezultatai parodė, kad tarp šių temperatūrinių rodiklių egzistuoja logistinės kreivės pobūdis, kuris darbe išreikštas trečio laipsnio polinomu, pasireiškiančių priešingo ženklo lygties laisvaisiais nariais (1.8 pav.). Vidutinei oro temperatūrai kintant nuo -10 iki +20 °C, minimali temperatūra kinta nuo -30 iki +10°C, o maksimali nuo 0 iki 40 °C. Tai reikšmingi pokyčiai galintys turėti reikšmingos įtakos visiems bio- geo sisteminiams procesams vykstantiems sąlygiškai natūraliose miško ekosistemose.



1.8 pav. Vidutinės oro temperatūros ir jos minimalios ir maksimalios reikšmės sąveiką.

Vidutinės oro temperatūros 2 m aukštyje sąsajos su temperatūra 8 ir 22 m aukštyje reikšmingai nesiskiria, tik lygties B koeficientas 8 m aukštyje nesiekia 1, o 22 m aukštyje kiek tai viršija 1 reikšmę.

Analizuojant vidutinės temperatūros ore ir dirvožemyje sąveikas nustatyta, kad ši tarpusavio priklausomybė turi sezoninį pobūdį. Prie tos paties vidutinės oro temperatūros dirvožemio temperatūra pirmoje metų pusėje reikšmingai mažesnė negu antroje metų pusėje. Šis skirtumas didžiausias ties 10 °C riba ir siekia apie 3 °C, t.y. pavasarį neviršija 8 °C, o rudenį siekia 11 °C.



1.9 pav. Vidutinės temperatūros ir jos reikšmių skirtinguose dirvožemio gyliuose sąveika

1.1.4. Dirvožemio temperatūros kaita KM stočių teritorijose

Dirvožemio temperatūra yra pagrindinis aplinkos veiksnys, reguliuojantis fizinius, cheminius ir biologinius procesus sausumos ekosistemose. Ji tiesiogiai veikia dirvožemio pedobiontų aktyvumą, organinių medžiagų skaidymąsi, maistinių medžiagų ciklo intensyvumą ir augalų šaknų funkcionavimą, todėl lemia ekosistemos produktyvumą ir stabilumą, tuo pačiu atsparumą nepalankiems aplinkos veiksniams (Johannes Lehmann ir Markus Kleber, 2015; Ivan Janssens ir kt., 2001). Miškų ekosistemose, ypač šiauriau esančiose platumų pusiau borealiniuose miškuose, dirvožemio temperatūra stipriai siejama su oro temperatūra, kurią vis labiau sąlygoja vykstanti klimato kaita.

Padidėjus dirvožemio temperatūrai, paprastai paspartėja biocheminės reakcijos ir sustiprėja pedobiontų veikla, todėl greičiau skaidosi dirvožemio organinės medžiagos ir padidėja maistinių medžiagų mineralizacija (Erik A. Davidson & Ivan Janssens, 2006). Šis procesas gali laikinai pagerinti maistinių medžiagų prieinamumą augalams. Tačiau dėl ilgalaikio atšilimo taip pat gali padidėti anglies nuostoliai dėl sustiprėjusio dirvožemio kvėpavimo, kas gali prisidėti prie klimato kaitos pasekmių teigiamo vertinimo (Serita D. Frey ir kt., 2013).

Augalų šaknų sistemos yra ypač jautrios dirvožemio temperatūros pokyčiams. Vidutinis atšilimas gali paskatinti šaknų augimą ir maistinių medžiagų pasisavinimą; tačiau per didelė dirvožemio temperatūra gali pabloginti šaknų funkciją, sumažinti smulkių šaknų ilgaamžiškumą ir pakeisti anglies paskirstymo modelius (Hans Lambers ir kt., 2008). Borealinėms medžių rūšims, tokioms kaip paprastoji pušis (*Pinus sylvestris* L.), šis poveikis gali būti ypač ryškus esant nepakankamai maistinių medžiagų sąlygoms, kai šaknų efektyvumas yra labai svarbus pušims augti ar ypač išgyventi stresą.

Oligotrofinėse miško ekosistemose, kur maistinių medžiagų prieinamumas iš esmės yra mažas, padidėjusi dirvožemio temperatūra gali sustiprinti maistinių medžiagų disbalansą, nes pagreitėja mineralizacija ir kartu padidėja maistinių medžiagų nuostoliai dėl išplovimo ir emisijų iš dirvožemio. Todėl, ilgalaikis atšilimas gali lemti laipsnišką dirvožemio maistinių medžiagų išeikvojimą ir sumažėjusį ekosistemos atsparumą (Richard D. Bardgett & Wim H. van der Putten, 2014).

Galiausiai, dirvožemio temperatūra yra esminis ekosistemos funkcionavimo veiksnys, o jos poveikis priklauso nuo atšilimo dydžio ir trukmės, taip pat nuo sąveikos su dirvožemio drėgme ir maistinių medžiagų prieinamumu. Šių procesų supratimas yra būtinas norint numatyti miškų reakciją į klimato kaitą, ypač pažeidžiamose sistemose, tokiose kaip pusiau borealiniai miškai oligotrofiniuose dirvožemiuose, kurie papildomai veikiami tolimųjų oro teršalų pernašų ir Vidurio ir Vakarų Europos.

Dirvožemio temperatūra reguliariai stebima tik Aukštaitijos KMS, kur per 27 metų laikotarpį dirvožemio temperatūros (5, 10 ir 20 cm gyliuose) vidutinė reikšmė didėjo nuo 6,1 2001 m. iki 8,7 °C 2024 m. Didžiausios metų vidutinės temperatūros reikšmės buvo 2000, 2007-2011, 2020 ir 2024 m. Neigiamos vidutinės mėnesio temperatūros buvo nustatytos 2006 (II-III), 2010 (II), 2012 (II), 2014 (I-II), 2016 (I), 2017 (II) ir 2018 (II-III), kurie tapo paskutiniaisiais metais, kad vidutinė mėnesio temperatūra vasario mėnesį buvo neigiama. Šis rodiklis tik pasikartojo 2026 m., bet tai jau kitų metų tyrimo rezultatas.

Mažiausias dirvožemio temperatūros vidurkis per žiemos mėnesius buvo 2012 metų vasarį (-1,4°C), o ilgiausiai neigiama temperatūra laikėsi nuo 2002 metų gruodžio iki 2003 metų kovo. Pagal dirvožemio temperatūrą 2012 metai buvo kontrastiškiausi pagal temperatūros svyravimo amplitudę, maksimalias ir minimalias valandines temperatūras per stebėjimų laikotarpį.

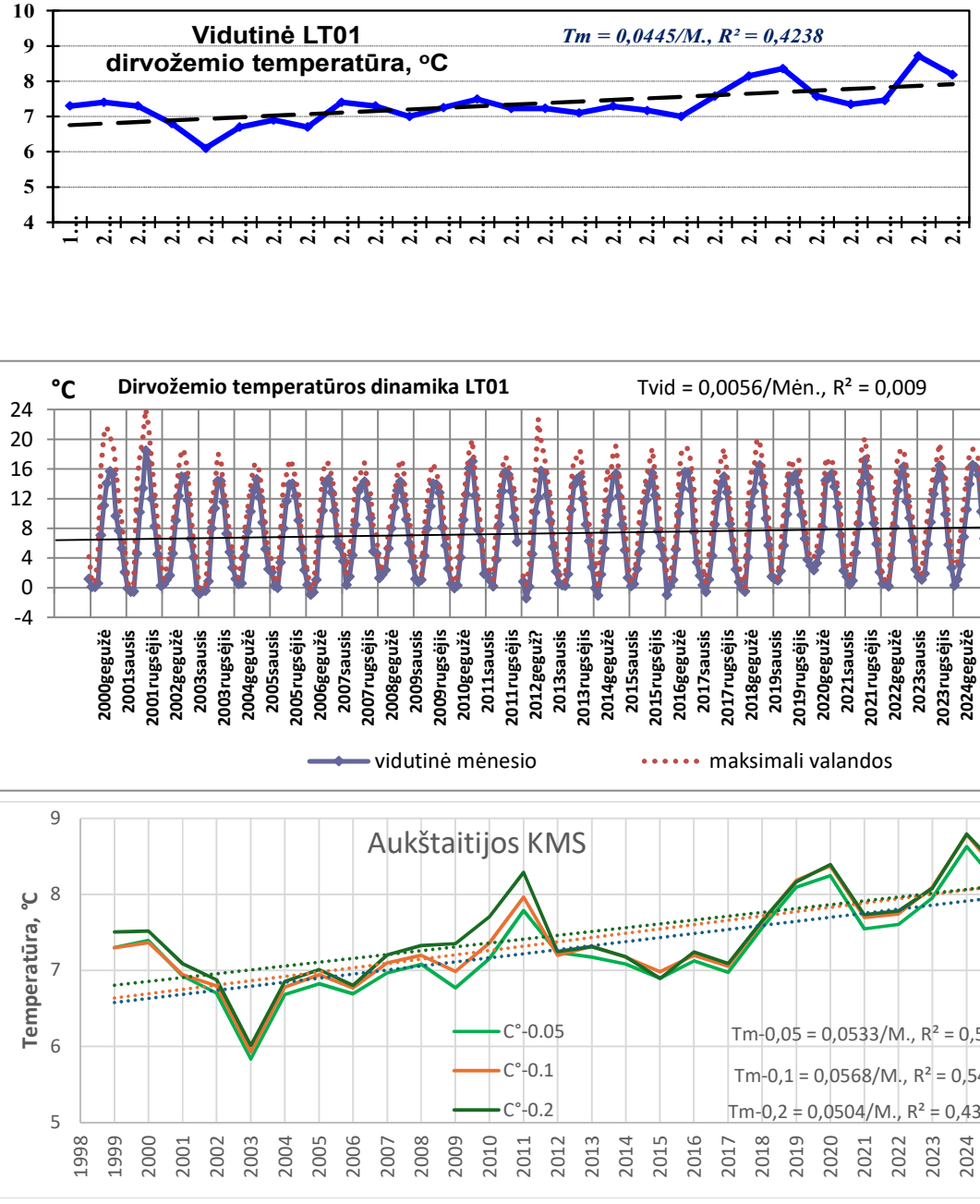
2019-2025 m. laikotarpiu dirvožemio vidutinės temperatūros kaitoje jokių ženklesnių tendencijų nenustatyta. Vidutinė temperatūra žiemą nebuvo nukritusi žemiau 0°C I-III mėnesiais. Paskutiniaisiais 2025 metais nustatytas ir vienas mažiausių skirtumų tarp ramybės ir vegetacijos laikotarpių vidutinės mėnesio temperatūros. Panašus rezultatas registruotas ir 2020 metais, bei 2008-2009 m.

Per visą šį 5 m. laikotarpį vidutinė temperatūra praktiškai išliko stabili. Maksimalios temperatūros kaitoje taip pat reikšmingesnių tendencijų neįvyko. Per pastarąjį penkerių metų laikotarpį maksimali mėnesio temperatūros taip pat išliko tame pačiame lygmenyje, nors mažėjo maksimali temperatūra vegetacijos laikotarpiu bet didėjo ramybės laikotarpiu.

Per tiriamąjį laikotarpį vidutinė dirvožemio temperatūra trijuose gyliuose didėjo po 0,044 °C per metus, taip kaip ir oro po 0,04 °C per metus.

Vidutinės metinės temperatūros skirtinguose dirvožemio gyliuose vertės parodė, kad per tiriamąjį 27 metų laikotarpį, vidutinė temperatūra sekliausiame gylyje didėjo po 0,053 °C C per metus, 10 cm gylyje po 0,057 °C ir 20 cm gylyje, kur bendra temperatūra buvo didžiausia, po 0,05 °C per metus.

Tuo tarpu antruoju tiriamuoju laikotarpiu, t.y. 2011-2025 ir toliau buvo registruojamas ženklus temperatūros augimo tempas, kuris iš esmės nesiskyrė nuo pradinio 1999-2010 m. laikotarpio. Didžiausios dirvožemio temperatūros registruotos 2011 ir 2020 bei 2024 m. Tai išskirtiniai metai, kurie turėjo turėti reikšmingos įtakos procesams, kurie priklauso nuo oro ir dirvožemio temperatūros kaitos.



1.10 pav. Aukštaitijos KMS dirvožemio temperatūra (5, 10 ir 20 cm gyliuose, mėnesio vidurkis ir maksimali valandos. 2001 m. pabaigoje temperatūros matuoklis perkeltas į miško aplinką.

2019 m. dirvožemio vidutinė temperatūra 10 cm gylyje pasiekė savo maksimalią reikšmę per iki tol tiriamąjį laikotarpį, t.y. 8,2 °C. 2020 m. temperatūra dar pakilo iki 8,36 °C. 2024 m. dirvožemis buvo labiausiai įšilęs per visą stebėjimo laikotarpį, viršydamas 8,7 °C ribą.

1.1.5. Dirvožemio drėgnis ir jo kaitos reikšmė Aukštaitijos KMS miško ekosistemose.

Dirvožemio drėgnumas (dirvožemio drėgnis) yra pagrindinis medžių fiziologinių procesų, ekosistemų produktyvumo ir atsparumo meteorologiniams ekstremumams miško ekosistemose reguliatorius. Jo svarba ypač ryški oligotrofiniuose dirvožemiuose, kur mažas organinių medžiagų kiekis ir šiurkšti tekstūra riboja vandens sulaikymą ir padidina laikinus dirvožemio vandens trūkumo kaitą. Tokiomis sąlygomis dirvožemio drėgmė yra glaudžiai susijusi su krituliais, ypač jų trūkumu ir karščio bangomis.

Naujausi tyrimai rodo, kad dirvožemio drėgmės trūkumas yra pagrindinė vyraujančių medžių rūšių augimą mažinantis veiksnys, ypač vasaros sausros laikotarpiais gegužės-liepos mėnesiais (Ogana ir kt., 2024). Sumažėjęs dirvožemio vandens kiekis riboja radialinį augimą ir anglies asimiliaciją, o tai atspindi didelį fiziologinių procesų jautrumą vandens stresui (Augustaitis ir Pivoras, 2024; Augustaitis ir Sidabrienė, 2026). Įrodyta, kad ekosistemų mastu sausros sukeltas dirvožemio drėgmės sumažėjimas labai sumažina grynąjį ekosistemos prieaugį, kuris per sausras borealiniuose miškuose gali sumažėti daugiau nei 50% (Martínez-García ir kt., 2024).

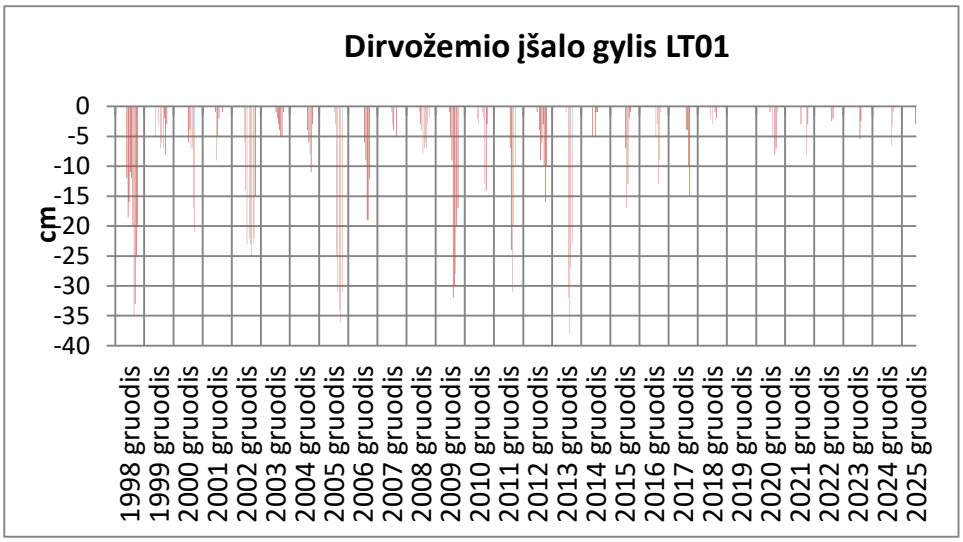
Oligotrofinėje aplinkoje dėl riboto dirvožemio vandens kaupimo pajėgumo greitai išsenka turimas vanduo sausais laikotarpiais. Tai sukelia lapų žiotelių užsidarymą, kas sukelia sumažėjusią transpiraciją ir padidintą visos ekosistemos vandens apytakos sutrikimo riziką. Nors paprastoji pušis pasižymi santykinai dideliu atsparumu sausroms – augimas atsigauna greičiau nei kartu sutinkamų rūšių tokių kaip paprastoji eglė, kuriai užsitęsęs dirvožemio drėgmės trūkumas gali sukelti jų žūtį (Bose ir kt., 2024).

Antrą vertus, didesnis dirvožemio drėgmės kiekis gali apsaugoti nuo ekstremalių klimato sąlygų, mažindamas mikroklimato sąlygas ir palaikydamas ekosistemos funkcionavimą. Padidėjęs dirvožemio drėgnumas dėl sumažėjusio garavimo, sumažina sausros streso poveikį augalijai ir visai biologinei įvairovei (Koelemeijer, 2024; Hedwall ir kt., 2026). Tačiau oligotrofinėms sistemoms būdinguose smėlio dirvožemiuose drėgmės perteklius paprastai būna trumpalaikis, o hipoksinis stresas ne toks ryškus.

Dirvožemio drėgmė taip pat atlieka lemiamą vaidmenį reguliuojant maistinių medžiagų ciklą. Smarkios sausros gali sukelti didelį maistinių medžiagų praradimą iš miško ekosistemų, pakeisti biogeocheminius ciklus ir galbūt prisidėti prie ilgalaikio maistinių medžiagų išeikvojimo (Houle ir kt., 2016). Tai išryškina dirvožemio drėgmės reikšmę ne tik kaip fiziologinį procesu inhibitorių, bet ir kaip pagrindinį ekosistemos funkcionavimo stimuliatorių. Kadangi dirvožemio drėgmė veikia kaip centrinė kontrolė, susiejanti meteorologinius stresorius su visos ekosistemos stabilumu jos tyrimams yra skiriamas padidintas dėmėsis ir VAMP programos VII skirsnyje.

Dirvožemio temperatūra taip pat stipriai kontroliuoja dirvožemio drėgmės dinamiką. Padidėjusi temperatūra padidina garavimo greitį, todėl dažnai sumažėja vandens prieinamumas dirvožemyje, ypač stambios tekstūros arba oligotrofiniuose dirvožemiuose, kurių vandens sulaikymo geba yra maža. Ši sąveika tarp atšilimo ir džiovinimo gali apriboti mikrobų procesus ir apriboti maistinių medžiagų sklaidą, galiausiai sumažindama augalų produktyvumą (Sharon A. Billings & Kees Jan van Groenigen, 2011).

Dirvožemio drėgmė tiesiogiai siejasi su krituliais ir dirvožemio vandens atsargomis, apie kurias galima spręsti pagal pavasario polaidžio vandens kiekį ir vandens atsargų pokyčių amplitudę šiltuoju (vegetacijos) laikotarpiu. Jei žiemą sniego nedaug, tada šiltojo laikotarpio pradžioje dirvožemio vandens atsargos nepasipildo, o negausaus besifiltruojančio vandens sąveika su dirvožemiu yra neglaudi. Jei pavasario polaidžio metu per dirvožemį sunkiasi daug vandens, medžiagų išplovimas iš dirvožemio padidėja. Didelę įtaką medžiagų išplovimui iš dirvožemio turi įšalo gylis (1.11 pav.) ir dirvožemio drėgmės atsargų kaita (1.12 ir 1.13 pav.).



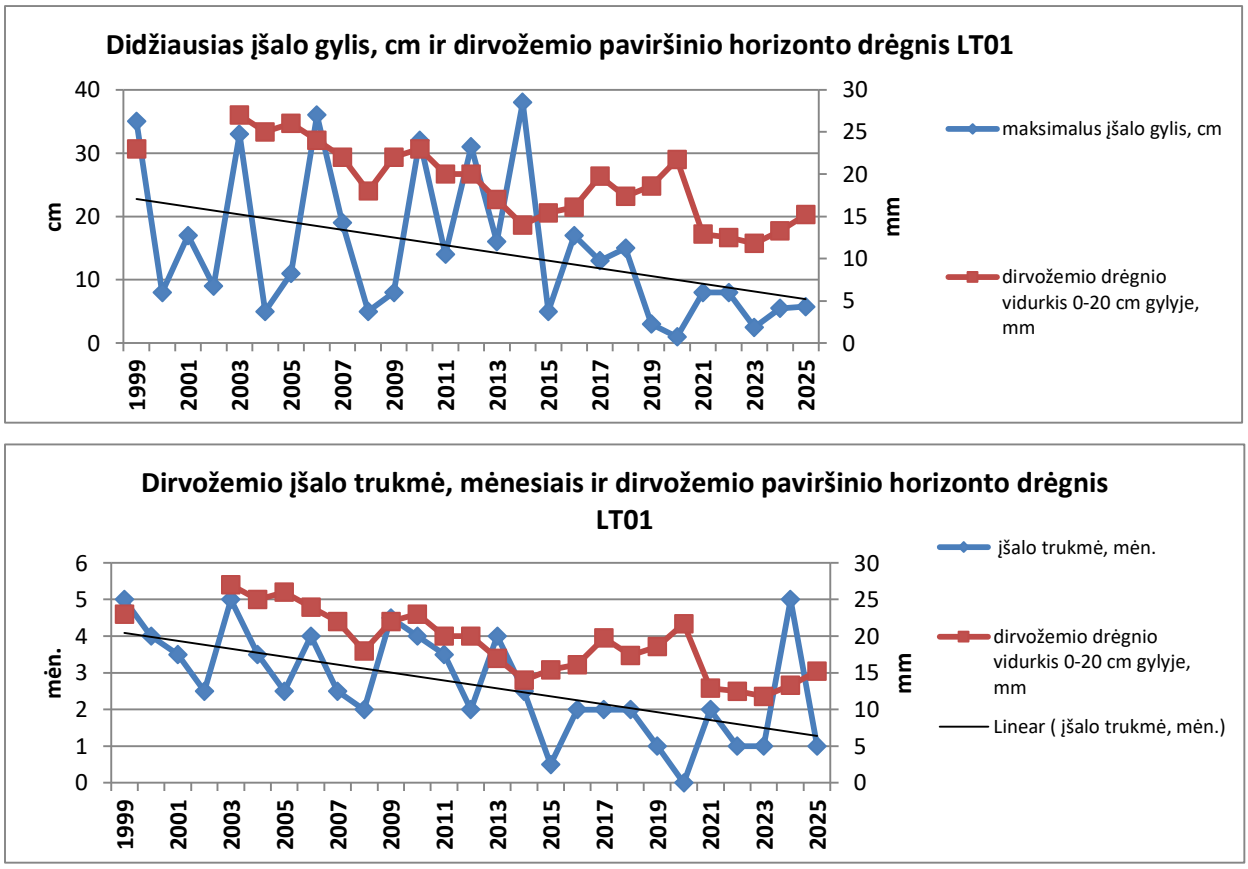
1.11 pav. Įšalo gylio kaita Aukštaitijos KMS žiemos laikotarpiu.

Tyrimo rezultatai rodo, kad įšalo gylis viršijantis 20 cm gyli buvo reguliariai registruojamas iki 2013 metų. Nuo 2014 metų nebesusidaro gilesnis nei 20 cm įšalas, o 2019 metais dirvožemio įšalo visai nebuvo užfiksuota (1.11 pav.). paskutiniuoju laikotarpi įšalo gylis svyravo apie 5 cm.

Nuo 1998 m. periodiškai, kas 3–4 metus, Aukštaitijos stotyje kartojosi šaltos žiemos, kai dirvožemis įšaldavo giliau, negu 30 cm ir įšalas laikėsi keturis ir daugiau mėnesių. Per stebėjimų laikotarpį buvo šešios tokio gilaus ir ilgai trunkančio įšalo žiemos: 1998–1999, 2002–2003, 2005-2006, 2009–2010, 2011-2012 ir 2013-2014 metais. Nors didžiausias įšalo gylis 1998-2014 metais

turėjo tendenciją augti, bet įšalo trukmė mažėjo. Menkiausias įšalas buvo susidaręs 2001–2002, 2003–2004, 2007-2008 m., kai dirvožemis neįšalo giliau negu 10 cm ir įšalas laikėsi trumpiausiai, ne ilgiau, kaip du su puse mėnesio. Stebėsenos laikotarpio pradžioje seklus įšalas susidarydavo kas antrą žiemą. 2013-2014 metų žiemą buvo užfiksuotas didžiausias įšalo gylis per stebėsenos laikotarpį, bet įšalas laikėsi vos 2,5 mėnesio.

Nuo 2014 m. stebimas itin reikšmingas dirvožemio įšalo mažėjimas. Jei dar 2014 m. įšalas siekdamas maksimalią reikšmę pasiekė net 28 cm, tai iki 2025 m. įšalo gylis mažėjo ir jau 2020 m. jo iš viso nebuvo registruojama. Tokia įšalo gylio kaita turėjo esminės įtakos dirvožemio drėgniui.



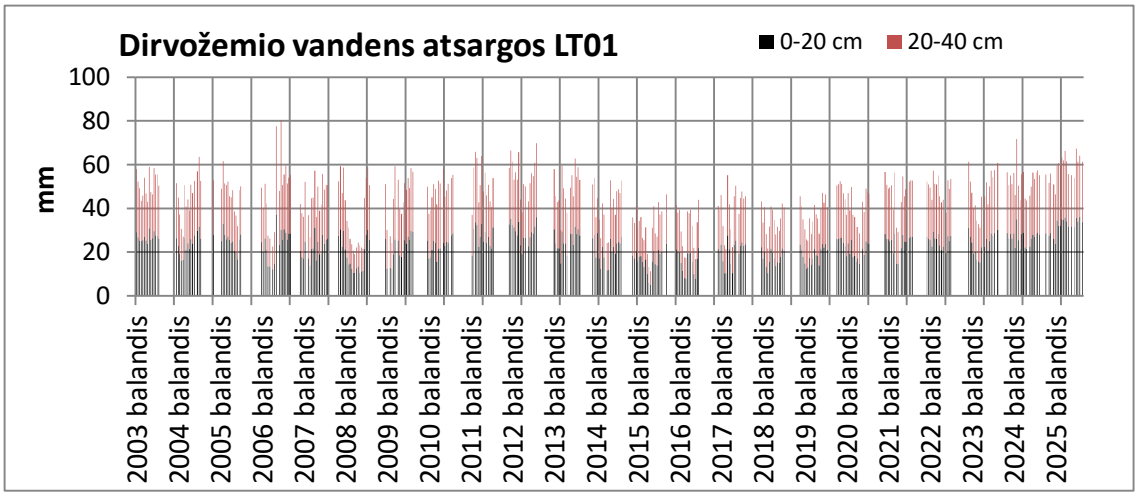
1.12. pav. Dirvožemio įšalo charakteristikos Aukštaitijos KMS (LT01) ir jų ryšys su dirvožemio drėgniu.

Nuo 2015 metų nebeliko priklausomybės tarp dirvožemio drėgnio ir įšalo gylio bei trukmės. 2014 metais dirvožemio drėgnis buvo mažiausias, o 2015 metais įšalas laikėsi trumpiausiai nuo 1999 metų ir nesiekė 5 cm. Nors dirvožemio drėgmė 2015-2020 metais ėmė tolygiai didėti, įšalo parametrai 2019 ir 2020 metais tik po vieną kartą siekė 1 cm reikšmę (1.12 pav.).

Nuo 2003 metų 2007, 2011, 2013 ir 2015 metų pavasarį drėgmės trūko, buvo mažiau dirvožemio vandens atsargų, negu šiltojo laikotarpio pabaigoje, o per pavasario polaidį dirvožemio drėgmės atsargos labiausiai pasipildė 2020-2021 ir 2023 metais.

Palankūs medžiagų išplovimui pavasarį (dėl menko įšalo ir didelio polaidžio vandens kiekio) buvo 2004, 2008, 2009, 2016 ir 2019-2023 metai. Didžiausi dirvožemio drėgnio kontrastai vegetacijos laikotarpiu buvo 2004, 2006, 2015, 2020, 2021 ir 2023 metais.

2025 metais dirvožemio drėgmės atsargos 0-20 ir 0-40 cm gylyje Aukštaitijos KMS buvo didžiausios nuo 2003 m., kai turime matavimus vegetacijos laikotarpiu kas 2 savaites. 2025 metais dirvožemio drėgmės atsargos pagal vidurkį ir kaitą metų bėgyje panašios į 2012 metų, bet mažai kintančios. Po sausringų 2015-2016 metų, 11 metų iš eilės dirvožemio drėgnis šiltuoju laikotarpiu tolygiai didėjo. Per pastaruosius 5 metus didžiausi dirvožemio drėgmės kontrastai (vadinasi ir dirvožemio vandens srauto intensyvumas) buvo 2021 ir 2023 metais (1.13 pav.).



1.13. pav. Dirvožemio drėgmės atsargų kaita Aukštaitijos KMS 2003-2025 metais. Grafike pateikiamos pirminės išmatuotos reikšmės, kas 2 savaites šiltuoju laikotarpiu.

Nuo 1999 iki 2014 m. egzistavo glaudus ryšys tarp dirvožemio vidutinio drėgnio ir įšalo gylio. Po išskirtinų 2014 m. ši priklausomybė tapo atvirkštinė, kai drėgniui didėjant įšalo gylis reikšmingai mažėjo, taip kaip ir bendra įšalo trukmė. Tai išskirtinis procesas geosistemoje galintis turėti reikšmingos įtakos bendrai miško ekosistemų tvariai plėtrai.

Toks įšalo gylio sumažėjimas 2015-2025 m. laikotarpiu, apsprendė dirvožemio drėgnio išaugimą ir galėjo turėti reikšmingos įtakos ne vien vandens balanso kaitai geosistemoje, bet ir biotos komponentų būklei, produktyvumui, gausai ir rūšių įvairovei..

1.1.6. KM stočių upelio vandens temperatūra ir jos kaitos reikšmė

Kylanti vandens temperatūra yra kritinis stresorius mažose upeliuose, kur mažas debitas ir ribotas šiluminis buferis lemia greitą atšilimą. Padidėjusi temperatūra sumažina ištirpusio deguonies prieinamumą, tuo pačiu padidindama vandens organizmų medžiagų apykaitos greitį ir taip sustiprindama fiziologinį stresą (Bonacina ir kt., 2023; Niedrist ir kt., 2022). Borealiniuose ir pusiau borealiniuose upeliuose atšilimas gali iš esmės pakeisti makro bestuburių grupes ir sutrikdyti trofinę sąveiką, o tai gali sukelti biologinės įvairovės nykimą ir bendruomenės homogenizaciją (Mustonen ir kt., 2018).

Makrobentosas (bentoso makrobestuburiai) yra labai jautrūs šiluminių pokyčių rodikliai, ypač mažuose upeliuose ir upeliuose, kur dėl ribotos šiluminės inercijos greitai svyruoja temperatūra. Didėjanti vandens temperatūra tiesiogiai veikia makrobentoso bendruomenes, nes keičia medžiagų apykaitos greitį, gyvavimo ciklo laiką ir rūšių sąveiką.

Kylant temperatūrai paprastai paspartėja augimas ir vystymasis, bet taip pat padidėja medžiagų apykaitos poreikis, o tai gali sukelti energetinį disbalansą esant ribotam maisto prieinamumui arba sumažėjusiai deguonies koncentracijai (Woodward ir kt., 2010; Durance ir Ormerod, 2007), kas ypač pasidaro aktualu mažuose upeliuose su ribotu debitu. Supaprastėjus makrobentoso bendruomenių struktūrai, toliau prarandami jautrūs taksonai ir pasikeičia ekosistemos funkcionalumas, ypač prie sausrų ir sumažėjusio debito sinergetinio poveikio.

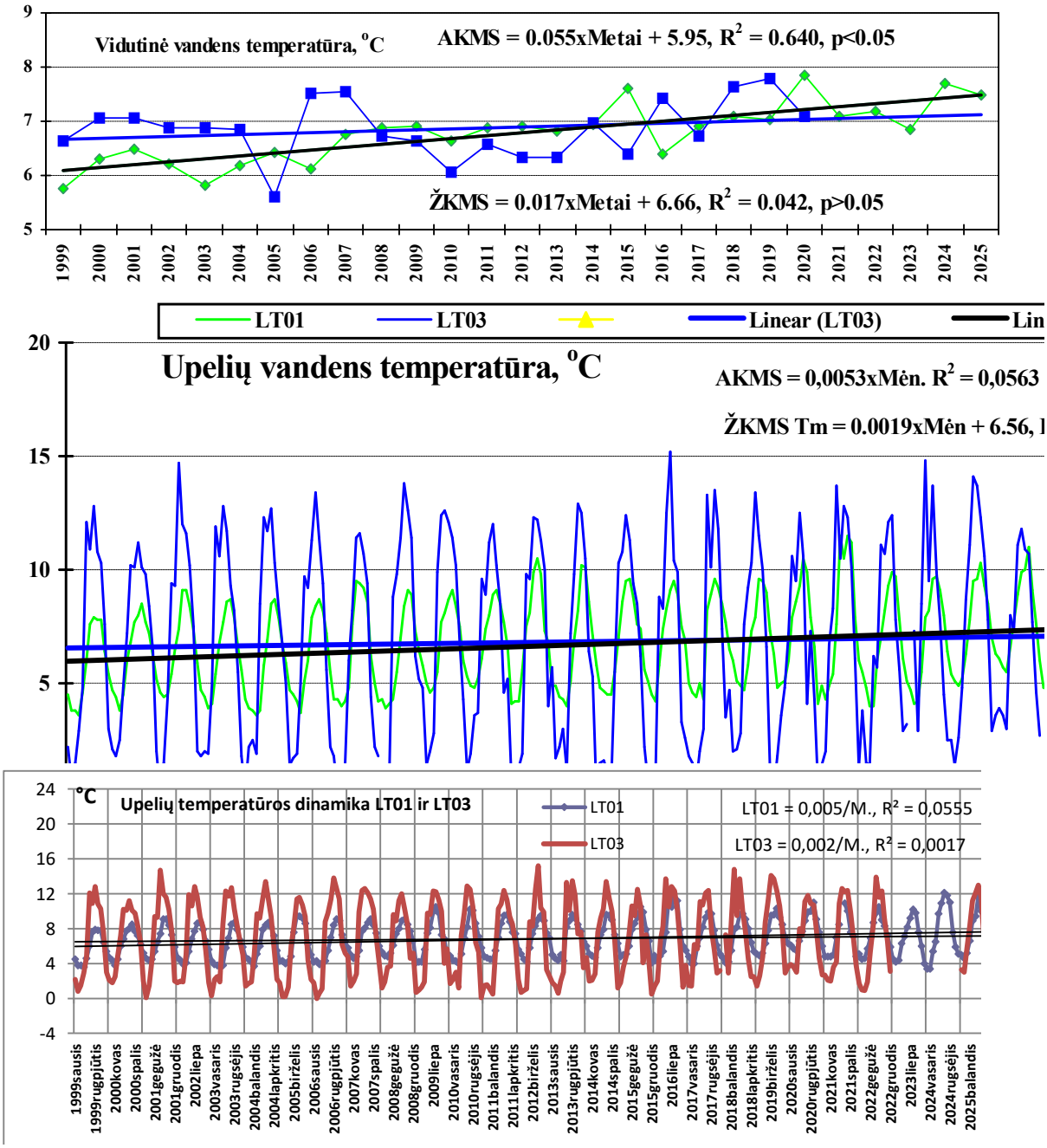
Didėjanti vandens temperatūra mažuose upeliuose taip pat daro didelę įtaką maistinių medžiagų apykaitai ir teršalų kaitai. Padidėjusi temperatūra pagreitina mikrobų aktyvumą ir biocheminių reakcijų greitį, todėl sustiprėja organinių medžiagų skaidymas ir greitesnis azoto bei fosforo junginių transformavimas (Acuña ir kt., 2008; Woodward ir kt., 2010). Be to, aukštesnė temperatūra kartu su padidėjusiu teršalų tirpimu vandenyje, didina jų ekologinį toksiškumą ir poveikio vandens organizmams riziką.

Vandens šilimas taip pat keičia teršalų, tokių kaip sunkieji metalai ir organiniai teršalai, reikšmingumą, darydamas įtaką tirpumui, adsorbcijos-desorbcijos dinamikai ir mikro organizmų aktyvumo greičiui. Daugeliu atvejų padidėjusi temperatūra padidina teršalų mobilumą ir biologinį prieinamumą, taip padidindama ekologinį stresą bentoso bendrijoms (Whitehead ir kt., 2009).

Šie procesai dažnai sustiprėja dėl klimato sąlygotų hidrologinių reiškinių (pvz., sausrų ir staigių potvynių), kurie keičia medžiagų nuosėdų susidarymo trukmę, jų pernešimą ir maistinių medžiagų efektyvumą. Dėl to maži upeliai pastaruoju laikotarpiu tampa vis labiau kintančiomis ir mažiau stabiliomis biogeocheminėmis sistemomis, dėl ko padidėja eutrofikacijos rizika, atsiranda epizodinių taršos reikšmingumas ir sumažėja ekosistemų atsparumas. Dėl šios priažasties upelio fizinių, cheminių ir biologinių savybių tyrimai yra privalomi VAMP programoje siekiant sąlygiškai natūralių ekosistemų kompleksiško monitoringo tikslų ir uždavinių.

Tyrimų rezultatai Aukštaitijos KMS upelyje parodė, kad per 27 m. laikotarpį upelio vandens temperatūra reguliariai didėjo po vidutiniškai 0,055°C per metus, kuris viršijo net oro temperatūros kaitos intensyvumą ore.

Žemaitijos stotyje 22 stebėjimo metų upelio temperatūra praktiškai išlieka stabili, nors oro temperatūra kyla beveik 2 kartus intensyviau negu Aukštaitijos KMS (1.6 pav.).



1.14 pav. Upelių vandens vidutinė metinė ir mėnesių temperatūros kaita 1999-2025 m. laikotarpiu.

Didžiausios ir ilgiausiai trukusios upelio vandens temperatūros reikšmės Aukštaitijos stotyje buvo 2009-2010 m. 2010 m. didesnė nei 10°C upelio vandens temperatūra buvo fiksuojama net 2 mėnesius - rugpjūtį ir rugsėjį, bet neviršijo 2009 m. rekordinės reikšmės (10,5°C). 2014 m. vidutinė metinė upelio vandens temperatūra Aukštaitijos stotyje buvo 6,95°C, didžiausia per 1999-2014 m. stebėsenos laikotarpį. Paskutiniuoju laikotarpiu 2020-2025 m. vandens temperatūra neturi aiškesnės tendencijos didėti, nors 2024m. kai buvo registruojami vieni iš šilčiausių metų, vandens temperatūra pasiekė savo maksimaliausią reikšmę – vidutinė mėnesio temperatūra viršijo net 12 °C. Tai galėjo turėti reikšmingos įtakos upelio makro bentoso rūšių įvairovės ir individų gausos pokyčiams o taip pat ir visiems tirpumo ir išplovimo procesams miško ekosistemoje.

Žemaitijos stotyje 2014 metais upelio vandens temperatūra buvo po penkių metų pertraukos pakilo iki didesnės už vidurkį (1.6 pav.). 2016 m. ir ypač 2018-2019 m. vandens temperatūra Žemaitijos KMS upelio pasiekė maksimalias reikšmes nuo stebėjimo pradžios, t.y. viršijo 7,5 °C.

Žemaitijos KMS, nors ir išaiškintas intensyvesnis oro temperatūros kilimo trendas negu Aukštaitijos KMS, vandens temperatūra 2020 m. pakankamai reikšmingai nukrito lyginant su 2019 m., ir tokį temperatūros pokytį, mūsų manymu, lėmė vasaros mėnesių sumažėjusi vandens temperatūra.

2025 atnaujinti upelio temperatūros matavimai parodė, kad tiriamuoju laikotarpiu upelio temperatūra Aukštaitijos KMS didėja po 0,005 °C per mėn., o Žemaitijos KMS – po 0,002 °C per mėn., t.y. virš 2 kartų lėčiau negu Aukštaitijos KMS upelyje.

1.1.7. Ištirpusio deguonies kiekis KM stočių upelio vandenyje ir jų reikšmingumas

Ištirpusio deguonies (TO_2) koncentracija yra pagrindinis vandens kokybės ir ekosistemos funkcionavimo upeliuose ir mažuose upeliuose rodiklis. Jis tiesiogiai reguliuoja aerobinį metabolizmą, rūšių sudėtį ir bendrą biogeocheminį stabilumą. Dėl mažo gylio ir didelio paviršiaus ploto ir tūrio santykio upeliai paprastai yra gerai prisotinti deguonimi; tačiau jie taip pat labai jautrūs aplinkos trikdžiams, tokiems kaip atšilimas, sumažėjęs debitas ir organinė tarša.

Vandens temperatūra yra pagrindinis TO_2 dinamikos veiksnys, nes didėjant temperatūrai mažėja deguonies tirpumas, o tuo pačiu didėja organizmo deguonies poreikis. Dėl to susidaro fiziologinis trikdžiai atšilimo sąlygomis, dažnai sukeliantis hipoksinį stresą, ypač vasaros mažo vandens srauto laikotarpiais (Jacobsen ir kt., 2014; Durance ir Ormerod, 2007). Mažuose upeliuose net trumpalaikiai temperatūros šuoliai gali žymiai sumažinti TO_2 lygį ir taip paveikti jautrius vandens taksonus, kadangi mažai ištirpusio deguonies sąlygos daro didelę įtaką makrobentoso bendruomenės

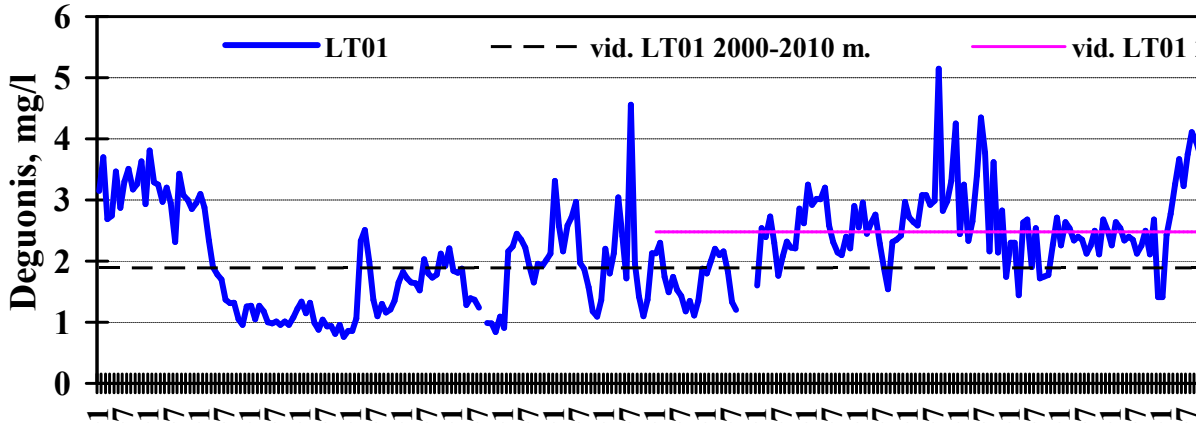
struktūrai, sumažindamos deguoniui jautrių taksonų skaičių, dėl ko sumažėja biologinė įvairovė ir supaprastėja bendruomenės funkcinės galimybės (Woodward ir kt., 2010).

Be to, TO_2 yra glaudžiai susijęs su organinių medžiagų skaidymu ir maistinių medžiagų ciklu. Sumažėjęs deguonies prieinamumas gali pakeisti mikro biotos aktyvumą bei pakeisti procesus iš aerobinių į anaerobinius kelius, taip pakeisdamas azoto transformaciją (pvz., denitrifikaciją) ir padidindamas sumažintų junginių, tokių kaip amoniakas ir metanas, susidarymą. Šie pokyčiai gali dar labiau pabloginti vandens kokybę ir padidinti ekosistemų nestabilumą, ypač sistemose, paveiktose eutrofikacijos arba padidėjusios organinės apkrovos.

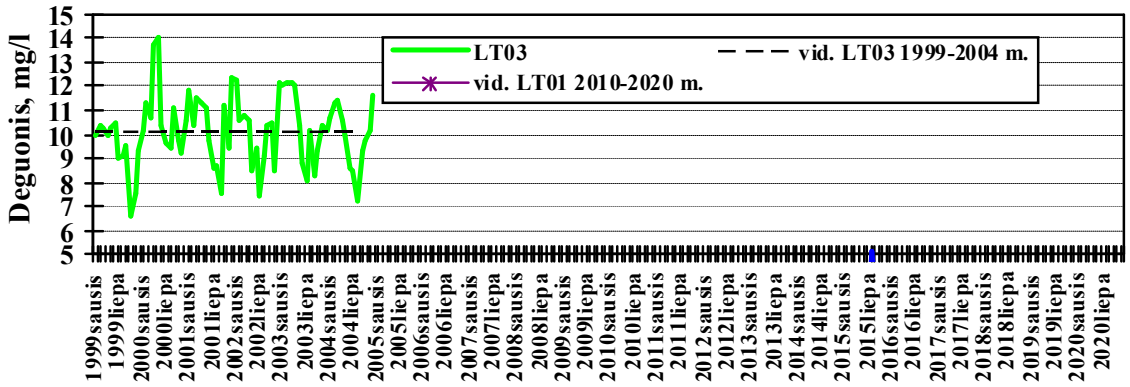
Galiausiai, ištirpusio deguonies koncentracija yra pagrindinis kompleksinis kintamasis, jungiantis šiluminį režimą, hidrologiją ir biologinę upelių struktūrą. Jo mažėjimas dėl klimato atšilimo ir antropogeninių stresorių tampa pagrindiniu veiksniu, skatinančiu biologinės įvairovės nykimą ir ekosistemų degradaciją mažose upelių sistemose.

Tyrimų rezultatai Aukštaitijos KMS upelio vandenyje parodė, kad ištirpusio deguonies kiekis trejus metus buvo didesnis už vidutinę reikšmę (1999-2008 m. vidurkis 1,89 mg/l), o 2010 metais tapo panašus į vidurkį, 1,60 mg/l. Mažiausiai deguonies upelio vandenyje buvo 2002–2003 m., apie 1 mg/l. 2004–2005 ir 2007–2009 metais ištirpusio deguonies kiekis buvo didesnis už vidurkį dėl upelio vandens temperatūros padidėjimo ir režimo.

2010 metais sumažėjus temperatūrai ir vandens augalų (producentų) vešėjimui, upelio vandenyje deguonies sumažėjo (1.15 pav.). Aukštaitijos stotyje ryšys tarp upelio vandens temperatūros ir ištirpusio deguonies yra tiesioginis (išimtį sudaro 1999-2000 metai), Žemaitijoje šis ryšys mažiau pastebimas, 2000 ir 2003 metais.



1.15 pav. Upelio vandenyje ištirpęs deguonis Aukštaitijos KMS Versminio upelio vandenyje. 2011 m. rugsėjį–gruodį nebuvo išmatuotas.



1.16 pav. Upelio vandenyje ištirpęs deguonis Žemaitijos KMS Juodupio vandenyje. Dėl techninių kliūčių LT03 nuo 2005 m. nebuvo matuotas.

2014 metais ištirpusio deguonies kiekis Aukštaitijos stoties upelio vandenyje visus metus buvo didesnis už 2 mg/l ir vidutinę 2000-2010 metų reikšmę (1,77 mg/l). Pastaraisiais metais ištirpusio deguonies kiekis buvo didesnis už vidurkį dėl upelio vandens temperatūros tolygaus didėjimo ir režimo. 2012-2013 metais Aukštaitijos monitoringo stoties aukšta upelio vandens temperatūra ir didelis nuotėkis buvo palankus vandens augalų (producentų) vešėjimui ir deguonies kiekio padidėjimui upelio vandenyje, o 2014 metais sumažėjęs upelio nuotėkis lėmė deguonies kiekio sumažėjimą iki 1,54 mg/l rugpjūčio mėnesį – tai mažiausia reikšmė per pastaruosius 4 metus, nuo 2011 metų liepos.

2015-2016 m. laikotarpiu registruotas vienas didžiausių vandens prisotinimo deguonimi laipsnių, kuris savo maksimalią reikšmę įgavo 2015 m. liepos ir 2016 m. gegužės mėnesiais – apie 5 mg/l. 2017-2018 m. deguonies kiekis upelio vandenyje stabilizavosi, tačiau buvo mažesnis nei daugiametis vidurkis – apie 2,8 mg/l. 2019 m. deguonies koncentracija Versminio upelio vandenyje išliko praktiškai stabili, nežymiai svyruojant apie 2,38 mg/l ribą. Tai truputį mažiau už daugiametį vidurkį dėl sausros ankstyvą pavasarį ir vegetacijos pradžioje. ***2020m. registruojamas reikšmingas deguonies kiekio padidėjimas Versminio upelio vandenyje. Panašus deguonies kiekis šio upelio vandenyje buvo registruotas tik 1999, 2009 ir 2015 m.***

Paskutiniaisiais 2025 m. registruojamas reikšmingas vandens prisotinimo deguonimi laipsnio mažėjimas, kuris galėjo turėti reikšmingos įtakos makro bentoso rūšinės įvairovės ir gausos pokyčiams.

.

IŠVADOS

Daugiametė metinė vidutinės temperatūros kaitos analizė parodė, kad per tiriamąjį laikotarpį reikšmingiausiai didėjo metinė oro temperatūra Aukštaitijos ir Dzūkijos regiono MS. Čia registruojamas reikšmingas virš 0,62 °C augimas per dešimtmetį. Tokio augimo rezultatas būtų 6 °C per šimtmetį, kas viršytų bet kokias pastarojo laikotarpio prognozes. Toks reikšmingas temperatūros kilimas sudarė unikalias sąlygas tirti visus ekosistemoje vykstančio bio- geo- cenotinius procesus, aiškinant galimas grėsmes ekosistemai.

Kiek mažesniu temperatūros augimu pasižymėjo Vakarinis Lietuvos regionas, kur Telšių MS buvo registruojamas apie 0,6 °C augimas per dešimtmetį. Šio augimo reikšmingumo lygmuo buvo taip pat nors ir ne ženkliai, tačiau mažesnis nei Dzūkijoje ir Aukštaitijoje.

Išskirtinis skirtumas tarp tirtų regionų yra reikšmingai žemesnė temperatūra Aukštaitijos regione, kuri siekia vidutiniškai iki 0,5°C žemesnė lyginant su Pietiniu ir Vakariniu Lietuvos regionu. Tai gali būti vienas iš reikšmingesniu aplinkos veiksniu vertinant bendrą miško ekosistemų tvarumą intensyvios kaitos sąlygomis.

Toks intensyvus temperatūros kilimas leidžia teigti kad tik per tiriamąjį 32 m. laikotarpį oro temperatūra pakilo vidutiniškai apie jau 2,0° C. ***Tokius meteorologinius pokyčius Lietuvoje būtų galima vertinti kaip intensyviausios klimato kaitos scenarijų, o miško ekosistemų atskirų biotos komponentų reakcijas, kaip jų prisitaikymo prie tokių naujų sąlygų galimybes ir išgyvenimo perspektyvas ateityje.***

Vertinant aplinkos šiltėjimo intensyvumą konkrečiose kompleksiško monitoringo stotyse (miškų apaugusiame plote) nustatyta, kad Aukštaitijos KM stotyje temperatūros kilimas buvo kiek tai žemesnis negu Dūkšto MS ir siekė apie 0,35 ° C per dešimtmetį. Tai galimai miško medžių poveikis temperatūrų kaitai.

Lyginant atskirų sezonų oro temperatūros kaitą nustatyta, kad Aukštaitijos KMS rudens laikotarpiu šiltėjimo intensyvumas išlaiko maksimalią ir reikšmingą reikšmę, nors kiek tai žemesnę negu buvo nustatyta 2020 m. T.y. vidutinės temperatūros augimas rudenį sumažėjo nuo +0,66°C iki 0,62°C per 10 m. laikotarpį. Kiek mažiau šilo žiemos ir vasaros laikotarpiai, po maždaug +0,32 ir +0,38 °C per 10 m. laikotarpį atitinkamai. Lyginant su 2020 m., šis šilimo intensyvumas kiek tai viršija nustatytą intensyvumą prieš 5 metus. Mažiausiu atšilimu pasižymi ir toliau pavasario laikotarpis, nors šilimo intensyvumas per paskutiniuosius 5 metu padidėjo nuo +0,09°C iki 0,12°C per 10 m. laikotarpį. Šie rodikliai rodo, kad ir toliau Aukštaitijos regiono temperatūra turi tendencija didėti, taip sąlygodama augantį pavojų visai miško ekosistemai.

2025 m. vidutinė temperatūra toliau mažėjo tik sausio, balandžio ir gegužės mėnesių nesiekdama reikšmingumo lygmens (p>0,05). Liepos mėnesio temperatūra po paskutiniojo 5 metų laikotarpio pradėjo didėti. Toliau kyla vasario – kovo, birželio, rugpjūčio mėnesių oro temperatūros. Tačiau ir šis pokytis yra dar nereikšmingas. Intensyviausiai ir reikšmingai pastaruoju laikotarpiu šyla rugsėjis, lapkritis ir gruodis. Šilimo intensyvumas kiek tai sumažėjo lyginant su praėjusių 5 metų laikotarpiu, bet vis dar viršija 0,06 ℃ per metus.

Apibendrinus metinius temperatūrų parametrus, nustatyta, kad šalčiausi per tiriamąjį laikotarpį buvo 1996, 2003, 2006, 2010, 2017 ir 2022 metai, kada oro vidutinė temperatūra žiemą nukrisdavo žemiau -5°C. Tokiam temperatūros sumažėjimui didžiausios įtakos turėjo žemiausios gruodžio – vasario mėn. temperatūros, kurios buvo žemesnės nei -7°C.

Šilčiausi 2001-2002, 2007, 2014, 2024 ir ypač 2020 m., kai vidutinė oro temperatūra viršijo net 8 °C, kurią reikšmingiausiai sąlygojo rudens ir vasaros mėnesių temperatūros.

Minimalios ir maksimalios mėnesio temperatūros kaitos analizė parodė, kad Aukštaitijos KMS intensyviausiai kyla minimali mėnesio temperatūra, du kartus lėčiau vidutinė mėnesio temperatūra ir stabili išlieka maksimali mėnesio temperatūra. Tai esminiai veiksniai sąlygojantys sėkminga biotos peržiemojimo tikimybę pastaruoju laikotarpiu, kai ypač šylą ramybės laikotarpis.

Žemaitijos NP atskirais metų sezonais pagal oro temperatūros daugiametę kaitą Telšių meteorologinėje stotyje (1994-2025 m.) vidutinė temperatūra rudens ir žiemos laikotarpiu didėjo intensyviausiai, po +0,06°C per 10 m. laikotarpį, kiek mažiau šilo pavasaris ir vasara, po maždaug +0,47 ir +0,41 °C per 10 m. laikotarpį atitinkamai. Lyginant su 2020 m. duomenimis, šiltėjimo intensyvumas reikšmingai slopo ir tik vasaros sezone išliko nepakitęs. ***2020 ir 2024 m. šioje stotyje išskirtiniai. Vidutinė metinė oro temperatūra šioje stotyje pasiekė maksimalią reikšmę per visą tiriamąjį laikotarpį, t.y. 8,6 °C.***

Dzūkijos regione oro temperatūra šilo analogiškai Vakariniam regionui. Intensyviausiai šilo rudens ir žiemos mėnesiai, kai oro temperatūra kilo po 0,82 ir 0,76 °C per dešimtmetį. Kiek silpniau šilo vasaros sezonas – po 0,57 °C per dešimtmetį ir silpniausiai šilo pavasaris – po 0,033 °C per dešimtmetį. Išskirtiniai metai, kaip ir Žemaitijos regione: 2002, 2007, 2014, 2020 ir 2024 m., kai oro temperatūra nuo 8 pakilo iki 9,2 °C. Paskutiniuoju 2020-2025 m. laikotarpiu oro vidutinė temperatūra praktiškai išliko stabili Aukštaitijos ir Žemaitijos regione, Dzūkijos MS duomenimis šiuo laikotarpiu oro temperatūra turėjo nereikšminga tendencija didėti.

Žemaitijos ir Dzūkijos stotyse reikšmingai didėja kovo, birželio rugsėjo ir lapkričio-gruodžio mėnesių vidutinė temperatūra. Abiejose stotyse šis didėjimo trendas siekė ir viršijo 0,08 ℃ per m.

Oro temperatūros kaita iki 2010 m. ir po jų:

Palyginus oro temperatūros kaitą iki 2010 m. ir po jų nustatytas išskirtinis vidutinės mėnesio temperatūros kitimo bruožas Žemaitijos ir Dzūkijos stotyse – visais mėnesiais vidutinė temperatūra per visą tiriamąjį laikotarpį turi tendencija didėti.

Būtent apie 2010 m. aplinkoje įvyko reikšminga aplinkos temperatūrų kaita. Jeigu iki pastarojo laikotarpio tirtiems regionams buvo būdinga nereikšminga temperatūrų žemėjimo kaita sausio – vasario mėnesiais, tai jau po 2010 metų šių mėnesių vidutinė temperatūra didėja siekdama 0,3℃ per metus, o Dzūkijos KM stotyje siekia net ir reikšminga didžiausią lygį sausio mėnesį – po 0,33 ℃ per metus. Tai ypač intensyvus šio mėnesio šilimas.

Vegetacijos pradžioje arti reikšmingo lygmens pradeda šalti gegužės mėnesis, kuris gali neigiamai sąlygoti visus gyvybinius procesus miško ekosistemų biotos ir ypač augalų ir medžių būklę ir prieaugį. Reikšmingiausiai Žemaitijos stotyje, kur iki 2010 m. gegužės mėnesio vidutinė temperatūra didėjo po beveik 0,1℃ per metus, o jau po 2011 m. tokiu pat intensyvumu jau mažėja.

Viduryje vegetacijos ryškėja intensyvėjantis birželio mėnesio šilimas, kai tuo tarpu liepą ir rugpjūtį, temperatūros augimas sulėtėjo ir stabilizavosi arti neutralaus lygio, t.y. apie 0℃ per metus.

Reikšmingai pakito ir rudens mėnesių vidutinės temperatūros kaita. Jeigu iki 2010 m. šių mėnesių vidutinė temperatūra reikšmingai didėjo, tai po 2010 m toks šilimas baigėsi, o lapkričio mėnesio temperatūra net pradėjo žemėti.

Tokia atskirų mėnesių vidutinės temperatūros kaita turėjo turėti reikšmingos įtakos visiems bio- geo- cenotiniams ryšiams ir kaitai, sąlygodami bendrą miško ekosistemų vystymosi kaitą.

Oro temperatūra skirtingame aukštyje:

Skirtingame aukštyje oro temperatūros augimo intensyvumas išlieka tas pats, po maždaug 0,0005 ℃ per mėnesį, ar 0,06 ℃ per metus, ką parodė ir vidutinių metinių temperatūrų kaitos intensyvumo rezultatai.

Vidutinei oro temperatūrai kintant nuo -10 iki +20 °C, minimali temperatūra kinta nuo -30 iki +10°C, o maksimali nuo 0 iki 40 °C. Tai reikšmingi pokyčiai galintys turėti reikšmingos įtakos visiems bio- geo sisteminiams procesams vykstantiems sąlygiškai natūraliose miško ekosistemose.

Vidutinės oro temperatūros 2 m aukštyje sąsajos su temperatūra 8 ir 22 m aukštyje reikšmingai nesiskiria, tik lygties B koeficientas 8 m aukštyje nesiekia 1, o 22 m aukštyje kiek tai viršija 1 reikšmę. Analizuojant vidutinės temperatūros ore ir dirvožemyje sąveikas nustatyta, kad ši tarpusavio priklausomybė turi sezoninį pobūdį. Prie tos paties vidutinės oro temperatūros dirvožemio temperatūra pirmoje metų pusėje reikšmingai mažesnė negu antroje metų pusėje. Šis skirtumas didžiausias ties 10 °C riba ir siekia apie 3 °C, t.y. pavasarį neviršija 8 °C, o rudenį siekia 11 °C.

Dirvožemio temperatūra:

Dirvožemio temperatūra reguliariai stebima tik Aukštaitijos KMS, kur per 27 metų laikotarpį dirvožemio temperatūros (5, 10 ir 20 cm gyliuose) vidutinė reikšmė didėjo nuo 6,1 2001 m. iki 8,7 °C 2024 m. Didžiausios metų vidutinės temperatūros reikšmės buvo 2000, 2007-2011, 2020 ir 2024 m. Neigiamos vidutinės mėnesio temperatūros buvo nustatytos 2006 (II-III), 2010 (II), 2012 (II), 2014 (I-II), 2016 (I), 2017 (II) ir 2018 (II-III), kurie tapo paskutiniaisiais metais, kad vidutinė mėnesio temperatūra vasario mėnesį buvo neigiama. Šis rodiklis tik pasikartojo 2026 m., bet tai jau kitų metų tyrimo rezultatas.

Skirtingai nei tikėtasi lėčiausiai šyla dirvožemio paviršinio sluoksnio t.y. 5 cm gylyje. Gyliui didėjant šilimo procesas pasireiškia intensyviau.

Mažiausias dirvožemio temperatūros vidurkis per žiemos mėnesius buvo 2012 metų vasarį (-1,4°C), o ilgiausiai neigiama temperatūra laikėsi nuo 2002 metų gruodžio iki 2003 metų kovo. Pagal dirvožemio temperatūrą 2012 metai buvo kontrastiškiausi pagal temperatūros svyravimo amplitudę, maksimalias ir minimalias valandines temperatūras per stebėjimų laikotarpį.

2019-2025 m. laikotarpiu dirvožemio vidutinės temperatūros kaitoje jokių ženklesnių tendencijų nenustatyta. Vidutinė temperatūra žiemą nebuvo nukritusi žemiau 0°C I-III mėnesiais. Paskutiniaisiais 2025 metais nustatytas ir vienas mažiausių skirtumų tarp ramybės ir vegetacijos laikotarpių vidutinės mėnesio temperatūros. Panašus rezultatas registruotas ir 2020 metais, bei 2008-2009 m.

Vidutinės metinės temperatūros skirtinguose dirvožemio gyliuose vertės parodė, kad per tiriamąjį 27 metų laikotarpį, vidutinė temperatūra sekliausiame gylyje didėjo po 0,053 °C per metus, 10 cm gylyje po 0,057 °C ir 20 cm gylyje, kur bendra temperatūra buvo didžiausia, po 0,05 °C per metus.

Tuo tarpu antruoju tiriamuoju laikotarpiu, t.y. 2011-2025 ir toliau buvo registruojamas ženklus temperatūros augimo tempas, kuris iš esmės nesiskyrė nuo pradinio 1999-2010 m. laikotarpio. Didžiausios dirvožemio temperatūros registruotos 2011 ir 2020 bei 2024 m. Tai išskirtiniai metai, kurie turėjo turėti reikšmingos įtakos procesams, kurie priklauso nuo oro ir dirvožemio temperatūros kaitos.

Dirvožemio įšalo gylys:

Didelę įtaką medžiagų išplovimui iš dirvožemio turi įšalo gylis ir dirvožemio drėgmės atsargų kaita. Aukštaitijos KMS įšalo gylis viršijantis 20 cm gylį buvo reguliariai registruojamas iki 2013 metų. Nuo 2014 metų nebesusidaro gilesnis nei 20 cm įšalas, o 2019 metais dirvožemio įšalo visai nebuvo užfiksuota; paskutiniuoju laikotarpi įšalo gylis svyravo apie 5 cm.

Nuo 1998 m. periodiškai, kas 3–4 metus, Aukštaitijos stotyje kartojosi šaltos žiemos, kai dirvožemis įšaldavo giliau, negu 30 cm ir įšalas laikėsi keturis ir daugiau mėnesių. Per stebėjimų laikotarpį buvo šešios tokio gilaus ir ilgai trunkančio įšalo žiemos: 1998–1999, 2002–2003, 2005-2006, 2009–2010, 2011-2012 ir 2013-2014 metais. Nors didžiausias įšalo gylis 1998-2014 metais turėjo tendenciją augti, bet įšalo trukmė mažėjo. Nuo 2014 m. stebimas itin reikšmingas dirvožemio įšalo mažėjimas. Jei dar 2014 m. įšalas siekdamas maksimalią reikšmę pasiekė net 28 cm, tai iki 2025 m. įšalo gylis mažėjo ir jau 2020 m. jo iš viso nebuvo registruojama. Tokia įšalo gylio kaita turėjo esminės įtakos dirvožemio drėgniui.

2025 metais dirvožemio drėgmės atsargos 0-20 ir 0-40 cm gylyje Aukštaitijos KMS buvo didžiausios nuo 2003 m., kai turime matavimus vegetacijos laikotarpiu kas 2 savaites. 2025 metais dirvožemio drėgmės atsargos pagal vidurkį ir kaitą metų bėgyje panašios į 2012 metų, bet mažai kintančios. Po sausringų 2015-2016 metų, 11 metų iš eilės dirvožemio drėgnis šiltuoju laikotarpiu tolygiai didėjo. Per pastaruosius 5 metus didžiausi dirvožemio drėgmės kontrastai (vadinasi ir dirvožemio vandens srauto intensyvumas) buvo 2021 ir 2023 metais

Nuo 1999 iki 2014 m. egzistavo glaudus ryšys tarp dirvožemio vidutinio drėgnio ir įšalo gylio. Po išskirtinų 2014 m. ši priklausomybė tapo atvirkštinė, kai drėgniui didėjant įšalo gylis reikšmingai mažėjo, taip kaip ir bendra įšalo trukmė. Tai išskirtinis procesas geosistemoje galintis turėti reikšmingos įtakos bendrai miško ekosistemų tvariai plėtrai.

Palankūs medžiagų išplovimui pavasarį (dėl menko įšalo ir didelio polaidžio vandens kiekio) buvo 2004, 2008, 2009, 2016 ir 2019-2023 metai. Didžiausi dirvožemio drėgnio kontrastai vegetacijos laikotarpiu buvo 2004, 2006, 2015, 2020, 2021 ir 2023 metais.

Paviršinio vandens temperatūra:

Aukštaitijos KMS upelio vandens temperatūra per 27 m. laikotarpį reguliariai didėjo po vidutiniškai 0,055°C per metus, kuris viršijo net oro temperatūros kaitos intensyvumą ore.

Žemaitijos stotyje 22 stebėjimo metų upelio temperatūra praktiškai išlieka stabili, nors oro temperatūra kyla beveik 2 kartus intensyviau negu Aukštaitijos KMS

Didžiausios ir ilgiausiai trukusios upelio vandens temperatūros reikšmės Aukštaitijos stotyje buvo 2009-2010 m. 2010 m. didesnė nei 10°C upelio vandens temperatūra buvo fiksuojama net 2 mėnesius - rugpjūtį ir rugsėjį, bet neviršijo 2009 m. rekordinės reikšmės (10,5°C). 2014 m. vidutinė metinė upelio vandens temperatūra buvo 6,95°C, didžiausia per 1999-2014 m. stebėsenos laikotarpį. Paskutiniuoju laikotarpiu 2020-2025 m. vandens temperatūra neturi aiškesnės tendencijos didėti, nors 2024m. kai buvo registruojami vieni iš šilčiausių metų, vandens temperatūra pasiekė savo maksimaliausią reikšmę –viršijo net 12 °C. Tai galėjo turėti reikšmingos įtakos upelio makro

benntoso rūšių įvairovės ir individų gausos pokyčiams o taip pat ir visiems tirpumo ir išplovimo procesams miško ekosistemoje.

Deguonies kiekis upelio vandenyje:

Aukštaitijos KMS ištirpusio deguonies kiekis upelio vandenyje trejus metus buvo didesnis už vidutinę reikšmę (1999-2008 m. vidurkis 1,89 mg/l), o 2010 metais tapo panašus į vidurkį, 1,60 mg/l. Mažiausiai deguonies upelio vandenyje buvo 2002–2003 m., apie 1 mg/l. 2004–2005 ir 2007–2009 metais ištirpusio deguonies kiekis buvo didesnis už vidurkį dėl upelio vandens temperatūros padidėjimo ir režimo.

2015-2016 m. laikotarpiu registruotas vienas didžiausių vandens prisotinimo deguonimi laipsnių, kuris savo maksimalią reikšmę įgavo 2015 m. liepos ir 2016 m. gegužės mėnesiais – apie 5 mg/l. 2017-2018 m. deguonies kiekis upelio vandenyje stabilizavosi, tačiau buvo mažesnis nei daugiametis vidurkis – apie 2,8 mg/l. 2019 m. deguonies koncentracija Versminio upelio vandenyje išliko praktiškai stabili, nežymiai svyruojant apie 2,38 mg/l ribą. Tai truputį mažiau už daugiametį vidurkį dėl sausros ankstyvą pavasarį ir vegetacijos pradžioje. ***2020m. registruojamas reikšmingas deguonies kiekio padidėjimas Versminio upelio vandenyje. Panašus deguonies kiekis šio upelio vandenyje buvo registruotas tik 1999, 2009 ir 2015 m.***

Paskutiniaisiais 2025 m. registruojamas reikšmingas vandens prisotinimo deguonimi laipsnio mažėjimas, kuris galėjo turėti reikšmingos įtakos makro bentoso rūšinės įvairovės ir gausos pokyčiams.

1.2. Vandens balansas pagrindinėse geosistemos grandyse

Vandens balanso komponentai, įskaitant dirvožemio vandenį, požeminį vandenį ir paviršinį nuotėkį (upelį), yra pagrindiniai miško ekosistemos funkcionavimo elementai. Šie hidrologiniai komponentai yra dinamiškai tarpusavyje susiję ir reguliuoja vandens prieinamumą, maistinių medžiagų ciklą ir ištirpusių medžiagų transportavimą ekosistemoje. Miškinguose baseinuose, ypač oligotrofinėmis sąlygomis, hidrologiniai procesai stipriai kontroliuoja biogeocheminius srautus, nuo ko priklauso ir bendras ekosistemos atsparumas.

Kritulių kiekio ir pasiskirstymo pokyčiai yra vienas iš svarbiausių veiksnių, turinčių įtakos miško vandens balansui. Kritulių kiekio svyravimai tiesiogiai veikia dirvožemio drėgmės prieinamumą, gruntinio vandens papildymą ir nuotėkio susidarymą, todėl keičiasi hidrologinių srautų dydis ir laikas. Padidėjęs kritulių kiekis gali sustiprinti maistinių medžiagų, pvz., azoto ir bazinių katijonų, išplovimą, o tai gali sukelti maistinių medžiagų išeikvojimą dirvožemyje ir padidėjusį eksportą į paviršinius vandenis. Ir atvirkščiai, sumažėjęs kritulių kiekis ir užsitęsę sausros periodai gali apriboti vandens prieinamumą medžiams, apriboti maistinių medžiagų pasisavinimą ir padidinti tirpių medžiagų koncentraciją dirvožemyje ir požeminiame vandenyje (Dirnböck ir kt., 2014; Vuorenmaa ir kt., 2018).

Be to, kritulių režimo pokyčiai turi įtakos teršalų mobilizacijai ir transportavimui. Didelio intensyvumo krituliai gali pagreitinti susikaupusių sulfatų, nitratų ir sunkiųjų metalų išplovimą iš dirvožemio į nuotėkį, o esant mažam srautui, šios medžiagos gali kauptis dirvožemio profilyje (Eklöf ir kt., 2024). Taigi kritulių kiekis ir laiko modelis yra pagrindiniai veiksniai, kontroliuojantys hidrologinių procesų ir cheminės sudėties sąveiką miško ekosistemose.

Šių procesų supratimas yra ypač svarbus vykstančios klimato kaitos kontekste, kuri, kaip tikimasi, pakeis kritulių intensyvumą, dažnumą ir sezoninį pasiskirstymą. Tokie pokyčiai gali turėti didelės įtakos miškų būklei, maistinių medžiagų apykaitai ir medžių rūšių, augančių maistinių medžiagų neturtingomis sąlygomis, prisitaikymo galimybėms slopinti klimato kaitą.

ICP integruota stebėjimo programa suteikia unikalią galimybę vykdyti šios sąveikos analizę, atliekant suderintus ilgalaikius stebėjimus visose Europos miškų ekosistemose. Programa integruoja fizinius, cheminius ir biologinius matavimus keliuose skyriuose, todėl galima atlikti išsamų ekosistemos pokyčių vertinimą (Weldon ir kt., 2026).

Dirvožemio vanduo yra pagrindinis augalams prieinamas drėgmės šaltinis ir yra pagrindinė maistinių medžiagų transportavimo ir biocheminių transformacijų terpė. Jo cheminė sudėtis atspindi atmosferos nusėdimo, dirvožemio procesų ir biologinio įsisavinimo sąveiką. Dirvožemio tirpalo

chemijos stebėjimas leidžia suprasti maistinių medžiagų prieinamumą, rūgštėjimo procesus ir potencialiai toksiškų elementų, tokių kaip aliuminis, mobilizaciją (Forsius ir kt., 2021).

ICP monitoringo aikštelėse reguliariai imami dirvožemio vandens mėginiai, siekiant įvertinti pagrindinių jonų, azoto junginių ir ištirpusios organinės anglies koncentracijas, kurios yra esminiai ekosistemos maistinių medžiagų būklės ir taršos poveikio rodikliai (Weldon ir kt., 2026).

Gruntinis vanduo yra ilgalaikio hidrologinio ciklo saugojimo komponentas ir vaidina apsauginį vaidmenį išgyvenant naujas klimato kaitos sąlygotas grėsmes. Šiame vandenyje kompleksiškai sumuojasi procesų vykstančių dirvožemyje rezultatus, todėl atspindi uždelstą atsaką į atmosferos iškritas ir jų transformacijas ekosistemose. Tokiu būdu šių vandenų cheminę sudėtį sąlygoja oro sąlygos, dirvožemio ir vandens sąveika bei biologiniai procesai. Miško ekosistemose gruntinio vandens chemija dažnai atspindi dirvožemio vandens tendencijas, tačiau dėl ilgesnio buvimo laiko kintamumas yra lėtesnis (Vuorenmaa ir kt., 2018). ICP monitoringas apima periodinį gruntinio vandens mėginių ėmimą, siekiant įvertinti maistinių medžiagų išplovimą ir teršalų pernešimą baseinuose (Weldon ir kt., 2026).

Paviršinis nuotėkis, įskaitant nedidelius upelius, yra pagrindinis vandens ir tirpių medžiagų eksporto iš miško ekosistemų kelias. Jis sujungia hidrologinius ir biogeocheminius procesus, vykstančius visame baseine. Jo cheminė sudėtis yra pagrindinis ekosistemos maistinių medžiagų išplovimo ir teršalų eksporto rodiklis. Tokie parametrai kaip sulfatas, nitratas, baziniai katijonai, ištirpusi organinė anglis ir sunkiųjų metalų koncentracijos yra reguliariai matuojami, siekiant kiekybiškai įvertinti elementų srautus ir įvertinti ekosistemų reakciją į aplinkos pokyčius (Vuorenmaa ir kt., 2017). Ilgalaikiai ICP duomenys parodė reikšmingas sieros ir azoto srautų tendencijas, atspindinčias atmosferos nusėdimo sumažėjimą ir ekosistemų procesų pokyčius (Vuorenmaa ir kt., 2018).

Norint įvertinti miško ekosistemos būklę ir tvarumą, būtina suprasti vandens balansą ir cheminę sudėtį. Hidrologiniai procesai reguliuoja maistinių medžiagų prieinamumą, kontroliuoja teršalų pernešimą ir sąlygoja medžių augimą bei jų atsaką į stresą.

Tokiu būdu ICP integruoto stebėjimo duomenys suteikia naujų žinių apie ilgalaikes tendencijas ir ekosistemų reakciją į aplinkos pokyčius, įskaitant atsigavimą po rūgštėjimo, azoto nusėdimo poveikį ir klimato sąlygotus hidrologijos pokyčius (Weldon ir kt., 2026; Forsius ir kt., 2021). Šie duomenys remia ekosistemomis pagrįstų valdymo strategijų kūrimą ir prisideda prie tarptautinės aplinkos politikos struktūrų.

Integruoto monitoringo teritorijose Lietuvoje, dviejose sąlygiškai natūraliose ekosistemose Aukštaitijos nacionalinio parko Ažvinčių girios rezervate (nuo 1993 m.) ir Žemaitijos nacionalinio parko Plokštinės girios rezervate (nuo 1995 metų) stebima ekosistemų būklė. Ekosistemos būklės pokyčiai įvertinami pagal pamatinių ekosistemos elementų dirvožemio, dirvožemio vandens, gruntinio vandens cheminės sudėties dinamiką. Analizuojant šiuos duomenis drauge su kritulių duomenimis, vertinamas su tolimomis pernašomis į Lietuvos teritoriją patenkančių teršalų kaupimasis ir pakitimas dirvožemyje, nustatomas medžiagų išplovimo iš dirvožemių režimas, migracijos keliai ir teršalų patekimas į gruntinį vandenį, bei išnešimas upeliais į paviršinio vandens telkinius. Dabartiniu metu dirvožemio sudėties, upelio, dirvožemio vandens ir gruntinio vandens režimo ir sudėties stebėsena rodo ir klimato pokyčių pasekmes.

Šie duomenys naudingi, sudarant balansus ir modelius, pagal kuriuos įvertinamas antropogeninės veiklos ir klimato kaitos poveikis natūralioms ekosistemoms ir prognozuojama jų būklė ateityje. Sąlygiškai natūralių ekosistemų monitoringo duomenis galima naudoti kaip atskaitos tašką, vertinant regioninę taršą, jungti į globalios taršos vertinimo sistemą.

Vykdydamas "Gruntinio, dirvožemio bei paviršinio vandens ir dirvožemių tyrimas pagal ICP KM programą**",** Gamtos tyrimo centro Geologijos ir geografijos instituto mokslininkė dr. Ieva Baužienė atliko tokius techninėje užduotyje numatytus darbus:

1. koregavo, apdorojo ir kartu su Aplinkos apsaugos agentūros darbuotojais tikrino dirvožemio vandens, gruntinio vandens ir upelių vandens cheminės analizės duomenis;

2. nustatė vandens balanso nuotėkio sudedamąją (vandens srautai dirvožemio ir gruntiniame vandenyje) Aukštaitijos ir Žemaitijos KM stočių baseinuose ir išaiškino pagrindines jos kaitos tendencijas bei priežastis;

3. nustatė ištirpusių maistinių medžiagų (azotas ir fosforas) ir sieros balansų nuotėkio sudedamąsias Aukštaitijos ir Žemaitijos KM stočių baseinuose ir išaiškino pagrindines jos kaitos tendencijas bei priežastis;

Atliekant tyrimus, vadovautasi ICP KM programos ir ICP KM Vadovo kompleksiniam monitoringui (Manual for Integrated Monitoring. Convention on Long-range Transboundary Air Pollution of the UNECE, International Cooperative Programme on Integrated Monitoring of Air Pollution Effects on Ecosystems. Compiled by the ICP KM Programme Centre Finnish Environment Institute, Helsinki, Finland. Original version August 1998, 2010.

Objektas ir metodika

Kompleksiniai dirvožemio vandens, gruntinio vandens bei upelių vandens cheminės sudėties tyrimai atliekami mažų upelių baseinuose, esančiuose Aukštaitijos (LT01) ir Žemaitijos (LT03) nacionaliniuose parkuose – tose vietose, kur antropogeninis poveikis yra mažiausias visoje Lietuvoje. Daroma prielaida, kad baseinai hidrologiškai yra uždari. Detalus upelių baseinų fizinis-geografinis, klimatinių rodiklių aprašymas, teminiai žemėlapiai, darbų vykdymo ir cheminių analizių metodikos pateiktos Geografijos instituto ataskaitose (Dirvožemių…, 1993, Dirvožemių…, 1994, Dirvožemių…, 1995).

Pastovūs dirvožemio vandens, gruntinio vandens bei upelių vandens cheminės sudėties stebėjimai Aukštaitijos nacionalinio parko integruoto monitoringo teritorijoje (NP IMT) pradėti 1993 metų rudenį, o Žemaitijos NP IMT – 1995-jų metų pavasarį.

Nuo 1999.01.04 Aukštaitijos nacionaliniame parke, Rūgštėliškio kaime, kuris yra už 4,5 km į Šiaurės rytus nuo Integruoto monitoringo teritorijos (10 km iki Tauragnų miesto, 17 km nuo Ignalinos MS ir 21 km nuo Dūkšto MS) įkurta meteorologinė stotis. Šalia meteorologinės stoties aikštelės buvo instaliuoti trys PT1000 dirvožemio temperatūros matavimo davikliai , kuriais imta matuoti dirvožemio temperatūrą 20, 10, ir 5 cm gyliuose. 2001.10.30 – dirvožemio temperatūrą matuojantys PT1000 davikliai perkelti už 100 m, į miško dirvožemį, o 2012.01.18 PT1000 dirvožemio temperatūros matavimo davikliai pakeisti kitais, automatiniais davikliais (*Campbell Scientific* 107 temperatūros matavimo zondai su *BetaTherm* 100K6A termistoriais).

Dirvožemio vandens mėginiai cheminei analizei imami kas mėnesį šiltuoju metų laikotarpiu. Tuo pačiu apskaičiuojamas ir dirvožemio vandens nuotėkis iš 1 km^2 20 cm ir 40 cm gyliuose. Jei žiemą dirvožemis būna neįšalęs ir kartojasi dažni atlydžiai, vandens pavyzdžiai imami ir dirvožemio vandens nuotėkis skaičiuojamas tuo pačiu periodiškumu.

Suomių tyrėjai 1997–1998 metais, finansuojant Šiaurės šalių ministrų tarybai (Nordic Counsil of Ministers), vykdė programą "The Integrated Groundwater Monitoring Network in the Baltic and Nordic Countries" ir įrengė du standartinius, uždaro tipo lizimetrus, kurie Žemaitijos IMT veikia iki šiol ir vadinami didžiuoju ir mažuoju suomių lizimetrais.

Didysis suomių lizimetras yra 140 cm skersmens ir 170 cm gylio (pagamintas iš stiklo pluošto) bei skirtas infiltracinio vandens debitui stebėti. Iš lizimetro dugno susikaupęs vanduo plastiko vamzdžiu nuteka i rinktuvą namelin, kur *kas savaitę* išmatuojamas jo tūris. Debito matavimai atliekami nuo 1998 lapkričio 11 dienos. Kritulių kiekiui, patenkančiam į lizimetrą, stebėti salia jo (už 1 metro įrengtas kritulmatis). Matuojamas per savaitę susikaupęs kritulių kiekis.

Mažasis suomių lizimetras yra pagamintas iš plastikinio 56 cm skersmens ir 70 cm ilgio vamzdžio ir naudojamas infiltracinio vandens kiekio ir cheminės sudėties stebėjimui. Kitaip, nei seklieji lizimetrai (20 ir 40 cm), mažasis suomių lizimetras stebėjimo laikotarpiu dar nebuvo užšalęs (gylis 70 cm). Jis yra uždaras, sujungtas vamzdžiu su nameliu, kuriame yra indas vandeniu. *Kas mėnesį* nustatomas prasifiltravusio vandens tūris ir paimamas 1 litro mėginys cheminei analizei laboratorijoje.

Du kartus per mėnesį nustatomas dirvožemio drėgnumas 20 ir 40 cm gyliuose.

Aukštaitijos stebėsenos stotyje (LT01) 1998–2011 metais dirvožemio drėgmės nustatymui buvo naudotas: 01.01 -05.13d. laikotarpiu elektroninis dirvožemio drėgmės matuoklis Watermark ir stacionariai įrengti šeši dirvožemio drėgmės davikliai po tris 20 cm. gylyje ir 40 cm gylyje. Nuo 2011.05.13 buvo instaliuoti nauji, tikslesni Theta Probe ML2x dirvos drėgmės davikliai ir jų nuskaitymui pradėtas naudoti Delta-T firmos HH2 drėgmės matavimo prietaisas. Naudojant Wattermark matuoklį dirvožemio drėgnumas buvo matuojamas santykinėje 200 vnt. skalėje, o vėliau perskaičiuojamas į % dirvožemio drėgmę. Pradėjus naudoti naujus Theta Probe ML2x daviklius dirvožemio drėgnumas yra tiesiogiai matuojamas procentinėje išraiškoje. Norint suderinti senųjų ir naujųjų daviklių parodymus; matavimai senąja ir naująja įranga 2011 balandžio–spalio mėnesiais buvo dubliuojami.

Žemaitijos stebėsenos stotyje (LT01) 1998–2010 metais dirvožemio drėgmė buvo nustatoma gravimetriškai, o nuo 2011 metų, kaip ir Aukštaitijos stotyje, instaliuoti Theta Probe ML2x davikliai. Kontrolė senuoju, gravimetriniu metodu buvo 2011 metų gegužės ir lapkričio mėnesį. Rezultatai, gauti naująja įranga ir 2011, ir 2012 metais Žemaitijos stebėsenos stotyje neatitiko senuoju (gravimetriniu) metodu gautų duomenų, t.y. sudarė apie 70 %. Galimai dirvožemio drėgmės davikliai buvo instaliuoti tokioje vietoje arba gylyje, kuris neatitinka gravimetriniu metodu rinktų duomenų.

Gruntinio vandens mėginiai imami 6 kartus per metus, gruntinio vandens lygis matuojamas kas 2 savaites.

Upelių vandens mėginiai cheminei analizei imami kas mėnesį visus metus, pagal saviraščių duomenis apskaičiuojami kasdieniai upelių debitai. Upelių vandenyje kas mėnesį išmatuojamas ištirpusio deguonies kiekis.

Visose trijose vandens mėginių rūšyse (dirvožemio, gruntinio ir upelio) nuo stebėjimų pradžios reguliariai analizuojama SO_4, NO_3N, NH_4N, Ca, Na, K, Mg, Cl, $P_{visuminis}$, Mn, Fe, Si, pH. Nuo 2000 metų matuojamas fosfatų fosforo (PO_4P), ir visuminio azoto ($N_{visuminis}$) kiekis, nuo 2002 m. pradėta matuoti visuminį aliuminio kiekį, o nuo 2003 m. – visuminį organinės anglies kiekį. Nuo 2000 metų vidurio visose paprogramėse, 3 kartus per metus, balandžio, liepos ir spalio mėnesiais pradėta matuoti

sunkiųjų metalų (Cu, Cr, Cd, Pb, Zn, Ni) kiekius gamtiniame vandenyje. Iš viso nustatomi 23 cheminiai parametrai.

Visi mėginiai imami ir jų cheminės analizės atliekamos vadovaujantis vieninga metodika (The Working…, 1989, Environment…, 1993, ICP IM…, 1998), pagal kurią dirba ir kitos integruoto monitoringo programoje dalyvaujančios šalys.

Duomenys analizuojami palyginant svertinius metų vidurkius, rangų ir koreliacijų metodais.

Dirvožemio vandens nuotėkis skaičiuojamas pagal lizimetro darbinį plotą.

Gruntinio vandens dinaminiai ištekliai apskaičiuojami pagal formulę (Сакалаускене, 1969):

$$Qd = \sum \mu \cdot F \cdot \Delta h$$

Qd dinaminiai ištekliai, μ – vandens atidavimo koeficientas, *F – plotas,* Δ *h* – lygio metinė amplitudė. Požeminis nuotėkis (*Q*) apskaičiuotas:

$$Q = \frac{Qd}{365 - t}$$, *kur t laikas, kai gruntinio vandens lygis kyla.*

Baseino plotas Aukštaitijos integruoto monitoringo stotyje yra patikslintas pagal santykinai inertiškos medžiagos (sulfatų) balansą ekosistemoje (Baužienė, 2005) Chloridų balanso nebuvo galima apskaičiuoti, nes nebuvo duomenų apie chloridus kritulių vandenyje.

Plotas gruntinio vandens dinaminių atsargų skaičiavimui yra nustatytas pagal gręžinių altitudes, darant prielaidą, kad teritorijose, vienodai pakilusiose virš jūros lygio, gruntinio vandens lygio svyravimo amplitudės yra panašios.

Viso baseino vandens balansas sudarytas pagal supaprastintą lygtį ir apskaičiuotas bendras garavimas:

$$ET = Pt - qt \pm \Delta S,$$

Čia: *ET* – bendras garavimas, *qt* – nuotėkis, ΔS - vandens atsargų (dirvožemio drėgnio) pokytis dirvožemyje per laikotarpį t (Ruseckas, 2008).

Dėmens ΔS reikšmės nustatymas yra problematiškas, nes dirvožemio drėgnumas per metus (dažniausiai pavasarį-vasarą) mažėja ne tik dėl nuotėkio į gruntinius vandenis (aeracijos zoną), bet ir dėl transpiracijos (Dobkevičius, 2001). Dydis ΔS bendro garavo formulėje visada pridedamas prie transpiracijos, nes gruntinio vandens sistema pasipildo dirvožemio vandeniu pavėluotai ir neproporcingai dirvožemio vandens nuotėkiui. Taigi, mūsų skaičiavimuose bendrojo garavimo reikšmė yra perdėtai aukšta. Daryta prielaida, kad metų pradžioje, kai žemės paviršių dengia sniegas, šaltuoju sezonu, vandens išgaravimas iš dirvožemio lygus nuliui, drėgmės pokyčiai (ΔS) dirvožemyje vyksta tik dėl gravitacinės drėgmės judėjimo į gruntinius vandenis.

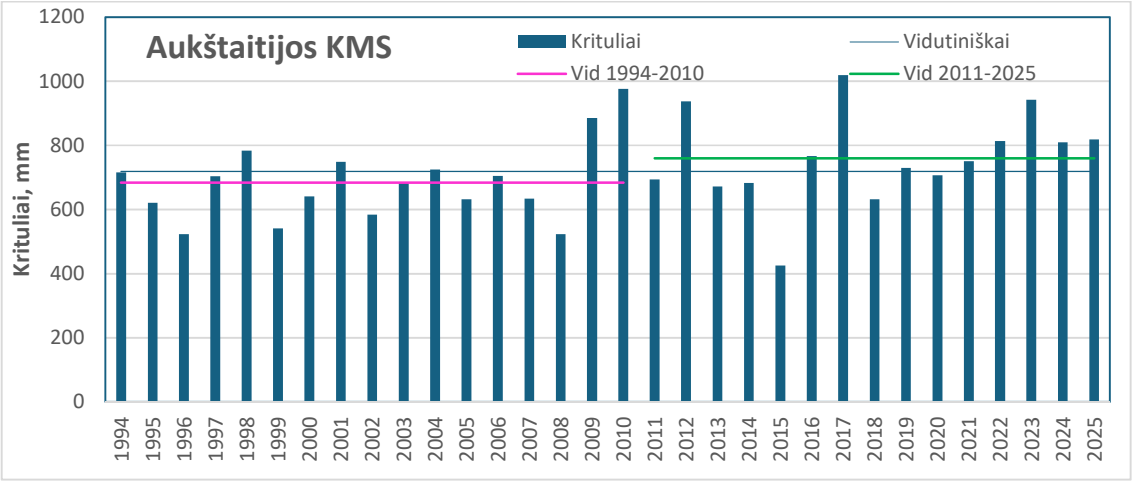
2025 m. papildomai buvo atnaujintas vandens mėginių rinkimas 3 gylių gruntiniuose vandenyse ir dirvožemio paviršiniame horizonte (kvadrate) bei profilyje. Sutvarkyta upelio užtvanka paviršinio vandens debitui ir cheminėms analizėms vykdyti. Kritulių kiekio ilgalaikiai dinamikai stebėti panaudoti Varėnos meteorologinės stoties duomenys.

1.2.1. Kritulių kiekio dinamika KM stočių teritorijose

Aukštaitijos KMS per paskutiniuosius 40 m. kritulių kiekis pagal Dūkšto MS duomenis didėjo po 1 mm per metus, tačiau ši kaita buvo nereikšminga ($p<0,05$). Per tiriamąjį laikotarpį (1993-2010 m.) šioje MS stotyje kritulių kiekis kito intensyviau, t.y. didėjo po 6 mm per metus, o Aukštaitijos KMS beveik po 4,3 mm per metus. Kritulių kiekis klimatinę normą (1972-2010 m. vidurkį) viršijo 1998, 2000, 2005 ir 2010 m., o nesiekė 1992, 1996, 1999, 2006 ir 2008 m.

Tiriamuoju laikotarpiu 2010 m. Aukštaitijoje iškrito daugiausiai kritulių per visą stebėjimų laikotarpį, 33% daugiau, negu stebėjimo laikotarpio vidurkis. Didžioji kritulių dalis iškrito vegetacijos laikotarpiu, t.y. birželio-rugpjūčio mėnesiais.

2011-2015 m. laikotarpiu stebimas ryškus kritulių kiekio mažėjimas visais metų laikais. Dėl šios priežasties ir 22 m. kritulių sumos kaita rodo, kad kritulių kiekis pradėjo mažėti. 2015 m. dėl sausros, kritulių kiekis Aukštaitijos KMS buvo mažiausias per visą tiriamąjį laikotarpį. Šiais metais susidarė tik 425 mm Aukštaitijos KMS ir 670 mm Žemaitijos KMS. 2016 m. birželio mėn. taip pat buvo pradėtas registruoti sausros periodas, bet liepos mėn. pradžioje krituliai jį nutraukė. Per 2016 m. iškritusių kritulių kiekis prilygo daugiametei normai.



1.17 pav. Kritulių kiekio kaita ir palyginimas su daugiamečiais vidurkiais: 1993-2025; 1993-2010; 2011-2025.

2017 m. galima būtų įvardinti kaip perteklinės drėgmės metais. Šiais metais kritulių kiekis Aukštaitijos KMS viršijo 1000 mm. Tai rekordinis kritulių kiekis per paskutiniuosius 25 metus.

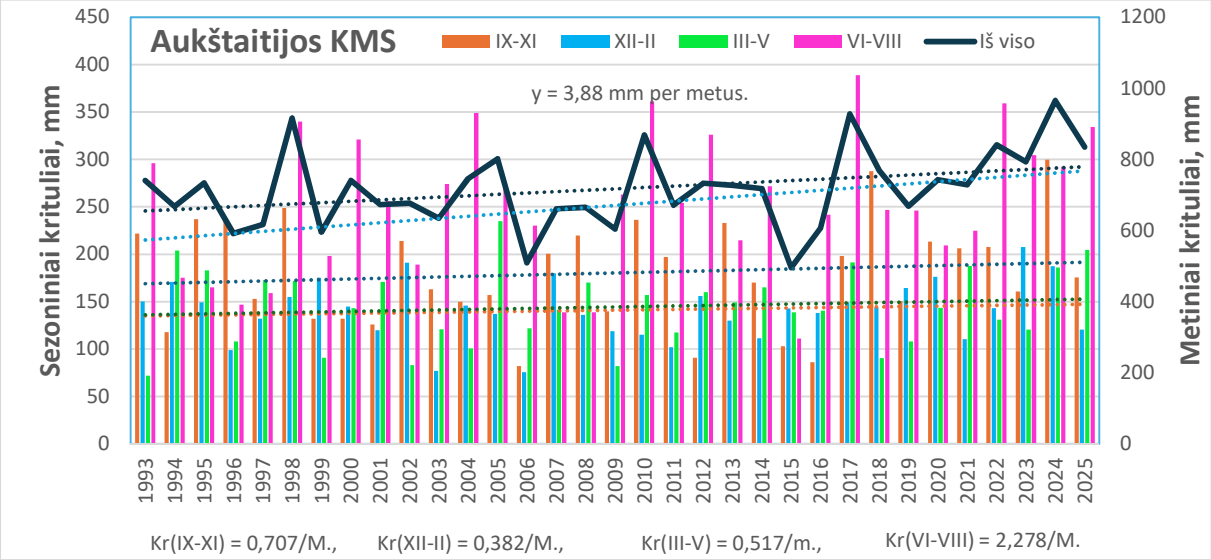
2018 m. vėl pasikartojo sausra, tik ji nebuvo tokia reikšminga kaip 2015 m.

2019-2020 m. kritulių normą vėl viršijo daugiametį vidurkį, dėl ko ekosistemoje po bepasikartojančių sausrų vėl turėjo atsikurti vandens lygis. Tokia kritulių kiekio kaita turėjo esminės įtakos biogeocheminiams procesams ir vandens srautams ekosistemoje, kurie savo ruožtu reikšmingai sąlygojo tiriamų biotos komponentų būklę, rūšinę įvairovę, gausumą ir medžių produktyvumą.

Paskutinysis 5 metų laikotarpis (2021-2025 m.) pasižymėjo išskirtinai didesniais kritulių kiekiais lyginant per visą tiriamąjį laikotarpį. Metinis kritulių kiekis viršijo 700 mm. Išskirtiniai 2023 m. kai kritulių kiekis viršijo ir 900 mm riba. Tokiu būdu per 33 metų laikotarpį kritulių kiekio kaitoje nustatyta kritulių kiekio didėjimo tendencija, kuri pasireiškė 3,9 mm per metus didėjimo intensyvumu.

Atskirais sezonais skirtingai negu buvo nustatyta ankstesnėse ataskaitose, kritulių kiekis tiriamuoju laikotarpiu rudenį didėjo po 0,7 mm per m., žiemą po 0,38 mm per m., pavasarį po 0,52 mm per m. ir vasarą po 2,28 mm per mm. Kaip rodo gauti rezultatai ypač intensyviai didėjantis kritulių kiekis vegetacijos laikotarpiu turėjo turėti reikšmingos įtakos visos miško ekosistemos biotos kaitai.

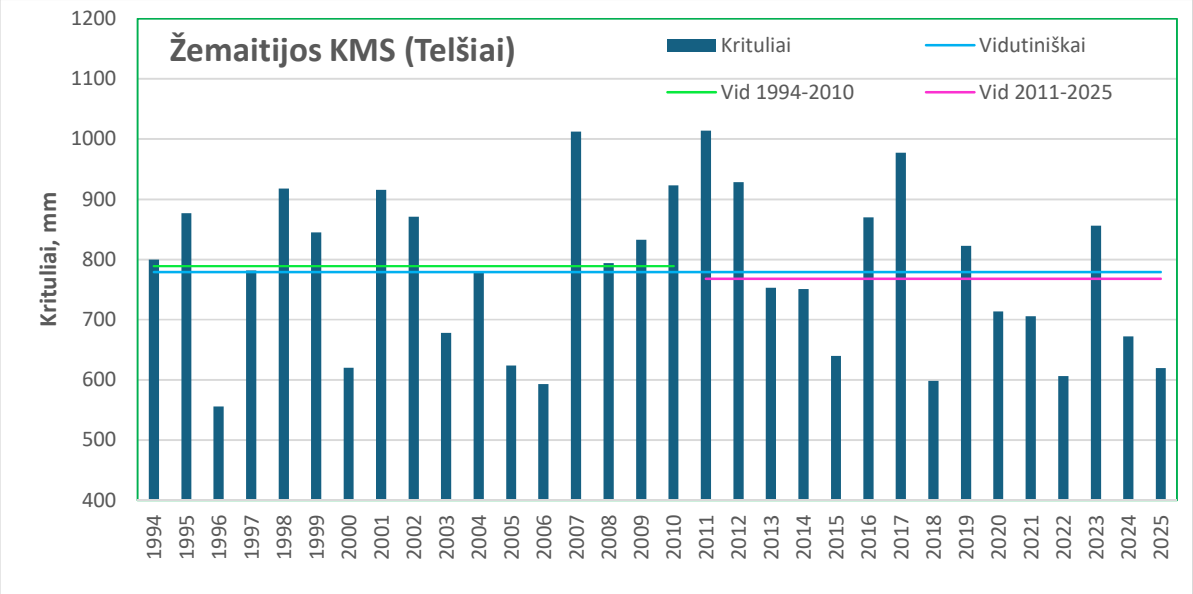
Apibendrinus gautus rezultatus nustatyta, kad jei Aukštaitijos KMS metinis kritulių kiekis per 27 m. laikotarpį didėjo po beveik 1 mm per metus, tai įskaitant paskutiniuosius 5rius metus, kiekio didėjimo tendencija dar labiau išaugo ir paskutiniuoju laikotarpiu siekia jau beveik 4 mm per m.



1.18 pav. Įvairių sezonų ir metinių kritulių kiekio kaita Aukštaitijos KMS 1994-2025 m.

Jei dar 2020 m. buvo mėginama informuoti apie naujai kylančią grėsmę miško ekosistemos, dėl beprasidedančio drėgmės trūkumo, tai paskutinieji 2021-2025 metai paneigė šias prognozes. Dėl intensyviai didėjančio kritulių kiekio Aukštaitijos KMS miško ekosistemos žymiai geriau yra aprūpinamos vandens atsargomis, kas turėjo turėti reikšmingos įtakos visos miško ekosistemo būklei ir jos atsparumui nepalankiems aplinkos veiksniams.

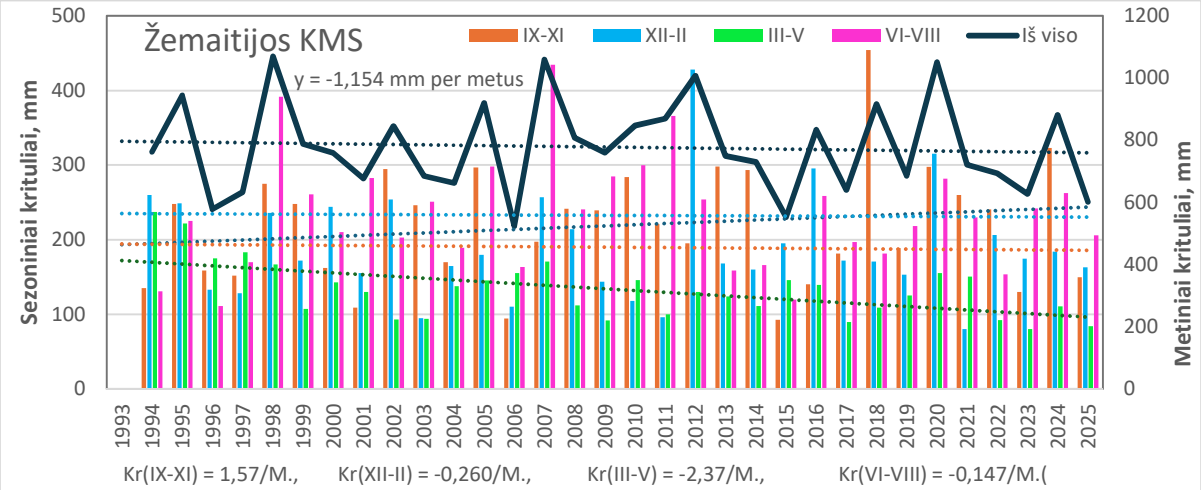
Žemaitijos KMS stebėjimų stotyje metinis kritulių kiekis klimatinę normą (daugiametį 1972-2010 m. vidurkį Vėžaičių meteorologinė stotis, 906,8 mm) viršijo 1995, 1998, 2002, 2005, 2007, 2010-2012m., o paskutiniuoju laikotarpiu tik 2017 m., 2020m. ir 2023 m. Žemiau vidutinės reikšmės kritulių kiekis buvo registruojamas 1992, 1996, 2006 ir ypač 2015, 2018, 2022 ir 2025 m. (1.19 pav.).



1.19 pav. Kritulių kiekio kaita ir palyginimas su daugiamečiais vidurkiais: 1993-2025; 1993-2010; 2011-2025.

Paskutiniųjų 5rių metų laikotarpiu kritulių kiekis arti minimumo buvo registruojamas 2022 ir 2025 metais. Dėl šios priežasties reikšmingas tapo kritulių kiekio mažėjimas nuo 2007 ar 2011 metų. Tai kaip jau buvo minėta 2020 m. ataskaitoje, šiame Vakariniame Lietuvos regione mažėjantis kritulių kiekis gali būti ir toliau įvardijamas kaip kylanti ar jau egzistuojanti grėsmė visoms natūralios ekosistemoms.

Per visą tiriamąjį 1994-2025 m. laikotarpį kritulių kiekis Žemaitijos KMS pradėjo mažėti po 1,15 mm per metus. Atskirais metų sezonais kritulių gausėjo tik rudenį, kai jų kiekis augo po 1,6 mm per m. Likusiais sezonais buvo registruojamas kritulių kiekio mažėjimas: žiemą po 0,26 mm per m., pavasarį po -2,4 mm per m., vasarą po -0,15 mm per m.

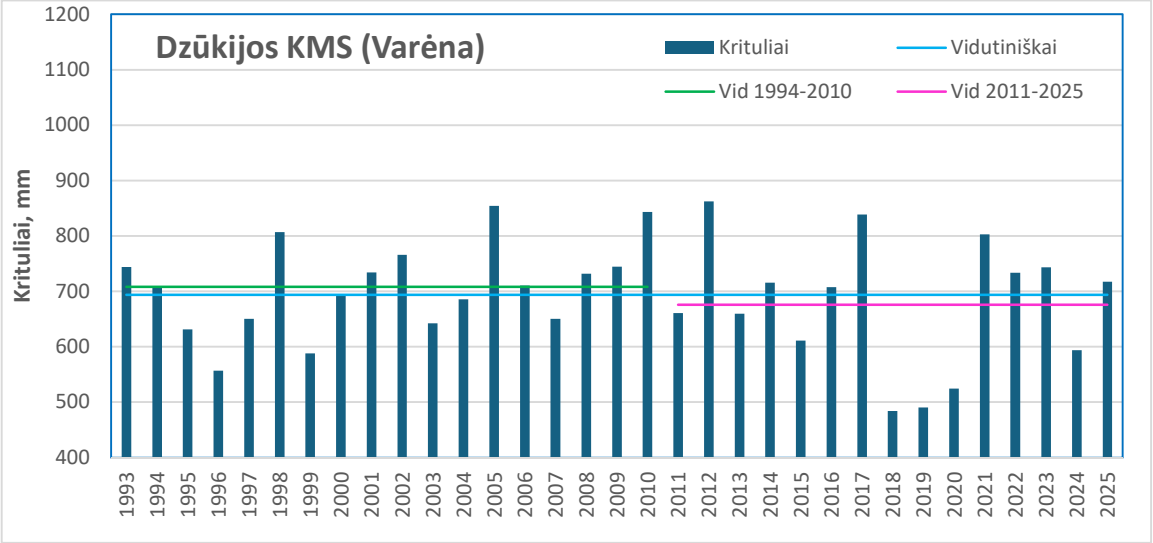


1.20 pav. Įvairių sezonų ir metinių kritulių kiekio kaita Žemaitijos KMS 1994-2025 m.

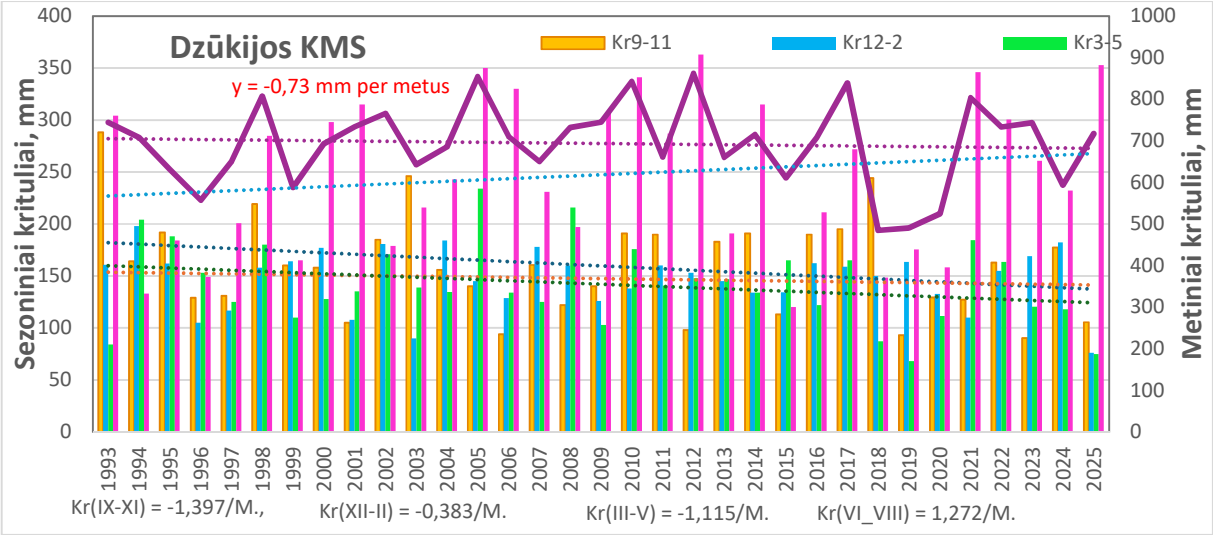
Tokiu būdu, jei dar 2020 m. buvo teigiama, kad Žemaitijos KMS metinis kritulių kiekis per 27 m. laikotarpį didėjo ypač reikšmingai, t.y. po 1,7 mm per metus ir šis intensyvumas palaipsniui auga, tai jau po paskutiniųjų 5rių metų laikotarpio, kritulių dinamika pasikeitė iš esmės, dėl reikšmingo kritulių kiekio sumažėjimo ir ypač 2023 ir 2025 metais.

Dzūkijos KMS kritulių kiekio kaitos analizė atlikta Varėnos MS duomenų pagrindu. Nustatyta, kad kompleksiško programos veiklos laikotarpiu nuo 1993 iki 2025 m., kritulių kiekis turėjo tendencija mažėti po 0,73 mm per m. Didėjo tik kritulių kiekis vegetacijos laikotarpiu po 1,3 mm per m. Likusiais metų sezonais kritulių kiekis mažėjo: rudenį po -1,4 mm per m., žiemą po -0,4 mm per m. ir pavasarį po -1,12 mm per m. Ar vegetacijos laikotarpiu didėjantis kritulių kiekis kompensuos jų mažėjimą likusiais sezonais ir ar tai turės reikšmingos įtakos visiems bio- geo sisteminiams procesams miško ekosistemoje parodys ateities tyrimų rezultatai.

Apibendrinus galima konstatuoti, kad pagrindinė grėsmė miško ekosisteminiams procesams ir biotos komponentų būklei gali būti mažėjantis kritulių kiekis Dzūkijos KMS ir ypač Žemaitijos KMS. Didėjantis kritulių kiekis Aukštaitijos KMS, atvirkščiai, turėtų sąlygoti padidintus miško ekosistemos gebėjimus išgyventi stresą bei jos geresnę būklę ir prisitaikymą prie intensyviai kintančios aplinkos. Tokie du priešingi procesai vykstantys ekosistemose sudaro galimybes tirti biotos ekofiziologines reakcijas į besikeičiančią aplinką skirtingose augaviečių tipuose bei klimatiniuose rajonuose.



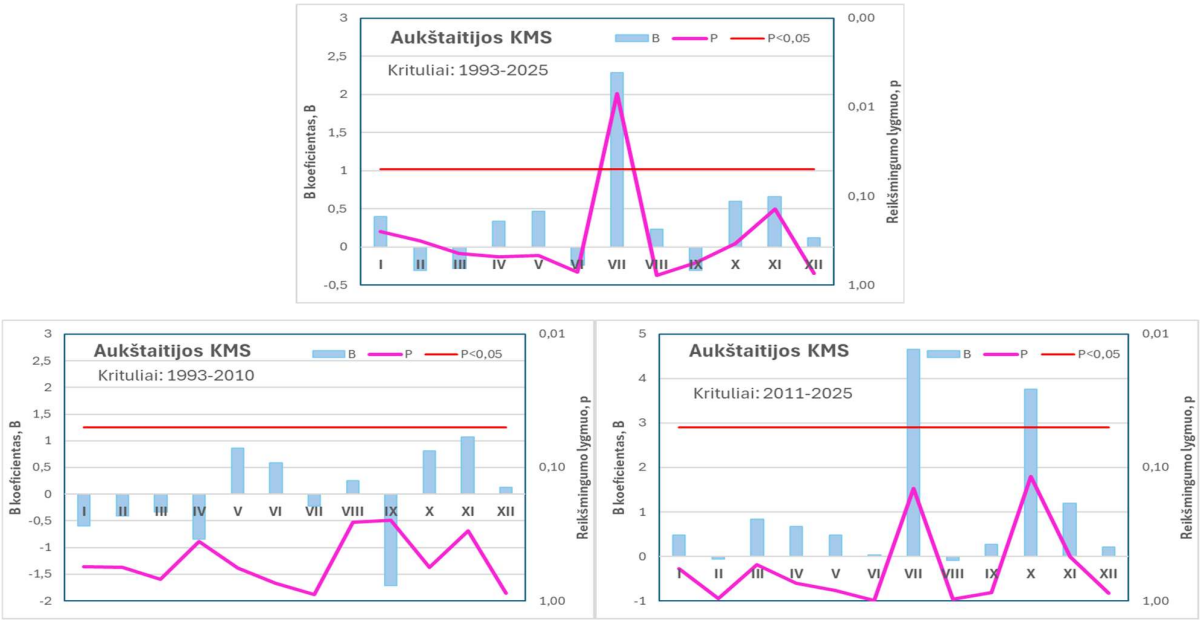
1.21 pav. Kritulių kiekio kaita ir palyginimas su daugiamečiais vidurkiais: 1993-2025; 1993-2010; 2011-2025.



1.22 pav. Įvairių sezonų ir metinių kritulių kiekio kaita Dzūkijos KMS 1993-2025 m.

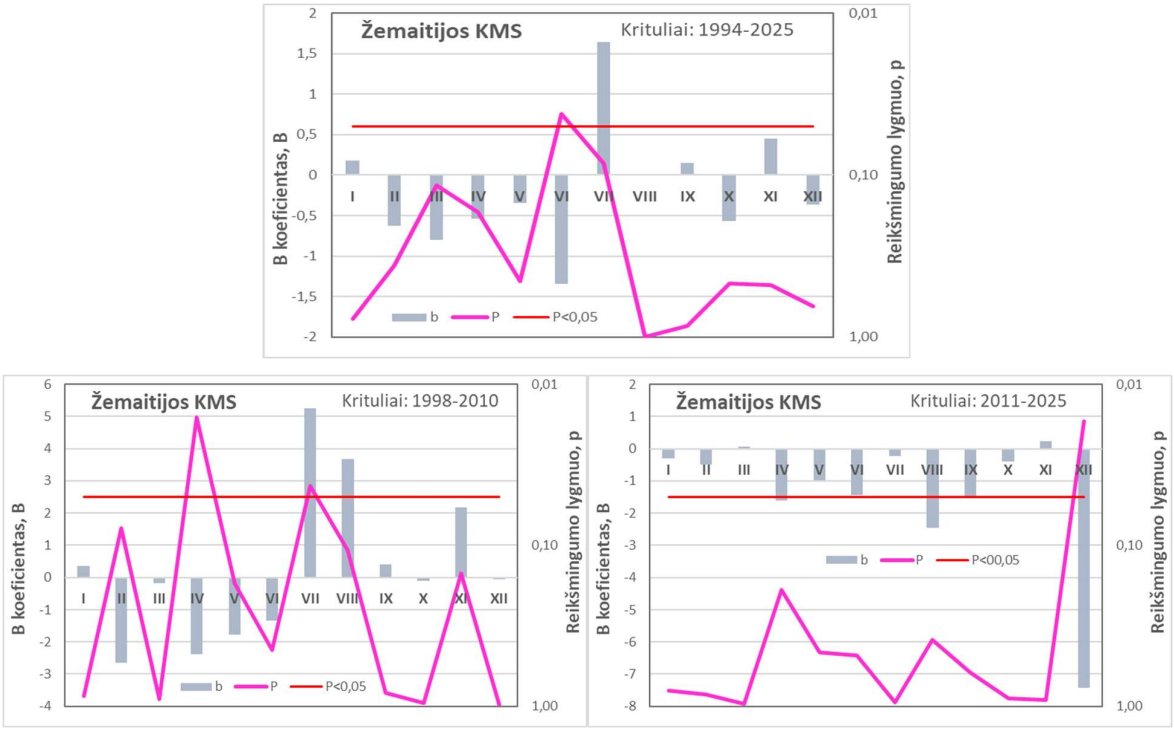
Norėdami detaliau išanalizuoti kritulių kaitos ypatumus išanalizuoti buvo mėnesiniai kritulių kiekiai per visą tiriamąjį laikotarpį, palyginant kaitos pobūdį ir intensyvumą iki 2011 metų ir po 2011 metų. Tyrimų rezultatai parodė, kad Aukštaitijos KMS tiriamuoju laikotarpiu reikšmingiausiai kito kritulių kiekis liepos mėnesį, demonstruodamas reikšmingą didėjimą po +2,3 mm per metus. Likusiais mėnesiais registruoti tiek kritulių kiekio mažėjimo, tiek ir didėjimo tendencijos kurių reikšmingumas nesiekė 0,1. Kritulių didėjo sausio, balandžio, gegužės, rugpjūčio ir spalio-gruodžio mėnesiais, o mažėjo vasario-kovo ir rugsėjo mėnesį.

Palyginus skirtingus laikotarpius iki 2010 ir po 2011 metų rezultatus išryškėjo esminiai skirtumai kurie galėjo turėti reikšmingos įtakos tiek ir cheminių komponenčių tiek ir biotos komponentų kaitos intensyvumui ar net ir bendram ekosistemos tvarumui ar atsparumui išgyventi stresą. Pirmuoju laikotarpiu kritulių kiekis mažėjo žiemos ir ankstyvo pavasario mėnesiais, tai jau antruoju laikotarpiu šiuo laikotarpiu kritulių kiekis didėja. Reikšmingas pokytis įvyko rugsėjo mėn. kritulių kaitoje, kai paskutiniuoju laikotarpiu kritulių mažėjimas stabilizavosi. Rudens ir ankstyvos žiemos laikotarpiu kritulių kiekio didėjimas, nors ir nereikšmingas išlieka. Reikšmingiausias pokytis įvyko liepos mėn. kritulių, kuris nuo 2011 metų pradėjo didėti po beveik 5 mm per m., kas turėjo turėti reikšmingos įtakos visai Aukštaitijos KMS augalijai, jos būklei ir produktyvumui.



1.23 pav. Mėnesių kritulių kiekio kaita, jos intensyvumas ir reikšmingumas Aukštaitijos KM stotyje: per visą tiriamąjį laikotarpį ir pradinį (1993-2010 m.) bei pastarąjį (2011-2025 m.).

Žemaitijos KMS kritulių kiekio kaitoje stebimos reikšmingai besiskiriančios analogiškos tendencijos, tačiau kaitos reikšmingumas iš esmės skiriasi. Kritulių taip pat kaip ir Aukštaitijos KMS mažėja vasario – birželio mėnesiais, tačiau jei Aukštaitijos KMS ši kaita buvo nereikšminga, tai Žemaitijos KMS birželio mėn. kritulių kiekis mažėja net po beveik 2 mm per metus, ir šis mažėjimas yra jau reikšmingas. Antra vertus intensyviau negu Aukštaitijos KMS didėja likusių mėnesių kritulių kiekis. Tokios kaitos rezultatas – 1,7 mm per metus didėjantis kritulių kiekis, kuris buvo nustatytas 2020 m. 2017-2020 m didėjantis kritulių kiekis turėtų teigiamai sąlygoti miško biotos gausos, rūšių įvairovės kaitą, o taip pat ir geresnę medžių būklę bei didesnį prieaugį. ***Paskutiniaisiais 2021, 2022, 2023 ir 2025 m. mažėjantis kritulių kiekis gali sugriauti šias optimistines prognozes.***

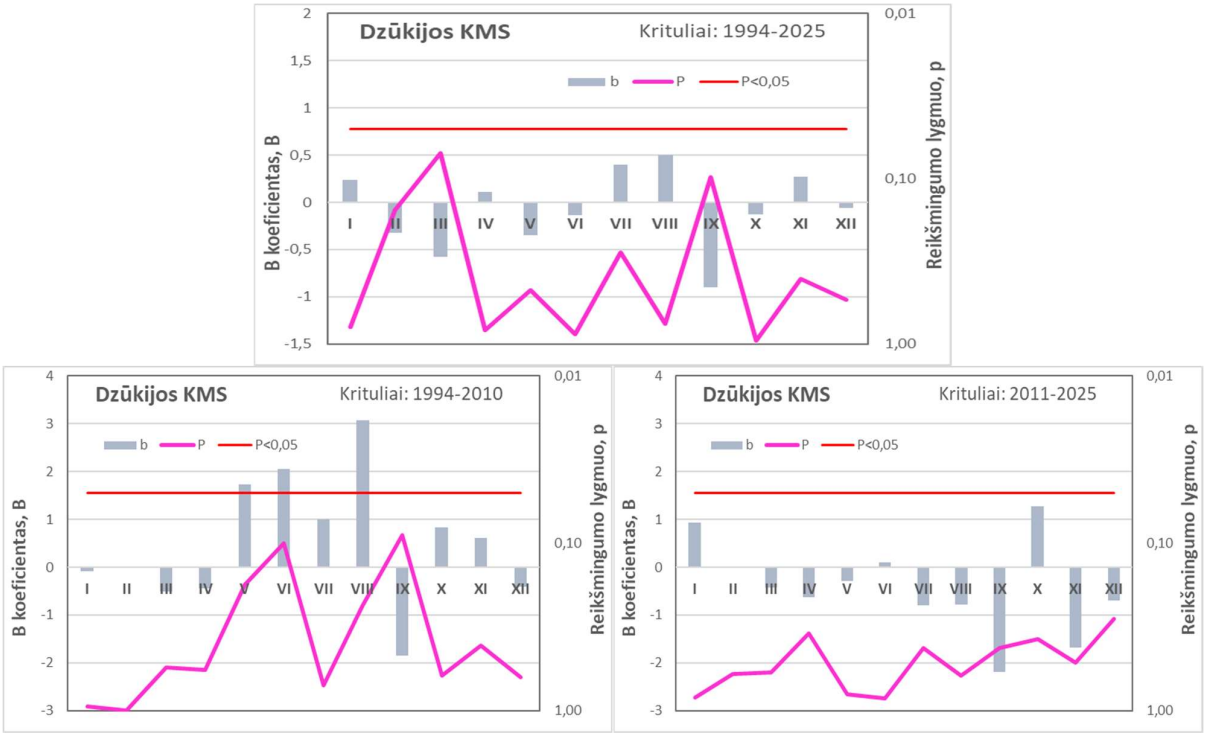


1.24 pav. Mėnesių kritulių kiekio kaita, jos intensyvumas ir reikšmingumas Žemaitijos KM stotyje: per visą tiriamąjį laikotarpį ir pradinį (1993-2010 m.) bei pastarąjį (2011-2025 m.).

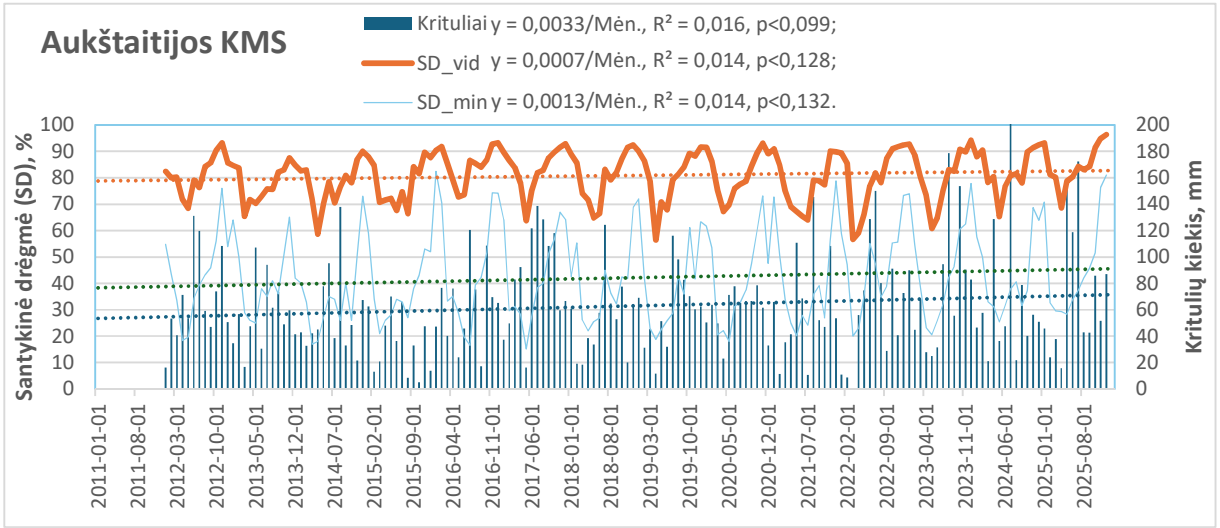
Per tiriamąjį 31 m. laikotarpį reikšmingai mažėjo birželio mėn., o didėjo liepos mėn. kritulių kiekis. Kitų mėnesių kritulių kiekis kito panašiai kaip ir Aukštaitijos KMS. Mažėjo žiemos ir ankstyvo pavasario mėnesių kritulių kiekiai, kurie reikšmingiau pasireiškė pradiniame tiriamajame laikotarpyje, t.y. iki 2010 m. šiame laikotarpyje vasario ir ypač balandžio mėnesių kritulių kiekis mažėjo reikšmingai, maždaug po 1,5 ir 5 mm per m. atitinkamai. Gausesniais krituliais pasižymėjo liepa ir rugpjūtis, kai kritulių kiekis didėjo maždaug po 3,5-5,5 mm per m. atitinkamai. Didėjimo tendenciją demonstravo ir lapkričio mėn. krituliai.

Antrajame tiriamajame laikotarpyje kritulių kiekio kaita pasikeitė. Reikšmingai sumažėjo tik gruodžio mėn. krutulių kiekis, viršydamas net 7 mm per m. ribą. Likusiais mėnesiais kritulių kiekio kaita buvo absoliučiai nereikšminga, nors turėjo išskirtinę mažėjimo tendenciją praktiškai visais likusiais mėnesiais. ***Tai iš tiesų nauja grėsmė Žemaitijos krašto miško ekosistemoms.***

Reikšmingesnių kritulių kiekio kaitos tendencijų Dzūkijos KMS per tiriamąjį laikotarpį nenustatyta. Panašiai kaip ir Žemaitijos KMS, paskutiniuoju laikotarpiu (2011-2025 m.) praktiškai visais mėnesiais mažėja kritulių kiekis ir tik sausio ir spalio mėnesį registruojamas arti reikšmingo lygmens kritulių kiekio padidėjimas. Kokią įtaką tokia kaita turės miško ekosistemoms parodys detalesni ateities tyrimai.



1.25 pav. Mėnesių kritulių kiekio kaita, jos intensyvumas ir reikšmingumas Dzūkijos KM stotyje: per visą tiriamąjį laikotarpį ir pradinį (1993-2010 m.) bei pastarąjį (2011-2025 m.).



1.26 pav. Mėnesio krutulių kiekio ir santykinės vidutinės ir minimalios oro drėgmės kaita Aukštaitijos KM stotyje.

Kritulių kiekio ir santykinės drėgmės palyginamoji analizė parodė, kad 2011-2025 m. laikotarpiu kritulių kiekiui didėjant po 0,003 mm per mėn., vidutinė santykinė oro drėgmė didėjo po 0,0007 % per mėn., o minimali jos reikšmė didėjo net po 0.0013 % per mėn., t.y. kritulių kiekiui padidėjus 1 mm santykinės drėgmės parametrai padidėtų 0,2 ir 0,4 % atitinkamai.

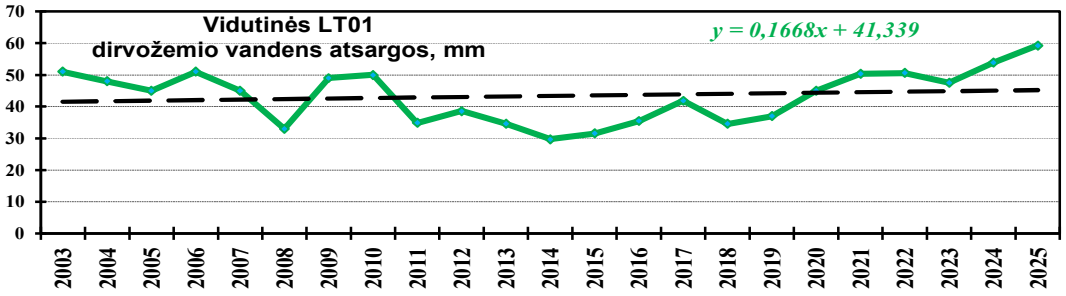
1.26 pav. Metinio kritulių kiekio kaita ir jos reikšmingumas KM stotyse nuo 1994 m. iki ataskaitinių metų (2005; 2010; 2015; 2020)

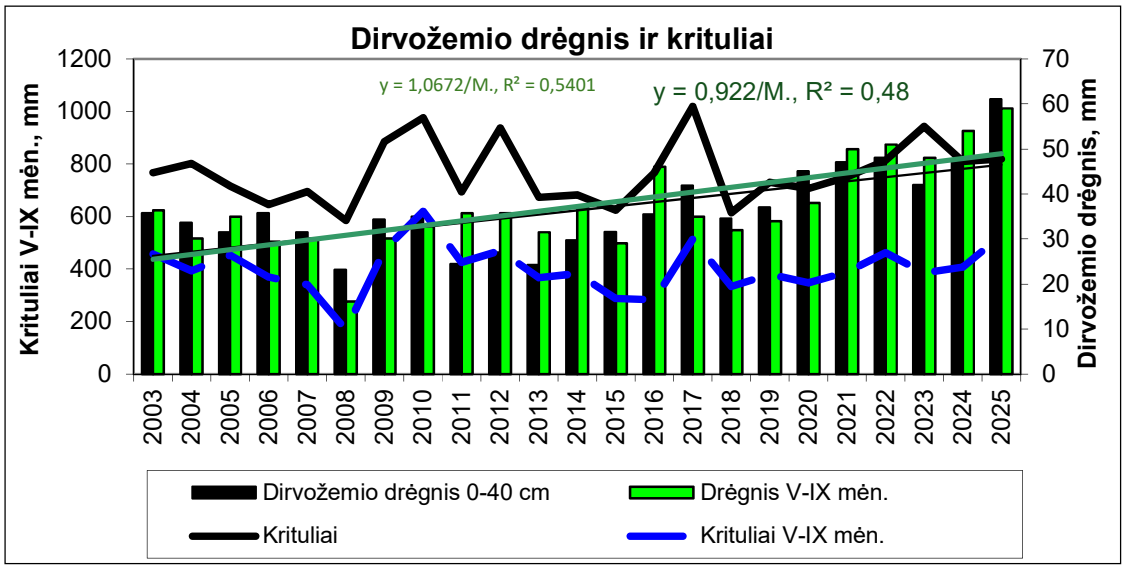
Lyginant atskirų laikotarpių kritulių kiekio kaitos tendenciją ir intensyvumą, nustatyta, kad intensyviausiai kritulių kiekis didėjo 2010 m., kai jis viršijo 2,0 mm per metus. Gausūs krituliai 2017 ir 2020 m. sąlygojo, kad kritulių augimas nuo 1994 m. vėl pradėjo didėti, nors šis intensyvumas viršija 2020 m. tik 1,5 mm per metus.

Paskutiniuoju laikotarpiu mažėjantis kritulių kiekis Dzūkijoje ir ypač Žemaitijoje gali tapti nauja grėsme miško ekosistemų tvarumui ateityje.

1.2.2. Dirvožemio vanduo

Metiniai dirvožemio vandens srauto ir sunkimosi intensyvumo vidurkiai 2020 metų ataskaitoje nepateikiami dėl neprognozuojamų matavimo paklaidų, kurias lemia didelė klimato parametrų kaita. Besniegėmis žiemomis lizimetrų talpos pildosi lėtai ir vandens tūris lieka neužfiksuotas. Ir atvirkščiai sniegingomis žiemomis, polaidžio metu lizimetrų talpos greitai persipildo ir dalis dirvožemio vandens tūrio lieka neišmatuotas.





1.27 pav. Dirvožemio drėgnio medianos ir kritulių metinės reikšmės bei vegetacijos periodu.

Šioje ataskaitoje aprašyti dirvožemio drėgnio pokyčiai. Dirvožemio drėgnio duomenys išmatuoti 2003-2025 metais. Ypač mažas dirvožemio drėgnis nustatytas 2008 metais, o taip pat 2014 ir 2018 m., kai jo reikšmė buvo mažesnė už daugiametį vidurkį.

Didelis dirvožemio drėgnis buvo 2016-2017 metais. Pastebėta, kad didelis dirvožemio drėgnis nebūtinai susijęs su gausiais krituliais: didžiausias dirvožemio drėgnis vegetacijos laikotarpiu buvo 2016 metais, bet didžiausias kritulių kiekis – kitais 2017 metais (1.27 pav.).

Pastaraisiais 2020-2025 m. registruojamas reikšmingas dirvožemio drėgnio augimas, kuris paskutiniaisiais 2025 m. pasiekė viso tiriamojo laikotarpio maksimalią reikšmę, t.y. apie 60 mm.

Išskirtinai aukštą 2025 m. drėgnį galėjo sąlygoti pasikartojančios šiltos žiemos, kurių metu nebuvo registruojamas dirvožemio įšalas ir gausūs krituliai ramybės laikotarpiu nuo 2019 m., o taip pat galimai ir labai vėsus pavasaris (kovo-gegužės mėn.), dėl ko galėjo sumažėti ir evapotranspiracija nuo dirvožemio paviršiaus bei sumažėjęs nuotėkis. Dirvožemio drėgnio pokytis naudojamas skaičiuojant bendrą garavimą. Tokie dėsningumai patvirtina, kad klimato kaita gali turėti reikšmingos įtakos miško dirvožemio fizikinėms savybėms.

1.2.3. Gruntinis vanduo

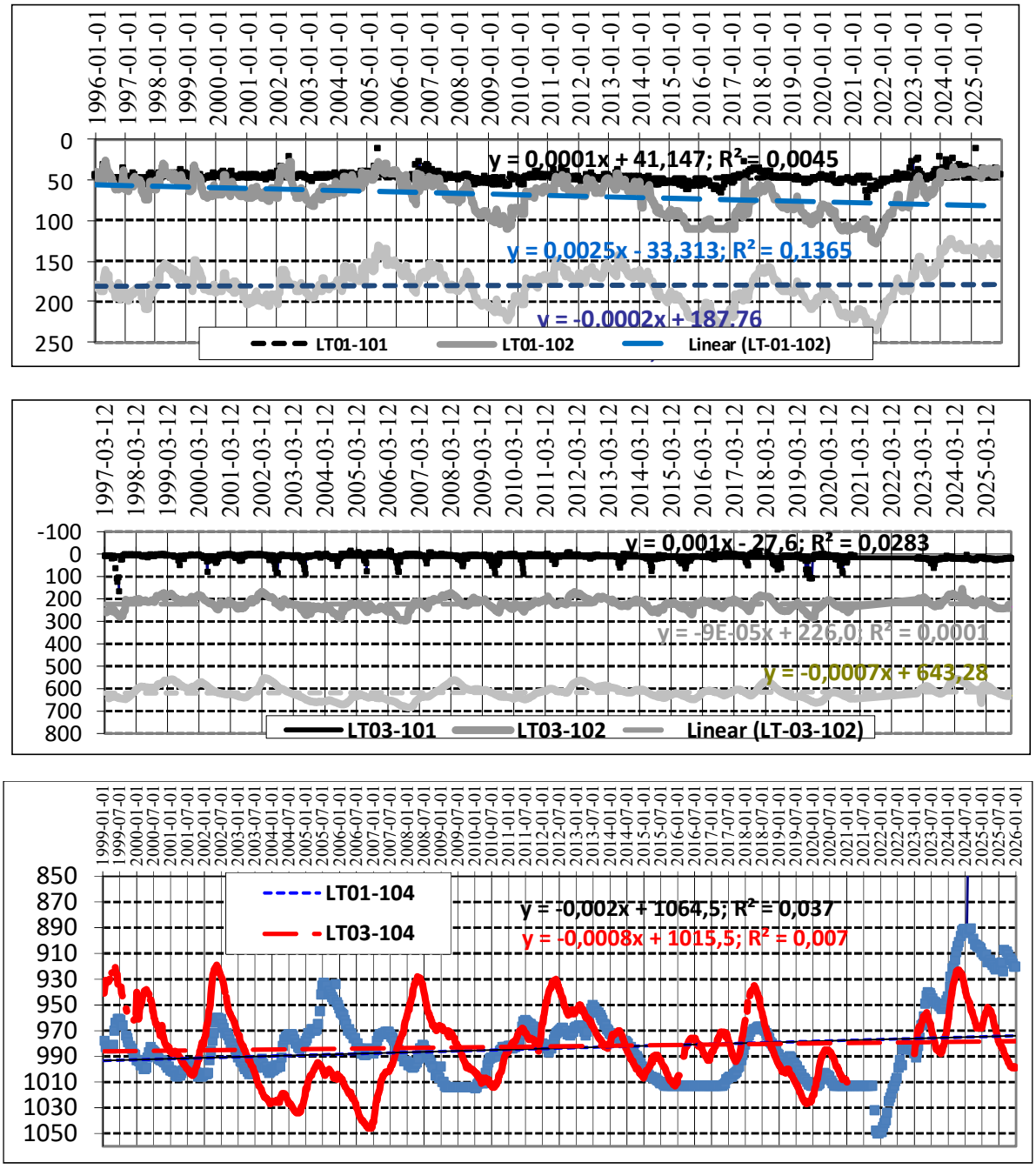
Per 25 stebėsenos metus gruntinio vandens lygio žemėjimas ryškiausias gruntinio vandens gręžiniuose LT01_02 ir LT03_04. Aukštaitijos KMS gruntinio vandens lygio kritimas reikšmingiausias LT01_102 ir LT01_104, o Žemaitijoje LT03_104 gręžiniuose atitinkamai Kituose gręžiniuose vandens lygio kaita yra ne tokia ryški, ypač sekliausiuose (LT01_101 ir LT03_101), gruntinio vandens lygis nekinta arba kyla (1.28 pav.).

Gruntinio vandens lygis, kaip ir kritulių kiekis, banguoja 3–4 metų ciklais, bet dėl metus, pusantrų metų vėluojančio gruntinio vandens atsako į kritulius, esant mažiausiam kritulių kiekiui, gruntinio vandens lygis, giliausiuose gręžiniuose pakyla iki aukščiausio lygio per trimetį ciklą, „kompensuodamas“ ekosistemai sausros pasekmes. : 1999, 2002, 2005, 2008, 2011-2012 ir 2018 metais, kai kritulių kiekis per metus buvo mažiausias, giliajame gręžinyje gruntinio vandens lygis pavasarį buvo aukščiausias arba pakilo kitų metų pavasarį. Sausringų metų sekoje, nėra 2014-2015 metų, nes Stebėjimo laikotarpiu kritulių ir gruntinio vandens ciklų kompensacija sutriko 2004-2006 m. Pavyzdžiui Žemaitijos KMS 2004 metai, pagal trimetį ciklą turėjo būti drėgni, o 2006 sausi, tačiau klimatinė kritulių norma 2004 m. nebuvo viršyta, 2005 viršyta nežymiai, todėl kritulių gruntinio vandens lygio pakilimui „pritrūko“ ir 2006 metais vandens lygis giliajame gręžinyje buvo nukritęs žemiausiai per stebėjimo laikotarpį – tai lėmė vandens trūkumą visoje ekosistemoje.

2007-2008 metais gruntinio vandens lygis kilo, palyginti su kitais stebėsenos metais, sparčiausiai, ir 2006 metų vandens trūkumas buvo kompensuotas. 2009-2017 metais kritulių kiekis yra artimas arba viršija klimatinę normą, todėl vandens lygis visuose Žemaitijos KMS gręžiniuose stabilizavosi (1.28 pav.)

Vandens lygio kitimas įvairaus gylio gręžiniuose susijęs su vandens persiskirstymo procesais geoekosistemoje. Gruntinis ir dirvožemio vanduo – tai tarpinė grandis tarp kritulių ir upelio nuotėkio, galinti kompensuoti augalams kritulių trūkumą. Per 25 stebėjimo metų Aukštaitijos stotyje mažiausiai

kritulių iškrito 2008, o upelio nuotėkis buvo mažiausias metais vėliau, 2009 metais. Sekliuose gręžiniuose gruntinis vanduo labiausiai nuslūgo jau sausringųjų 2008 metų antroje pusėje, o 2009 metais dar labiau pažemėjo, o tai savo ruožtu lėmė mažiausią upelio nuotėkį. Giliausiame gręžinyje, LT01-104, gruntinio vandens lygis iki žemiausio taško nukrito tik 2009-2010 metais, kai kritulių kiekis buvo didžiausias per stebėjimų laikotarpį (1.28 pav.).



1.28. pav. Vidutinis gruntinio vandens lygis gręžiniuose Nr. 1, 2, 3 ir 4. Plokštumos LT01-104 kreivėje reiškia, kad 4 gręžinyje nebuvo vandens: 2009 ir 2015-2017.

Gruntinio vandens lygis, kaip ir kritulių kiekis, kinta 3–4 metų ciklais ir šie ciklai, dėl metais „vėluojančio“ gruntinio vandens atsako į kritulius, kompensuoja vienas kitą, esant mažiausiam kritulių kiekiui, gruntinio vandens lygis, ypač gilesniuose gręžiniuose būna pakilęs iki aukščiausio taško per trimetį ciklą. Būna ir išimčių. Stebėjimo laikotarpiu kritulių ir gruntinio vandens ciklų kompensacija sutriko 2004-2006 m. Žemaitijos KMS 2004 metai, pagal trimetį ciklą turėjo būti drėgni, o 2006 sausi, tačiau klimatinė norma 2004 m. nebuvo viršyta, 2005 viršyta nežymiai, todėl kritulių „pritrūko“. ir 2006 metais vandens lygis giliajame gręžinyje buvo nukritęs žemiausiai per stebėjimo laikotarpį – tai lėmė vandens trūkumą visoje ekosistemoje. 2007 metais dėl ypač gausių kritulių gruntinio vandens lygis kilo, palyginti su kitais stebėsenos metais, sparčiausiai ir kompensavo 2006 metų vandens trūkumą. 2009-2013 metais kritulių kiekis yra artimas arba viršija klimatinę normą, todėl vandens lygis visuose gręžiniuose stabilizavosi (1.28 pav.).

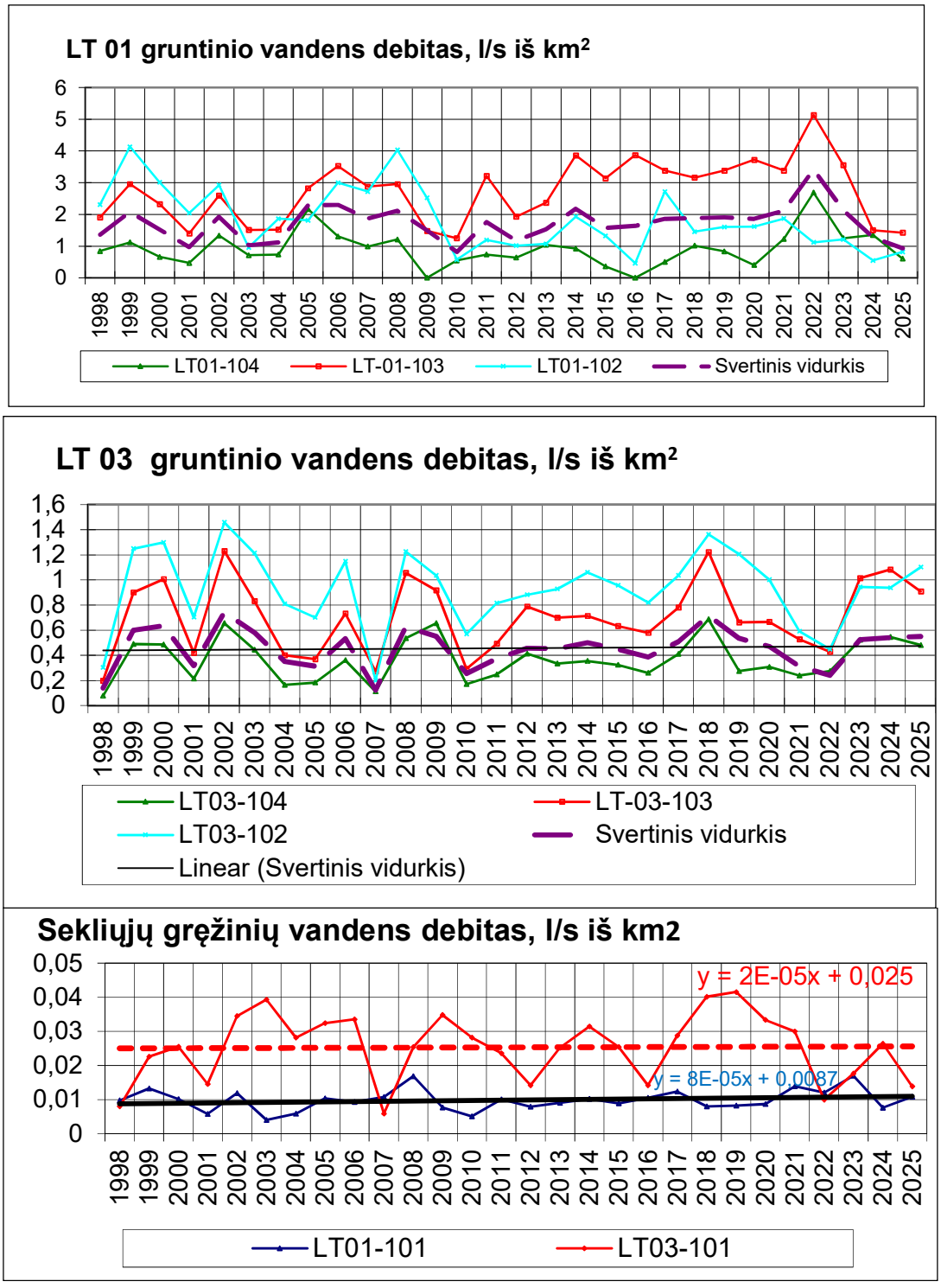
2015-2018 m. gruntinio vandens lygį iš esmės sąlygojo kritulių kiekis, kuris kito nuo žemiausių iki didžiausių reikšmių Aukštaitijos KMS baseine. Būtent gausūs kritulių kiekiai 2017 m. ir sausra 2018 m. sąlygojo gruntinio vandens lygio atitinkamus pokyčius visuose gręžiniuose, t.y. 2017 m. vandens lygis gręžiniuose kilo, o jau kitais metais reikšmingai mažėjo.

Trimečiai vandens apytakos ciklai ir apgaulinga atvirkštinė priklausomybė tarp kritulių ir vandens lygio giliuosiuose gruntinio vandens gręžiniuose stebėti 2002 ir 2018 metais, kai abiejose KMS esant mažiausiam kritulių kiekiui, gruntinio vandens lygis giliausiame gręžinyje, pavasarį pakilo iki aukščiausio lygio. Kitais sausringais trimečių ciklų metais gruntinio vandens lygio pakilimai vyko, bet buvo ne tokie ryškūs.

Paskutiniųjų 5 m. duomenys rodo, kad abiejose stotyse gruntinio vandens dinaminiai ištekliai 2015-2017 metais reikšmingai didėjo, o 2017 m. Aukštaitijos stotyje buvo didžiausi per stebėjimo laikotarpį. ***Nuo 2018 m. reikšmingai žemėti pradėjo gruntinio vandens lygis Aukštaitijos KMS visuose gręžiniuose išskyrus LT-01-101, kuriame vanduo laikosi pačiame sekliausiame lygmenyje. Žemaitijos KMS seklesniuose gręžiniuose tokios tendencijos nustatyti nepavyko. Tik giliausiame gręžinyje vandens lygio sumažėjimas buvo pradėtas registruoti nuo 2018 m. liepos mėn.***

2020 metų kritulių gausa (>1000 mm), kaip ir buvo anksčiau prognozuota sukėlė gruntinio vandens lygio augimą visuose gręžiniuose, tik skirtingu laiku. 2022-2024 m. pasižymėjo vandens lygio pakilimu visuose gręžiniuose abiejose KMS, o giliuosiuose gręžiniuose paskutiniaisiais metais ėmė kristi, pirmiausia, Žemaitijos KMS. 2024 metų buvo pasiekti aukščiausi gruntinio lygiai, 2025 metais prasidėjo lygio kritimas.

Gruntinio vandens debito mažėjimas būdingas Aukštaitijos KMS 102 gręžiniui ir abiejų stočių giliesiems gręžiniams, kuriuose vanduo kitais metais po sausmečių nusenka iki dugno, o debitas artėja prie nulio (1.29 pav.).



1.29 pav Vidutinis gruntinio vandens metinis debitas (nuotėkis).

Gruntinio vandens dinamika intensyviausia Aukštaitijos KMS giliuosiuose gręžiniuose LT01_102-103-104. Aukščiausias vandens lygis, pasiektas 2024 metų pradžioje (LT01_102 ir 103) ir antrame pusmetyje (LT01_104) buvo laipsniško vandens nuotėkio didėjimo pasekmė, LT01_103 gręžinyje prasidėjusio 2012 metais (minimalus nuotėkis buvo 2010 metais) ir pasiekusio didžiausias reikšmes 2022 metais, t.y. po 10-12 metų. 2024 ir 2025 metais vidutinis gruntinio vandens nuotėkis visuose gręžiniuose buvo mažiausias per stebėsenos laikotarpį, gruntinio vandens lygis LT01_102 ir 103 gręžiniuose nukrito, o LT01_104 gręžinyje – stabilizavosi.

Žemaitijos KMS gręžiniuose (LT03_102-103-104) vidutinis vandens nuotėkis yra daugiau kaip dvigubai lėtesnis, nei Aukštaitijos KMS. Giliajame gręžinyje (LT03_104) nuo žemiausių reikšmių 1998 ir 2007 ir 2010 metais ėmė didėti ir 2018 metais buvo aukščiausias, 2019-2020 metais nukrito, o 2023-2025 laikosi aukštesnės nei vidutinės reikšmės.

Žemaitijos KMS giliausiame gręžinyje (LT03_104) vandens lygio svyravimo ciklas yra keliais metais trumpesnis, negu Aukštaitijoje, bet aukščiausi vandens lygiai buvo beveik tokiu pačiu metu, 2002, 2018 ir 2024 metais. Tik Aukštaitijos KMS giliausiuose gręžiniuose vandens lygis nukrenta metų viduryje, o Žemaitijos KMS – anksčiau maždaug balandžio-gegužės mėnesį.

Seklieji gręžiniai atspindi hidrologines sąlygas užmirkusiame dirvožemyje, todėl jų gruntinio vandens lygių ir debitų kreivių forma skiriasi nuo gilesniųjų gręžinių. Aukštaitijos KMS seklusis gręžinys (LT01_101) yra šlapynėje, durpžemyje, o Žemaitijos KMS seklusis gręžinys (LT03_101) užmirkusiame aliuviniame dirvožemyje. Vandens lygis ir nuotėkis įmirkusiose ekosistemose laikosi stabilus ir pastaraisiais metais kyla, o nuotėkis auga.

2025 metais atnaujintas vandens lygių matavimas Dzūkijos KMS daugiamečių tendencijų negali parodyti. Visuose Dzūkijos KMS gręžiniuose stebimas žemesnis vandens lygis negu buvo 1997-1999 metais, bet sezoninės kaitos amplitudės yra panašios. Giliausiame gręžinyje, LT02_103, rudenį vandens lygis sutapo su 1997-1999 metų duomenimis.

Apibendrinimui reikia pažymėti, kad gręžinių vandens charakteristikos rodo didėjantį požeminio vandens cirkuliacijos greitį.

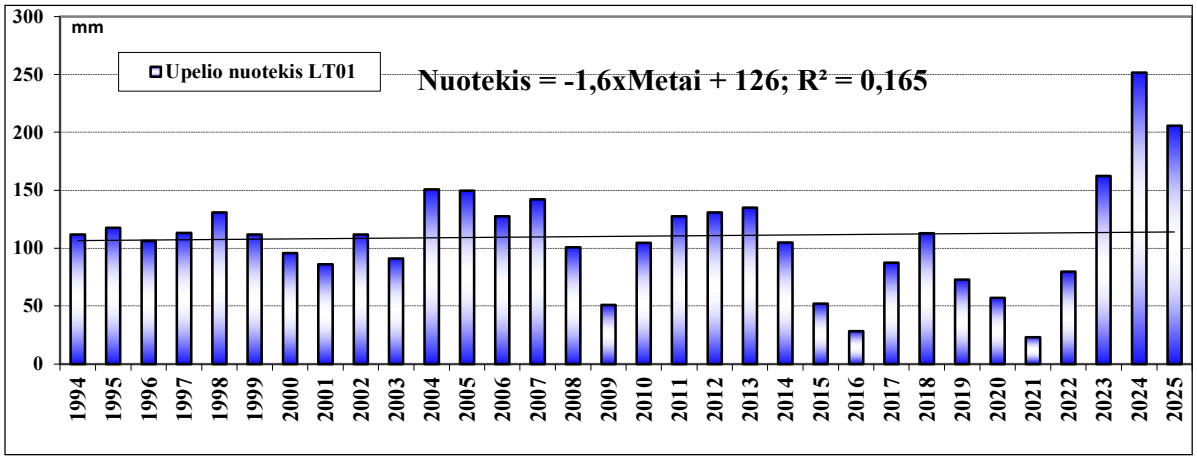
1.2.4 Paviršinio upelio vandens nuotėkis Aukštaitijos KMS

Paviršinio vandens nuotėkio sekoje išsiskiria 5 laikotarpiai, kai nuotėkio reikšmės viršijo daugiametį vidurkį. Tai 1998, 2004-2007, 2011-2013, 208 ir 2023-2025.

2015-2020 m. krituliai turėjo reikšmingos įtakos upelio nuotėkiui, bet ne einamaisiais, o po metų arba net dvejus ateinančius metus. Dėl šios priežasties mažiausias nuotėkis per visą tiriamąjį laikotarpį Aukštaitijos KMS baseine buvo nustatytas 2016 metais, t.y., praėjus metams nuo 2015 m. sausros, nesiekė net 30 mm. 2020 metais upelio nuotekis buvo dar mažesnis, negu 2019 metais, kai didžiausią įtaką padarė 2018 metų kritulių stygius.

2020 metais iškritę krituliai neviršijo stebėsenos laikotarpio vidurkio, pavasarį dirvožemio drėgmė 0-40 cm gylyje buvo didesnė, negu stebėsenos vidurkis, bet pagreitėjusi gruntinio vandens cirkuliacija ir pradžioje žymiai sumažino Aukštaitijos KMS upelio nuotėkį. Šiuo laikotarpiu *kritulių kiekiui didėjant šioje stotyje po beveik 5 mm per metus upelio nuotėkis mažėja po 1,6 mm per metus.* ***Toks iškreiptas vandens balanso ciklas rodo, kad šylant klimatui pradeda didėti vandens evapotranspiracija dėl ko mažėja vandens sunkimasis į gilesnius dirvožemio sluoksnius. Tai galėjo tapti naujos, išskirtinės, klimato kaitos sąlygotos, grėsmės miško ekosistemų tvariai plėtrai pradžia.***

Tačiau ketverius metus iš eilės, 2022-2025 metais kritulių kiekiui viršijus daugiamečius vidurkius, jau po metų, 2023-2025 metais upelio nuotėkis pakilo iki didžiausių reikšmių per stebėsenos laikotarpį.



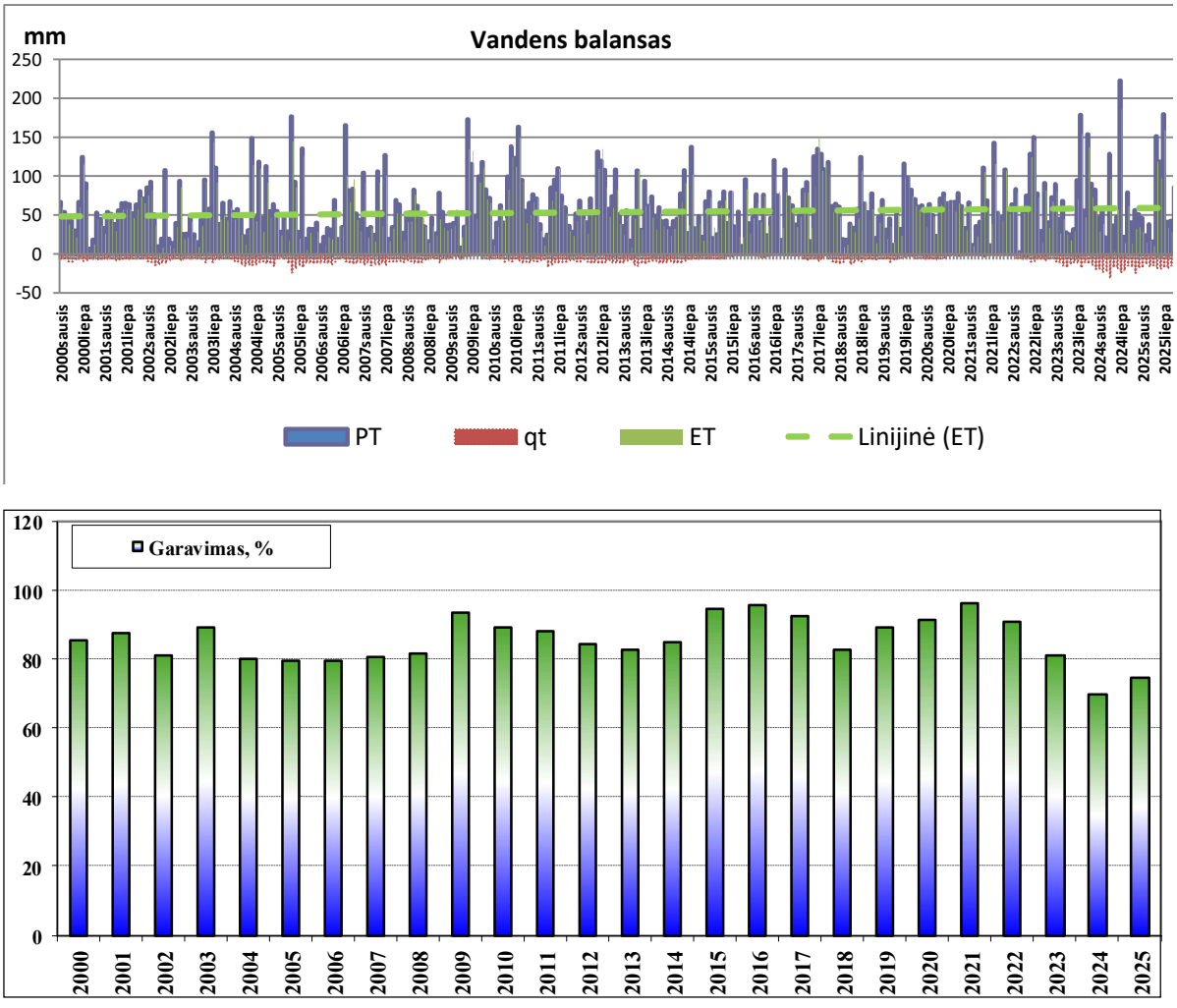
1.30 pav. Upelių nuotėkio modulis. 2007, 2009-2012 ir 2017 m.

Duomenų trūkumas Žemaitijos KM stotyje neleidžia šiandieną patvirtinti šį išaiškintą dėsningumą. Tikėtina, kad dėl švelnesnio klimato Žemaitijos KM stotyje šie dėsningumai silpnesni.

Atnaujintų tyrimų Dzūkijos KM stotyje rezultatai bus pateikiami tik jau kitoje apibendrinančioje 2026-2030 m. ataskaitoje.

1.2.5. Vandens balanso sudedamosios

Naudojant duomenis apie upelio nuotėkį, dirvožemio drėgmės pokyčius (0-40 cm gylyje) ir kritulius pagal elementarią vandens balanso lygtį (Ruseckas, 2008) apskaičiuotas bendras garavimas. Pagal šį skaičiavimą, bendro garavimo reikšmė stebėsenos laikotarpiu 2000-2025 m. buvo vidutiniškai Aukštaitijos KMS 86%, o Žemaitijos KMS 1998-2010 metais – 80. Kitais metais po labiausiai sausringųjų, 2008, 2015, 2018 ir 2021 metų, bendrasis garavimas Aukštaitijos KMS padidėdavo iki labai didelių reikšmių, atitinkamai 94% (2009 m.), 92-96% (2015-2017 m.) ir 91-96% (2020-2022 m.), o 2024-2025 metais bendrasis garavimas sumažėjo iki rekordiškai mažų 70-74%, nors kritulių kiekis augo, ypač 2023 ir 2024 metų vasarą (1.31 pav.).



1.31 pav. Vandens balanso sudedamųjų dinamika (PT - krituliai, qt – paviršinis nuotėkis, ET – bendras garavimas. Metų garavimo ir kritulių.

Neturėdami upelio nuotėkio duomenų, negalime apskaičiuoti bendro garavimo Žemaitijos KMS. Ateityje vandens balanso sudedamųjų skaičiavimas galėtų būti tikslinamas, o duomenų eilės nevientisumas pildomas naudojant įvairius modelius, gretimų meteorologinių postų duomenis bei skaičiuojant inertiškų medžiagų balansą. Priežastys lemiančios ilgai užtrunkantį vandens sistemos atsistatymą po sausrų yra kylanti oro ir dirvožemio temperatūra bei dirvožemio ir gruntinių vandenų hidrologinių savybių pokyčiai.

1.2.6. Vandens balanso sudėdamųjų apibendrinimas

Kritulių kiekis ir jo kaita:

Aukštaitijos regione per paskutiniuosius 40 m. kritulių kiekis pagal Dūkšto MS duomenis didėjo po 1 mm per metus, tačiau ši kaita buvo nereikšminga ($p<0,05$). Per tiriamąjį laikotarpį (1993-2010 m.) šioje MS stotyje kritulių kiekis kito intensyviau, t.y. didėjo po 6 mm per metus, o Aukštaitijos KMS beveik po 4,3 mm per metus. Kritulių kiekis klimatinę normą (1972-2010 m. vidurkį) viršijo 1998, 2000, 2005 ir 2010 m., o nesiekė 1992, 1996, 1999, 2006 ir 2008 m.

Tiriamuoju laikotarpiu 2010 m. Aukštaitijoje iškrito daugiausiai kritulių per visą stebėjimų laikotarpį, 33% daugiau, negu stebėjimo laikotarpio vidurkis. Didžioji kritulių dalis iškrito vegetacijos laikotarpiu, t.y. birželio-rugpjūčio mėnesiais.

2011-2015 m. laikotarpiu stebimas ryškus kritulių kiekio mažėjimas visais metų laikais. Dėl šios priežasties ir 22 m. kritulių sumos kaita rodo, kad kritulių kiekis pradėjo mažėti. 2015 m. dėl sausros, kritulių kiekis Aukštaitijos KMS buvo mažiausias per visą tiriamąjį laikotarpį. Šiais metais susidarė tik 425 mm Aukštaitijos KMS ir 670 mm Žemaitijos KMS.

2017 m. galima būtų įvardinti kaip perteklinės drėgmės metais. Šiais metais kritulių kiekis Aukštaitijos KMS viršijo 1000 mm. Tai rekordinis kritulių kiekis per paskutiniuosius 25 metus.

Paskutinysis 5 metų laikotarpis (2021-2025 m.) pasižymėjo išskirtinai didesniais kritulių kiekiais lyginant per visą tiriamąjį laikotarpį. Metinis kritulių kiekis viršijo 700 mm. Išskirtiniai 2023 m. kai kritulių kiekis viršijo ir 900 mm riba. Tokiu būdu per 33 metų laikotarpį kritulių kiekio kaitoje nustatyta kritulių kiekio didėjimo tendencija, kuri pasireiškė 3,9 mm per metus didėjimo intensyvumu.

Atskirais sezonais kritulių kiekis tiriamuoju laikotarpiu rudenį didėjo po 0,7 mm per m., žiemą po 0,38 mm per m., pavasarį po 0,52 mm per m. ir vasarą po 2,28 mm per mm. Kaip rodo gauti rezultatai ypač intensyviai didėjantis kritulių kiekis vegetacijos laikotarpiu turėjo turėti reikšmingos įtakos visos miško ekosistemos biotos kaitai.

Apibendrinus gautus rezultatus nustatyta, kad jei Aukštaitijos KMS metinis kritulių kiekis per 27 m. laikotarpį (iki 2020 m.) didėjo po beveik 1 mm per metus, tai įskaitant paskutiniuosius 5rius metus (2021-2025 m.), kiekio didėjimo tendencija dar labiau išaugo siekia jau beveik 4 mm per m.

Jei dar 2020 m. buvo mėginama informuoti apie naujai kylančią grėsmę miško ekosistemos, dėl beprasidedančio drėgmės trūkumo, tai paskutinieji 2021-2025 metai paneigė šias prognozes. Dėl intensyviai didėjančio kritulių kiekio Aukštaitijos KMS miško ekosistemos žymiai geriau yra aprūpinamos vandens atsargomis, kas turėjo turėti reikšmingos įtakos visos miško ekosistemos būklei ir jos atsparumui nepalankiems aplinkos veiksniams.

Aukštaitijos KMS pastarąjį dešimtmetį kritulių kiekio kaita buvo ypatinga. Jei pirmąjį 21 amžiaus dešimtmetį sausus laikotarpius keitė drėgnieji, kas tris-keturis metus, tai nuo 2014-2025 metų vandens režimas pasikeitė. Oro ir dirvožemio temperatūra ėmė tolygiai augti, menkstantis dirvožemio įšalas sukėlė dirvožemio įmirkimą. Gruntinio vandens cirkuliacijos pagreitėjimas ir bendras garavimas išaugo 2015-2022 m. Viso to pasekmė buvo ekstremaliai didelis upelio nuotėkis 2024-2025 metais.

Žemaitijos KMS stebėjimų stotyje metinis kritulių kiekis klimatinę normą (daugiametį 1972-2010 m. vidurkį Vėžaičių meteorologinė stotis, 906,8 mm) viršijo 1995, 1998, 2002, 2005, 2007, 2010-2012m., o paskutiniuoju laikotarpiu tik 2017 m., 2020m. ir 2023 m. Žemiau vidutinės reikšmės kritulių kiekis buvo registruojamas 1992, 1996, 2006 ir ypač 2015, 2018, 2022 ir 2025 m. (1.19 pav.).

Jei dar 2020 m. buvo teigiama, kad Žemaitijos KMS metinis kritulių kiekis per 27 m. laikotarpį didėjo ypač reikšmingai, t.y. po 1,7 mm per metus ir šis intensyvumas palaipsniui auga, tai jau po paskutiniųjų 5rių metų laikotarpio, kritulių dinamika pasikeitė iš esmės, dėl reikšmingo kritulių kiekio sumažėjimo ir ypač 2023 ir 2025 metais.

Dzūkijos KMS kritulių kiekio kaitos analizė atlikta Varėnos MS duomenų pagrindu. Nustatyta, kad kompleksiško programos veiklos laikotarpiu nuo 1993 iki 2025 m., kritulių kiekis turėjo tendencija mažėti po 0,73 mm per m. Didėjo tik kritulių kiekis vegetacijos laikotarpiu po 1,3 mm per m. Likusiais metų sezonais kritulių kiekis mažėjo: rudenį po -1,4 mm per m., žiemą po -0,4 mm per m. ir pavasarį po -1,12 mm per m.

Ar vegetacijos laikotarpiu didėjantis kritulių kiekis kompensuos jų mažėjimą likusiais sezonais ir ar tai turės reikšmingos įtakos visiems bio- geo sisteminiams procesams miško ekosistemoje parodys ateities tyrimų rezultatai.

Apibendrinus galima konstatuoti, kad pagrindinė grėsmė miško ekosisteminiams procesams ir biotos komponentų būklei gali būti mažėjantis kritulių kiekis Dzūkijos KMS ir ypač Žemaitijos KMS. Didėjantis kritulių kiekis Aukštaitijos KMS, atvirkščiai, turėtų sąlygoti padidintus miško ekosistemos gebėjimus išgyventi stresą bei jos geresnę būklę ir prisitaikymą prie intensyviai kintančios aplinkos. Tokie du priešingi procesai vykstantys ekosistemose sudaro galimybes tirti biotos ekofiziologines reakcijas į besikeičiančią aplinką skirtingose augaviečių tipuose bei klimatiniuose rajonuose.

Kritulių sezoninė kaita:

Aukštaitijos KMS tiriamuoju 32 m. laikotarpiu reikšmingiausiai kito kritulių kiekis liepos mėnesį, demonstruodamas reikšmingą didėjimą po +2,3 mm per metus. Likusiais mėnesiais registruoti tiek kritulių kiekio mažėjimo, tiek ir didėjimo tendencijos kurių reikšmingumas nesiekė 0,1. Kritulių didėjo sausio, balandžio, gegužės, rugpjūčio ir spalio-gruodžio mėnesiais, o mažėjo vasario-kovo ir rugsėjo mėnesį.

Palyginus skirtingus laikotarpius iki 2010 ir po 2011 metų rezultatus išryškėjo esminiai skirtumai kurie galėjo turėti reikšmingos įtakos tiek ir cheminių komponenčių tiek ir biotos komponentų kaitos intensyvumui ar net ir bendram ekosistemos tvarumui ar atsparumui išgyventi stresą. Pirmuoju laikotarpiu kritulių kiekis mažėjo žiemos ir ankstyvo pavasario mėnesiais, tai jau antruoju laikotarpiu šiuo laikotarpiu kritulių kiekis didėja. Reikšmingas pokytis įvyko rugsėjo mėn. kritulių kaitoje, kai paskutiniuoju laikotarpiu kritulių mažėjimas stabilizavosi. Rudens ir ankstyvos žiemos laikotarpiu kritulių kiekio didėjimas, nors ir nereikšmingas išlieka. Reikšmingiausias pokytis įvyko liepos mėn. kritulių, kuris nuo 2011 metų pradėjo didėti po beveik 5 mm per m., kas turėjo turėti reikšmingos įtakos visai Aukštaitijos KMS augalijai, jos būklei ir produktyvumui.

Žemaitijos KMS kritulių taip pat kaip ir Aukštaitijos KMS mažėja vasario – birželio mėnesiais, tačiau jei Aukštaitijos KMS ši kaita buvo nereikšminga, tai Žemaitijos KMS birželio mėn. kritulių kiekis mažėja net po beveik 2 mm per metus, ir šis mažėjimas yra jau reikšmingas. Tačiau čia intensyviau negu Aukštaitijos KMS didėja likusių mėnesių kritulių kiekis. Tokios kaitos rezultatas – 1,7 mm per metus didėjantis kritulių kiekis, kuris buvo nustatytas 2020 m. 2017-2020 m didėjantis kritulių kiekis turėtų teigiamai sąlygoti miško biotos gausos, rūšių įvairovės kaitą, o taip pat ir geresnę medžių būklę bei didesnį prieaugį.

Per tiriamąjį 31 m. laikotarpį reikšmingai mažėjo birželio mėn., o didėjo liepos mėn. kritulių kiekis. Kitų mėnesių kritulių kiekis kito panašiai kaip ir Aukštaitijos KMS. Mažėjo žiemos ir ankstyvo pavasario mėnesių kritulių kiekiai, kurie reikšmingiau pasireiškė pradiniame tiriamajame laikotarpyje, t.y. iki 2010 m. šiame laikotarpyje vasario ir ypač balandžio mėnesių kritulių kiekis

mažėjo reikšmingai, maždaug po 1,5 ir 5 mm per m. atitinkamai. Gausesniais krituliais pasižymėjo liepa ir rugpjūtis, kai kritulių kiekis didėjo maždaug po 3,5-5,5 mm per m. atitinkamai. Didėjimo tendenciją demonstravo ir lapkričio mėn. krituliai.

Antrajame tiriamajame laikotarpyje kritulių kiekio kaita pasikeitė. Reikšmingai sumažėjo tik gruodžio mėn. krutulių kiekis, viršydamas net 7 mm per m. ribą. Likusiais mėnesiais kritulių kiekio kaita buvo absoliučiai nereikšminga, nors turėjo išskirtinę mažėjimo tendenciją praktiškai visais likusiais mėnesiais. ***Tai iš tiesų nauja grėsmė Žemaitijos krašto miško ekosistemoms.***

Reikšmingesnių kritulių kiekio kaitos tendencijų Dzūkijos KMS per tiriamąjį laikotarpį nenustatyta. Panašiai kaip ir Žemaitijos KMS, paskutiniuoju laikotarpiu (2011-2025 m.) praktiškai visais mėnesiais mažėja kritulių kiekis ir tik sausio ir spalio mėnesį registruojamas arti reikšmingo lygmens kritulių kiekio padidėjimas. Kokią įtaką tokia kaita turės miško ekosistemoms parodys detalesni ateities tyrimai.

Kritulių kiekio ir santykinės drėgmės palyginamoji analizė parodė, kad 2011-2025 m. laikotarpiu kritulių kiekiui didėjant po 0,003 mm per mėn., vidutinė santykinė oro drėgmė didėjo po 0,0007 % per mėn., o minimali jos reikšmė didėjo net po 0.0013 % per mėn., t.y. kritulių kiekiui padidėjus 1 mm santykinės drėgmės parametrai padidėtų 0,2 ir 0,4 % atitinkamai.

Paskutiniuoju laikotarpiu mažėjantis kritulių kiekis Dzūkijoje ir ypač Žemaitijoje gali tapti nauja grėsme miško ekosistemų tvarumui ateityje.

Dirvožemio drėgnis:

Dirvožemio drėgnio duomenys Aukštaitijos KMS išmatuoti 2003-2025 metais. Ypač mažas dirvožemio drėgnis nustatytas 2008 metais, o taip pat 2014 ir 2018 m., kai jo reikšmė buvo mažesnė už daugiametį vidurkį.

Pastaraisiais 2020-2025 m. registruojamas reikšmingas dirvožemio drėgnio augimas, kuris paskutiniaisiais 2025 m. pasiekė viso tiriamojo laikotarpio maksimalią reikšmę, t.y. apie 60 mm.

Išskirtinai aukštą 2025 m. drėgnį galėjo sąlygoti pasikartojančios šiltos žiemos, kurių metu nebuvo registruojamas dirvožemio įšalas ir gausūs krituliai ramybės laikotarpiu nuo 2019 m., o taip pat galimai ir labai vėsus pavasaris (kovo-gegužės mėn.), dėl ko galėjo sumažėti ir evapotranspiracija nuo dirvožemio paviršiaus bei sumažėjęs nuotėkis. Dirvožemio drėgnio pokytis naudojamas skaičiuojant bendrą garavimą. Tokie dėsningumai patvirtina, kad klimato kaita gali turėti reikšmingos įtakos miško dirvožemio fizikinėms savybėms.

Gruntinis vanduo ir jo lygis:

Gruntinio vandens lygis, kaip ir kritulių kiekis, banguoja 3–4 metų ciklais, bet dėl metus, pusantrų metų vėluojančio gruntinio vandens atsako į kritulius, esant mažiausiam kritulių kiekiui, gruntinio vandens lygis, giliausiuose gręžiniuose pakyla iki aukščiausio lygio per trimetį ciklą, „kompensuodamas“ ekosistemai sausros pasekmes. : 1999, 2002, 2005, 2008, 2011-2012 ir 2018 metais, kai kritulių kiekis per metus buvo mažiausias, giliajame gręžinyje gruntinio vandens lygis pavasarį buvo aukščiausias arba pakilo kitų metų pavasarį.

Vandens lygio kitimas įvairaus gylio gręžiniuose susijęs su vandens persiskirstymo procesais geoekosistemoje. Gruntinis ir dirvožemio vanduo – tai tarpinė grandis tarp kritulių ir upelio nuotėkio, galinti kompensuoti augalams kritulių trūkumą. Per 25 stebėjimo metų Aukštaitijos stotyje mažiausiai kritulių iškrito 2008, o upelio nuotėkis buvo mažiausias metais vėliau, 2009 metais. Sekliuose gręžiniuose gruntinis vanduo labiausiai nuslūgo jau sausringųjų 2008 metų antroje pusėje, o 2009 metais dar labiau pažemėjo, o tai savo ruožtu lėmė mažiausią upelio nuotėkį. Giliausiame gręžinyje, LT01-104, gruntinio vandens lygis iki žemiausio taško nukrito tik 2009-2010 metais, kai kritulių kiekis buvo didžiausias per stebėjimų laikotarpį

2016-2020 m. ***duomenys rodo, kad*** abiejose stotyse gruntinio vandens dinaminiai ištekliai 2015-2017 metais reikšmingai didėjo, o 2017 m. Aukštaitijos stotyje buvo didžiausi per stebėjimo laikotarpį. ***Nuo 2018 m. reikšmingai žemėti pradėjo gruntinio vandens lygis Aukštaitijos KMS visuose gręžiniuose išskyrus LT-01-101, kuriame vanduo laikosi pačiame sekliausiame lygmenyje. Žemaitijos KMS seklesniuose gręžiniuose tokios tendencijos nustatyti nepavyko. Tik giliausiame gręžinyje vandens lygio sumažėjimas buvo pradėtas registruoti nuo 2018 m. liepos mėn.***

2020 metų kritulių gausa (>1000 mm), kaip ir buvo anksčiau prognozuota sukėlė gruntinio vandens lygio augimą visuose gręžiniuose, tik skirtingu laiku. 2022-2024 m. pasižymėjo vandens lygio pakilimu visuose gręžiniuose abiejose KMS, o giliuosiuose gręžiniuose paskutiniaisiais metais ėmė kristi, pirmiausia, Žemaitijos KMS. 2024 metų buvo pasiekti aukščiausi gruntinio lygiai, 2025 metais prasidėjo lygio kritimas.

Gruntinio vandens dinamika intensyviausia Aukštaitijos KMS giliuosiuose gręžiniuose LT01_102-103-104. Aukščiausias vandens lygis, pasiektas 2024 metų pradžioje (LT01_102 ir 103) ir antrame pusmetyje (LT01_104) buvo laipsniško vandens nuotėkio didėjimo pasekmė, LT01_103 gręžinyje prasidėjusio 2012 metais (minimalus nuotėkis buvo 2010 metais) ir pasiekusio didžiausias reikšmes 2022 metais, t.y. po 10-12 metų. 2024 ir 2025 metais vidutinis gruntinio vandens nuotėkis visuose gręžiniuose buvo mažiausias per stebėsenos laikotarpį, gruntinio vandens lygis LT01_102 ir 103 gręžiniuose nukrito, o LT01_104 gręžinyje – stabilizavosi.

Žemaitijos KMS gręžiniuose (LT03_102-103-104) vidutinis vandens nuotėkis yra daugiau kaip dvigubai lėtesnis, nei Aukštaitijos KMS. Giliajame gręžinyje (LT03_104) nuo žemiausių reikšmių 1998 ir 2007 ir 2010 metais ėmė didėti ir 2018 metais buvo aukščiausias, 2019-2020 metais nukrito, o 2023-2025 laikosi aukštesnės nei vidutinės reikšmės.

2025 metais atnaujintas vandens lygių matavimas Dzūkijos KMS daugiamečių tendencijų negali parodyti. Visuose Dzūkijos KMS gręžiniuose stebimas žemesnis vandens lygis negu buvo 1997-1999 metais, bet sezoninės kaitos amplitudės yra panašios. Giliausiame gręžinyje, LT02_103, rudenį vandens lygis sutapo su 1997-1999 metų duomenimis.

Paviršinis vanduo (upelio vanduo) ir jo kaitos tendencijos:

Paviršinio vandens nuotėkio sekoje išsiskiria 5 laikotarpiai, kai nuotėkio reikšmės viršijo daugiametį vidurkį. Tai 1998, 2004-2007, 2011-2013, 208 ir 2023-2025.

2015-2020 m. krituliai turėjo reikšmingos įtakos upelio nuotėkiui, bet ne einamaisiais, o po metų arba net dvejus ateinančius metus. Dėl šios priežasties mažiausias nuotėkis per visą tiriamąjį laikotarpį Aukštaitijos KMS baseine buvo nustatytas 2016 metais, t.y., praėjus metams nuo 2015 m. sausros, nesiekė net 30 mm. 2020 metais upelio nuotėkis buvo dar mažesnis, negu 2019 metais, kai didžiausią įtaką padarė 2018 metų kritulių stygius.

2020 metais iškritę krituliai neviršijo stebėsenos laikotarpio vidurkio, pavasarį dirvožemio drėgmė 0-40 cm gylyje buvo didesnė, negu stebėsenos vidurkis, bet pagreitėjusi gruntinio vandens cirkuliacija ir pradžioje žymiai sumažino Aukštaitijos KMS upelio nuotėkį. Šiuo laikotarpiu *kritulių kiekiui didėjant šioje stotyje po beveik 5 mm per metus upelio nuotėkis mažėja po 1,6 mm per metus.* ***Toks iškreiptas vandens balanso ciklas rodo, kad šylant klimatui pradeda didėti vandens evapotranspiracija dėl ko mažėja vandens sunkimasis į gilesnius dirvožemio sluoksnius. Tai galėjo tapti naujos, išskirtinės, klimato kaitos sąlygotos, grėsmės miško ekosistemų tvariai plėtrai pradžia.***

Tačiau ketverius metus iš eilės, 2022-2025 metais kritulių kiekiui viršijus daugiamečius vidurkius, jau po metų, 2023-2025 metais upelio nuotėkis pakilo iki didžiausių reikšmių per stebėsenos laikotarpį.

Vandens garavimo intensyvumas:

Pagal šį skaičiavimą, bendro garavimo reikšmė stebėsenos laikotarpiu 2000-2025 m. buvo vidutiniškai Aukštaitijos KMS 86%, o Žemaitijos KMS 1998-2010 metais – 80. Kitais metais po labiausiai sausringųjų, 2008, 2015, 2018 ir 2021 metų, bendrasis garavimas Aukštaitijos KMS padidėdavo iki labai didelių reikšmių, atitinkamai 94% (2009 m.), 92-96% (2015-2017 m.) ir 91-96% (2020-2022 m.), o 2024-2025 metais bendrasis garavimas sumažėjo iki rekordiškai mažų 70-74%, nors kritulių kiekis augo, ypač 2023 ir 2024 metų vasarą.

Pagrindinės išvados

1. Ilgalaikiai 1993–2025 m. vandens balanso tyrimai parodė, kad Lietuvos hemiborealinių miškų hidrologinis režimas pereina į naują funkcionavimo etapą, kuriame klimato kaita keičia ne tik vandens kiekį, bet ir jo pasiskirstymą, kaupimą bei judėjimo laiką ekosistemoje.
2. Aukštaitijos KMS nustatytas didėjantis kritulių kiekis, augantis dirvožemio drėgnis, aukštesnis gruntinio vandens lygis ir rekordiškai padidėjęs upelio nuotėkis rodo didėjančias vandens atsargas bei didesnį šios ekosistemos hidrologinį atsparumą klimato ekstremumams.
3. Žemaitijos ir Dzūkijos KMS nustatytos priešingos kritulių kaitos tendencijos rodo didėjančią regioninę klimato kaitos diferenciaciją. Kritulių mažėjimas, ypač ne vegetacijos laikotarpiu, gali tapti vienu svarbiausių ilgalaikių miško ekosistemų stabilumą ribojančių veiksnių.
4. Gruntinio vandens lygio ir upelio nuotėkio analizė parodė ryškų hidrologinės sistemos inertiškumą. Kritulių pokyčiai ekosistemose pasireiškia ne iš karto, bet po vienerių ar net kelerių metų, todėl gruntinis vanduo veikia kaip natūralus hidrologinis buferis, amortizuojantis sausrų ir drėgnų laikotarpių poveikį.
5. Nustatyta, kad klimato šiltėjimas keičia tradicinį vandens balanso modelį. Šiltos žiemos, mažėjantis dirvožemio įšalas, spartėjanti gruntinio vandens cirkuliacija ir pakitęs evapotranspiracijos intensyvumas tampa svarbesniais vandens režimą reguliuojančiais veiksniais negu vien metinis kritulių kiekis.
6. Vandens balanso komponentų sąsajos parodė, kad dirvožemio drėgnio, gruntinio vandens ir paviršinio nuotėkio pokyčiai glaudžiai susiję su visais svarbiausiais miško ekosistemos procesais – medžių mineraline mityba, elementų migracija, produktyvumu ir ekosistemų atsparumu klimato kaitai.

Ilgalaikiai kompleksinio monitoringo tyrimai parodė, kad hemiborealinių miškų vandens balanso pokyčiai yra vienas svarbiausių šiuolaikinės klimato kaitos poveikio mechanizmų. Nustatyta, kad keičiasi ne tik kritulių kiekis, bet ir visa hidrologinė sistema – vandens kaupimasis dirvožemyje, gruntinio vandens dinamika, upelių nuotėkio formavimasis bei bendras garavimo režimas. Šie pokyčiai tiesiogiai veikia biogeocheminius procesus, maisto medžiagų migraciją, medžių fiziologinę būklę ir ilgalaikį miško ekosistemų stabilumą. Todėl vandens balansas tampa centrine grandimi, jungiančia klimato kaitą su dirvožemio, vandens ir augalijos procesais, o jo ilgalaikė stebėsena yra viena svarbiausių sąlygų prognozuojant hemiborealinių miškų prisitaikymą prie ateities klimato scenarijų.

1.3. Saulės bendrosios, fotosintetiškai aktyvios ir ultravioletinės spinduliuotė, jų *kaita ir sąsajos su klimato pokyčiais*

Saulės energija išspinduliuojama į kosminę erdvę ir tam tikra labai maža jos dalis pasiekia Žemę. Apie 95 % Žemę pasiekusios spindulinės energijos atkeliauja į mūsų planetą trumposiomis bangomis, kurių ilgis 0,3 - 3,0 μm. Žemės atmosfera apie 35 % šios energijos atspindi į kosmosą kita dalis sunaudojama Žemės paviršiui šildyti, išgarinimo - kondensacijos ciklui, oro ir vandenynų srovių ir bangų bei vėjo susidarymui [Adomavičius ir Balčiūnas, 2003]. Todėl saulės spinduliuotės tyrimai klimato kaitos kontekste turėtų užimti vieną iš pirmųjų vietų.

Saulės spinduliuotė yra esminis miško ekosistemos funkcionavimo veiksnys, darantis įtaką fotosintezei, augalų fiziologijai ir biogeocheminiams ciklams (Ross L. McKenzie ir kt., 2007; Jan F. Bornman ir kt., 2015). Biologiškai svarbios saulės spektro dalys apima fotosintezės požiūriu aktyvią spinduliuotę (FAR; 400–700 nm), ultravioletinę A spinduliuotę (UV-A; 315–400 nm) ir ultravioletinę B spinduliuotę (UV-B; 280–315 nm), kurių kiekvienas daro skirtingą poveikį augalų fiziologiniams procesams ir ekosistemos vystymuisi (Bornman ir kt., 2015). Hemiborealiniuose regionuose ryškus saulės spinduliuotės sezoniškumas dar labiau sustiprina jos, kaip ribojančio veiksnio miško produktyvumui ir fiziologiniam našumui, svarbą.

Tiesioginė spinduliuotė patenka tiesiog nuo Saulės disko. Tačiau dalis tiesioginių Saulės spindulių yra išsklaidomi debesų bei atmosferos dulkių. Šie spinduliai krenta į Žemės paviršių įvairiais kampais ir vadinami sklaidžiąja spinduliuote. Dalis Saulės spindulių, patekusių ant Žemės ar kitų paviršių, yra atspindimi. Ši dalis vadinama atspindėtąja. Tiesioginės ir sklaidžiosios spinduliuočių suma vadinama pilnutine ar bendra saulės spinduliuotė, kurios intensyvumas Aukštaitijos KM stotyje stebimas nuo 19999 m. [Genutis ir kt., 2003, 2008].

FAR yra pagrindinis fotosintezės energijos šaltinis ir tiesiogiai kontroliuoja miško pirminį produktyvumą (Steven W. Running ir kt., 2004). Hemiborealiniuose miškuose, kur lajos struktūra dažnai yra nevienalytė, o šviesos prieinamumas kinta priklausomai nuo sezono, tiek spinduliuotės kiekis, tiek kokybė yra lemiami anglies asimiliacijos ir spinduliuotės panaudojimo efektyvumo veiksniai. Šiose sistemose ypač svarbų vaidmenį atlieka difuzinės (išsklaidytos) ir tiesioginės spinduliuotės santykis. Padidėjusi difuzinė spinduliuotė, paprastai susijusi su debesuotumu arba atmosferos aerozoliais, skatina lajos fotosintezę, pagerindama šviesos prasiskverbimą į šešėlinius lajos sluoksnius – šis procesas apibūdinamas kaip „difuzinis tręšimo efektas“ (Christian Gu ir kt., 2003; Yiqi Luo ir kt., 2001). Šis mechanizmas ypač aktualus spygliuočių dominuojančiuose medynuose, kur tankios eglių spyglių lajos riboja vertikalų šviesos pasiskirstymą.

Priešingai, ultravioletinė spinduliuotė, ypač UV-B, daugiausia žalingai veikia augalų audinius. UV-B spinduliuotė gali sukelti DNR pažeidimus, sutrikdyti baltymų funkciją ir sumažinti fotosintezės efektyvumą, paveikdama II fotosistemą. Nors UV-A spinduliuotė yra mažiau energinga, ji prisideda prie fotomorfogenetinių reakcijų ir aktyvuoja fotoreparacijos mechanizmus. Augalai išvystė apsaugos nuo ultravioletinės spinduliuotės strategijas, įskaitant UV spindulius sugeriančių junginių, tokių kaip flavonoidai, sintezę ir struktūrines adaptacijas, tokias kaip padidėjęs lapų storis. Tačiau šie apsaugos mechanizmai sukelia medžiagų apykaitos sąnaudas, kurios gali būti ypač didelės esant ribotiems ištekliams skurdžiose augavietėse ar nepalankių aplinkos veiksnių poveikio laikotarpiais..

Hemiborealiniuose miškuose, kuriuose vyrauja paprastoji pušis ir paprastoji eglė, saulės spinduliuotės poveikį stipriai lemia maistinių medžiagų prieinamumas ir aplinkos stresas. UV-B spinduliuotė skatina antrinių metabolitų, tokių kaip flavonoidai ir taninai, gamybą, stiprindama fotoapsaugą, bet kartu atspindėdama kompromisą tarp augimo ir apsaugos (Lavola et al., 2003 m.).

Nepaisant galimos UV spindulių sukeltos žalos, ilgalaikiai lauko eksperimentai rodo, kad paprastoji pušis pasižymi gana dideliu atsparumu padidėjusiai UV-B spinduliuotei. Pavyzdžiui, Sergi Nogués ir kt. (2006 m.) nenustatė reikšmingo padidėjusio UV-B poveikio paprastosios pušies ir paprastosios eglės augimui ar antrinių metabolitų koncentracijoms lauko sąlygomis, o tai rodo veiksmingus aklimatizacijos mechanizmus.

Saulės UV spinduliuotė taip pat veikia azoto metabolizmą ir fermentinį aktyvumą spygliuočių spygliuose. Marek Krywult ir kt. (2008) parodė, kad UV spinduliuotės nebuvimas pakeitė nitratų reduktazės aktyvumą ir aminorūgščių sudėtį paprastosios pušies spygliuose, o tai rodo, kad aplinkos UV spindulių lygis prisideda prie azoto asimiliacijos procesų reguliavimo. Šie duomenys pabrėžia dvejopą UV spinduliuotės vaidmenį – ji veikia ir kaip stresas, ir kaip medžiagų apykaitos reguliatorius.

Klimato kaita keičia saulės spinduliuotės režimus dėl debesuotumo, atmosferos sudėties ir stratosferos ozono dinamikos pokyčių (McKenzie ir kt., 2007). Debesuotumo pokyčiai veikia tiek bendrą, tiek išsklaidytą spinduliuotę, todėl keičiasi medžių lajų apšvietimo aplinka. Nors bendros spinduliuotės sumažėjimas gali riboti fotosintezę, išsklaidytos spinduliuotės padidėjimas gali padidinti šviesos panaudojimo efektyvumą medžių lajų lygmenyje (Gu ir kt., 2003). Atmosferos aerozolių koncentracijos pokyčiai dar labiau veikia spinduliuotės sklaidą ir absorbciją, prisidėdami prie apšvietimo sąlygų kintamumo.

Stratosferos ozono sluoksnio nykimas istoriškai padidino paviršiaus lygio UV-B spinduliuotę, nors tarptautiniai susitarimai, tokie kaip Monrealio protokolas, prisidėjo prie laipsniško ozono sluoksnio atsistatymo (McKenzie ir kt., 2007). Nepaisant to, UV-B spinduliuotės kintamumas išlieka,

net ir šiaurinėse platumose, kur auga hemiborealiniai ir borealiniai miškai. Padidėjusi UV-B spinduliuotė gali sustiprinti augalų stresą, ypač sąveikaujant su kitais su klimatu susijusiais veiksniais, tokiais kaip padidėjusi temperatūra ir sausra (Caldwell ir kt., 2007).

Tokiu būdu Saulės spinduliuotės ir kitų aplinkos stresorių sąveika ir kompleksiškas poveikis (sinergetinis ar slopinantis) yra labai svarbus miškų atsako reakcijų į klimato kaitą veiksnys. Didelė apšvita kartu su sausros sąlygomis gali sukelti fotoinhibiciją, nes žiotelių užsidarymas riboja CO_2 įsisavinimą, o sugertos spinduliuotės energija išlieka didelė, todėl susidaro sužadinimo energijos perteklius ir susidaro reaktyviosios deguonies formos (Ülo Niinemets, 2010). Padidėjusi temperatūra dar labiau sustiprina šį poveikį, pagreitindama medžiagų apykaitos procesus ir didindama jautrumą oksidacinei žalai. Šie kombinuoti stresoriai yra ypač aktualūs hemiborealiniuose regionuose, kur dėl klimato kaitos, kaip prognozuojama, padažnės karščio bangos ir sausros.

Maistinių medžiagų neturinčiose (oligotrofinėse) miškų ekosistemų augavietėse, būdingose daugeliui hemiborealinių spygliuočių medynų, gebėjimas susidoroti su radiacijos sukeltu stresu yra dar labiau ribotas. Ribotas maistinių medžiagų prieinamumas riboja apsauginių junginių sintezę ir atsistatymo mechanizmus, todėl padidėja pažeidžiamumas tiek didelei PAR, tiek padidėjusiai UV-B spinduliuotei (Lavola ir kt., 2003). Be poveikio augalų lygmeniu, saulės spinduliuotė taip pat veikia ekosistemos procesus, tokius kaip nuokritų irimas ir maistinių medžiagų apykaita. Ultravioletinė spinduliuotė gali paspartinti organinių medžiagų fotodegradaciją, prisidėdama prie anglies apykaitos, ypač sausoje arba atviroje medžių lajų aplinkoje (Alan T. Austin ir Ballaré, 2010).

Be to, saulės spinduliuotė vaidina svarbų vaidmenį formuojant miško pomiškį. Naujausi Fałowska ir kt. (2024 m.) atlikti tyrimai rodo, kad šviesos prieinamumas stipriai veikia kerpių dominuojamas bendrijas paprastųjų pušynų miškuose, o tai pabrėžia šių ekosistemų jautrumą spinduliuotės režimų pokyčiams.

Apibendrinus galima teigti, kad klimato kaitos sukelti saulės spinduliuotės pokyčiai turi ir turės sudėtingą ir nuo konteksto priklausomą poveikį sąlygiškai natūralių miškų ekosistemų būklei ir produktyvumui. Nors padidėjusi difuzinė spinduliuotė tam tikromis sąlygomis gali padidinti produktyvumą, bendras padidėjusios UV-B spinduliuotės, karščio streso ir sausros poveikis greičiausiai padidins fiziologinį stresą medžiams ir sumažins ekosistemų atsparumą. Šis poveikis ypač ryškus oligotrofinėse miško augavietėse, kur miškų prisitaikymo gebėjimas yra iš esmės ribotas. Todėl, norint prognozuoti miškų reakciją į nuolatinius klimato kaitos veiksnius, labai svarbu suprasti spinduliuotės komponentų ir kitų aplinkos veiksnių sąveiką, kas yra vykdoma Sąlygiškai natūralių miško ekosistemų kompleksiško monitoringo stotyse.

Metodika

Saulės spinduliuotės energetines savybes nusako Saulės energinė apšvieta *G* ir Saulės spindulinė energija *H.* Saulės energinė apšvieta nurodo spinduliuotės galią, tenkančią vienam kv. metrui paviršiaus ploto. Apšvietos dimensija yra W/m2. Saulės spindulinė energija yra spindulinės energijos kiekis, tenkantis vienam kv. metrui paviršiaus per tam tikrą laikotarpį (valandą, dieną, mėnesį, metus). Šios energijos dimensija yra J/m2 arba kWh/m2.

Saulės spinduliuotės (aktinometriniai) stebėjimai Lietuvos meteorologijos stotyse vykdomi pagal specialią programą: didžioji dalis matavimų atliekama kas valandą. Jie atliekami tik labai nedaugelyje stočių, dirbančių pagal pilną programą.

Apšvieta kinta pagal sinusoidės dėsnį ir maksimumą pasiekia vidurdienį. Rudenį ir žiemą vyrauja sklaidžioji spinduliuotė, o tiesioginė sudaro mažiau 35 % visuminės spinduliuotės. Vasarą (nuo gegužės iki rugsėjo) tiesioginės spinduliuotės dalis sudaro apie 50 % visuminės. Esant giedram dangui, sklaidžiosios spinduliuotės dalis yra nedidelė: vasarą – 13 – 15 %, žiemą 30 – 42 %. Retais atvejais, kai kuriomis vasaros dienomis, esant skaidriai atmosferai, visuminė apšvieta gali siekti 0,98 - 1,12 kW/m2 [3].

Dar viena Saulės spinduliuotės energetinė charakteristika yra Saulės spindėjimo trukmė, t. y. laikotarpis, kai Saulės apšvieta viršija 0,21 kW/m2. Saulės spindėjimo trukmė Lietuvos pajūryje siekia 1900 h, o rytinėje dalyje – apie 1700 h.

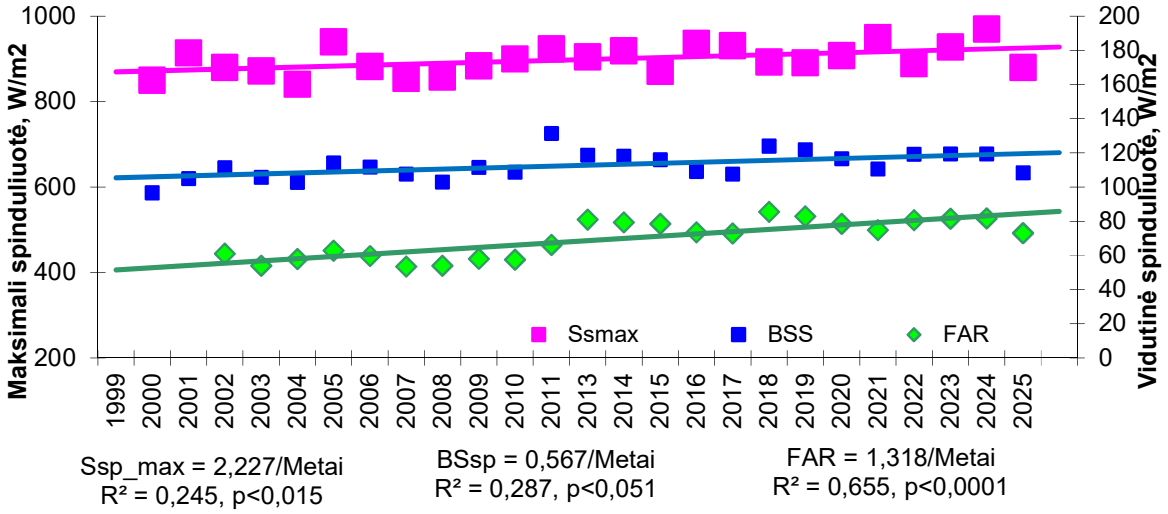
Saulės švietimo laikas Lietuvoje ilgiausias pajūryje ir trumpėja rytinės sienos link, kadangi visoje šalies teritorijoje debesuotumo tikimybė didėja rytų kryptimi. Vidutiniškai saulėtų valandų skaičius pajūryje siekia 1 840–1 900 val. kasmet. Šalies rytiniame pakraštyje jis neviršija 1 700 val./m. Maksimali saulės švietimo trukmė yra Nidoje ir siekia 1908 val./metus [3].

Daugiamečių stebėjimų duomenimis, vidutinis metinis suminės saulės radiacijos kiekis, krintantis į horizontalų paviršių yra 970 kWh/m2 Šilutėje ir 1025 kWh/m2 Kaune. Paros suminės radiacijos kiekiai į horizontalų paviršių labai skiriasi per metus ir kinta nuo 0,55 kWh/m2d. sausį iki 5,8 kWh/m2d. birželio mėnesį [3]. Remiantis gautais rezultatais HM stotyse buvo atlikta ir Aukštaitijos KMS gautų spinduliuotės rezultatų analizė.

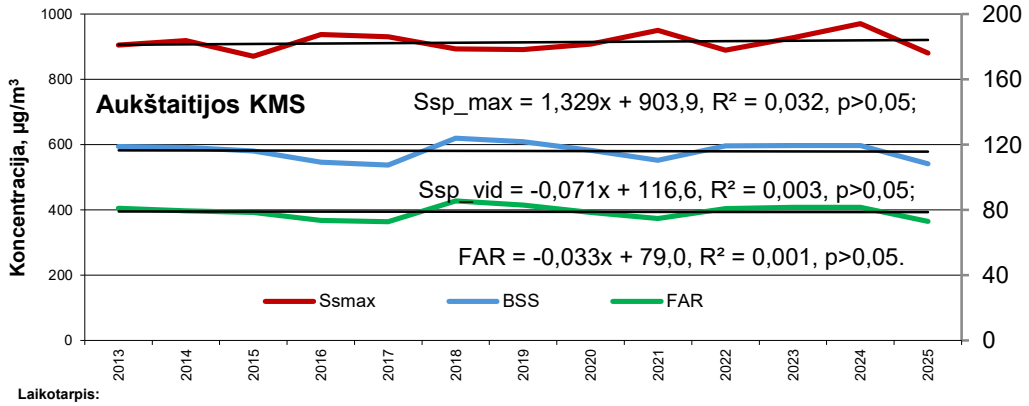
1. Adomavičius, V.; Balčiūnas, P. *Atsinaujinančiosios ir alternatyviosios energijos šaltiniai*. Kaunas, 2003. ISBN 9955-09-472-9.
2. Genutis, A., et al. *Atsinaujinantys energijos šaltiniai*. Akademija, 2008. ISBN 978-9955-865-09-4.
3. Genutis, A., et al. *Atsinaujinančiosios ir alternatyviosios energijos naudojimas šilumos gamybai*. Kaunas: Technologija, 2003. ISBN 9955-09-470-2.

1.3.1. Saulės bendrosios ir fotosintetiškai aktyvios spinduliuotės kaita Aukštaitijos KMS

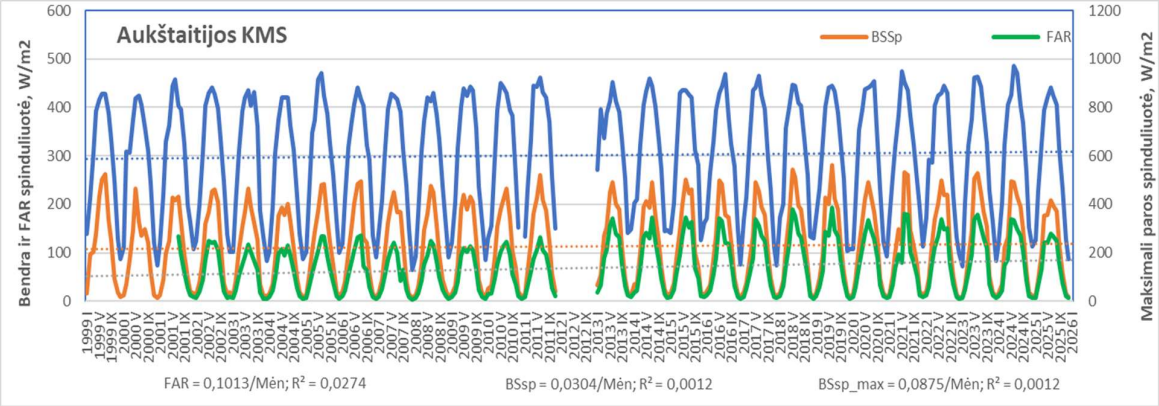
Saulės bendrosios ir fotosintetiškai aktyvios spinduliuotės kaita Aukštaitijos KMS pradėta registruoti 1999 m. Tai pagrindinis parametras tiesiogiai sąlygojantys visus ekofiziologinius parametrus miško ekosistemose ir lemiantis pirmiausiai klimato šilimo procesą.



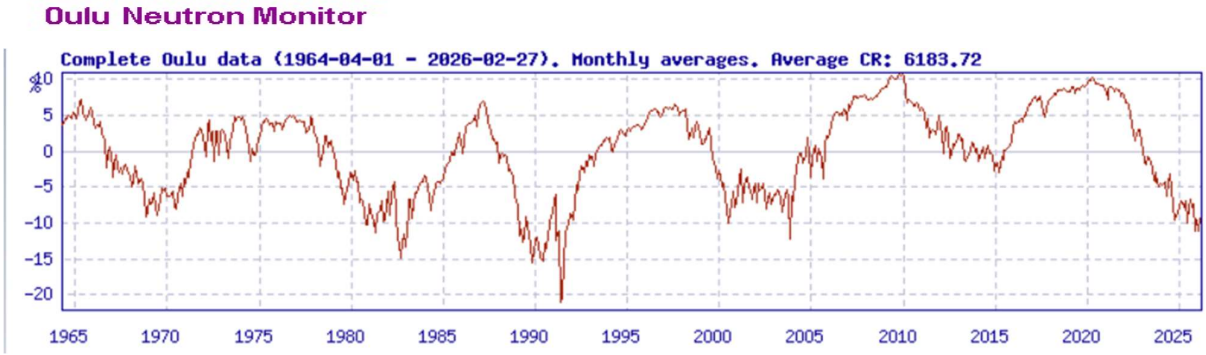
1.32 pav. Fotosintetiškai aktyvios spinduliuotės ir bendrosios saulės spinduliuotės vidutinių metinių ir jos maksimalių reikšmių kaita Aukštaitijos KMS 1999-2025 m. laikotarpiu.



1.33 pav. Fotosintetiškai aktyvios spinduliuotės ir bendrosios saulės spinduliuotės vidutinių metinių ir jos maksimalių reikšmių kaita Aukštaitijos KMS 2013-2025 m. laikotarpiu.



1.34 pav. Fotosintetiškai aktyvios spinduliuotės ir bendrosios saulės spinduliuotės vidutinių mėnesinių ir jos maksimalių reikšmių kaita Aukštaitijos KMS 1999-2025 m. laikotarpiu.



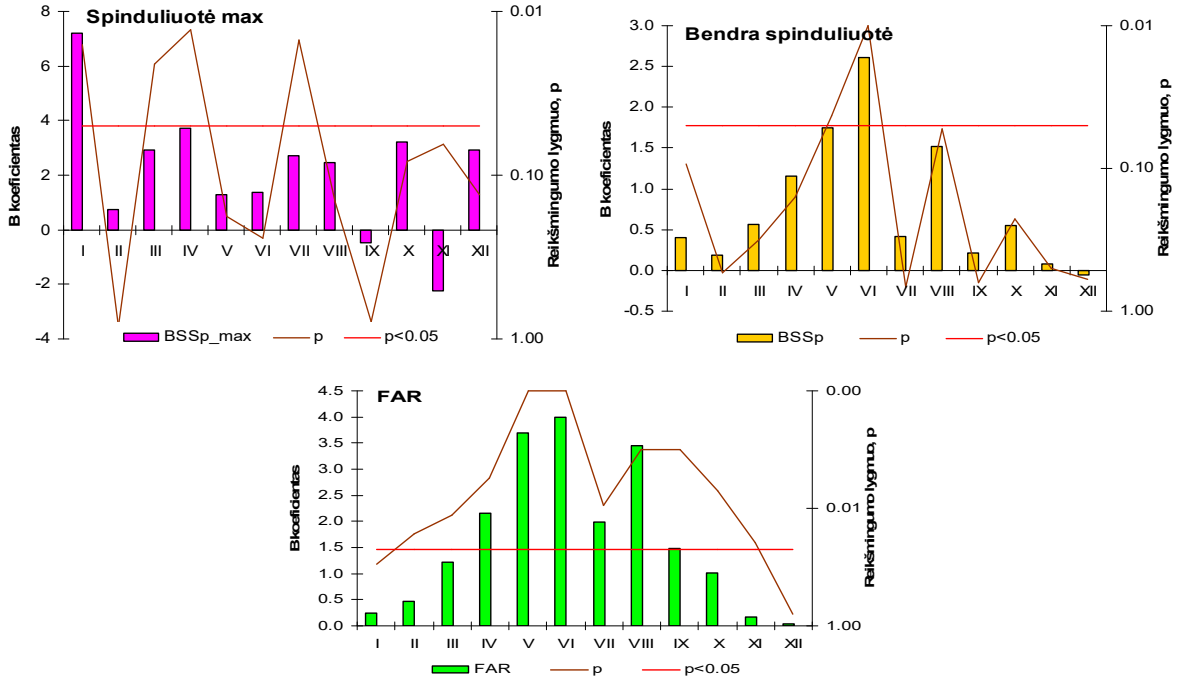
http://cosmicrays.oulu.fi/

Palyginimui pateiktas neutronų srauto kaita, kuri daugiausia kyla iš kosminės spinduliuotės ir tiesiogiai neįtakoja augalų fiziologinių procesų, kuriuos reguliuoja fotosintezės aktyvioji spinduliuotė (PAR) arba ultravioletinė spinduliuotė (UV-A ir UV-B). Skirtingai nuo elektromagnetinės spinduliuotės, neutronai yra jonizuojančios dalelės, o jų natūralus srautas Žemės paviršiuje yra per mažas, kad turėtų išmatuojamą poveikį fotosintezei, fotomorfogenezei ar UV spindulių sukeltiems streso atsakams. Naujausi tyrimai patvirtina, kad nėra tiesioginių ekologinių kelių, siejančių neutronų spinduliuotę su miškų fiziologiniu funkcionavimu, o jos vaidmuo ekosistemų procesuose natūraliomis sąlygomis išlieka nereikšmingas. Buvo iškelta hipotezė apie galimą netiesioginį poveikį, kurį lemia kosminių spindulių sukelta jonizacija, daranti įtaką debesų susidarymui ir atitinkamai difuzinės spinduliuotės režimams; tačiau empirinis biologiškai reikšmingo poveikio ekosistemoms patvirtinimas išlieka ribotas ir labai neaiškus (Bontemps ir Svensmark, 2022). Nors kosminių spindulių kintamumas buvo aptartas atsižvelgiant į atmosferos procesus ilguoju laikotarpiu (Nilsson ir kt., 2024), jo indėlis į trumpalaikius ekologinius pokyčius miškų sistemose laikomas nedideliu, palyginti su dominuojančiais klimato veiksniais, tokiais kaip aerozoliai, debesų dinamika ir temperatūra.

Miškų ekosistemų tyrimuose neutronų srautas pirmiausia yra svarbus kaip metodologinė priemonė, ypač kosminių spindulių neutronų jutikliuose, naudojamuose dirvožemio drėgmei įvertinti, o tai gali netiesiogiai paveikti augalų reakciją į spinduliuotę per sausros stresą ir žiotelių laidumą. Apskritai neutronų srautas nelaikomas reikšmingu su spinduliuote susijusių fiziologinių procesų veiksniu hemiborealiniuose miškuose, kuriuose vyrauja paprastoji pušis (*Pinus sylvestris* L.), ypač lyginant su gerai žinomu ir kiekybiškai dominuojančiu PAR, UV-A ir UV-B spinduliuotės poveikiu.

Aukštaitijos KM stotyje atlikti tyrimai rodo, kad ***intensyviausiai ir reikšmingiausiai didėja FAR spinduliuotė, kuri per 27 m. laikotarpį didėja vidutiniškai 1,32 w/m^2 per metus. Bendrosios saulės spinduliuotės kaita yra kiek mažesnė ir siekia 0,6 w/ m^2 per metus. Maksimalių reikšmių kaitoje stebimas iki 2,2 w/ m^2 spinduliuotės aktyvėjimas per metus.***

II laikotarpiu nuo 2013, kaitos tendencijos pasikeitė iš esmės. Jei maksimalios spinduliuotės didėjimas sušvelnėjo 2 ratus, tai vidutinės ir FAR spinduliuotį Aukštaitijos KMS pradėjo mažėti po 0,07 ir 0,033 w/m^2 per metus, ką būtų jau galima pradėti sietis ir su temperatūros mažėjimu paskutiniuoju laikotarpiu, nors ši spinduliuotės kaitos tendencija dar nereikšminga.



1.35 pav. Fotosintetiškai aktyvios spinduliuotės ir bendrosios saulės spinduliuotės vidutinių mėnesinių ir jos maksimalių reikšmių kaitos intensyvumas ir reikšmingumas Aukštaitijos KMS 1999-2025 m. laikotarpiu.

Analizuojant vidutines mėnesines reikšmių kaitos, nustatyta, kad bendroji saulės spinduliuotė reikšmingiausiai didėja gegužės, birželio ir rugpjūčio mėnesiais beveik siekdama 2W/ m^2 per metus reikšmę.

Šios spinduliuotės maksimalių reikšmių sekoje išsiskiria sausio, kovo-balandžio ir liepos mėnesiai, kada maksimalios reikšmės didėja vidutiniškai po virš 3 W/ m^2 per metus.

Kaip minėta intensyviausiai didėja FAR spinduliuotė, kuri yra ypač svarbi augalams. Per 27 m laikotarpį FAR spinduliuotė intensyviausiai didėja šiltuoju laikotarpiu, t.y. nuo kovo iki net lapkričio mėnesio, savo maksimalias didėjimo reikšmes pasiekdama gegužės-birželio ir rugpjūčio mėnesiais – virš 3,5 W/ m^2 per metus, kai tiesioginė spinduliuotė būna intensyviausia.

Saulės spinduliuotės intensyvumo augimas, vienas iš reikšmingiausių aplinkos kaitos rodiklių, gali turėti reikšmingos įtakos gerėjančiai miškų būklei ir didėjančiam produktyvumui, o taip pat ir kitų miško ekosistemų biotos komponentų įvairovei ir gausai. Tačiau nuo 2013 m. Saulės spinduliuotės kaitoje stebima mažėjimo tendencija

1.3.2. Ultravioletinės spinduliuotė kaita Aukštaitijos KMS

Energijos masė, judanti nuo Saulės link mūsų šviesos greičiu, turi bendrą pavadinimą elektromagnetinė spinduliuotė arba šviesa. Nešamą energijos kiekį lemia bangos ilgis (dažnis) – kuo mažesnis bangos ilgis, tuo didesnė energija. Žmogaus akis jautri tik tam tikrai šio srauto daliai (400–700 nm), vadinamai matomąja šviesa (1 nm =10-9 m). Spektro dalis, pagal bangos ilgį esanti už mėlynosios dalies, vadinama ultravioletine (UV). Ji paprastai dalijama į:

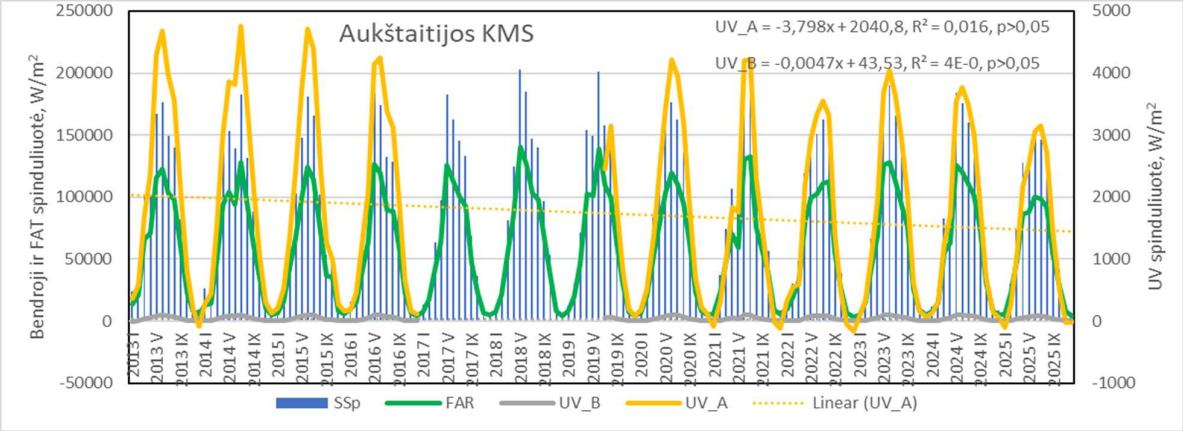
UVA, bangos ilgis 315–400 nm;

UVB, bangos ilgis 280–315 nm;

UVC, bangos ilgis 100–280 nm.

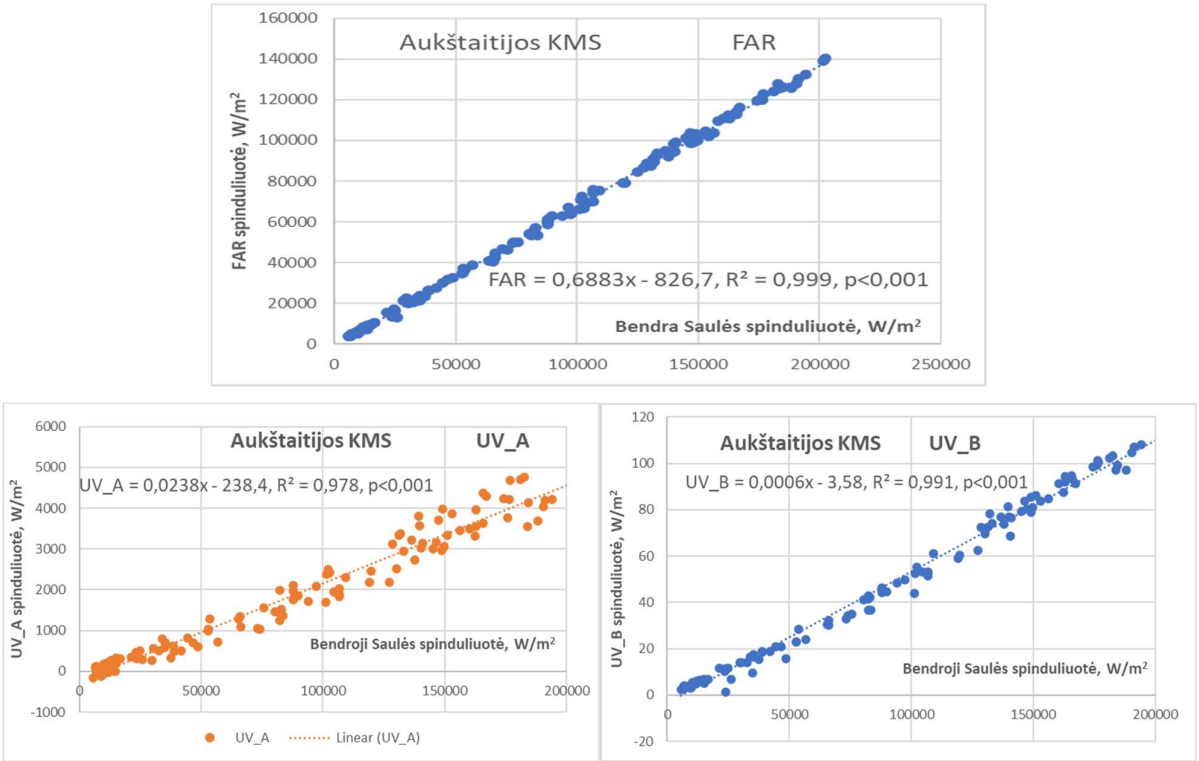
Iš jų pavojingiausia dalis, pasiekianti Žemės paviršių, yra UVB. Ji turi poveikio žmogaus sveikatai, t. y. gali būti tam tikrų vėžio rūšių priežastis, veikia augalų ir gyvūnų DNR.

Potencialiai pavojingiausia yra UVC energija, bet ji beveik nepasiekia Žemės paviršiaus. UVB irgi yra labai stipriai sugeriama atmosferoje, o Žemę pasiekia tik maža jos dalis. UVA ozonas absorbuoja silpniau, išsklaido arti Žemės paviršiaus. Iš bendro UV kiekio, pasiekiančio Žemės paviršių, apie 94% yra UVA ir 6% UVB. http://www.meteo.lt/ivairenybes/ultravioletine-saules-spinduliuote



1.36 pav. Ultravioletinės UV A ir UV B spinduliuotės vidutinių mėnesinių reikšmių kaita Aukštaitijos KMS 1999-2025 m. laikotarpiu.

Tyrimai Aukštaitijos KM stotyje parodė, kad ultravioletinė spinduliuotė paskutiniųjų 13 metų laikotarpiu turi tendenciją mažėti: UV A – po 3,8 , o UV B po 0,005 W/m2 per metus. Šią katą reikšmingai sąlygojo bendroji Saulės spinduliuotė, kuri 98 ir 99 proc. paaiškino šių UV spinduliuočių kaitą atitinkamai. ***Nuo 2013 m. Saulės spinduliuotės kaitoje stebima mažėjimo tendencija, kuri lėmė ultravioletinės spinduliuotės reikšmingą mažėjimą nuo 2021 m.***



1.37 pav. Bendrosios Saulės spinduliuotės ir FAR bei Ultravioletinės UV A ir UV B spinduliuotės tarpusavio ryšys 1999-2025 m. laikotarpiu Aukštaitijos KMS.

1.3.3. Meteorologinių veiksnių ir saulės spinduliuotės tarpusavio sąveikos

Nustatyta, kad Žemę pasiekusi Saulės spindulinė energija mūsų planetoje, esant giedram orui, pasiskirsto taip:

- sugeriama Žemės paviršiuje – 80 %;
- sugeriama atmosferos dulkėse – 12 %;
- atsispindi nuo atmosferos dulkių – 6 %;
- atsispindi nuo Žemės paviršiaus – 2 %.

Esant debesuotam orui, Žemę pasiekusi Saulės spindulinė energija pasiskirsto kiek kitaip:

- sugeriama Žemės paviršiuje - 10 – 50 %;
- atsispindi nuo debesų - 30 – 60 %;
- sugeriama debesyse - 10 – 20 %.

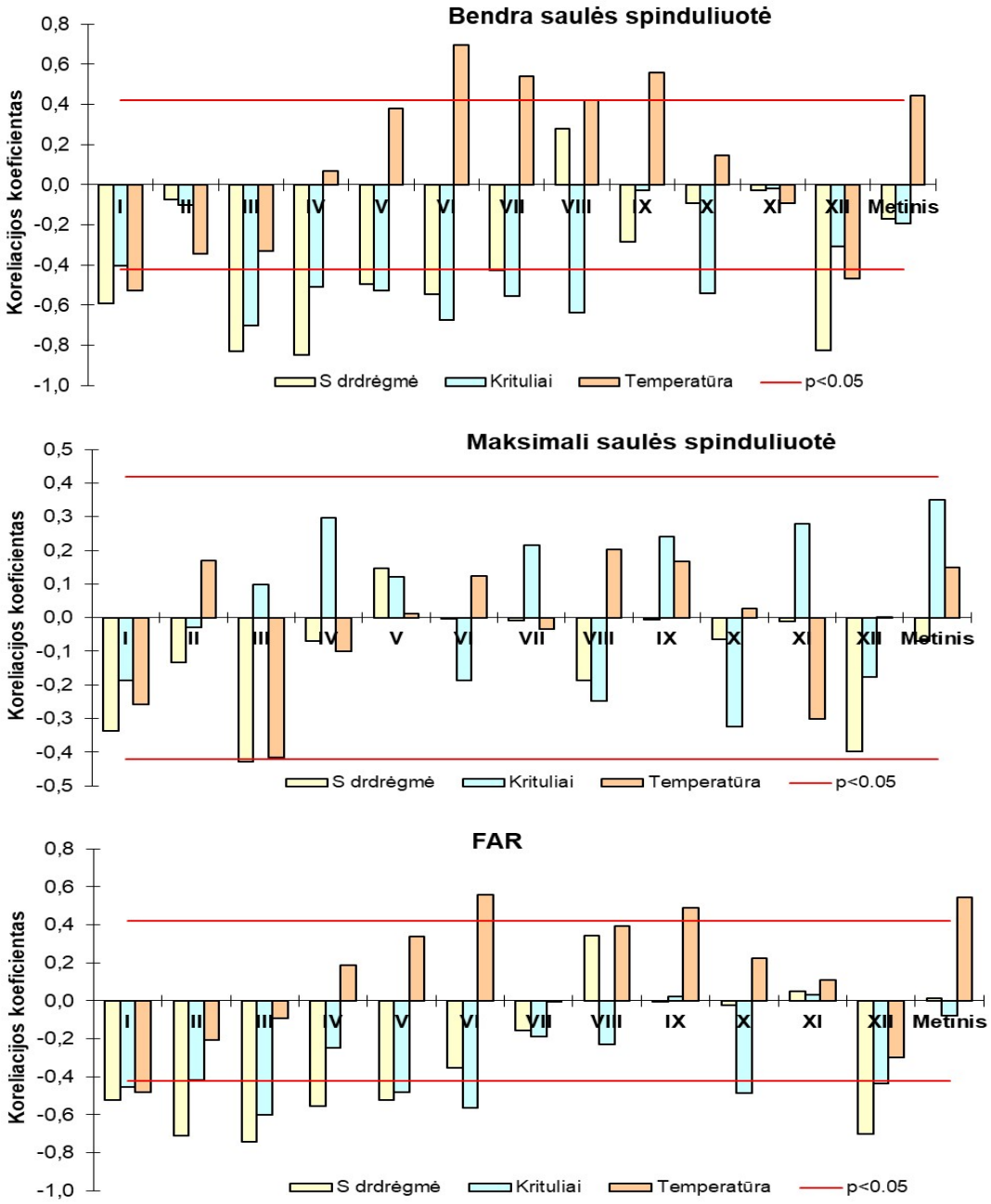
Todėl tiriant sąveikas su meteorologiniais veiksniais saulės spinduliuotė buvo nagrinėjama ir kaip priklausomas (nuo debesuotumo ir kritulių) ir kaip sąlygojantis (oro temperatūra) veiksnys.

Labai didelę įtaką turi debesuotumas: priklausomai nuo debesų tamsumo, vasarą per apsiniaukusią dieną iš Saulės tas pat ploto vienetas toje pačioje Saulės energinės erdvės plokštumoje gauna apie 10-20 kartų mažiau energijos, negu visiškai giedrią dieną. Dėl nakties laikotarpio paros cikle ir dėl to, kad gali pasitaikyti kelios apsiniaukusios dienos iš eilės, šilumos ir spinduliuotės santykis gali iš esmės pasikeisti.

Tyrimų rezultatai parodė, kad reikšmingiausi koreliaciniai ryšiai egzistuoja tarp meteorologinių veiksnių ir bendrosios (visuminės) Saulės spinduliuotės, kurie reikšmingai skiriasi šaltuoju (ramybės) ir šiltuoju (vegetacijos) laikotarpiais. Didžiausią įtaką tokiai priklausomybei turi saulės spindulių kritimo kampas į Žemės paviršių.

Šiltuoju laikotarpiu, kai vyrauja tiesioginė spinduliuotė, didesnis jos intensyvumas tiesiogiai sąlygoja oro temperatūrą, dėl ko ji šiais mėnesiais didėja ir ypač birželio-liepos mėnesiais. Likusiais šiltojo sezono mėnesiais tiesioginis ryšys išlieka, tik jis tampa mažiau reikšmingas. Šaltuoju laikotarpiu, kai vyrauja išsklaidyta spinduliuotė, didesnis jos intensyvumas – priešingai mažina oro temperatūrą, dėl ko žiemą giedromis dienomis registruojami didesni šalčiai.

Santykinė drėgmė ir krituliai, skirtingai negu oro temperatūra, kurią sąlygoja spinduliuotės intensyvumas, patys turi reikšmingos įtakos Saulės spinduliuotei pasiekiančiai Žemės paviršių. Dėl šios priežasties visais mėnesiais egzistuoja atvirkštinė priklausomybė tarp šių nagrinėjamų parametrų. Paminėtina tai, kad kuo žemesnė drėgmė tuo Saulės spinduliuotės intensyvumas didesnis, tuo Žemės paviršiui mažiau tenka ir kritulių kiekio. Tokia sudėtinga meteorologinių ir Saulės spinduliuotės sąveika turi reikšmingos įtakos visiems bio-, geo- ekosistemos komponentų pokyčiams ir procesams.



1.38 pav. Fotosintetiškai aktyvios spinduliuotės ir bendrosios saulės spinduliuotės vidutinių mėnesinių ir jos maksimalių reikšmių tarpusavio sąveika su meteorologiniais parametrais ir jos reikšmingumas Aukštaitijos KMS 1999-2025 m. laikotarpiu.

FAR spinduliuotės ir meteorologinių veiksnių sąveikos pagrindiniai ypatumai iš esmės nesiskiria nuo bendrosios spinduliuotės ir meteo veiksnių sąveikos ypatumų, tik šie ryšiai mažiau reikšmingi. Nenustatyti reikšmingi ir tendencingi ryšiai tarp maksimalios spinduliuotės ir meteo veiksnių.

Išvados

Aukštaitijos KM stotyje atlikti tyrimai rodo, kad ***intensyviausiai ir reikšmingiausiai didėja FAR spinduliuotė, kuri per 27 m. laikotarpį didėja vidutiniškai 1,32 w/m^2 per metus. Bendrosios saulės spinduliuotės kaita yra kiek mažesnė ir siekia 0,6 w/ m^2 per metus. Maksimalių reikšmių kaitoje stebimas iki 2,2 w/ m^2 spinduliuotės aktyvėjimas per metus.***

Analizuojant vidutines mėnesines reikšmių kaitos, nustatyta, kad bendroji saulės spinduliuotė reikšmingiausiai didėja gegužės, birželio ir rugpjūčio mėnesiais beveik siekdama 2W/ m^2 per metus reikšmę. Šios spinduliuotės maksimalių reikšmių sekoje išsiskiria sausio, kovo-balandžio ir liepos mėnesiai, kada maksimalios reikšmės didėja vidutiniškai po virš 3 W/ m^2 per metus.

Intensyviausiai didėja FAR spinduliuotė, kuri yra ypač svarbi augalams. Per 27 m laikotarpį FAR spinduliuotė intensyviausiai didėja šiltuoju laikotarpiu, t.y. nuo kovo iki net lapkričio mėnesio, savo maksimalias didėjimo reikšmes pasiekdama gegužės-birželio ir rugpjūčio mėnesiais – virš 3,5 W/ m^2 per metus, kai tiesioginė spinduliuotė būna intensyviausia.

Saulės spinduliuotės intensyvumo augimas, vienas iš reikšmingiausių aplinkos kaitos rodiklių, gali turėti reikšmingos įtakos gerėjančiai miškų būklei ir didėjančiam produktyvumui, o taip pat ir kitų miško ekosistemų biotos komponentų įvairovei ir gausai. Nuo 2013 m. Saulės spinduliuotės kaitoje stebima mažėjimo tendencija, kuri lėmė ultravioletinės spinduliuotės mažėjimą.

Didesnė santykinė drėgmė ir gausūs krituliai turi reikšmingos įtakos Saulės spinduliuotės pasiekiančios Žemės paviršių intensyvumui slopinti. Tai veiksniai, kuriems didėjant, gali būti sąlygotas ir klimato atšalimas ateityje.

Saulės spinduliuotės intensyvumo pokyčiai gali turėti reikšmingos įtakos gerėjančiai miškų būklei ir produktyvumui, o taip pat ir kitų miško ekosistemų biotos komponentų įvairovei ir gausai.

1.4 Pažemio ozono koncentracijų tyrimai

Ozonas yra stiprus fotocheminis oksidantas, kuris gali sukelti rimtus žmogaus sveikatos sutrikimus ir pažeisti žemės ūkio kultūras bei įvairias medžiagas. Tokios ozono koncentracijos yra stebimos visoje Europoje. Troposferoje yra tik apie 10 % viso atmosferos ozono kiekio, tačiau jis vaidina didžiulį vaidmenį ne tik augmenijos, bet ir gyvūnijos bei žmonių gyvenime. Neigiamus efektus ozonas sukelia dėl savo ypatingo cheminio aktyvumo. Šiandien ozono koncentracija oro masėse virš jūros, kurios pasiekia Europą iš vakarų, yra 60-70 $\mu g/m^3$. Fotocheminiai vyksmai virš vakarų ir centrinės Europos padidina šį lygį 30-40% vasarą ir sumažina apie 10% žiemos metu. Europoje labai didelės - virš 200 $\mu g/m^3$ - ozono koncentracijos pastebimos fotocheminių epizodų metu. Per paskutiniuosius 20 praėjusio šimtmečio metus ozono koncentracija didėjo Šiaurės pusrutulio vidutinių platumų troposferoje 1-3 % per metus. Tačiau po 2000 metų situacija daugelyje Europos šalių pasikeitė, vidutinė metinė ozono koncentracija nustojo didėjusi arba net pradėjo mažėti [1]. Pastebimai sumažėjo didžiausios ozono koncentracijos dydis, tačiau padidėjo mažesnių koncentracijų lygis, t.y., sumažėjo ozono sezoninė amplitudė. Tai yra siejama su pagrindinių ozono pirmtakų emisijos sumažėjimu daugelyje Vakarų Europos šalių (Girgždienė, 20019).

Pasaulinėje literatūroje vis dažniau tarp ekosistemų būklę sąlygojančių veiksnių minimas neigiamas priežemio ozono poveikis. Ozonas yra vienas stipriausių oksidatorių, neigiamai veikiantis visą gyvąją aplinką. Šio teršalo koncentracija ore, skirtingai nei vieno pagrindinio pramoninių emisijų komponento SO_2, rodo tendenciją didėti (Staehelin et al., 1994; Dollar et al., 1995, Solberg et al, 2004). Jei dar praėjusio amžiaus pabaigoje pagrindinės teritorijos, kuriose buvo stebimi medžių pažeidimai dėl padidėjusių priežemio ozono koncentracijų, buvo Pietų Europoje, tai pastaruoju metu vis dažniau minima Centrinė ar net Šiaures Europa (Skärby ir kt., 1998, 2004; Karlsson ir kt., 2006; Ultrainen ir Holopainen, 2000). Dėl šios priežasties daugelio autorių nuomone, dabar didžiausias dėmesys turi būt skiriamas 3 pagrindinėms atmosferos komponentėms, kurios atskirai ar junginiuose gali turėti esminę įtaką ilgalaikiam miškų ekosistemų stabilumui. Tai ozono ir CO_2 koncentracijos ore bei azoto iš atmosferos iškritos (Matyssek and Innes, 1999). Šių komponenčių poveikis yra susijęs su medžiagų persiskirstymu medžiuose bei jų sąlygojamais ekologiškai svarbiais medžių bendro gyvybingumo pokyčiais. Visų pirma tai įtaka medžių konkurentingumui bei atsparumui skirtingiems stresams. Todėl reikšmingas ozono poveikis gali būt slepiamas jį lydinčių veiksnių poveikio. Tokiais veiksniais gali tapti ir natūralūs veiksniai, tokie kaip vabzdžių pažeidimai (Grodzki et al., 2002), ir antropogeniniai veiksniai, iš kurių išsiskiria aplinkos užterštumas sieros dioksidu. Būtent padidėjusios ozono ir sieros dioksido koncentracijos, sinergetiškai veikdamos gali smarkiai pažeisti lapiją (Percy, 2002).

Šiuo metu yra žinoma, kad ozonas gali turėti įtakos medžių defoliacijai bei mažinti medžių prieaugį (Manning, 2004). Tačiau nustatyti greitesni miškų augimo tempai (Spieker et al., 1999) iš dalies prieštarauja dabartinei ozono koncentracijos augimo tendencijai. Probleminis lieka ir ozono bei lajų defoliacijos ryšys (Brantley et al., 1994; Skelly et al., 1987). Pagrindinė priežastis – didelis medžių lajų defoliacijos laipsnio nustatymo subjektyvumas bei šio rodiklio nespecifinės reakcijos į kitus aplinkos veiksnius, kas apsunkina šių duomenų interpretaciją (Innes, 1990, 1993; Ferretti, 1998). Vidutinei medžių lajų defoliacijai daugelį metų reikšmingai kintant, ryšys su ozono koncentracijų kaita išlieka silpnas arba jis apskritai nenustatomas (Innes et al 1997; Klap et al., 1997, 2000). Iki šiol reikšmingas ozono poveikis augalijos gyvybingumui buvo nustatytas tik teritorijose, pasižyminčiose išskirtinėmis sąlygomis (Skelly et al., 1998b) bei kontroliuojamoje aplinkoje. Tačiau tokiomis sąlygomis atskleisti ozono poveikio augalijai dėsningumai, negali būti perkelti į natūralias sąlygas (Manning, 2004). Ozono poveikis natūraliomis sąlygomis yra susijęs ir su kitų natūralių ir antropogeninių stresorių poveikiu. Todėl ozono tiesioginis poveikis plataus masto miškų būklės pablogėjimui praėjusio amžiaus paskutiniajame dešimtmetyje iki šiol nenustatytas (Skelly and Innes, 1994; Kandler and Innes, 1995). Nepaisydami šių prieštaravimų, daugelis mokslininkų linkę teigti, kad būtent ozonas turi reikšmingiausią įtaką miškų būklei globaliu mastu (Reich, 1987; Steiguer, 1990; Sandermann, 1996).

Ozono koncentracijos atmosferos pažemio sluoksnyje monitoringas leidžia nustatyti ozono lygio pokyčius per ilgą laikotarpį, ozono kitimo tendenciją bei šaltinius, nustatyti kritinius jo lygius bei įvertinti galimą poveikį į ekosistemas.

Pagrindinis darbo tikslas – atmosferos pažemio sluoksnyje ozono koncentracijos matavimo pagal EMEP programą ir ES direktyvų 96/62/EB ir 2002/3/EB reikalavimus duomenų, gautų Preilos foninio monitoringo stotyse, įvertinimas, jų apdorojimas ir analizė, didžiausių ozono koncentracijų atsikartojimo dažnio, šaltinio ir galimo ozono poveikio Lietuvos ekosistemoms įvertinimas. Indikatorių AOT40 ir AOT60 verčių apskaičiavimas ir įvertinimas.

Įsigaliojančioje naujoje Europos Parlamento ir Tarybos direktyvoje 2008/50/EB dėl aplinkos oro kokybės ir švaresnio oro Europoje esminių pakitimų ozono klausimais nėra, išlieka tie patys reikalavimai [7].

Metodika:

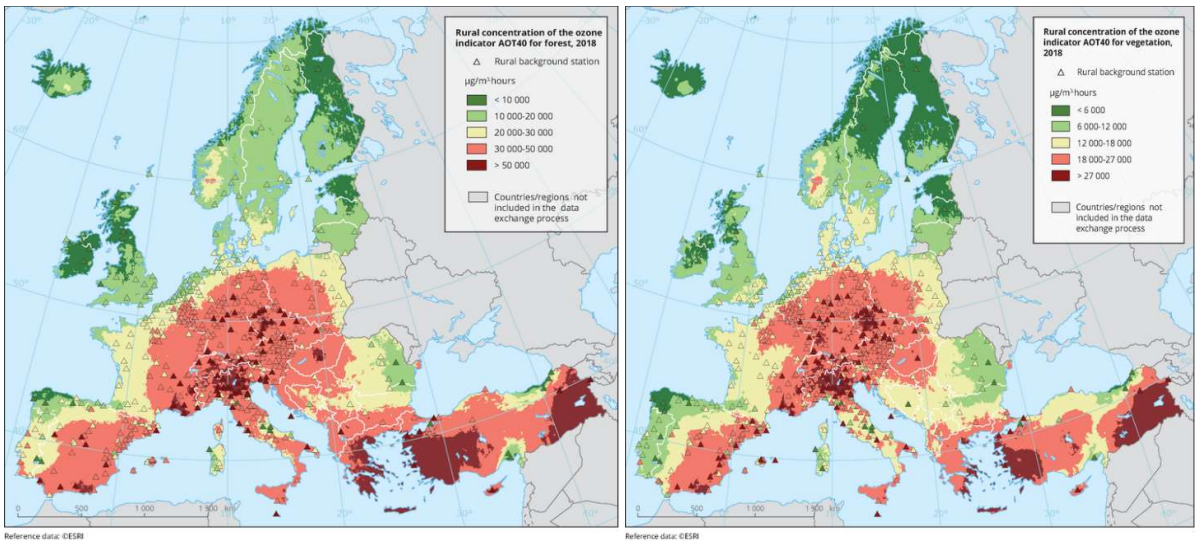
Ozono koncentracija atmosferos pažemio sluoksnyje Lietuvoje pagal EMEP (Oro taršos tolimųjų pernašų Europoje monitoringo ir įvertinimo kooperatyvinė programa) reikalavimus matuojama nenutrūkstamai Aukštaitijos, Žemaitijos ir buvusioje Dzūkijos KM stotyse. Matavimams naudojami komerciniai UV absorbcijos ozono analizatoriai.

Remiantis 2001/81/EB Direktyva bei LR Aplinkos ministro įsakymu Nr. 468, yra nustatytas pažemio ozono kritinis lygis žmonių sveikatai. Šis lygis nusakomas indikatoriumi AOT 60, kurio vertė yra didesnių nei 120 µg/m^3 (= 60 ppb) ir 120 µg/m^3 pažemio ozono 1 valandos koncentracijų, matuotų metus skirtumų suma.

Augalams ir miškams vis dar naudojamas AOT 40 (išreikštas (µg/m^3) x valandų) yra skirtumo tarp valandinių koncentracijų, didesnių už 80 µg/m^3 (= 40 dalių vienam milijardui) ir 80 µg/m^3 suma per nustatytą laikotarpį, naudojant tik vienos valandos vertes, matuotas nuo 8:00 iki 20:00 val. Vidurio Europos laiku kiekvieną dieną.

1.4.1. Ozono koncentracijos pokyčių apžvalga ir prognozė Europoje

Paskutinieji apibendrinti ozono koncentracijų tyrimai rodo, kad suminės AOT 40 koncentracijos nei augalijai nei miškams net nepriartėja prie ribinių, kurias viršijus būtų tikėtinas neigiamas poveikis augalams.

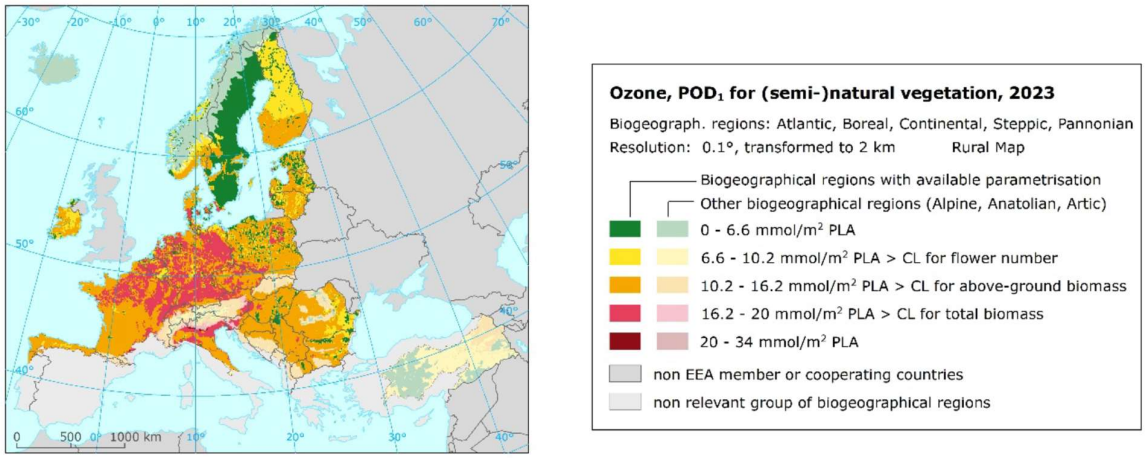


1.39 pav. AOT 40 augalams ir miškams suminės vertės Europoje 2018 m.

https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/rural-concentration-of-the-ozone-6

. Pastaruoju laikotarpiu šis rodiklis dažnai kritikuojamas, kadangi neatsižvelgiama į augalo būklę, laikotarpiu kai aplinkoje susidaro maksimalios ozono koncentracijos. Nustatyta, kad tik patekęs į augalus pro žioteles ozonas gali sukelti nepageidautinus poveikius augalams, kurie sukelia priešlaikinį spyglių/lapų pageltimą ir nukritimą, o taip pat ir prieaugio sumažėjimą. Dėl šios priežasties vis dažniau siūloma naudoti ozono srauto pro žioteles skaičiavimo metodiką.

Rezultatai rodo, kad 2018 m. ***AOT 40 miškams suminės vertės Lietuvoje svyravo tarp 10 000 ir 20 000 µg/m³•h, o augmenijai šios vertės dar buvo mažesnės ir svyravo tarp 6 000 ir 12 000 µg/m³•h. Tokios suminės šio indikatoriaus rezultatai rodo, kad nei miškai, nei augmenija visumoje neturėtų patirti papildomų nuostolių dėl žalingo šio fitotoksikanto poveikio Lietuvoje.***



Horálek, J., et al., 2025, *Air quality maps of EEA member and cooperating countries for 2023*, Eionet Report – ETC HE 2025/5, European Topic Centre on Human Health and the Environment (https://doi.org/10.5281/zenodo.17427293) accessed 12 December 2025.

1.40 pav. Fitotoksinė ozono dozė (POD1) (pusiau) natūraliai augmenijai, 2023 m.

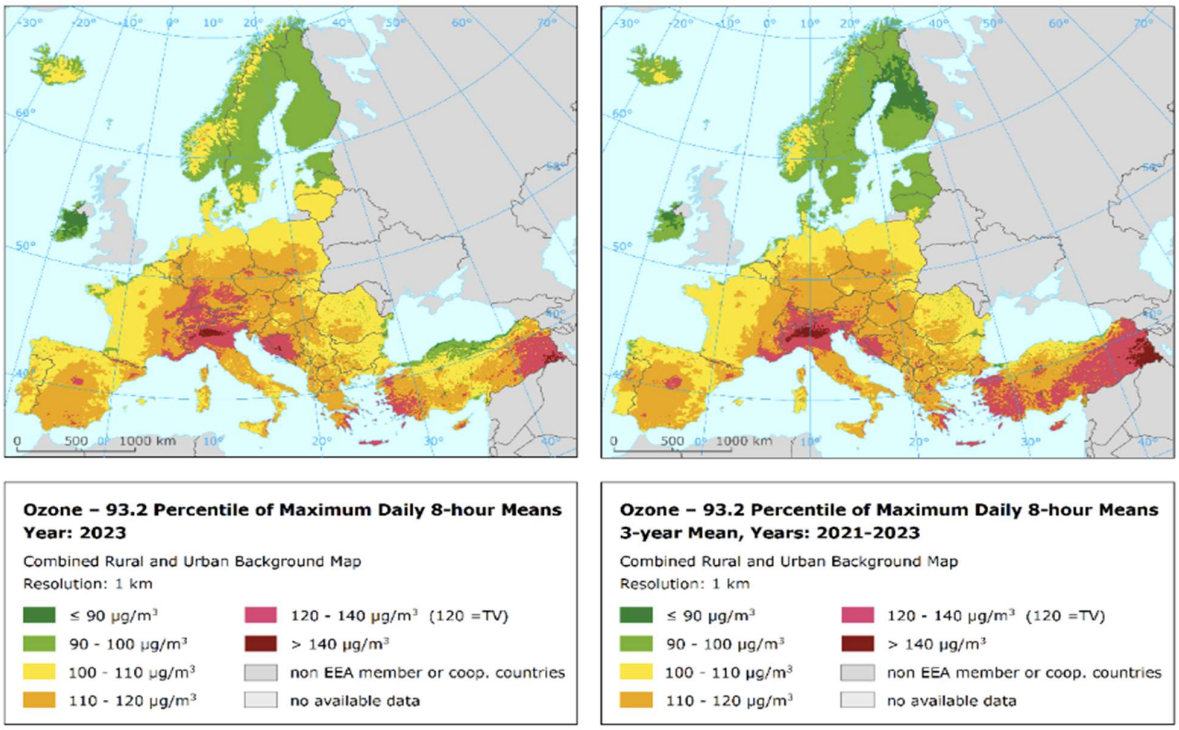
Žemėlapyje pateiktas galutinis jungtinis einamųjų kalendorinių metų (2023 m.) ir trejų metų vidurkio (2021–2023 m.) 93,2 procentilio maksimalaus paros 8 valandų vidurkio žemėlapis. Žemėlapiuose raudonoje ir tamsiai raudonoje srityse parodytos 93,2 procentilio maksimalaus paros 8 valandų vidurkio vertės, viršijančios 120 µg/m3 daugiau nei 25 dienas 2023 m., t. y. atitinkamai viršijančios leistiną slenkstį 2023 m. ir slenkstį trejų metų vidurkyje 2021–2023 m.

Žemėlapyje parodyta, kad 2023 m. keliose Europos vietose buvo užfiksuotos didesnės nei 120 µg/m3 procentilio vertės. Šios vertės ypač ryškios didelėse Turkijos, Bosnijos ir Hercegovinos, Kroatijos, šiaurės Italijos ir Šveicarijos teritorijose.

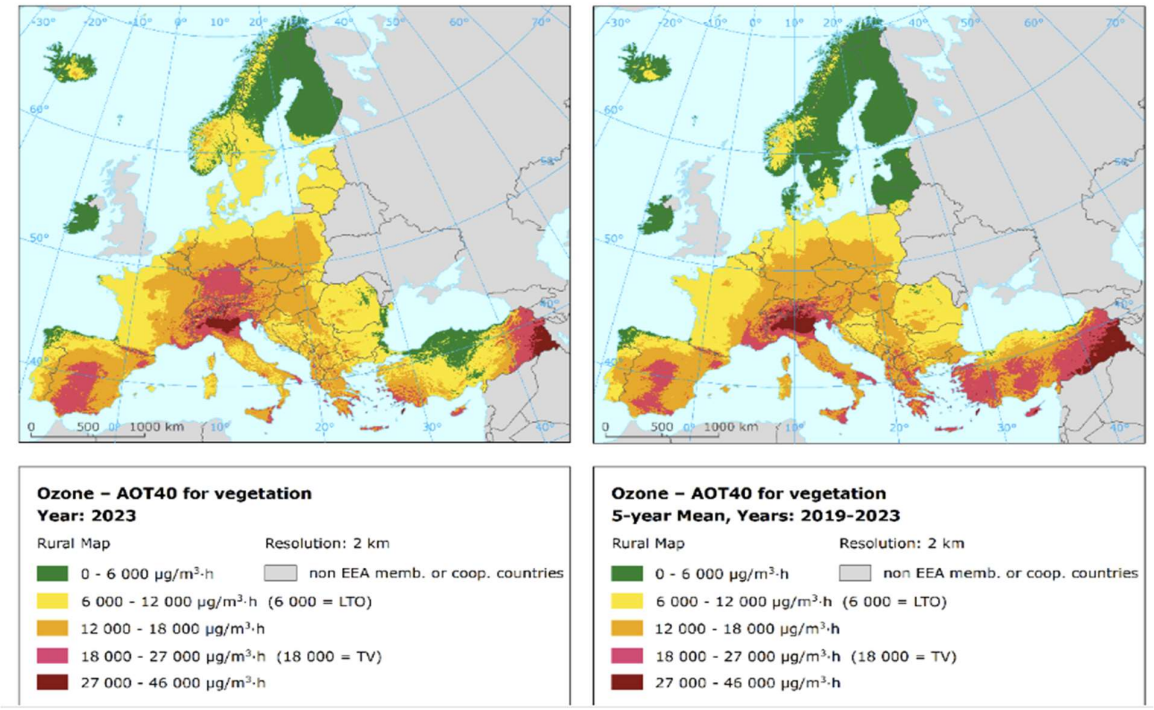
Kalbant apie 3 metų vidurkį (2021–2023 m.), kuris yra 93,2 procentilio maksimalaus paros 8 valandų vidurkio, šios procentilio vertės, viršijančios 120 µg/m3, pasitaikė didelėse Turkijos, Bosnijos ir Hercegovinos, Šiaurės Italijos ir Šveicarijos teritorijose.

Apskritai pietinėje, pietrytinėje ir centrinėje Europos dalyse ozono koncentracija yra didesnė nei šiaurinėje, o tai daugiausia lemia didesnė saulės spinduliuotė ir temperatūra šiose vietovėse. Nepaisant to, 2018 m. duomenimis, net ir šiaurės Europoje šiltuoju metų laiku gali susidaryti didesnės nei leistinų koncentracijų slenkstis koncentracijos (Horálek ir kt., 2021).

Tuo tarpu didžiausias padidėjimas pastebėtas pietų, centrinėje ir šiaurinėje Europos dalyse, ypač Bosnijoje ir Hercegovinoje, Kroatijoje, Rumunijoje, Lenkijoje, **Baltijos šalyse** ir pietų Suomijoje, kur kai kuriose vietovėse lygis padidėjo daugiau nei 4 µg/m³.



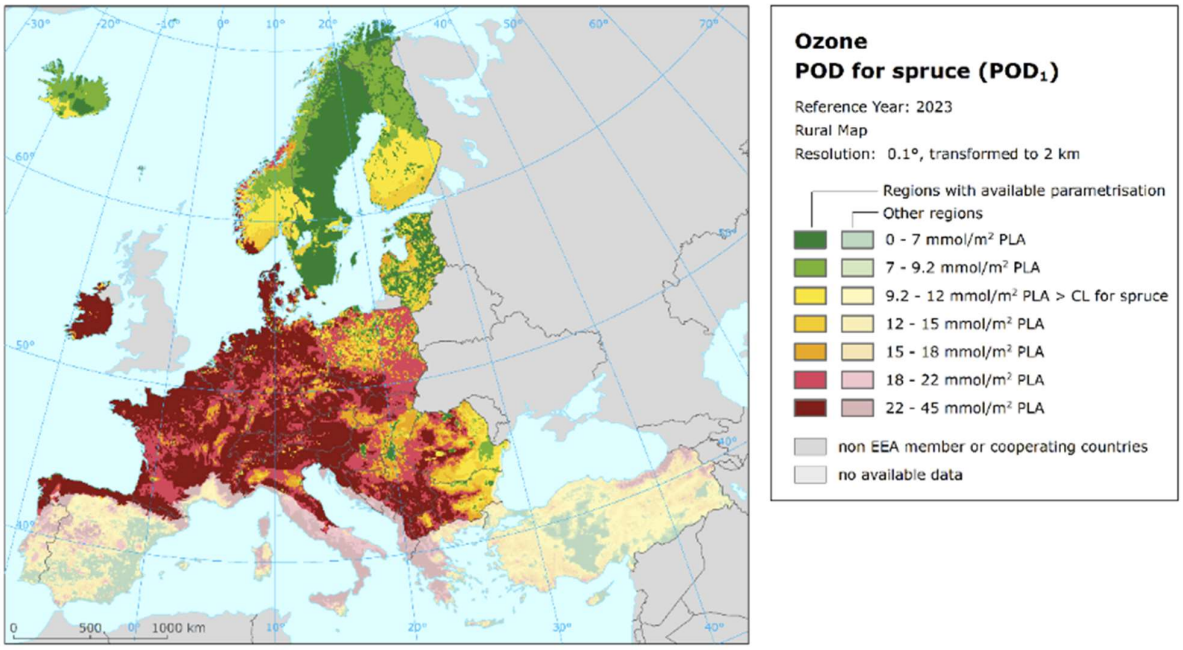
1.41 pav. Ozono indikatoriaus koncentracijos žemėlapis, rodantis 93,2 procentilio didžiausią paros 8 valandų vidurkį, 2023 m. (kairėje) ir 3 metų vidurkį 2021–2023 m. (dešinėje)



1.42 pav. Ozono indikatorių koncentracijų skirtumas tarp 2023 m. ir 5 metų vidurkio (2018–2022 m.) – 93,2 procentilio nuo paros 8 valandų maksimumo. 3.7 žemėlapis. Ozono indikatoriaus AOT40 koncentracijos žemėlapis augmenijai, kaimo žemėlapis, 2023 m. (kairėje) ir 5 metų vidurkis (2019–2023 m.) (dešinėje).

Sritys žemėlapyje su AOT40 augmenijai 2023 m. viršijančios leistiną ribą 18 000 µg/m3·h, pažymėtos raudona ir tamsiai raudona spalva. Sritys, esančios žemiau ilgalaikio tikslo, pažymėtos žaliai. AOT40 viršija TV slenkstį augmenijai ypač būdinga pietinėje ir pietryčių Europoje, taip pat Vidurio Europoje (Šveicarijos, Vokietijos, Austrijos, Slovėnijos, Čekijos, Slovakijos, Lenkijos ir Vengrijos dalyse).

1.43 pav. pateiktas eglės POD1 žemėlapis 2023 m. Vietovės, kurių POD1 vertės yra mažesnės už eglės CL (t. y. 9,2 mmol/m2), pažymėtos tamsiai žalia ir žalia spalvomis. Vietovės, kurių POD1 vertės viršija eglės CL, pažymėtos geltona, tamsiai geltona, oranžine, raudona ir tamsiai raudona spalvomis. Kadangi Vidužemio jūros, Anatolijos ir Juodosios jūrų biogeografiniuose regionuose eglės parametrų nėra, ši sritis pažymėta šviesesnėmis spalvomis.



1.43 pav. Fitotoksinė ozono dozė (POD1) eglėms, kaimiškoje vietovėje 2023 m.

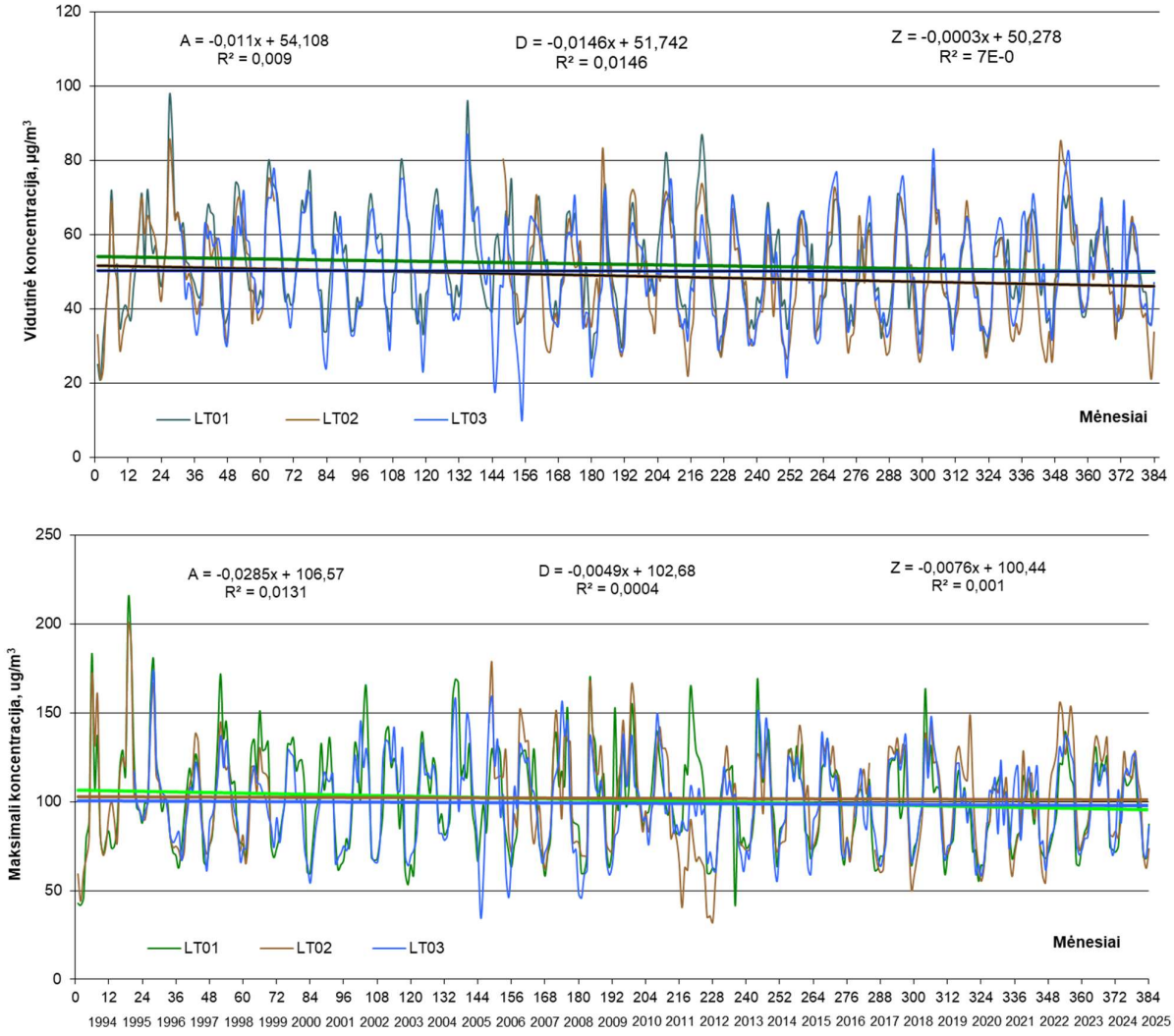
Eglės CL buvo viršytas beveik visame žemėlapyje pažymėtame Europos regione, išskyrus didelius plotus Skandinavijoje, Islandijoje ir kai kuriose Baltijos šalyse, nedidelį plotą Rumunijoje ir kelias išsibarsčiusias vietoves Bulgarijoje, Vengrijoje, Serbijoje, Lenkijoje ir Vokietijoje. Tačiau beveik kiekvienoje Europos šalyje galima rasti daug mažesnių plotų, kurių POD yra mažesnis už CL. Nepaisant to, remiantis CLRTAP (2020) duomenimis, vegetacijos sezono pradžia Šiaurės Europoje yra ankstesnė nei vegetacijos sezono pradžia, apskaičiuota pagal dabartinį rekomenduojamą platumos modelį (borealinis regionas). Dėl šios ankstesnės vegetacijos sezono pradžios POD1 vertės Šiaurės Europoje (borealiniame regione) gali būti didesnės nei pateiktos. Deja, šiuo metu šiame regione nėra geresnio metodo eglės vegetacijos sezono pradžiai nustatyti.

O3 lygiai taip pat priklauso nuo aplinkos sąlygų ir augalų fenologijos. Pavyzdžiui, didesnės POD1 vertės gali būti tose vietose, kur O3 koncentracija yra mažesnė, bet palankios sąlygos žiotelių laidumui. Kita vertus, mažiausias POD1 lygis paprastai būna tose vietose, kur O3 koncentracija yra mažesnė, pavyzdžiui, Šiaurės Europos regionuose ir (arba) tose vietose, kur aplinkos sąlygos riboja O3 žiotelių laidumą, pavyzdžiui, sausose ir šiltose vietovėse.

Remiantis „Copernicus“ duomenimis, 2023 m. vasara Europoje buvo penkta pagal šilčiausią istoriją, o 2022 m. vasara buvo šilčiausia. Tai gali būti vienas iš paaiškinimų, kodėl 2023 m. vertės buvo santykinai mažesnės, palyginti su 2022 m. Tačiau daugiau kitų veiksnių analizė gali suteikti patikimesnių įžvalgų.

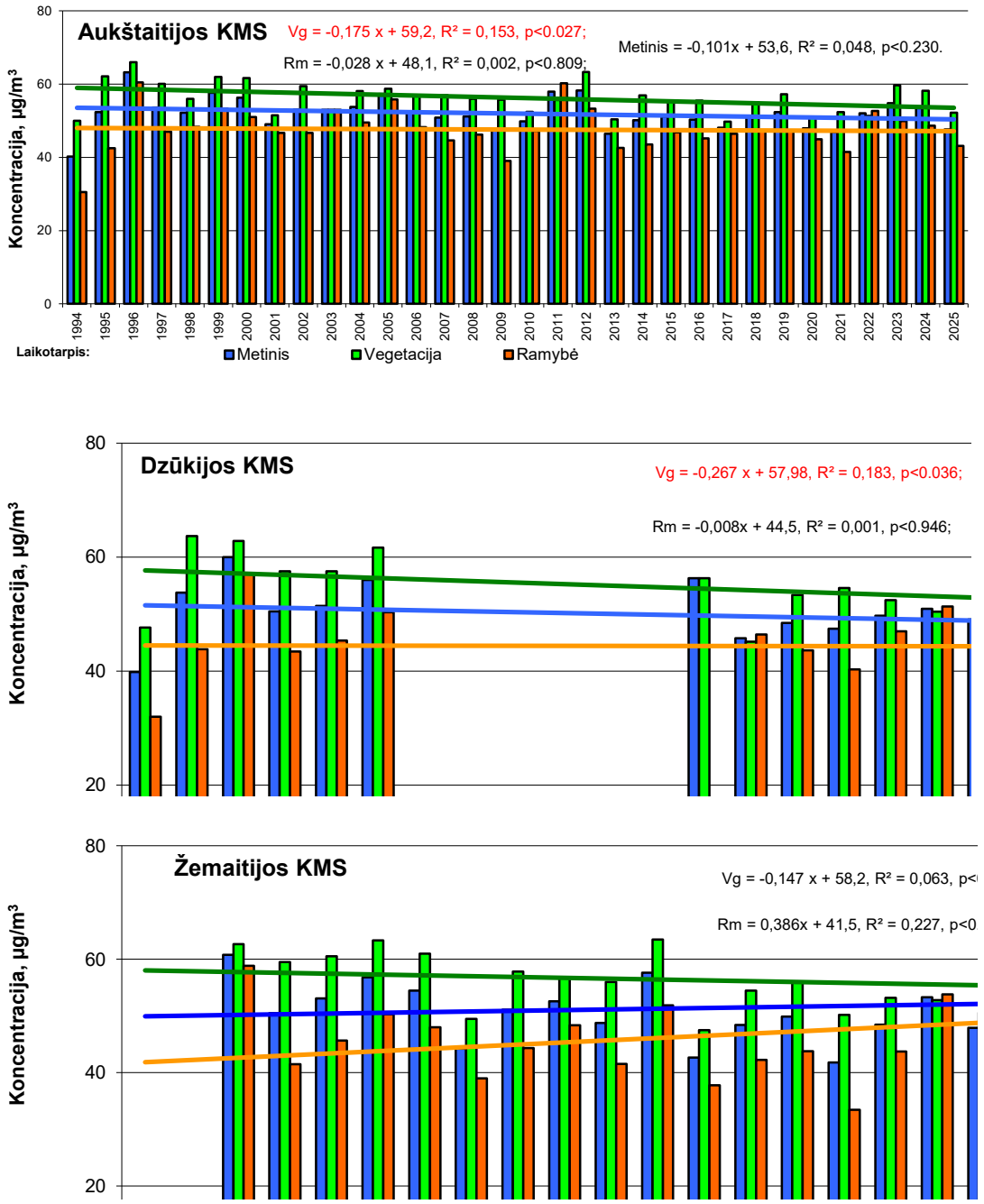
1.4.2 Ozono koncentracijos pokyčių per 1994-2025 metų laikotarpį pagrindinės tendencijos

Pažemio ozono tyrimų rezultatai parodė, kad ***per 32 m. laikotarpį stebima mėnesio vidutinių koncentracijų mažėjimo tendencija, kuri Dzūkijoje yra statistiškai reikšminga (p<0,05).***



1.44 pav. Mėnesio vidutinių ir maksimalių O_3 koncentracijų kaita tiriamuoju laikotarpiu KM stotyse

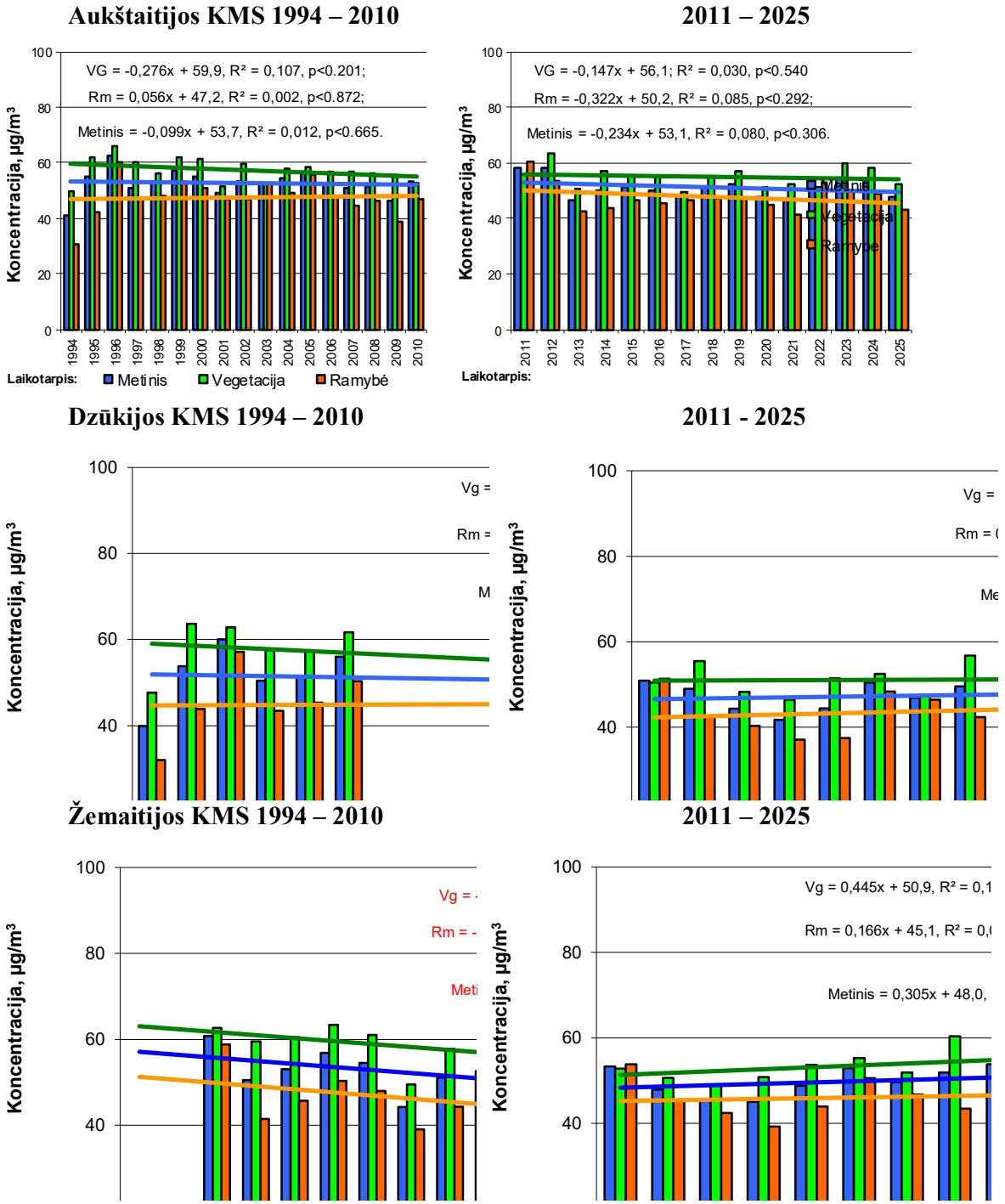
Būtent per šį laikotarpį Dzūkijoje O_3 koncentracija mažėja po 0,015 µg/m^3, Aukštaitijoje 0,011 µg/m^3 ir Žemaitijoje mažiausiai po 0,0003 µg/m^3 per mėnesį. Per paskutinįjį 5 m. laikotarpį vidutinių koncentracijų mažėjimo tendencija slopo. Detalesnė analizė laidžia išskirti laikotarpius, kur ši kaita buvo intensyvesnė. Tai laikotarpiai nuo 1995 iki 2004 m., 2005-2013 ir 2014-2020 m. ***2023 m. nustatyta viena didžiausių O3 koncentracijų KM stotyse per visą tiriamąjį laikotarpį.***



1.45 pav. Ozono koncentracijos vidutinių metinių reikšmių kaita per 1994–2025 metus kompleksiško monitoringo stotyse.

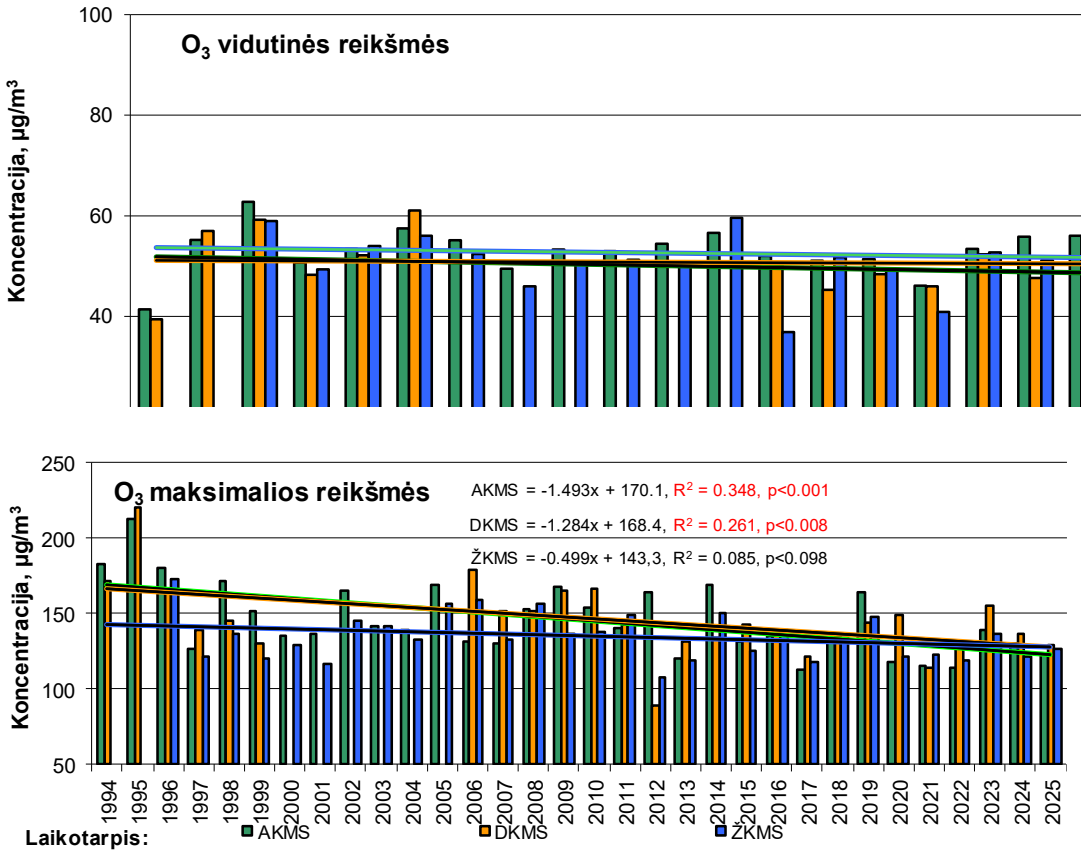
Laikotarpiai: šiltasis (balandis-rugpjūtis), šaltasis (rugsėjis-kovas) ir metai (rugsėjis-rugpjūtis)

Ramybės ir vegetacijos laikotarpių vidutinių koncentracijų kaita parodė, kad pirmą kartą nuo stebėsenos pradžios Žemaitijos regione pradėtas stebėti O3 koncentracijų augimas ramybės laikotarpiu, t.y. rugsėjo – kovo mėn. laikotarpiu po 0,39 ug/m3 per metus.



1.46 pav. Ozono koncentracijos vidutinių metinių reikšmių kaita per 1994–2010 ir 2011-2025 m. laikotarpiais kompleksiško monitoringo stotyse.

Paskutiniuoju laikotarpiu (2011-2025 m.) dėl padidėjusių koncentracijų 2018-2019, o taip pat 2023 ir iš dalies 2024 m., O3 koncentracijos ore ramybės ir vegetacijos laikotarpiais pradėjo augti Dzūkijos KMS ir ypač reikšmingai Žemaitijos KMS. Aukštaitijos KMS 2011-2025 m. laikotarpiu vidutinių koncentracijų kaitoje išlieka mažėjimo tendencija

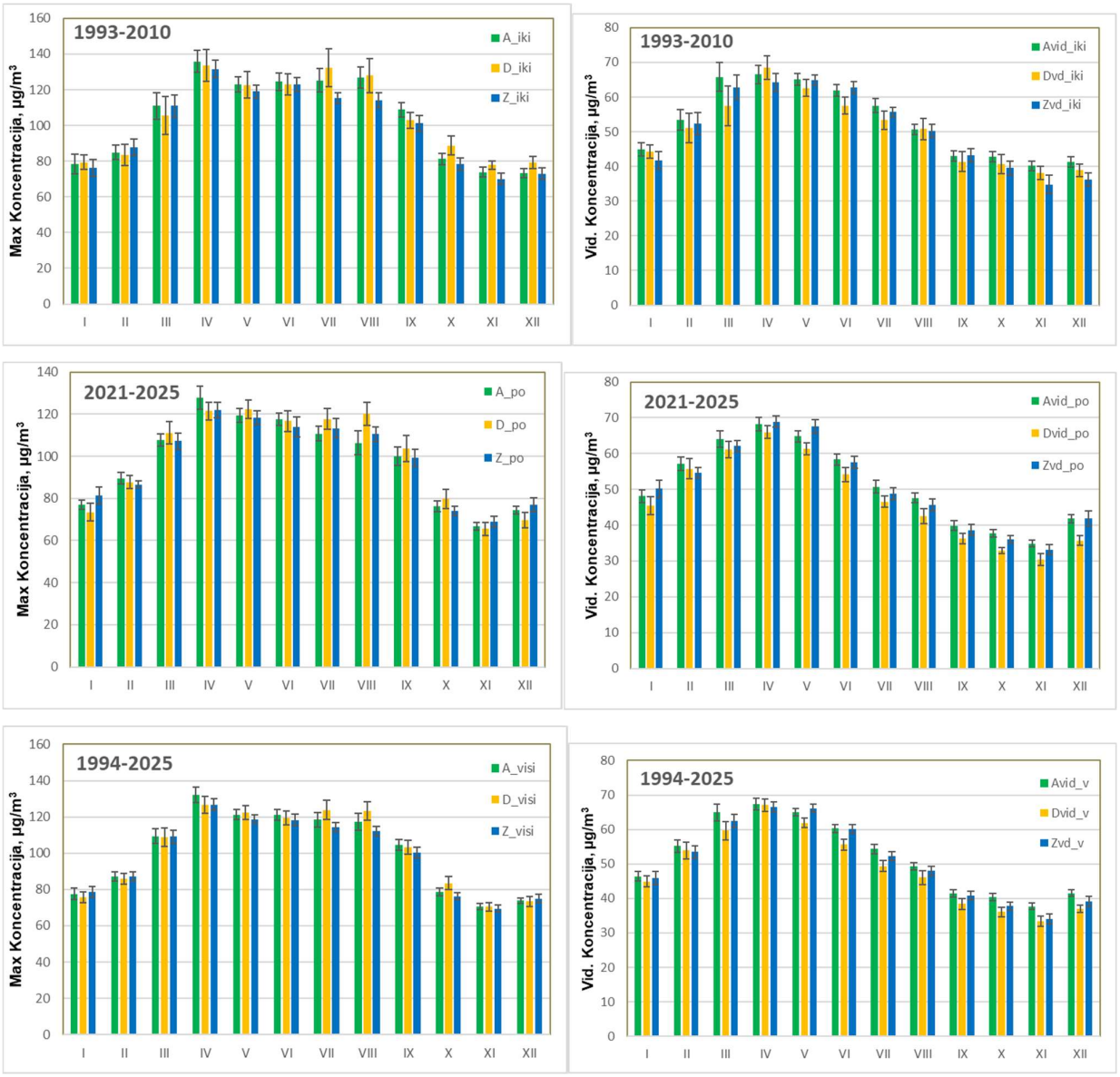


1.47 pav. Ozono vidutinių ir maksimalių metinių koncentracijų kaita kompleksiško monitoringo stotyse.

Apibendrinus gautus rezultatus per visą tiriamąjį laikotarpį nustatyta, kad vidutinė ***metinė priežemio ozono koncentracija mažėja: intensyviausiai Dzūkijos KMS – po 0,18 µg/m³, silpniau Aukštaitijos KMS – po 0,11 µg/m³ ir silpniausiai Žemaitijos KMS – po 0,04 µg/m³ per metus.*** Ši vidutinės metinės koncentracijos mažėjimo tendencija visose stotyse buvo nereikšminga, t.y. p>0,05.

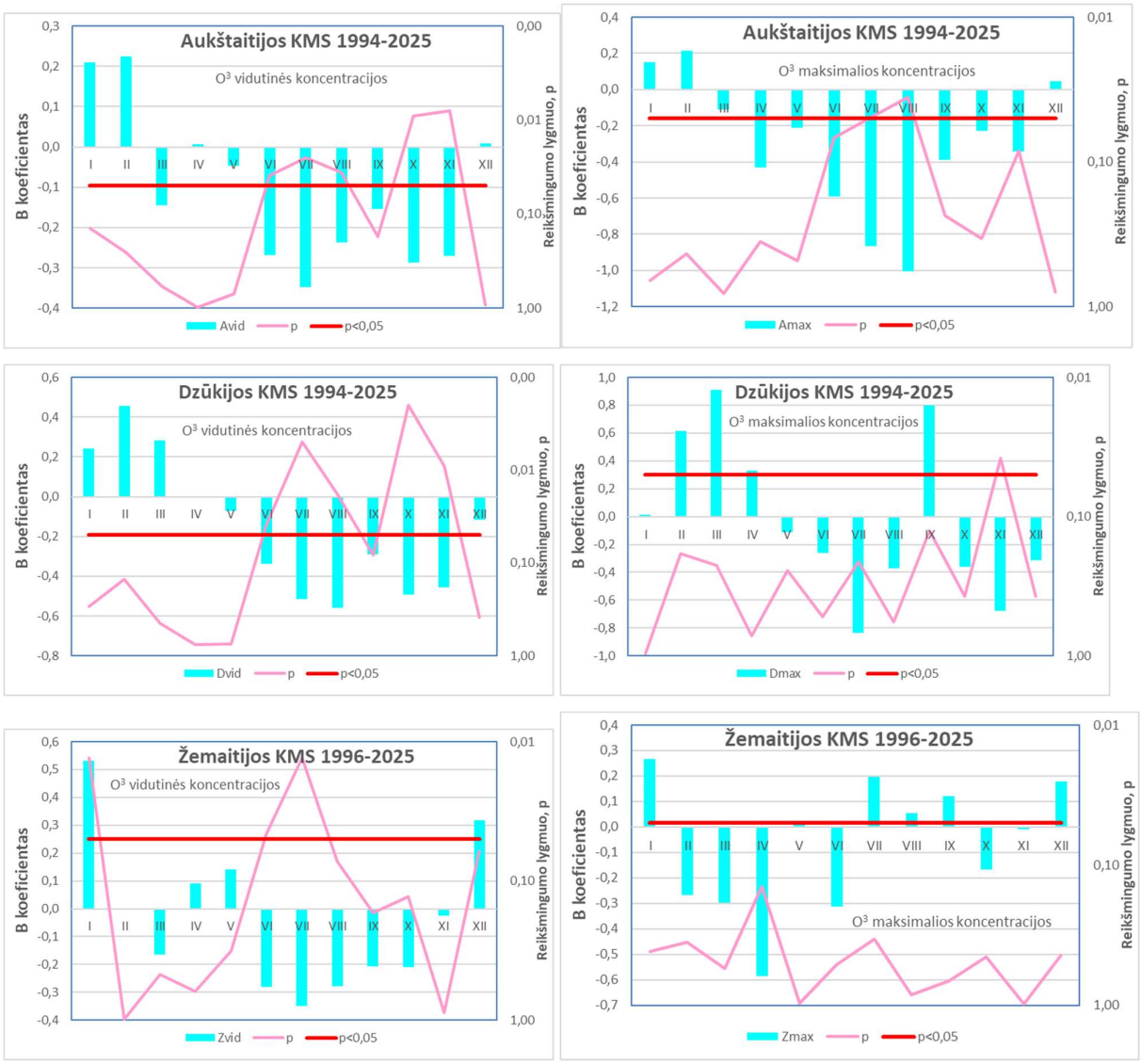
Anova testas parodė, kad vidutinė daugiametė ozono koncentracija tarp stočių skiriasi reikšmingai (p<0,05): ***Aukštaitijos KMS ši reikšmė siekia 52,1 µg/m³, Žemaitijoje 49,7 µg/m³ ir Dzūkijoje 48,8 µg/m³.*** Tam tikrą paklaidą šių duomenų patikimumui gali turėti tas faktas, kad nuo 2000 iki 2006 m. ozono koncentracijų tyrimai Dzūkijoje nebuvo vykdomi.

Metinių maksimalių koncentracijų kaitoje nustatyta reikšminga mažėjimo tendencija Aukštaitijos ir Dzūkijos KM stotyse, kur ji siekė apie 1,49 µg/m³ ir 1,28 µg/m³ per metu atitinkamais. Žemaitijos KMS ši tendencija buvo žymiai mažesnė ir siekė tik 0,5 µg/m³ per metus.



1.48 pav. Mėnesio vidutinės ir maksimalios ozono koncentracijos skirtingais tiriamaisiais laikotarpiais: A: 1993-2010; b: 2011-2025; c: 1994-2025

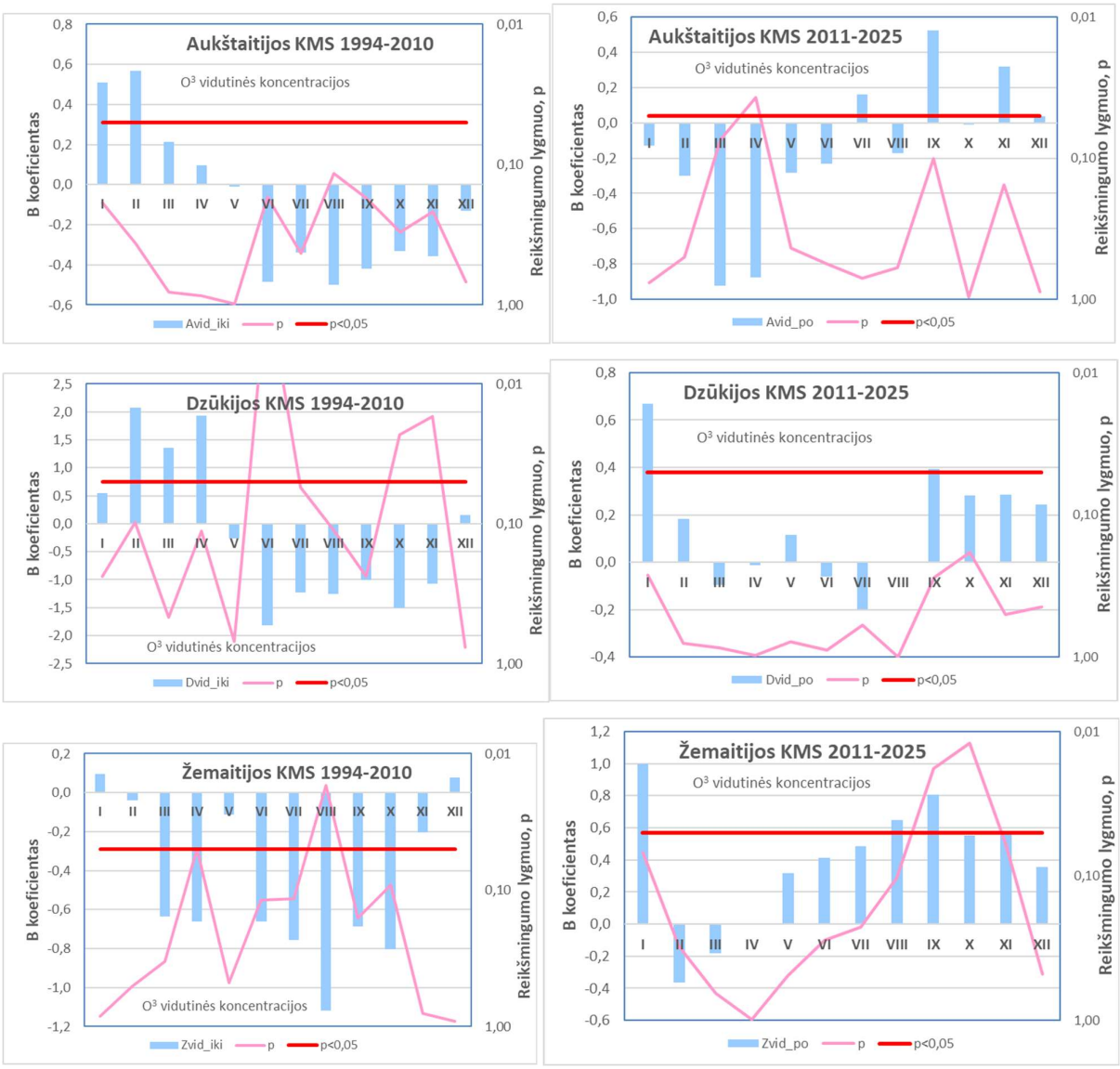
Mėnesio vidutinių ir maksimalių koncentracijų kaitoje matyti laikotarpiai, kuriais didžiausias dėmesys turėtų būt skirtas aiškinant neigiamą poveikį augmenijai. Tai pagrindinis vegetacijos laikotarpis prasidedantis balandžio mėn. ir pasibaigianti rugsėjo mėn. Dažnai į šį laikotarpį yra įskaičiuojamas ir rugsėjo mėn. Antra vertus palyginus su kitais šio sezono rezultatais, matyti, kad rugsėjo mėnesį ozono koncentracija vidutiniškai yra mažesnė nei koncentracijos nustatytos sausio, vasario ir ypač kovo mėnesiais. Panašios tendencijos matyti ir maksimalių mėnesio koncentracijų kaitoje.



1.49 pav. Mėnesio vidutinės ir maksimalios koncentracijos kaitos intensyvumas (tiesinės lygties B koeficientas) ir jo reikšmingumo lygmuo (p) per visą tiriamąjį laikotarpį

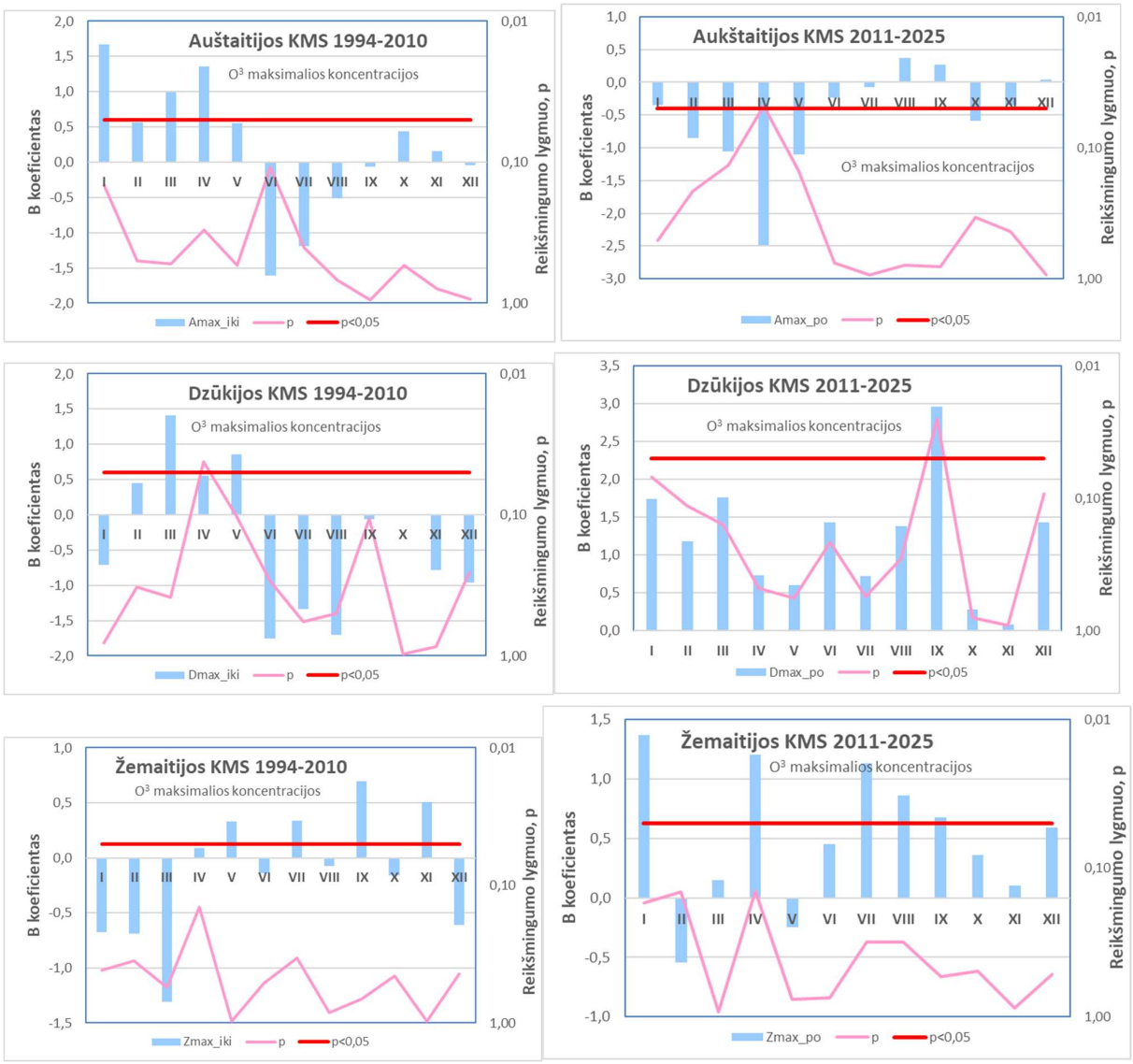
Maksimalių koncentracijų kaitoje išryškėja vegetacijos laikotarpis, kai birželio-rugpjūčio mėn. laikotarpiu maksimalios O_3 koncentracijos mažėja reikšmingiausiai siekdamos net ir 1 µg/m³ per metus lygį.

Dzūkijos KMS vidutinių koncentracijų sekoje nustatytos analogiškos tendencijos kaip ir Aukštaitijos KMS. Čia tik papildomai reikšmingai mažėja ir liepos mėn. O_3 koncentracijos. Esminiai skirtumai šioje stotyje nustatyti maksimalių O_3 koncentracijų sekoje. Jei vasaros mėnesių maksimalios koncentracijos turi tendenciją mažėti, tačiau ši kaita yra labai silpna daugeliu atveju ir nereikšminga.



1.50 pav. Mėnesio vidutinės koncentracijos kaitos intensyvumas (tiesinės lygties B koeficientas) ir jo reikšmingumo lygmuo (p)

Reikšmingiausi pokyčiai nustatyti lyginant O3 koncentracijų kaitą pirmuoju (1994-2010 m.) ir antruoju (2011-2025 m.) laikotarpiu. Pateikti rezultatai rodo, kad jei pirmuoju laikotarpiu O3 koncentracijos mažėjo V-XI mėnesiais praktiškai visose stotyse, tai jau antruoju laikotarpiu pradėtas registruoti koncentracijų augimas ir ypač Žemaitijos KMS ir kiek silpnesnis Dzūkijos KMS. Aukštaitijos KMS O3 koncentracijos praktiškai išliko stabilios. Tai galimai naujos grėsmės visai miško ekosistemos biotai, jos rūšių įvairovei, gausai ir būklei.



1.51 pav. Mėnesio maksimalios koncentracijos kaitos intensyvumas (tiesinės lygties B koeficientas) ir jo reikšmingumo lygmuo (p)

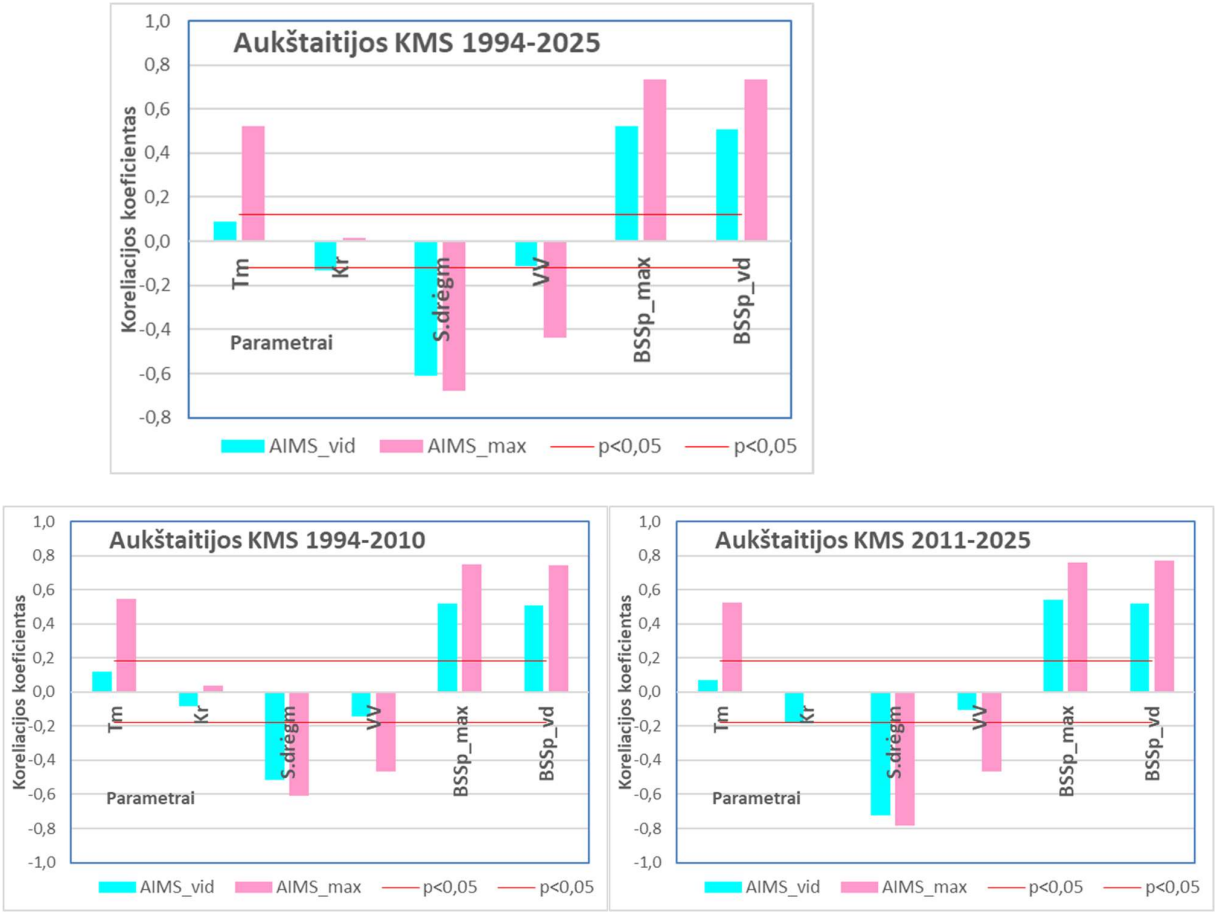
Maksimalių koncentracijų kaitoje, nustatyti didėjimo trendai buvo dar reikšmingesni lyginant su vidutinių koncentracijų kaitos trendais. Dzūkijos KMS registruotas koncentracijų augimas tęsėsi ištisus metus. Tai gali turėti reikšmingos įtakos miško ekosistemoms tvariai vystytis ateityje.

Tarptautinės prognozės, kad pažemio ozono koncentracijos ateityje turėtų didėti Lietuvos foninio užterštumo teritorijose iki 2020 m. laikotarpio nepasitvirtino. Tačiau paskutinysis 5 m. laikotarpis pakeitė šia išvadą: O3 koncentracijos ore Lietuvoje pradeda didėti.

Suprognozavus galimus ozono koncentracijų pokyčius iki šio šimtmečio pabaigos (µg/m^3 ir % išraiška) buvo teigiama, ***kad Lietuvoje vidutiniškai šimtmečio pabaigoje vidutinė ozono koncentracija turėtų didėti 2-3 µg/m^3 o maksimalios sumažėti 1-2 µg/m^3.*** Tai sudarytų +2-3 % ir 1-2 % atitinkamai lyginant su 1960-2010 m. ozono koncentracijų lygmeniu. Paskutinieji rezultatai rodo, kad šios prognozės bent jau iš dalies pradeda pasitvirtinti.

1.4.3. Meteorologinių veiksnių ir ozono koncentracijų tarpusavio sąveikos

Meteorologinių veiksnių ir ozono koncentracijų tarpusavio sąveikos analizė atlikta mėnesinių duomenų pagrindu. Atrinkti šie pagrindiniai aplinkos parametrai: Saulės vidutinė vidutinių ir maksimalių valandinių spinduliuočių bendroji spinduliuotė, mėnesio vidutinė santykinė drėgmė, mėnesio vidutinė oro temperatūra ir suminis kritulių kiekis bei vėjo vidutinis ir maksimalus greitis.



1.52 pav. Meteorologinių veiksnių ir pažemio ozono tarpusavio sąveikos koreliaciniai ryšiai ir jų reikšmingumas p<0,05.

Nustatyta, kad kaip ir buvo tikimasi, didžiausiu reikšmingumu pasižymi saulės bendrosios spinduliuotės maksimalios vidutinės reikšmės ir vidutinių bei maksimalių pažemio ozono koncentracijų ryšis. ***Tiek bendroji Saulės vidutiniškos, tiek ir maksimalios spinduliuotės reikšmės turi reikšmingos įtakos maksimalioms pažemio ozono koncentracijoms susidaryti,*** t.y. paaiškina beveik ik 60% šių koncentracijų kaitos. Poveikis vidutinėms koncentracijoms yra kiek žemesnis ir paaiškina iki 25-30 % šių ozono koncentracijų kaitos.

Galima grėsmė: palaipsniui didėjanti Saulės spinduliuotė skatina priežemio ozono susidarymą, dėl ko ateityje galima tokėtis šio fitotoksikanto koncentracijų augimo priežemyje.

Labai reikšmingu poveikiu ozonui susidaryti pasižymi ir santykinė oro drėgmė. Didesnė drėgmė panašiai slopina tiek vidutinių, tiek ir maksimalių koncentracijų susidarymą. Ji paaiškina atitinkamai apie 35 ir 45 % šių ozono koncentracijų kaitos. ***Dažnėjančios sausros gali prisidėti prie O3 koncentracijų augimo priežemyje.***

Vienas iš pagrindinių ozono susidarymą skatinantis veiksnys yra karšio bangos. Gauti rezultatai patvirtino šį teiginį. ***Būtent aukšta oro temperatūra ypač reikšmingai skatina maksimalių ozono koncentracijų susidarymą. Prognozė: ar ateityje O3 koncentracijos didės taip pat priklausys ir nuo karščio bangų pasikartojamumo dažnio.***

Nenustatytas joks reikšmingesnis kritulių poveikis maksimalių ozono koncentracijų kaitai, tačiau kritulių didesni kiekiai slopina ozono susidarymo procesą, didindami aplinkos santykinę drėgmę. Jų kiekiai paaiškina apie 5 % ozono vidutinių koncentracijų kaitos.

Pažemio ozono koncentracijas taip pat mažina ir vėjas, ypač jo poveikis reikšmingas maksimalioms ozono koncentracijoms susidaryti. Nustatyta, kad tiek vidutinis tiek ir maksimalus vėjo greitis gali paaiškinti atitinkamai iki 20 ir 10 % maksimalios ozono koncentracijos kaitos.

Apibendrinus gautus rezultatus pamėginta išaiškinti nustatytas ozono kaitos tendencijas, jas sąlygojančių veiksnių atžvilgiu. Pagrindinis veiksnys skatinantis pažemio ozono susidarymą yra bendroji Saulės spinduliuotė ir jos maksimalios reikšmės, kurias lydi, kaip taisyklė, karščio bangos ir žemas santykinis oro drėgnumas bei, tikėtina, mažas vėjo greitis.

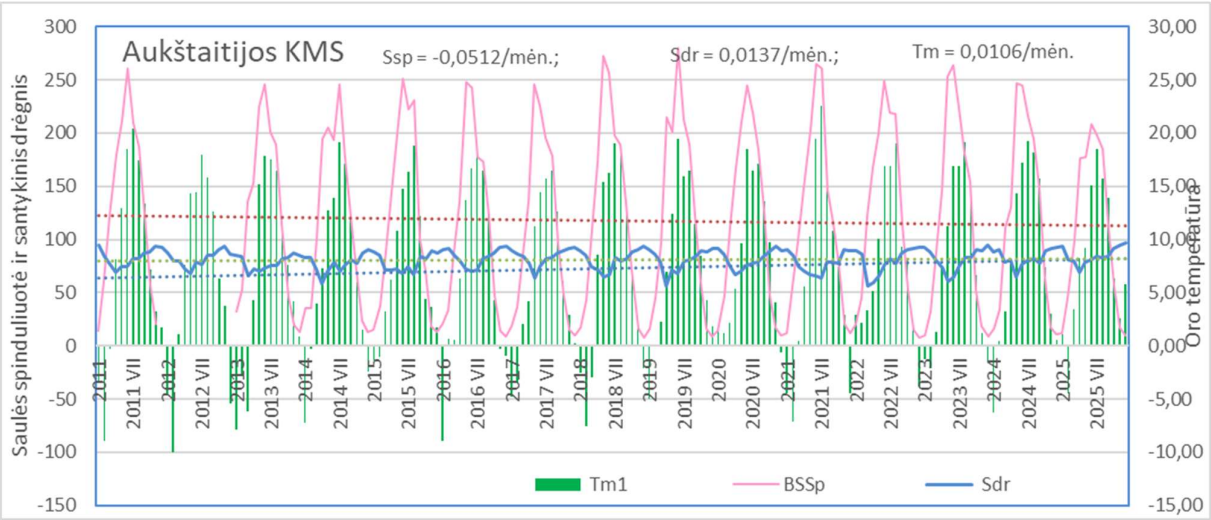
Nustatyta, kad vidutinė mėnesio O_3 koncentracija mažėja nuo gegužės iki gruodžio mėn. imtinai ir šis mažėjimas pasiekia reikšmingumo lygmenį VII, IX, X ir ypač XI mėnesiais, o maksimalios koncentracijos reikšmingai mažėja liepos mėnesiais. Šiais mėnesiais bendroji Saulės spinduliuotė ir ypač FAR reikšmingai didėja, todėl mažėjanti ozono koncentracija negalėtų būt siejama su saulės spinduliuotės kaita.

Oro temperatūra nors dar nereikšmingai, bet turi tendencija mažėti balandžio ir liepos mėnesiais, dėl ko šis poveikis gali prisidėti prie mažėjančių ozono koncentracijų ir ypač liepos mėnesį, per kurį saulės spinduliuotės intensyvumo augimas yra taip pat silpniausias. Šiais mėnesiais ozono koncentracija pasiekia vienas iš didžiausių savo reikšmių, todėl toks poveikis gali turėti reikšmingos įtakos ir bendram ozono koncentracijų mažėjimui. Antra vertus aukštesnė oro temperatūra turėtų skatinti ozono susidarymą būtent gegužės-birželio ir rugpjūčio-rugsėjo mėn., kai ji turi tendenciją didėti.

Kritulių kiekis kuris mažina patenkančią bendrąją Saulės spinduliuotę, slopina ir ozono susidarymą, dėl ko ***vienas iš reikšmingiausių veiksnių sąlygojančių pažemio ozono susidarymą Lietuvoje būtų galima laikyti kritulių pakankamai reikšmingą gausėjimą rugpjūčio ir ypač liepos mėnesiais.*** Vakarinėje Lietuvos dalyje beprasidedanti kritulių mažėjimo tendencija vasario-birželio mėnesiais gali prisidėti prie pažemio ozono augimo šiame regione.

Santykinė oro drėgmė slopina pažemio ozono susidarymą, tačiau teigti, kad būtent dėl jos poveikio ozono koncentracijos Lietuvoje mažėja būtų sunku. Daugiamečių drėgmės rezultatų analizė rodo, kad per stebėjimo laikotarpį drėgmė kyla, tačiau vos po 0,003 % per metus ir šis pokytis yra visiškai nereikšmingas, p>0,05.

Stipresnis vėjo greitis taip pat slopina ozono susidarymą, bet ir šiam parametrui netgi reikšmingai mažėjant, jis negali būti priskirtas prie veiksnių reikšmingai sąlygojančių pažemio ozono koncentracijų mažėjimą.



1.53 pav. pagrindinių meteorologinių veiksnių, sąlygojančių O3 susidarymą priežemyje, kaita paskutiniuoju 2011-2025 m. laikotarpiu.

Prognozė ir galimos grėsmės

Todėl pažemio ozono koncentracijų mažėjimą ateityje galėtų skatinti pirmiausiai Saulės spinduliuotės mažėjimas ir debesuotumas lydimas kritulių kiekio didėjimu, kas sąlygotų ir didesnę santykinę drėgmę ir žemesnę bendrą temperatūra, kuri tik po truputį pradedama stebėti.

Ir atvirkščiai pažemio ozono koncentracijų didėjimą ateityje galėtų skatinti Saulės spinduliuotės pliūpsniai, sausros, lydimos karščio bangų. Nuo šių veiksnių tolesnės kaitos prognozės priklausys ir priežemio ozono susidarymas, sąlygojantis bendrą miško ekosistemų būklę ir produktyvumą.

1.4.4. Ozono poveikio sukeltų pažeidimų analizė

Oro teršalų ir klimato kaitos poveikio miško ekosistemoms tyrimų rezultatai dažniausiai pristatomi atskirai. Tačiau daugelis oro teršalų ir klimato kaitą sukeliančių dujų turi tą patį šaltinį, t.y. antropogeninę veiklą. Veikdami vienas kitą atmosferoje jie sukelia sinergetinius poveikius ekosistemoms, kurie dažniausiai reikšmingai skiriasi nuo šių pavienių komponenčių poveikio tiek atskiriems miško ekosistemų biotos komponentams, tiek ir miškų bendram tvarumui sumos. Ozonas priskiriamas abejoms šioms išskirtoms grupėms. Tokiu būdu priežemio ozonas, kaip lydintysis klimato kaitos komponentas yra vienas iš svarbiausių veiksnių sąlygojančių miškų būklės ir produktyvumo kaitą tiek laiko, tiek ir teritorine prasme. Skirtingai nei SO_2 koncentracijos ore, pirminių emisijos komponenčių (kaip ir oro temperatūros) augimas (VOC, NO, NO2) turėtų sąlygoti šio fitotoksikanto koncentracijų augimą ateityje globaliu mastu. Šis toksikantas, veikdamas kartu su meteorologiniais veiksniai bei kitais taršos komponentais pažeidžia azoto, anglies ir vandens pasisavinimą, dėl ko jo reikšmė miškų tvarumui dar labiau padidėja. Dėl to pastaruoju laikotarpiu priežemio ozonas įvardijamas kaip svarbiausias oro teršalų komponentas reikšmingai sąlygojantis miško ekosistemų tvarumą. Jei pagal klimato kaitos scenarijus ateityje planuojamas oro temperatūros augimas ir sausrų dažnėjimas, kuris iš dalies mažina ozono pažeidimus, tai pačio ozono koncentracijų didėjimas didins ozono pažeidimų teritorinę plėtrą, augavietėse gerai aprūpintuose drėgme.

Tyrimų rezultatai parodė, kad pastaruoju laikotarpiu Lietuvoje pažemio ozono tiek metinės, tiek ir šiltojo laikotarpio koncentracijos neturėjo aiškios tendencijos ir svyravo tarp 50 – 60 $\mu g \cdot m^{-3}$ ir 60-65 $\mu g \cdot m^{-3}$ atitinkamai. Tik maksimalių koncentracijų sekoje išskirti laikotarpiai, kai šios koncentracijos mažėjo (1995-2000 m.) ir didėjo (2001-2005m.). AOT40 reikšmės kito nuo 8000 to 21000 $\mu g \cdot m^{-3}$ h ir viršijo kritinę reikšmę augalams (6000 $\mu g \cdot m^{-3}$ h^{-1}) visose stotyse, o miškams

(20000 $\mu g \cdot m^{-3}\ h^{-1}$) – tik Aukštaitijoje 1999m. Todėl būtų galima teigti, kad ir pažeidimų mastas sąlygotas priežemio ozono poveikiu turėtų taip pat palaipsniui mažėti Lietuvoje.

Priežemio ozono poveikio medžių lajų būklei analizės rezultatai tik iš dalies patvirtino ozono fitotoksišką poveikį medžiams. Būtent tik maksimalios ozono koncentracijos gali turėti neigiamą poveikį pušų lajų būklei foninio užterštumo teritorijose.

Ozono poveikiui vertinti, papildomai buvo panaudota ir vizualiai vertinamų pažeidimų metodika. Žinoma kad ozonas, patekęs į augalo vidinius organus pro žioteles, sukelia ten oksidacijos procesus, kurių rezultatas pasikeitusi lapų ir spyglių spalva (1.34a pav.). Tipingi pažeidimai, kurie įprastai nustatomi Pietų Europos valstybėse gerai vizualiai išskiriami. Ilgalaikiai ypač jautrių ozono poveikiui, specialiai pasodintų tuopų lapų analizė parodė, kad pastaruoju laikotarpiu nėra stebimi būdingi ozono pažeidimams, tirtų tuopų lapų spalvos pokyčiai (1.34b pav.). Daugiamečiai miškų monitoringo duomenys rodo, kad ir pagal šią metodiką tiriant ozono pažeidimus, jų pastaruoju laikotarpiu nustatyti nepavyksta.

Apibendrinanti išvada, kad priežemio ozonas, kurio koncentracijos pastaruoju laikotarpiu nesiekia 60$\mu g/m^3$, neturi reikšmingos įtakos medžių lajų būklei. Karščio bangos ir sausros epizodai, kurių metu augalai besisaugodami nuo išdžiūvimo uždaro žioteles, apsisaugo tuo pačiu ir nuo žalingo, ir kaip taisyklė, tuo laikotarpio padidėjusios ozono koncentracijos.

1.54a pav. Tipingos ozono sukeltos depigmentacinės dėmės ant juodalksnio lapų (Italija)

1.54b. pav. Jautrių ozono pažeidimams tuopų lapų spalva Žemaitijos KMS 2020 ir 2025 m m.

Ozono koncentracijoms pradėjus didėti, medžių lajų būklė gali pradėti blogėti, o prieaugis mažėti. Tai gali tapti nauja grėsme miško ekosistemoms ateityje.

IŠVADOS

Pažemio ozono tyrimų rezultatai parodė, kad ***per 32 m. laikotarpį stebima mėnesio vidutinių koncentracijų mažėjimo tendencija, kuri Dzūkijoje yra statistiškai reikšminga (p<0,05).***

Būtent per šį laikotarpį Dzūkijoje O_3 koncentracija mažėja po 0,015 µg/m^3, Aukštaitijoje 0,011 µg/m^3 ir Žemaitijoje mažiausiai po 0,0003 µg/m^3 per mėnesį. Per paskutinįjį 5 m. laikotarpį vidutinių koncentracijų mažėjimo tendencija slopo. Detalesnė analizė laidžia išskirti laikotarpius, kur ši kaita buvo intensyvesnė. Tai laikotarpiai nuo 1995 iki 2004 m., 2005-2013 ir 2014-2020 m. ***2023 m. nustatyta viena didžiausių O3 koncentracijų KM stotyse per visą tiriamąjį laikotarpį.***

Ramybės ir vegetacijos laikotarpių vidutinių koncentracijų kaita parodė, kad pirmą kartą nuo stebėsenos pradžios Žemaitijos regione pradėtas stebėti O3 koncentracijų augimas ramybės laikotarpiu, t.y. rugsėjo – kovo mėn. laikotarpiu po 0,39 µg/m3 per metus.

Paskutiniuoju laikotarpiu (2011-2025 m.) dėl padidėjusių koncentracijų 2018-2019, o taip pat 2023 ir iš dalies 2024 m., O3 koncentracijos ore ramybės ir vegetacijos laikotarpiais pradėjo augti Dzūkijos KMS ir ypač reikšmingai Žemaitijos KMS. Aukštaitijos KMS 2011-2025 m. laikotarpiu vidutinių koncentracijų kaitoje išlieka mažėjimo tendencija

Eglės CL buvo viršytas beveik visame žemėlapyje pažymėtame Europos regione, išskyrus didelius plotus Skandinavijoje, Islandijoje ir kai kuriose Baltijos šalyse, nedidelį plotą Rumunijoje ir kelias išsibarsčiusias vietoves Bulgarijoje, Vengrijoje, Serbijoje, Lenkijoje ir Vokietijoje. Tačiau beveik kiekvienoje Europos šalyje galima rasti daug mažesnių plotų, kurių POD yra mažesnis už CL.

O3 lygiai taip pat priklauso nuo aplinkos sąlygų ir augalų fenologijos. Pavyzdžiui, didesnės POD1 vertės gali būti tose vietose, kur O3 koncentracija yra mažesnė, bet palankios sąlygos žiotelių laidumui. Kita vertus, mažiausias POD1 lygis paprastai būna tose vietose, kur O3 koncentracija yra mažesnė, pavyzdžiui, Šiaurės Europos regionuose ir (arba) tose vietose, kur aplinkos sąlygos riboja O3 žiotelių laidumą, pavyzdžiui, sausose ir šiltose vietovėse.

Remiantis „Copernicus“ duomenimis, 2023 m. vasara Europoje buvo penkta pagal šilčiausią istoriją, o 2022 m. vasara buvo šilčiausia. Tai gali būti vienas iš paaiškinimų, kodėl 2023 m. vertės buvo santykinai mažesnės, palyginti su 2022 m. Tačiau daugiau kitų veiksnių analizė gali suteikti patikimesnių įžvalgų.

Anova testas parodė, kad vidutinė daugiametė ozono koncentracija tarp stočių skiriasi reikšmingai ($p<0,05$): ***Aukštaitijos KMS ši reikšmė siekia 52,1 µg/m³, Žemaitijoje 49,7 µg/m³ ir Dzūkijoje 48,8 µg/m³.*** Tam tikrą paklaidą šių duomenų patikimumui gali turėti tas faktas, kad nuo 2000 iki 2006 m. ozono koncentracijų tyrimai Dzūkijoje nebuvo vykdomi.

Metinių maksimalių koncentracijų kaitoje nustatyta reikšminga mažėjimo tendencija Aukštaitijos ir Dzūkijos KM stotyse, kur ji siekė apie 1,49 µg/m³ ir 1,28 µg/m³ per metu atitinkamais. Žemaitijos KMS ši tendencija buvo žymiai mažesnė ir siekė tik 0,5 µg/m^3 per metus.

Aukštaitijos KMS vidutinė mėnesio O_3 koncentracija mažėja nuo gegužės iki lapkričio mėn. imtinai ir šis mažėjimas pasiekia reikšmingumo lygmenį VI-VIII, X ir ypač XI mėnesiais, svyruodamas apie 0,3 µg/m³ per metus lygį. Likusiais ramybės laikotarpio mėnesiais O_3 koncentracija didėja, nors ir nereikšmingai.

Maksimalių koncentracijų kaitoje išryškėja vegetacijos laikotarpis, kai birželio-rugpjūčio mėn. laikotarpiu maksimalios O_3 koncentracijos mažėja reikšmingiausiai siekdamos net ir 1 µg/m³ per metus lygį.

Lyginant O3 koncentracijų kaitą pirmuoju (1994-2010 m.) ir antruoju (2011-2025 m.) laikotarpiu. Pateikti rezultatai rodo, kad jei pirmuoju laikotarpiu O3 koncentracijos mažėjo V-XI mėnesiais praktiškai visose stotyse, tai jau antruoju laikotarpiu pradėtas registruoti koncentracijų augimas ir ypač Žemaitijos KMS ir kiek silpnesnis Dzūkijos KMS. Aukštaitijos KMS O3 koncentracijos praktiškai išliko stabilios. ***Tai galimai naujos grėsmės visai miško ekosistemos biotai, jos rūšių įvairovei, gausai ir būklei.***

Tarptautinės prognozės, kad pažemio ozono koncentracijos ateityje turėtų didėti Lietuvos foninio užterštumo teritorijose iki 2020 m. laikotarpio nepasitvirtino. Tačiau paskutinysis 5 m. laikotarpis pakeitė šia išvadą: O3 koncentracijos ore Lietuvoje pradeda didėti.

Priežemio ozonas, kurio koncentracijos pastaruoju laikotarpiu nesiekia 60µg/m^3, neturi reikšmingos įtakos medžių lajų būklei. Karščio bangos ir sausros epizodai, kurių metu augalai besisaugodami nuo išdžiūvimo uždaro žioteles, apsisaugo tuo pačiu ir nuo žalingo, ir kaip taisyklė, tuo laikotarpio padidėjusios ozono koncentracijos.

Ozono koncentracijoms pradėjus didėti, medžių lajų būklė gali pradėti blogėti, o prieaugis mažėti. Tai gali tapti nauja grėsme miško ekosistemoms ateityje.

Tiek bendroji Saulės vidutiniška, tiek ir maksimalios jos reikšmės turi reikšmingos įtakos maksimalių pažemio ozono koncentracijų susidarymui, t.y. paaiškindamos beveik iki 60% šių koncentracijų kaitos.

Prognozė ir galimos grėsmės

Todėl pažemio ozono koncentracijų mažėjimą ateityje galėtų skatinti pirmiausiai Saulės spinduliuotės mažėjimas ir debesuotumas lydimas kritulių kiekio didėjimu, kas sąlygotų ir didesnę santykinę drėgmę ir žemesnę bendrą temperatūra, kuri tik po truputį pradedama stebėti.

Ir atvirkščiai pažemio ozono koncentracijų didėjimą ateityje galėtų skatinti Saulės spinduliuotės pliūpsniai, sausros, lydimos karščio bangų. Nuo šių veiksnių tolesnės kaitos prognozės priklausys ir priežemio ozono susidarymas, sąlygojantis bendrą miško ekosistemų būklę ir produktyvumą.

LITERATŪRA

1. Solberg, S., Derwent, R. G., Hov, O., Langner, J. and Lindskog, A.: 2005, 'European Abatement of Surface Ozone in a Global Perspective', Ambio, 34, 47-53
2. Europos Parlamento ir Tarybos Direktyva 2002/3/EB dėl ozono aplinkos ore. *Official Journal L 067, 09/03/2002 P. 0014 – 0030.* http://europa.eu.int/eur-lex/lex/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:32002L0003:LT:HTML
3. TARYBOS DIREKTYVA dėl aplinkos oro kokybės vertinimo ir valdymo 96/62/EB, http://www3.lrs.lt/c-bin/eu/preps2?Condition1=20746&Condition2=
4. Europos Parlamento ir Tarybos Direktyva 2001/81/EB dėl tam tikrų atmosferos teršalų išmetimo nacionalinių ribų. *Official Journal L 309, 27/11/2001 P. 0022 - 0030.* http://europa.eu.int/eur-lex/lex/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:32001L0081:LT:HTML
5. Sveikatos apsaugos ministro įsakymas Nr. 544/508 "Dėl ozono aplinkos ore normų ir vertinimo taisyklių nustatymo". Valstybės žinios, 2002 Nr.105-4726
6. Lietuvos Respublikos aplinkos ministro įsakymas Nr. 468 "Dėl sieros dioksido, azoto oksidų, lakiųjų organinių junginių ir amoniako nacionalinių limitų patvirtinimo". Valstybės žinios, 2003, Nr.99-4465
7. Europos Parlamento ir Tarybos direktyva 2008/50/EB dėl aplinkos oro kokybės ir švaresnio oro Europoje http://lt.vlex.com/vid/38714879.
8. Environment Data Centre (1993) Manual for Integrated Monitoring, Helsinki

1.5. Tolimųjų oro teršalų pernašos ir jų sąsajos su meteorologiniais parametrais

(TMC Fizikos instituto ataskaita)

Nuo 1994 m. atmosferos taršos tyrimų duomenys integruoto monitoringo stotyse Aukštaitijoje (LT01) ir Žemaitijoje (LT03) rodo didelę pagrindinių sieros ir azoto junginių koncentracijų atmosferoje laikinę kaitą. Sieros dioksido (SO_2, dujos), azoto dioksido (NO_2, dujos), sulfatų (SO_4^{2-} aerozolio dalelėse), sumos nitratų (HNO_3, dujinė azoto rūgštis ir NO_3^- aerozolio dalelėse) ir sumos amonio (NH_3, dujinis amoniakas ir NH_4^+ aerozolio dalelėse) metinių koncentracijų ore, sulfatų (SO_4^{2-}) ir azoto (NO_3^- ir NH_4^+) junginių šlapiųjų iškritų kiekio kaita nuo 1994 m. iki 2025 m.

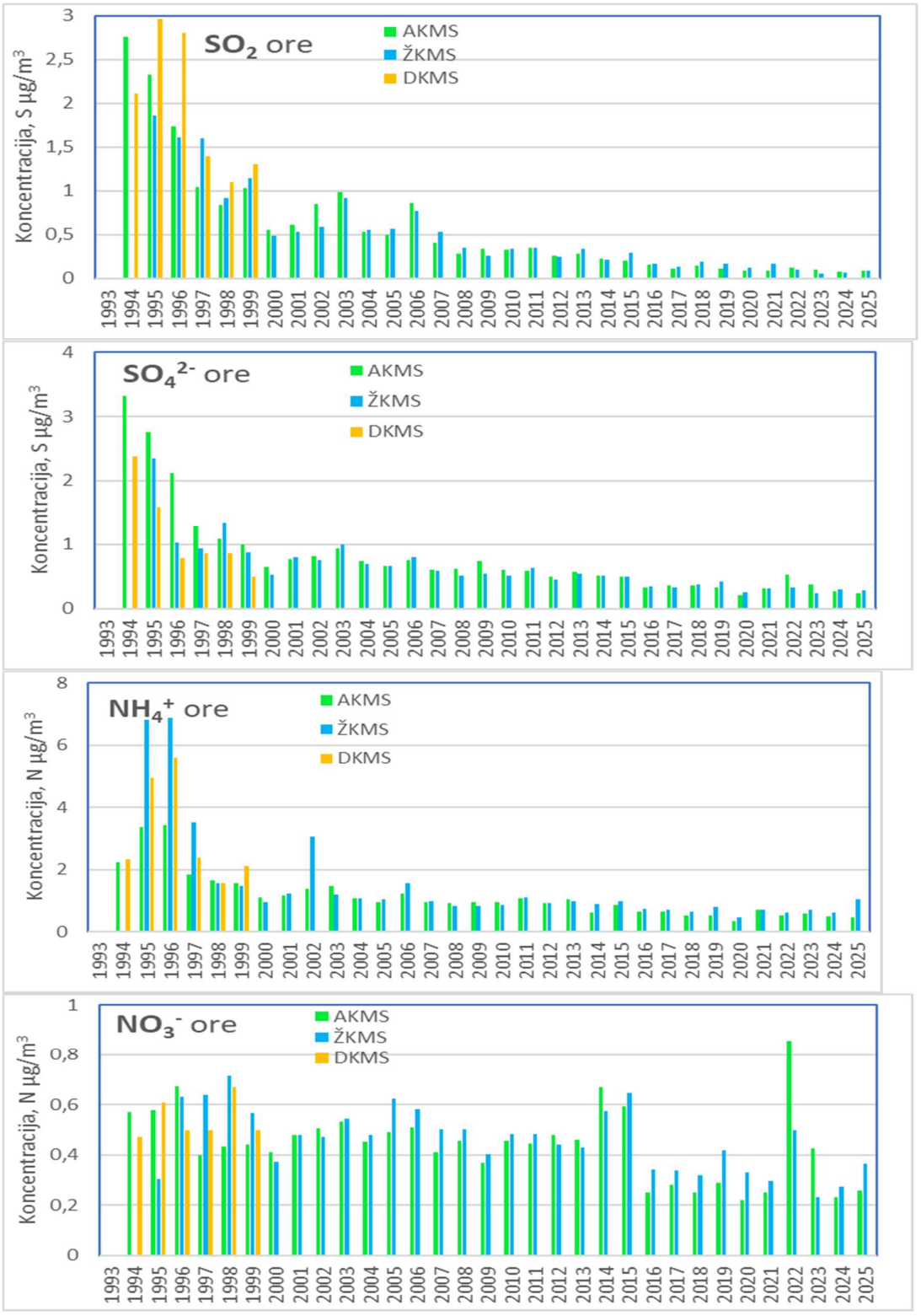
Analizuojant sieros dioksido vidutinių metinių koncentracijų kaitą per 32 metų laikotarpį, stebime jų ryškų mažėjimą visose tyrimo vietose. Neparametrinis Mann-Kendalio statistinis metodas skaičiuoja, kad nuo 1994 m. iki 2025 m. SO_2 metinės koncentracijos sumažėjo 113 ir 104 procentais, atitinkamai Aukštaitijos ir Žemaitijos KM stotyse. Aerozolinių sulfatų metinių koncentracijų kaita rodo jų mažėjimą Aukštaitijos KMS 90%, Žemaitijos KMS–po 79%. Sulfatų šlapiasis srautas sumažėjo 77% ir 92%, atitinkamai Aukštaitijos ir Žemaitijos KM stotyse.

Per 32 metų laikotarpį vidutinės metų sumNO_3 koncentracijos sumažėjo Aukštaitijoje 62%, Žemaitijoje 49 %. Nitratinio azoto metinių koncentracijų nėra vienareikšmės kaitos tendencijos.

Visose stotyse stebima sumNH_4 metinių koncentracijų mažėjimo tendencija per 1994–2025 m.: –82 ir –65, atitinkamai Aukštaitijos ir Žemaitijos KM stotyse.

Sieros ir azoto junginių koncentracijų atmosferos ore mažėjimas Lietuvoje labiausiai yra siejamas su ženkliu 93% sieros dioksido, 63% azoto dioksido ir 29% amoniako emisijos mažėjimu per 1990–2020 metų laikotarpį ES. Tokį pokytį lėmė sumažėjęs išmetamų teršalų kiekis daugumoje centrinės Europos valstybių ir Skandinavijoje. Oro masių judėjimo trajektorijų analizė rodo, kad didžiausią poveikį šių junginių koncentracijoms Lietuvoje daro emisijos šaltiniai, esantys centrinėje ir pietiniuose Europos regionuose.

2021-2025 m. laikotarpiu ir toliau mažėjo SO2 koncentracija ore, pasiekdama mažiau nei 0,09 µg/m3 ribą. Sulfatų koncentracijos taip pat pasiekė mažiausią savo koncentraciją per visą tiriamąjį laikotarpį, t.y. mažiau nei 0,3 µg/m3 ribą. Amonio koncentracijos kito dvejopai: Aukštaitijos KMS registruojamas tolydus mažėjimas, kai tuo tarpu Žemaitijos KMS padidėjo ir pasiekė 2011-2013 m. lygį. Nitratų kaitoje išsiskiria 2016-2025 m. laikotarpis, kai šio elemento koncentracijos ore ženkliai sumažėjo. Išimtį sudaro tik 2022-2023 m. laikotarpis, kai nitratų koncentracija ore ženkliai padidėjo, o Aukštaitijos KMS pasiekė net maksimalią savo reikšmę per visą laikotarpį. Toks koncentracijos šuolis neturėjo jokios įtakos paskutiniųjų metų nitratų koncentracijoms 2024-2025 m. Pastaraisiais metais nitratų koncentracijos ore vėl svyravo apie minimalias reikšmes.



1.55 pav. Rūgštinančių koncentracijų ore kaita pagal Fizikos mokslininkų tyrimų rezultatus.

Ilgalaikiai (1994–2025 m.) integruoto monitoringo stočių duomenys rodo, kad pagrindinių sieros ir azoto junginių koncentracijų atmosferoje Lietuvoje kaitą lemia dviejų pagrindinių veiksnių sąveika – antropogeninių emisijų pokyčiai Europoje ir meteorologinės sąlygos, reguliuojančios tolimąją oro teršalų pernašą, jų sklaidą, chemines transformacijas bei išplovimą iš atmosferos. Dėl nuolatinės atmosferos cirkuliacijos ir savaiminio apsivalymo procesų oro teršalų koncentracijos pasižymi didele laikine ir erdvine kaita, todėl net ir sąlygiškai natūraliose miško ekosistemose jų lygis glaudžiai susijęs su vyraujančiais meteorologiniais procesais.

Per daugiau kaip tris stebėjimų dešimtmečius visose Lietuvos integruoto monitoringo stotyse nustatytas ryškus sieros dioksido, aerozolinių sulfatų, azoto dioksido bei amonio junginių koncentracijų mažėjimas. Taip pat mažėjo suminių nitratų koncentracijos, nors jų dinamika buvo nepastovesnė ir jautresnė trumpalaikiams meteorologinių sąlygų pokyčiams. Šios tendencijos sutampa su reikšmingai sumažėjusiomis sieros dioksido, azoto oksidų ir amoniako emisijomis Europos Sąjungoje ir atspindi sėkmingą tarptautinių oro taršos mažinimo priemonių poveikį.

Oro masių trajektorijų analizė patvirtina, kad Lietuvos foninio užterštumo lygį ir toliau daugiausia lemia oro masės, atkeliaujančios iš Vidurio ir Pietų Europos regionų. Todėl net ir mažėjant vietinėms emisijoms atmosferos cheminė sudėtis išlieka jautri didelio masto atmosferos cirkuliacijos pokyčiams bei tarpvalstybinei teršalų pernašai.

Meteorologiniai veiksniai reikšmingai modifikuoja atmosferos teršalų koncentracijas ir jų iškritas. Didėjantis kritulių kiekis, aukštesnė santykinė oro drėgmė ir dažnesni drėgni periodai didina atmosferos savaiminio apsivalymo efektyvumą, skatindami teršalų išplovimą šlapiųjų iškritų būdu. Tuo tarpu sausros, ilgesni anticikloniniai laikotarpiai, aukštesnė oro temperatūra ir intensyvesnė Saulės spinduliuotė sudaro palankesnes sąlygas antrinių aerozolių ir oksiduotų azoto junginių formavimuisi bei jų kaupimuisi atmosferoje. Šios sąlygos ypač išryškėja trumpalaikiuose nitratų koncentracijų svyravimuose.

Krituliai yra ne tik pagrindinis atmosferos apsivalymo mechanizmas, bet ir svarbiausias cheminių medžiagų patekimo į miško ekosistemas kelias. Didžiausi sieros ir azoto junginių srautai į miško paklotę buvo registruoti 1995–1998 m., o vėliau jie nuosekliai mažėjo. Šiuo metu sieros junginių srautai yra apie 6–16 kartų, o azoto junginių – maždaug du kartus mažesni negu monitoringo pradžioje, rodydami ženkliai sumažėjusią atmosferinės iškritos apkrovą Lietuvos miško ekosistemoms, kurių intensyvumą papildomai modifikuoja medynų struktūra – tankios eglynų lajos efektyviau sulaiko atmosferines priemaišas negu retesnės pušynų lajos, todėl faktinė teršalų apkrova priklauso ne tik nuo užterštumo lygio, bet ir nuo konkrečios ekosistemos struktūrinių savybių.

Pastarųjų penkerių metų stebėjimai rodo, kad, nepaisant išliekančios bendros sieros ir daugumos azoto junginių mažėjimo tendencijos, atskirais metais registruojami trumpalaikiai nitratų koncentracijų padidėjimai, sutampantys su išskirtinėmis meteorologinėmis sąlygomis Europoje. Tai leidžia manyti, kad ateityje atmosferos cheminės sudėties trumpalaikiai svyravimai vis labiau priklausys nuo klimato kaitos sąlygojamų meteorologinių ekstremumų – karščio bangų, sausrų, intensyvios Saulės spinduliuotės, kritulių režimo pokyčių ir oro masių cirkuliacijos.

Apibendrinant galima teigti, kad per pastaruosius tris dešimtmečius Lietuvos miško ekosistemų apkrova rūgštinančiais sieros ir azoto junginiais reikšmingai sumažėjo dėl sėkmingai įgyvendintų tarptautinių oro taršos mažinimo priemonių. Tačiau klimato kaitai stiprėjant, meteorologiniai veiksniai tampa vis svarbesniu atmosferos cheminės sudėties reguliatoriumi. Todėl ateityje net ir išliekant mažoms antropogeninėms emisijoms, didėjantis meteorologinių sąlygų kontrastingumas gali lemti dažnesnius trumpalaikius atmosferos taršos epizodus, teršalų depozicijos pokyčius ir jų poveikį miško ekosistemoms. Dėl šios priežasties ilgalaikis integruotas meteorologinių, atmosferos cheminės sudėties ir ekosistemų būklės monitoringas išlieka būtina sąlyga vertinant klimato kaitos ir tarpvalstybinės oro taršos sąveiką bei prognozuojant Lietuvos miško ekosistemų raidą.

IŠVADA:

Pateikti rezultatai rodo, kad išaiškinta tokią daugiametė rūgštinančių komponenčių koncentracijų ore kaitą negalėjo turėti reikšmingos įtakos miško ekosistemų rūšių įvairovei, jų būklei, gausumui bei atsparumo sumažėjimui nepalankiais laikotarpiais.

1.6. Miško ekosistemų fizinių parametrų tyrimo rezultatų apibendrinimas

Oro temperatūros kaita:

Daugiametė metinės vidutinės oro temperatūros kaitos analizė parodė, kad tiriamuoju laikotarpiu reikšmingiausiai metinė oro temperatūra didėjo Aukštaitijos ir Dzūkijos regionų meteorologinėse stotyse (MS). Jose nustatytas statistiškai reikšmingas didesnis nei 0,62 °C temperatūros padidėjimas per dešimtmetį. Toks augimo tempas atitiktų apie 6 °C per šimtmetį, t. y. viršytų daugelį pastarojo laikotarpio klimato kaitos prognozių. Toks spartus temperatūros kilimas sudarė išskirtines sąlygas tirti miško ekosistemose vykstančius biogeocenotinius procesus ir vertinti galimas grėsmes ekosistemų funkcionavimui.

Mažesnis temperatūros augimas nustatytas Vakarų Lietuvos regione. Telšių MS registruotas apie 0,60 °C temperatūros padidėjimas per dešimtmetį. Nors šis pokytis taip pat buvo statistiškai reikšmingas, jo intensyvumas buvo šiek tiek mažesnis nei Aukštaitijos ir Dzūkijos regionuose.

Esminis skirtumas tarp tirtų regionų yra reikšmingai žemesnė vidutinė oro temperatūra Aukštaitijos regione, kur ji vidutiniškai buvo apie 0,5 °C mažesnė nei Pietų ir Vakarų Lietuvos regionuose. Šis skirtumas gali būti vienas svarbiausių aplinkos veiksnių, lemiančių miško ekosistemų tvarumą intensyvios klimato kaitos sąlygomis.

Toks spartus temperatūros kilimas leidžia teigti, kad vien per 32 metų tiriamąjį laikotarpį vidutinė oro temperatūra padidėjo maždaug 2,0 °C. Tokius meteorologinius pokyčius Lietuvoje galima vertinti kaip intensyvios klimato kaitos scenarijaus požymį, o miško ekosistemų biotos reakcijas – kaip prisitaikymo prie naujų klimato sąlygų ir išlikimo galimybių išraišką.

Vertinant aplinkos šiltėjimo intensyvumą kompleksinio monitoringo stotyse, esančiose mišku apaugusiose teritorijose, nustatyta, kad Aukštaitijos kompleksinio monitoringo stotyje (KMS) temperatūros kilimas buvo mažesnis nei Dūkšto MS ir siekė apie 0,35 °C per dešimtmetį. Tikėtina, kad tam įtakos turėjo miško medynų poveikis vietos mikroklimatui.

Lyginant sezoninius oro temperatūros pokyčius nustatyta, kad Aukštaitijos KMS rudens laikotarpiu šiltėjimo intensyvumas išliko didžiausias ir statistiškai reikšmingas, nors buvo šiek tiek mažesnis nei nustatyta 2020 m. Vidutinės rudens temperatūros didėjimas sumažėjo nuo +0,66 iki +0,62 °C per dešimtmetį. Mažesnis temperatūros augimas nustatytas žiemą ir vasarą – atitinkamai apie +0,32 ir +0,38 °C per dešimtmetį. Palyginti su 2020 m., šių sezonų šiltėjimo intensyvumas šiek tiek padidėjo. Mažiausias temperatūros kilimas ir toliau nustatytas pavasarį, nors per pastaruosius penkerius metus jo intensyvumas padidėjo nuo +0,09 iki +0,12 °C per dešimtmetį. Šie rezultatai rodo,

kad Aukštaitijos regione oro temperatūra ir toliau didėja, didindama galimą neigiamą poveikį miško ekosistemoms.

2025 m. vidutinė oro temperatūra ir toliau mažėjo tik sausio, balandžio ir gegužės mėnesiais, tačiau šie pokyčiai nepasiekė statistinio reikšmingumo ($p > 0,05$). Liepos mėnesio temperatūra po pastarojo penkerių metų laikotarpio pradėjo didėti. Toliau didėjo ir vasario, kovo, birželio bei rugpjūčio mėnesių vidutinė oro temperatūra, tačiau šie pokyčiai taip pat nebuvo statistiškai reikšmingi. Sparčiausiai ir reikšmingiausiai pastaruoju laikotarpiu šilo rugsėjo, lapkričio ir gruodžio mėnesiai. Nors šiltėjimo intensyvumas buvo šiek tiek mažesnis nei ankstesniu penkerių metų laikotarpiu, jis vis dar viršijo 0,06 °C per metus.

Apibendrinus metinius temperatūros rodiklius nustatyta, kad šalčiausi tiriamojo laikotarpio metai buvo 1996, 2003, 2006, 2010, 2017 ir 2022 m., kai vidutinė žiemos oro temperatūra nukrisdavo žemiau –5 °C. Didžiausią įtaką tokioms žemoms metinėms temperatūroms turėjo gruodžio–vasario mėnesių temperatūra, kuri buvo žemesnė nei –7 °C.

Šilčiausi buvo 2001–2002, 2007, 2014, 2020 ir 2024 m., kai vidutinė metinė oro temperatūra viršijo 8 °C. Tokias aukštas reikšmes daugiausia lėmė padidėjusi vasaros ir rudens mėnesių oro temperatūra.

Minimalios, vidutinės ir maksimalios mėnesio oro temperatūros kaitos analizė parodė, kad Aukštaitijos KMS sparčiausiai didėjo minimali mėnesio temperatūra, maždaug du kartus lėčiau – vidutinė mėnesio temperatūra, o maksimali mėnesio temperatūra išliko praktiškai stabili. Tai yra svarbūs veiksniai, didinantys sėkmingo biotos peržiemojimo tikimybę, ypač šylant ramybės laikotarpiui.

Žemaitijos nacionalinio parko regione, remiantis Telšių meteorologinės stoties 1994–2025 m. duomenimis, sparčiausiai šilo rudens ir žiemos sezonai. Temperatūra juose didėjo atitinkamai apie 0,60 ir 0,60 °C per dešimtmetį. Mažesnis temperatūros augimas nustatytas pavasarį ir vasarą – atitinkamai apie 0,47 ir 0,41 °C per dešimtmetį. Palyginti su 2020 m. duomenimis, šiltėjimo intensyvumas reikšmingai sumažėjo, išskyrus vasaros sezoną, kuriame jis išliko nepakitęs. 2020 ir 2024 m. buvo išskirtinai šilti – vidutinė metinė oro temperatūra šioje stotyje pasiekė aukščiausią per visą stebėjimų laikotarpį reikšmę – 8,6 °C.

Dzūkijos regione oro temperatūra šilo panašiu intensyvumu kaip ir Vakarų Lietuvoje. Sparčiausiai šilo rudens ir žiemos sezonai – atitinkamai po 0,82 ir 0,76 °C per dešimtmetį. Lėčiau šilo vasara (0,57 °C per dešimtmetį), o mažiausias temperatūros augimas nustatytas pavasarį – 0,33 °C per dešimtmetį. Išskirtinai šilti, kaip ir Žemaitijos regione, buvo 2002, 2007, 2014, 2020 ir 2024 m., kai vidutinė metinė oro temperatūra pakilo nuo maždaug 8 iki 9,2 °C. 2020–2025 m. laikotarpiu

vidutinė oro temperatūra Aukštaitijos ir Žemaitijos regionuose iš esmės išliko stabili, o Dzūkijos regione nustatyta tik statistiškai nereikšminga temperatūros didėjimo tendencija.

Žemaitijos ir Dzūkijos meteorologinėse stotyse reikšmingai didėjo kovo, birželio, rugsėjo, lapkričio ir gruodžio mėnesių vidutinė oro temperatūra. Abiejose stotyse šių mėnesių temperatūros didėjimo tendencija siekė arba viršijo 0,08 °C per metus.

Oro temperatūros kaita iki 2010 m. ir po 2010 m.:

Palyginus oro temperatūros kaitą iki 2010 m. ir po jų nustatytas išskirtinis vidutinės mėnesio oro temperatūros kitimo bruožas Žemaitijos ir Dzūkijos meteorologinėse stotyse – visais metų mėnesiais per visą tiriamąjį laikotarpį vidutinė oro temperatūra turėjo didėjimo tendenciją.

Analizė parodė, kad apie 2010 m. įvyko ryškus oro temperatūros kaitos lūžis. Iki šio laikotarpio sausio ir vasario mėnesiais visuose tirtuose regionuose buvo stebima statistiškai nereikšminga temperatūros mažėjimo tendencija, tačiau po 2010 m. šių mėnesių vidutinė oro temperatūra pradėjo didėti maždaug po 0,3 °C per metus. Didžiausias ir statistiškai reikšmingas pokytis nustatytas Dzūkijos kompleksinio monitoringo stotyje, kur sausio mėnesio temperatūra didėjo apie 0,33 °C per metus. Tai rodo itin spartų žiemos laikotarpio šiltėjimą.

Vegetacijos sezono pradžioje išryškėjo priešinga tendencija – gegužės mėnesio vidutinė oro temperatūra pradėjo mažėti ir artėjo prie statistinio reikšmingumo ribos. Toks pokytis gali neigiamai veikti miško ekosistemų biologinius procesus, ypač augalų ir medžių fiziologinę būklę bei jų metinį prieaugį. Ryškiausias pokytis nustatytas Žemaitijos meteorologinėje stotyje: iki 2010 m. gegužės mėnesio vidutinė oro temperatūra didėjo beveik po 0,1 °C per metus, o po 2011 m. tokiu pačiu intensyvumu pradėjo mažėti.

Vegetacijos sezono viduryje ryškėjo birželio mėnesio šiltėjimo intensyvėjimas, tuo tarpu liepos ir rugpjūčio mėnesiais temperatūros didėjimas sulėtėjo ir stabilizavosi, priartėdamas prie neutralios tendencijos (apie 0 °C per metus).

Reikšmingai pakito ir rudens mėnesių temperatūros kaita. Jei iki 2010 m. rudens mėnesiais vidutinė oro temperatūra reikšmingai didėjo, tai po 2010 m. ši tendencija susilpnėjo, o lapkričio mėnesį net pradėta registruoti temperatūros mažėjimo tendencija.

Tokie skirtingų metų mėnesių oro temperatūros pokyčiai galėjo turėti reikšmingą poveikį miško ekosistemose vykstantiems biogeocenotiniams procesams ir jų tarpusavio ryšiams, kartu veikdami bendrą ekosistemų funkcionavimą ir raidą.

Oro temperatūra skirtingame aukštyje:

Skirtinguose matavimo aukščiuose oro temperatūros didėjimo intensyvumas buvo labai panašus – apie 0,0005 °C per mėnesį, arba apie 0,06 °C per metus. Tokius rezultatus patvirtino ir vidutinės metinės oro temperatūros kaitos analizė.

Esant vidutinei oro temperatūrai nuo –10 iki +20 °C, minimali oro temperatūra kito nuo –30 iki +10 °C, o maksimali – nuo 0 iki +40 °C. Tokie temperatūros svyravimai yra reikšmingi ir gali turėti didelę įtaką biogeosisteminiams procesams, vykstantiems sąlygiškai natūraliose miško ekosistemose.

Vidutinės oro temperatūros, išmatuotos 2 m aukštyje, ryšys su temperatūra 8 ir 22 m aukštyje iš esmės nesiskyrė. Vienintelis pastebėtas skirtumas buvo regresijos lygties B koeficientas: 8 m aukštyje jis buvo mažesnis už 1, o 22 m aukštyje – šiek tiek didesnis už 1.

Analizuojant oro ir dirvožemio vidutinės temperatūros tarpusavio sąsajas nustatyta, kad jų priklausomybė yra aiškiai sezoninė. Esant tai pačiai vidutinei oro temperatūrai, pirmojoje metų pusėje dirvožemis buvo reikšmingai vėsesnis nei antrojoje. Didžiausias skirtumas nustatytas esant maždaug 10 °C oro temperatūrai ir siekė apie 3 °C: pavasarį dirvožemio temperatūra neviršijo 8 °C, o rudenį siekė apie 11 °C.

Dirvožemio temperatūra:

Dirvožemio temperatūra reguliariai stebima tik Aukštaitijos kompleksinio monitoringo stotyje (KMS). Per 27 metų stebėjimų laikotarpį vidutinė dirvožemio temperatūra 5, 10 ir 20 cm gyliuose padidėjo nuo 6,1 °C 2001 m. iki 8,7 °C 2024 m. Aukščiausios metinės vidutinės dirvožemio temperatūros nustatytos 2000, 2007–2011, 2020 ir 2024 m.

Neigiama vidutinė mėnesio dirvožemio temperatūra buvo registruota 2006 m. (vasario–kovo mėn.), 2010 m. (vasario mėn.), 2012 m. (vasario mėn.), 2014 m. (sausio–vasario mėn.), 2016 m. (sausio mėn.), 2017 m. (vasario mėn.) ir 2018 m. (vasario–kovo mėn.). 2018 m. buvo paskutiniai metai, kai vasario mėnesio vidutinė dirvožemio temperatūra buvo neigiama. Ši situacija pasikartojo tik 2026 m., tačiau šie duomenys jau nepatenka į šio tyrimo laikotarpį.

Priešingai nei buvo tikėtasi, lėčiausiai šilo paviršinis dirvožemio sluoksnis (5 cm gylis), o didėjant gyliui temperatūros kilimo intensyvumas didėjo.

Žemiausia vidutinė dirvožemio temperatūra žiemos laikotarpiu nustatyta 2012 m. vasarį ir siekė –1,4 °C. Ilgiausiai neigiama dirvožemio temperatūra išsilaikė nuo 2002 m. gruodžio iki 2003 m. kovo. Pagal temperatūros svyravimų amplitudę bei maksimalias ir minimalias valandines temperatūras 2012 m. buvo kontrastingiausi per visą stebėjimų laikotarpį.

2019–2025 m. laikotarpiu reikšmingų vidutinės dirvožemio temperatūros kaitos tendencijų nenustatyta. Žiemos mėnesiais (sausio–kovo mėn.) vidutinė dirvožemio temperatūra nenukrito žemiau 0 °C. 2025 m. nustatytas vienas mažiausių skirtumų tarp ramybės ir vegetacijos laikotarpių vidutinės mėnesio dirvožemio temperatūros. Panašūs rezultatai registruoti 2008–2009 ir 2020 m.

Vidutinės metinės dirvožemio temperatūros skirtinguose gyliuose parodė, kad per 27 metų stebėjimų laikotarpį 5 cm gylyje temperatūra didėjo vidutiniškai po 0,053 °C per metus, 10 cm gylyje – po 0,057 °C per metus, o 20 cm gylyje, kuriame buvo registruojama aukščiausia vidutinė temperatūra, – po 0,050 °C per metus.

Antruoju tiriamuoju laikotarpiu (2011–2025 m.) ir toliau buvo registruojamas spartus dirvožemio temperatūros augimas, kuris iš esmės nesiskyrė nuo 1999–2010 m. laikotarpio. Aukščiausios dirvožemio temperatūros užfiksuotos 2011, 2020 ir 2024 m. Šie metai buvo išskirtiniai ir, tikėtina, turėjo reikšmingą poveikį procesams, priklausantiems nuo oro ir dirvožemio temperatūros režimo.

Didelę įtaką medžiagų išplovimui iš dirvožemio turi įšalo gylis ir dirvožemio drėgmės atsargų dinamika. Aukštaitijos KMS didesnis nei 20 cm dirvožemio įšalo gylis buvo reguliariai registruojamas iki 2013 m. Nuo 2014 m. gilesnis nei 20 cm įšalas nebesiformavo, o 2019 m. dirvožemio įšalas apskritai nebuvo užfiksuotas. Pastaraisiais metais įšalo gylis paprastai neviršijo apie 5 cm.

Nuo 1998 m. Aukštaitijos KMS kas 3–4 metus kartodavosi šaltos žiemos, kai dirvožemis įšaldavo giliau nei 30 cm, o įšalas išsilaikydavo keturis ir daugiau mėnesių. Per visą stebėjimų laikotarpį nustatytos šešios tokios žiemos: 1998–1999, 2002–2003, 2005–2006, 2009–2010, 2011–2012 ir 2013–2014 m.

Nors 1998–2014 m. didžiausias įšalo gylis turėjo tendenciją didėti, įšalo trukmė palaipsniui trumpėjo. Nuo 2014 m. stebimas itin ryškus dirvožemio įšalo mažėjimas. Jei 2014 m. maksimalus įšalo gylis dar siekė 28 cm, tai vėlesniais metais jis sparčiai mažėjo, o 2020 m. dirvožemio įšalas apskritai nebuvo registruotas. Tokie pokyčiai turėjo esminės įtakos dirvožemio drėgmės režimui.

2025 m. dirvožemio drėgmės atsargos 0–20 ir 0–40 cm sluoksniuose Aukštaitijos KMS buvo didžiausios nuo 2003 m., kai vegetacijos laikotarpiu pradėti reguliariai atlikti matavimai kas dvi savaites. Pagal vidutinę reikšmę ir sezoninę dinamiką 2025 m. dirvožemio drėgmės režimas buvo panašus į 2012 m., tačiau pasižymėjo mažesniais svyravimais. Po sausringų 2015–2016 m. vienuolika metų iš eilės dirvožemio drėgnis šiltuoju metų laikotarpiu nuosekliai didėjo. Per pastaruosius penkerius metus didžiausi dirvožemio drėgmės kontrastai, rodantys intensyviausią dirvožemio vandens srautų dinamiką, nustatyti 2021 ir 2023 m.

1999–2014 m. buvo nustatytas glaudus ryšys tarp vidutinio dirvožemio drėgnio ir įšalo gylio. Po išskirtinių 2014 m. ši priklausomybė tapo priešinga – didėjant dirvožemio drėgniui, įšalo gylis ir jo trukmė reikšmingai mažėjo. Tai išskirtinis geosisteminis procesas, galintis turėti reikšmingą poveikį ilgalaikiam miško ekosistemų tvarumui.

Palankiausios sąlygos medžiagų išplovimui pavasarį, susidarius nedideliam įšalui ir gausiam polaidžio vandens kiekiui, buvo 2004, 2008, 2009, 2016 ir 2019–2023 m. Didžiausi dirvožemio drėgnio kontrastai vegetacijos laikotarpiu nustatyti 2004, 2006, 2015, 2020, 2021 ir 2023 m.

Paviršinio vandens temperatūra:

Aukštaitijos kompleksinio monitoringo stoties (KMS) upelio vandens temperatūra per 27 metų stebėjimų laikotarpį nuosekliai didėjo – vidutiniškai po 0,055 °C per metus. Šis didėjimo tempas netgi viršijo tuo pačiu laikotarpiu nustatytą oro temperatūros kilimo intensyvumą.

Tuo tarpu Žemaitijos stotyje per 22 stebėjimų metus upelio vandens temperatūra iš esmės išliko stabili, nors oro temperatūra šiame regione kilo beveik du kartus sparčiau nei Aukštaitijos KMS. Tai rodo, kad paviršinio vandens temperatūros režimą, be oro temperatūros, reikšmingai veikia vietinės hidrologinės ir hidrogeologinės sąlygos.

Aukščiausios ir ilgiausiai išsilaikiusios upelio vandens temperatūros Aukštaitijos KMS buvo registruotos 2009–2010 m. 2010 m. vidutinė mėnesio vandens temperatūra daugiau kaip du mėnesius (rugpjūtį ir rugsėjį) viršijo 10 °C, nors nepasiekė 2009 m. rekordinės 10,5 °C reikšmės. 2014 m. vidutinė metinė upelio vandens temperatūra siekė 6,95 °C ir buvo didžiausia 1999–2014 m. stebėjimų laikotarpiu.

2020–2025 m. aiškios vandens temperatūros didėjimo tendencijos nebenustatyta, tačiau 2024 m., vienais šilčiausių stebėjimų metų, upelio vandens temperatūra pasiekė didžiausią per visą stebėjimų laikotarpį reikšmę ir viršijo 12 °C. Toks vandens temperatūros padidėjimas galėjo turėti reikšmingos įtakos makrobentoso rūšių įvairovei ir individų gausai, taip pat medžiagų tirpumo, biogeocheminių procesų bei cheminių elementų migracijos intensyvumui miško ekosistemoje.

Ištirpusio deguonies kiekis upelio vandenyje:

Aukštaitijos KMS ištirpusio deguonies koncentracija upelio vandenyje pasižymėjo ryškiais daugiametės kaitos svyravimais. 1999–2008 m. vidutinė koncentracija siekė 1,89 mg/l. Kai kuriais metais ji viršijo šį vidurkį, o 2010 m. sumažėjo iki 1,60 mg/l. Mažiausios ištirpusio deguonies koncentracijos nustatytos 2002–2003 m. – apie 1 mg/l. Tuo tarpu 2004–2005 ir 2007–2009 m. registruotos didesnės už vidutines koncentracijos, kurias, tikėtina, lėmė palankesnis upelio hidrologinis režimas ir vandens temperatūros dinamika.

2015–2016 m. nustatytas vienas didžiausių vandens prisotinimo deguonimi lygių. Didžiausios ištirpusio deguonies koncentracijos buvo užfiksuotos 2015 m. liepą ir 2016 m. gegužę, kai jos siekė apie 5 mg/l. 2017–2018 m. deguonies koncentracija stabilizavosi, tačiau išliko mažesnė už daugiametį vidurkį ir siekė apie 2,8 mg/l. 2019 m. Versminio upelio vandenyje ištirpusio deguonies koncentracija išliko gana pastovi – apie 2,38 mg/l, tačiau buvo šiek tiek mažesnė už daugiametį vidurkį, tikėtina, dėl ankstyvą pavasarį ir vegetacijos pradžioje vyravusios sausros.

2020 m. nustatytas reikšmingas ištirpusio deguonies koncentracijos padidėjimas Versminio upelyje. Panašios koncentracijos buvo registruotos tik 1999, 2009 ir 2015 m.

Paskutiniaisiais stebėjimų metais (2025 m.) nustatytas ryškus vandens prisotinimo deguonimi sumažėjimas, kuris galėjo turėti reikšmingos įtakos makrobentoso rūšinės įvairovės ir individų gausos pokyčiams.

Vertinant šiuos rezultatus ekologiniu požiūriu, svarbu pažymėti, kad vandens temperatūra yra vienas pagrindinių ištirpusio deguonies tirpumą lemiančių veiksnių. Kylant vandens temperatūrai mažėja deguonies tirpumas, todėl šiltesniame vandenyje potencialiai gali būti ištirpę mažiau deguonies. Dėl šios priežasties ilgalaikis upelio vandens temperatūros didėjimas gali sudaryti mažiau palankias sąlygas deguonies poreikiui jautriems vandens organizmams, ypač makrobentosui, ir kartu keisti biogeocheminių procesų intensyvumą bei visos vandens ekosistemos funkcionavimą. Vis dėlto faktinę ištirpusio deguonies koncentraciją lemia ne tik temperatūra, bet ir hidrologinis režimas, vandens tėkmė, organinių medžiagų skaidymas, fotosintezės intensyvumas bei kiti hidrobiologiniai procesai, todėl temperatūros poveikis vertintinas kaip vienas svarbiausių, tačiau ne vienintelis šį rodiklį lemiantis veiksnys.

Kritulių kiekis ir jo kaita:

Aukštaitijos regione per pastaruosius 40 metų kritulių kiekis, remiantis Dūkšto meteorologinės stoties (MS) duomenimis, didėjo vidutiniškai po 1 mm per metus, tačiau ši tendencija nebuvo statistiškai reikšminga ($p > 0,05$). Tiriamuoju 1993–2010 m. laikotarpiu šioje MS kritulių kiekis didėjo intensyviau – vidutiniškai po 6 mm per metus, o Aukštaitijos kompleksinio monitoringo stotyje (KMS) – beveik po 4,3 mm per metus. Klimatinę normą (1972–2010 m. vidurkį) kritulių kiekis viršijo 1998, 2000, 2005 ir 2010 m., o buvo mažesnis nei vidurkis 1992, 1996, 1999, 2006 ir 2008 m.

2010 m. Aukštaitijoje iškrito didžiausias kritulių kiekis per visą stebėjimų laikotarpį – 33 % daugiau už daugiametį vidurkį. Didžioji kritulių dalis iškrito vegetacijos laikotarpiu, birželio–rugpjūčio mėnesiais.

2011–2015 m. laikotarpiu visu metų laikuose stebėtas ryškus kritulių kiekio mažėjimas. Dėl šios priežasties 22 metų laikotarpio analizė parodė bendrą kritulių kiekio mažėjimo tendenciją.

Sausringais 2015 m. Aukštaitijos KMS užregistruotas mažiausias kritulių kiekis per visą stebėjimų laikotarpį – 425 mm, o Žemaitijos KMS – 670 mm.

2017 m. galima apibūdinti kaip perteklinės drėgmės metus. Tais metais Aukštaitijos KMS iškrito daugiau kaip 1000 mm kritulių – tai didžiausias metinis kritulių kiekis per pastaruosius 25 m.

Paskutinis penkerių metų laikotarpis (2021–2025 m.) pasižymėjo išskirtinai dideliu kritulių kiekiu. Vidutinis metinis kritulių kiekis viršijo 700 mm, o 2023 m. viršijo ir 900 mm ribą. Todėl per visą 33 metų stebėjimų laikotarpį nustatyta bendra kritulių kiekio didėjimo tendencija, siekianti vidutiniškai 3,9 mm per metus.

Sezoninė analizė parodė, kad kritulių kiekis rudenį didėjo vidutiniškai po 0,7 mm per metus, žiemą – po 0,38 mm, pavasarį – po 0,52 mm, o vasarą – po 2,28 mm per metus. Ypač spartus kritulių kiekio didėjimas vegetacijos laikotarpiu galėjo turėti reikšmingos įtakos miško ekosistemų biotos būklei ir jos funkcionavimui.

Apibendrinus rezultatus nustatyta, kad iki 2020 m. Aukštaitijos KMS metinis kritulių kiekis per 27 metų laikotarpį didėjo beveik po 1 mm per metus, tačiau, į analizę įtraukus 2021–2025 m. duomenis, didėjimo intensyvumas išaugo iki beveik 4 mm per metus.

Jeigu 2020 m. buvo keliama prielaida apie didėjančią drėgmės trūkumo grėsmę miško ekosistemoms, tai 2021–2025 m. stebėjimų rezultatai šios prielaidos nepatvirtino. Dėl didėjančio kritulių kiekio Aukštaitijos KMS miško ekosistemos buvo geriau aprūpinamos vandens atsargomis, o tai galėjo turėti teigiamos įtakos jų būklei, atsparumui nepalankiems aplinkos veiksniams ir prisitaikymui prie klimato kaitos.

Pastarąjį dešimtmetį Aukštaitijos KMS kritulių režimas pakito iš esmės. Jeigu pirmajame XXI a. dešimtmetyje sausringi ir drėgni laikotarpiai kartodavosi kas trejus–ketverius metus, tai nuo 2014 m. vandens režimas pradėjo keistis. Oro ir dirvožemio temperatūra nuosekliai didėjo, mažėjo dirvožemio įšalas, didėjo dirvožemio įmirkimas, spartėjo gruntinio vandens cirkuliacija ir bendras garavimas. Šių procesų pasekmė – itin didelis upelio nuotėkis, užregistruotas 2024–2025 m.

Žemaitijos KMS metinis kritulių kiekis klimatinę normą (1972–2010 m. Vėžaičių meteorologinės stoties daugiametis vidurkis – 906,8 mm) viršijo 1995, 1998, 2002, 2005, 2007, 2010–2012, 2017, 2020 ir 2023 m. Mažesnis už daugiametį vidurkį kritulių kiekis buvo registruojamas 1992, 1996, 2006 ir ypač 2015, 2018, 2022 bei 2025 m.

Jeigu 2020 m. buvo nustatyta, kad Žemaitijos KMS metinis kritulių kiekis per 27 metų laikotarpį didėjo vidutiniškai po 1,7 mm per metus ir ši tendencija stiprėjo, tai, į analizę įtraukus paskutiniųjų penkerių metų duomenis, kritulių režimas reikšmingai pakito. Pastaraisiais metais stebimas kritulių kiekio mažėjimas, ypač išryškėjęs 2023 ir 2025 m.

Dzūkijos KMS kritulių kiekio analizė atlikta remiantis Varėnos meteorologinės stoties duomenimis. Nustatyta, kad 1993–2025 m. laikotarpiu metinis kritulių kiekis turėjo mažėjimo tendenciją – vidutiniškai po 0,73 mm per metus. Kritulių kiekis didėjo tik vegetacijos laikotarpiu – po 1,3 mm per metus. Kitais metų sezonais kritulių kiekis mažėjo: rudenį – po 1,4 mm, pavasarį – po 1,12 mm, o žiemą – po 0,4 mm per metus.

Ar vegetacijos laikotarpiu didėjantis kritulių kiekis kompensuos jų mažėjimą kitais metų sezonais ir kokią įtaką tai turės biogeosisteminiams procesams miško ekosistemose, parodys tolesni ilgalaikiai tyrimai.

Apibendrinant galima teigti, kad didžiausia grėsmė miško ekosistemų procesams ir biotos būklei gali būti susijusi su mažėjančiu kritulių kiekiu Dzūkijos ir, pastaraisiais metais, Žemaitijos regionuose. Tuo tarpu didėjantis kritulių kiekis Aukštaitijos KMS, tikėtina, gerina miško ekosistemų aprūpinimą vandeniu, didina jų atsparumą aplinkos stresui ir prisitaikymo prie klimato kaitos galimybes. Tokie skirtingi hidrologinio režimo pokyčiai sudaro prielaidas tirti biotos ekofiziologines reakcijas į besikeičiančias aplinkos sąlygas skirtinguose augaviečių tipuose ir klimato regionuose.

Kritulių sezoninė kaita:

Aukštaitijos KMS per 32 metų tiriamąjį laikotarpį reikšmingiausiai kito liepos mėnesio kritulių kiekis – nustatytas statistiškai reikšmingas didėjimas, siekiantis vidutiniškai 2,3 mm per metus. Kitais mėnesiais registruotos tiek kritulių kiekio didėjimo, tiek mažėjimo tendencijos, tačiau jų statistinis reikšmingumas nepasiekė $p < 0,1$ lygmens. Kritulių kiekis didėjo sausio, balandžio, gegužės, rugpjūčio bei spalio–gruodžio mėnesiais, o mažėjo vasario, kovo ir rugsėjo mėnesiais.

Palyginus laikotarpius iki 2010 m. ir nuo 2011 m., išryškėjo esminiai kritulių režimo skirtumai, galėję turėti reikšmingos įtakos cheminių komponentų migracijai, biotos kaitos intensyvumui bei bendram miško ekosistemų tvarumui ir atsparumui aplinkos stresui. Pirmuoju laikotarpiu kritulių kiekis mažėjo žiemos ir ankstyvo pavasario mėnesiais, o antruoju laikotarpiu šiais sezonais jau nustatyta kritulių kiekio didėjimo tendencija. Reikšmingas pokytis nustatytas ir rugsėjo mėnesį, kai antruoju laikotarpiu kritulių kiekio mažėjimas stabilizavosi. Rudens ir ankstyvos žiemos laikotarpiu kritulių kiekio didėjimo tendencija, nors ir statistiškai nereikšminga, išliko. Ryškiausias pokytis nustatytas liepos mėnesį – nuo 2011 m. kritulių kiekis pradėjo didėti beveik po 5 mm per metus. Toks pokytis galėjo turėti reikšmingos įtakos Aukštaitijos KMS augalijos būklei, produktyvumui ir visos miško ekosistemos funkcionavimui.

Žemaitijos KMS, kaip ir Aukštaitijos KMS, kritulių kiekis mažėjo vasario–birželio mėnesiais. Tačiau, jei Aukštaitijoje ši tendencija buvo statistiškai nereikšminga, tai Žemaitijoje birželio mėnesio kritulių kiekis reikšmingai mažėjo beveik po 2 mm per metus. Kitais metų mėnesiais kritulių kiekis

didėjo intensyviau negu Aukštaitijos KMS. Tokios kaitos rezultatas buvo iki 2020 m. nustatyta vidutiniškai 1,7 mm per metus didėjanti metinio kritulių kiekio tendencija. 2017–2020 m. didėjantis kritulių kiekis galėjo sudaryti palankesnes sąlygas miško biotos gausai, rūšių įvairovei, geresnei medžių būklei ir didesniam jų prieaugiui.

Per 31 metų tiriamąjį laikotarpį Žemaitijos regione reikšmingai mažėjo birželio mėnesio, o didėjo liepos mėnesio kritulių kiekis. Kitų mėnesių kritulių kaita buvo panaši į nustatytą Aukštaitijos KMS. Iki 2010 m. reikšmingiausiai mažėjo žiemos ir ankstyvo pavasario kritulių kiekis. Ryškiausi pokyčiai nustatyti vasario ir ypač balandžio mėnesiais, kai kritulių kiekis mažėjo atitinkamai apie 1,5 ir 5 mm per metus. Tuo tarpu liepos ir rugpjūčio mėnesiais kritulių kiekis didėjo maždaug po 3,5–5,5 mm per metus. Didėjimo tendencija nustatyta ir lapkričio mėnesį.

Antruoju tiriamuoju laikotarpiu kritulių režimas Žemaitijoje iš esmės pasikeitė. Reikšmingai mažėjo tik gruodžio mėnesio kritulių kiekis – daugiau kaip 7 mm per metus. Kitais mėnesiais kritulių kiekio pokyčiai buvo statistiškai nereikšmingi, tačiau beveik visais atvejais vyravo mažėjimo tendencija. Tokie pokyčiai gali tapti nauja grėsme Žemaitijos regiono miško ekosistemų tvarumui.

Dzūkijos KMS per visą tiriamąjį laikotarpį reikšmingų sezoninių kritulių kiekio pokyčių nenustatyta. Kaip ir Žemaitijos KMS, 2011–2025 m. laikotarpiu beveik visais mėnesiais stebėta kritulių kiekio mažėjimo tendencija. Tik sausio ir spalio mėnesiais registruotas kritulių kiekio didėjimas, artimas statistinio reikšmingumo ribai. Kokį poveikį tokie pokyčiai turės miško ekosistemoms, parodys tolesni ilgalaikiai tyrimai.

Kritulių kiekio ir santykinės oro drėgmės palyginamoji analizė parodė, kad 2011–2025 m. laikotarpiu kritulių kiekiui didėjant vidutiniškai po 0,003 mm per mėnesį, vidutinė santykinė oro drėgmė didėjo po 0,0007 % per mėnesį, o minimali santykinė oro drėgmė – net po 0,0013 % per mėnesį. Tai rodo, kad kritulių kiekiui padidėjus 1 mm, vidutinė ir minimali santykinė oro drėgmė padidėtų atitinkamai apie 0,2 ir 0,4 %.

Apibendrinant galima teigti, kad pastaraisiais metais mažėjantis kritulių kiekis Dzūkijos ir ypač Žemaitijos regionuose gali tapti nauja grėsme miško ekosistemų tvarumui ateityje.

Dirvožemio drėgnis:

Dirvožemio drėgnio stebėjimai Aukštaitijos KMS vykdomi nuo 2003 m. Iki 2025 m. mažiausias dirvožemio drėgnis nustatytas 2008, 2014 ir 2018 m., kai jo reikšmės buvo mažesnės už daugiametį vidurkį.

2020–2025 m. laikotarpiu registruotas reikšmingas dirvožemio drėgnio didėjimas. 2025 m. dirvožemio drėgnis pasiekė didžiausią per visą stebėjimų laikotarpį reikšmę – apie 60 mm.

Išskirtinai didelį 2025 m. dirvožemio drėgnį galėjo lemti keletas tarpusavyje susijusių veiksnių: pasikartojančios šiltos žiemos, kurių metu nesiformavo dirvožemio įšalas, gausūs ramybės laikotarpio krituliai nuo 2019 m. bei neįprastai vėsus pavasaris (kovo–gegužės mėn.), dėl kurio galėjo sumažėti evapotranspiracija iš dirvožemio ir paviršinis nuotėkis. Dirvožemio drėgnio pokyčiai naudojami bendrojo garavimo skaičiavimams, todėl nustatyti dėsningumai patvirtina, kad klimato kaita gali turėti reikšmingos įtakos miško dirvožemio fizikinėms savybėms ir vandens režimui.

Gruntinis vanduo ir jo lygis:

Gruntinio vandens lygis, panašiai kaip ir kritulių kiekis, pasižymi 3–4 metų cikliškumu. Tačiau dėl vėluojančio (apie 1–1,5 metų) gruntinio vandens atsako į kritulių režimo pokyčius, esant mažiausiam kritulių kiekiui, giliausiuose gręžiniuose gruntinio vandens lygis dažnai pakildavo iki aukščiausių reikšmių per ciklą, tarsi „kompensuodamas“ ekosistemos sausros poveikį. Tokie atvejai registruoti 1999, 2002, 2005, 2008, 2011–2012 ir 2018 metais, kai, esant sumažėjusiam kritulių kiekiui, gruntinio vandens lygis pavasarį giliuosiuose gręžiniuose buvo aukščiausias arba pakildavo kitų metų pavasarį.

Vandens lygio kitimas skirtingo gylio gręžiniuose yra susijęs su vandens persiskirstymo procesais geoekosistemoje. Gruntinis ir dirvožemio vanduo sudaro tarpinę grandį tarp kritulių ir upelio nuotėkio bei gali iš dalies kompensuoti augalų vandens trūkumą sausros laikotarpiais. Per 25 metų stebėjimų laikotarpį Aukštaitijos stotyje mažiausias kritulių kiekis nustatytas 2008 m., o mažiausias upelio nuotėkis – 2009 m. Sekliuose gręžiniuose gruntinio vandens lygis labiausiai sumažėjo jau 2008 m. antroje pusėje, o 2009 m. jis dar labiau pažemėjo, kas lėmė ir mažiausią upelio nuotėkį. Tuo tarpu giliausiame gręžinyje LT01-104 gruntinio vandens lygis iki žemiausių reikšmių nukrito tik 2009–2010 m., nepaisant to, kad 2009 m. kritulių kiekis buvo didelis per stebėjimų laikotarpį.

2016–2020 m. duomenys rodo, kad abiejose stotyse 2015–2017 m. laikotarpiu gruntinio vandens dinaminiai ištekliai reikšmingai didėjo, o 2017 m. Aukštaitijos stotyje buvo pasiektos didžiausios reikšmės per visą stebėjimų laikotarpį. Nuo 2018 m. Aukštaitijos KMS visuose gręžiniuose, išskyrus LT01-101, pradėtas registruoti reikšmingas gruntinio vandens lygio mažėjimas. Žemaitijos KMS seklesniuose gręžiniuose aiškios mažėjimo tendencijos nenustatyta, tačiau giliausiame gręžinyje vandens lygio mažėjimas pradėtas fiksuoti nuo 2018 m. liepos mėn.

2020 m. gausūs krituliai (>1000 mm), kaip ir buvo prognozuota, sukėlė gruntinio vandens lygio padidėjimą visuose gręžiniuose, tačiau šis atsakas pasireiškė skirtingu laiko vėlavimu. 2022–2024 m. laikotarpiu fiksuotas gruntinio vandens lygio kilimas visuose gręžiniuose abiejose KMS, o giliuosiuose gręžiniuose vėlesniais metais pradėtas registruoti lygio mažėjimas, pirmiausia

Žemaitijos KMS. 2024 m. buvo pasiektos aukščiausios gruntinio vandens lygio reikšmės, o 2025 m. pradėtas stebėti jų mažėjimas.

Gruntinio vandens dinamika intensyviausia buvo Aukštaitijos KMS giliuosiuose gręžiniuose LT01-102, LT01-103 ir LT01-104. Aukščiausias vandens lygis, pasiektas 2024 m. pradžioje (LT01-102 ir LT01-103) ir antrame pusmetyje (LT01-104), buvo laipsniško vandens nuotėkio didėjimo pasekmė. LT01-103 gręžinyje šis procesas prasidėjo 2012 m. (minimalus nuotėkis nustatytas 2010 m.) ir pasiekė maksimumą 2022 m., t. y. po 10–12 metų. 2024–2025 m. vidutinis gruntinio vandens nuotėkis visuose gręžiniuose buvo mažiausias per visą stebėjimų laikotarpį. Šiuo laikotarpiu LT01-102 ir LT01-103 gręžiniuose vandens lygis sumažėjo, o LT01-104 gręžinyje stabilizavosi.

Žemaitijos KMS gręžiniuose (LT03-102, LT03-103 ir LT03-104) vidutinis vandens nuotėkis yra daugiau kaip du kartus lėtesnis nei Aukštaitijos KMS. Giliausiame gręžinyje LT03-104 nuo žemiausių reikšmių, registruotų 1998, 2007 ir 2010 m., vandens lygis pradėjo kilti ir 2018 m. pasiekė maksimumą. 2019–2020 m. jis sumažėjo, o 2023–2025 m. išliko aukštesnis už vidutinį.

2025 m. atnaujinus vandens lygio matavimus Dzūkijos KMS, ilgametės tendencijos dar negali būti patikimai įvertintos. Visuose Dzūkijos KMS gręžiniuose nustatytas žemesnis vandens lygis nei 1997–1999 m., tačiau sezoninės kaitos amplitudė išliko panaši. Giliausiame gręžinyje LT02-103 rudens laikotarpiu vandens lygis sutapo su 1997–1999 m. duomenimis.

Paviršinis vanduo (upelio nuotėkis) ir jo kaitos tendencijos:

Paviršinio vandens nuotėkio sekoje išsiskiria penki laikotarpiai, kai nuotėkio reikšmės viršijo daugiametį vidurkį: 1998 m., 2004–2007 m., 2011–2013 m., 2018 m. ir 2023–2025 m.

2015–2020 m. laikotarpiu kritulių kaita turėjo reikšmingos įtakos upelio nuotėkiui, tačiau ši įtaka pasireiškė ne tais pačiais metais, o su 1–2 metų vėlavimu. Dėl šios priežasties mažiausias nuotėkis per visą tiriamąjį laikotarpį Aukštaitijos KMS baseine nustatytas 2016 m., t. y. praėjus vieneriems metams po 2015 m. sausros. Nuotėkis tais metais nesiekė net 30 mm. 2020 m. upelio nuotėkis buvo dar mažesnis nei 2019 m., kai reikšmingą poveikį turėjo 2018 m. kritulių stygius.

2020 m. kritulių kiekis neviršijo stebėjimo laikotarpio vidurkio. Nors pavasarį dirvožemio drėgmė 0–40 cm gylyje buvo didesnė už vidutinę, dėl paspartėjusios gruntinio vandens cirkuliacijos upelio nuotėkis iš pradžių reikšmingai sumažėjo. Šiuo laikotarpiu kritulių kiekiui didėjant Aukštaitijos KMS (beveik po 5 mm per metus), upelio nuotėkis mažėjo vidutiniškai po 1,6 mm per metus. Toks vandens balanso „išsibalansavimas“ rodo, kad šylant klimatui didėja evapotranspiracijos intensyvumas, todėl mažėja vandens infiltracija į gilesnius dirvožemio sluoksnius. Tai galėjo būti vienas iš naujų, klimato kaitos sąlygotų grėsmių miško ekosistemų tvarumui atsiradimo veiksnių.

Tačiau 2022–2025 m. laikotarpiu, ketverius metus iš eilės kritulių kiekiui viršijant daugiametį vidurkį, upelio nuotėkis 2023–2025 m. laikotarpiu padidėjo ir pasiekė didžiausias reikšmes per visą stebėjimų laikotarpį.

Vandens garavimo intensyvumas:

Pagal atliktus skaičiavimus bendrojo garavimo (evapotranspiracijos) reikšmė 2000–2025 m. laikotarpiu Aukštaitijos KMS vidutiniškai siekė 86 %, o Žemaitijos KMS 1998–2010 m. laikotarpiu – apie 80 %.

Po sausringų metų (2008, 2015, 2018 ir 2021 m.) bendrasis garavimas Aukštaitijos KMS reikšmingai padidėdavo ir pasiekdavo labai aukštas reikšmes: 2009 m. – 94 %, 2015–2017 m. – 92–96 %, 2020–2022 m. – 91–96 %. Tuo tarpu 2024–2025 m. laikotarpiu bendrasis garavimas sumažėjo iki rekordiškai žemų reikšmių – 70–74 %, nors kritulių kiekis tuo pačiu laikotarpiu didėjo, ypač 2023–2024 m. vasaros sezonu.

Saulės spinduliuotės kaita:

Aukštaitijos KM stotyje atlikti tyrimai rodo, kad intensyviausiai didėja FAR (fotosintetiškai aktyvi) spinduliuotė, kuri per 27 metų laikotarpį didėja vidutiniškai po 1,32 W/m² per metus. Bendrosios saulės spinduliuotės didėjimo intensyvumas yra mažesnis ir siekia apie 0,6 W/m² per metus. Maksimalių reikšmių sekoje nustatytas dar didesnis pokytis – iki 2,2 W/m² per metus.

Analizuojant mėnesinę kaitą nustatyta, kad bendroji saulės spinduliuotė reikšmingiausiai didėja gegužės, birželio ir rugpjūčio mėnesiais, kai pokyčiai siekia beveik 2 W/m² per metus. Maksimalių reikšmių sekoje išsiskiria sausio, kovo–balandžio ir liepos mėnesiai, kai spinduliuotės intensyvumas didėja vidutiniškai daugiau kaip 3 W/m² per metus.

Intensyviausias FAR spinduliuotės didėjimas stebimas šiltuoju laikotarpiu (nuo kovo iki lapkričio). Didžiausios reikšmės fiksuojamos gegužės–birželio ir rugpjūčio mėnesiais, kai pokyčiai viršija 3,5 W/m² per metus. Kadangi FAR spinduliuotė yra tiesiogiai susijusi su augalų fotosintezės procesais, jos didėjimas laikytinas reikšmingu ekologiniu veiksniu.

Nuo 2013 m. saulės spinduliuotės kaitoje stebima silpnėjanti didėjimo tendencija, o kai kuriais laikotarpiais – stabilizacija ar mažėjimas, kas siejama su atmosferos skaidrumo pokyčiais, padidėjusia santykine oro drėgme ir kritulių gausėjimu, mažinančiais į Žemės paviršių patenkančios spinduliuotės intensyvumą.

Bendrai vertinant, saulės spinduliuotės pokyčiai yra reikšmingas klimatinės sistemos komponentas, galintis veikti miško ekosistemų produktyvumą, biotos įvairovę ir fotosintetinių procesų intensyvumą. Ilgalaikėje perspektyvoje spinduliuotės kitimo kryptis kartu su kitais klimato veiksniais gali turėti kompleksinį poveikį ekosistemų funkcionavimui.

Pažemio ozono (O_3) koncentracijų kaita:

Pažemio ozono tyrimų rezultatai rodo, kad per 32 metų laikotarpį stebima mėnesio vidutinių koncentracijų mažėjimo tendencija, kuri Dzūkijoje yra statistiškai reikšminga ($p < 0,05$). Dzūkijoje O_3 koncentracija mažėja vidutiniškai po 0,015 µg/m³ per mėnesį, Aukštaitijoje – po 0,011 µg/m³, o Žemaitijoje – po 0,0003 µg/m³ per mėnesį.

Per paskutinius penkerius metus ši mažėjimo tendencija silpnėjo. Detalesnė analizė leidžia išskirti laikotarpius, kai koncentracijų kaita buvo intensyviausia: 1995–2004 m., 2005–2013 m. ir 2014–2020 m. 2023 m. nustatytos vienos didžiausių O_3 koncentracijų per visą stebėjimo laikotarpį.

Ramybės ir vegetacijos laikotarpių analizė parodė, kad Žemaitijos regione pirmą kartą stebimas ozono koncentracijų didėjimas ramybės laikotarpiu (rugsėjo–kovo mėn.), siekiantis apie 0,39 µg/m³ per metus.

2011–2025 m. laikotarpiu, dėl padidėjusių koncentracijų 2018–2019 m., taip pat 2023 m. ir iš dalies 2024 m., O_3 koncentracijos pradėjo didėti Dzūkijos KMS ir ypač Žemaitijos KMS, tuo tarpu Aukštaitijos KMS išliko mažėjimo tendencija.

Europos mastu nustatyta, kad augalų kritinės apkrovos (CL) viršijimai yra plačiai paplitę, išskyrus kai kuriuos Skandinavijos, Islandijos, Baltijos regionų bei Pietryčių Europos plotus. Tačiau mažesnio masto viršijimai fiksuojami beveik visose Europos šalyse.

O_3 koncentracijos priklauso nuo aplinkos sąlygų ir augalų fenologijos. Didžiausios poveikio vertės (POD1) gali būti nustatomos net esant mažesnei ozono koncentracijai, jei yra palankios sąlygos žiotelių laidumui. Tuo tarpu mažiausios vertės dažniausiai fiksuojamos Šiaurės Europoje arba sausose bei šiltose vietovėse, kur žiotelių laidumas yra ribotas.

Remiantis „Copernicus“ duomenimis, 2023 m. vasara Europoje buvo penkta pagal šiltumą, o 2022 m. – šilčiausia. Tai galėjo turėti įtakos 2023 m. ozono koncentracijų pokyčiams, tačiau tikslesniems paaiškinimams reikalinga papildoma analizė.

ANOVA analizė parodė, kad vidutinės daugiametės ozono koncentracijos tarp stočių skiriasi reikšmingai ($p < 0,05$): Aukštaitijoje – 52,1 µg/m³, Žemaitijoje – 49,7 µg/m³, Dzūkijoje – 48,8 µg/m³. Šių rezultatų patikimumui įtakos gali turėti tai, kad Dzūkijoje 2000–2006 m. laikotarpiu stebėjimai nebuvo vykdomi.

Metinių maksimalių koncentracijų kaitoje nustatyta reikšminga mažėjimo tendencija Aukštaitijos ir Dzūkijos KMS: atitinkamai apie 1,49 µg/m³ ir 1,28 µg/m³ per metus. Žemaitijos KMS ši tendencija buvo mažesnė – apie 0,5 µg/m³ per metus.

Aukštaitijos KMS vidutinės mėnesio O_3 koncentracijos mažėja nuo gegužės iki lapkričio, o reikšmingiausias mažėjimas fiksuojamas birželio–rugpjūčio, spalio ir ypač lapkričio mėnesiais (apie

0,3 µg/m³ per metus). Likusiais ramybės laikotarpio mėnesiais stebimas nežymus, statistiškai nereikšmingas didėjimas.

Maksimalių koncentracijų analizė rodo, kad vegetacijos laikotarpiu (birželio–rugpjūčio mėn.) ozono koncentracijos mažėja reikšmingiausiai – iki 1 µg/m³ per metus.

Lyginant laikotarpius (1994–2010 m. ir 2011–2025 m.), nustatyta, kad pirmuoju laikotarpiu ozono koncentracijos mažėjo daugelyje mėnesių, o antruoju laikotarpiu fiksuojamas koncentracijų didėjimas, ypač Žemaitijos ir iš dalies Dzūkijos KMS. Aukštaitijos KMS koncentracijos išlieka stabilios. Tai gali rodyti naujai besiformuojančias grėsmes miško ekosistemų biotai, jos rūšių įvairovei ir būklei.

Tarptautinės prognozės, kad ozono koncentracijos Lietuvoje iki 2020 m. didės, nepasitvirtino. Tačiau pastarasis 5 metų laikotarpis rodo naują tendencijos pokytį – ozono koncentracijų didėjimą.

Pažemio ozono koncentracijos, nesiekiančios 60 µg/m³, šiuo metu neturi reikšmingo neigiamo poveikio medžių lajų būklei. Sausros ir karščio bangų metu augalai, uždarydami žioteles, kartu sumažina ir ozono įsisavinimą, todėl poveikis dažnai būna ribotas.

Tačiau ozono koncentracijoms didėjant ateityje gali blogėti medžių lajų būklė ir mažėti prieaugis, kas galėtų tapti nauja grėsme miško ekosistemoms.

Nustatyta, kad tiek vidutinė, tiek maksimali saulės spinduliuotė paaiškina iki 60 % pažemio ozono koncentracijų kaitos.

Prognozuojama, kad ozono koncentracijų mažėjimą galėtų skatinti mažėjanti saulės spinduliuotė, didėjantis debesuotumas, kritulių gausėjimas ir santykinės oro drėgmės didėjimas. Tuo tarpu ozono koncentracijų didėjimą skatintų saulės spinduliuotės pliūpsniai, sausros ir karščio bangos.

Šie veiksniai lemia, kad pažemio ozono kaita išlieka svarbus veiksnys, galintis turėti reikšmingą poveikį miško ekosistemų būklei ir produktyvumui.

Tolimųjų oro teršalų pernašos ir jų sąsajos su meteorologiniais veiksniais:

Ilgalaikiai 1994–2025 m. integruoto monitoringo stočių duomenys rodo, kad pagrindinių sieros ir azoto junginių koncentracijos Lietuvos foninio užterštumo teritorijose per pastaruosius tris dešimtmečius reikšmingai sumažėjo. Ryškiausiai mažėjo sieros dioksido, aerozolinių sulfatų ir amonio junginių koncentracijos, o nitratų koncentracijų kaita buvo nepastovesnė ir jautresnė meteorologinių sąlygų svyravimams.

Nustatytas atmosferos užterštumo mažėjimas pirmiausia siejamas su reikšmingai sumažėjusiomis sieros ir azoto junginių emisijomis Europoje, tačiau ilgalaikius pokyčius reikšmingai modifikuoja ir meteorologiniai veiksniai. Kritulių kiekis, santykinė oro drėgmė, oro temperatūra,

Saulės spinduliuotė bei oro masių cirkuliacija lemia teršalų pernašą, jų chemines transformacijas, išplovimą iš atmosferos ir patekimą į miško ekosistemas.

Pastaraisiais metais gausėjant krituliams ir didėjant oro drėgmei sustiprėjo atmosferos savaiminio apsivalymo procesai, todėl sieros junginių koncentracijos pasiekė mažiausias reikšmes per visą stebėjimų laikotarpį. Tuo tarpu trumpalaikiai nitratų koncentracijų padidėjimai atskirais metais rodo, kad azoto junginių dinamika tampa vis labiau priklausoma nuo meteorologinių ekstremumų ir oro masių pernašos pobūdžio.

Cheminių medžiagų patekimas į miško ekosistemas taip pat reikšmingai sumažėjo – sieros junginių srautai į miško paklotę, palyginti su monitoringo pradžia, sumažėjo apie 6–16 kartų, o azoto junginių – maždaug du kartus. Šių pokyčių mastą papildomai lemia medynų struktūra, nes tankios eglių lajos efektyviau sulaiko atmosferos priemaišas negu retesnės pušynų lajos.

Apibendrinant galima teigti, kad per pastaruosius tris dešimtmečius atmosferinė apkrova rūgštinančiais sieros ir azoto junginiais Lietuvos miškų ekosistemoms reikšmingai sumažėjo. Vis dėlto klimato kaitos sąlygomis didėjantis meteorologinių procesų kontrastingumas gali tapti vienu svarbiausių veiksnių, reguliuojančių tolesnę atmosferos teršalų pernašą, depoziciją ir jų poveikį miško ekosistemų būklei ateityje.

Bendrosios išvados

1. Ilgalaikiai (1994–2025 m.) kompleksinio monitoringo duomenys rodo, kad Lietuvos miško ekosistemose vyksta sisteminiai klimato ir aplinkos pokyčiai, apimantys atmosferą, hidrologinį režimą, dirvožemį ir biogeocheminius procesus. Dauguma nustatytų tendencijų atitinka pasaulines klimato kaitos kryptis, tačiau jų intensyvumas ir pobūdis skiriasi tarp Lietuvos regionų.
2. Oro ir paviršinio vandens temperatūra ilgalaikėje perspektyvoje didėja, trumpėja dirvožemio įšalo laikotarpis, keičiasi sezoninis temperatūros režimas ir ilgėja vegetacijos sezonas. Šie pokyčiai daro reikšmingą poveikį biologinių procesų intensyvumui, dirvožemio savybėms ir vandens apytakai.
3. Lietuvos miško ekosistemose vyksta ryškus vandens režimo persitvarkymas. Keičiasi kritulių sezoninis pasiskirstymas, didėja dirvožemio drėgnio ir gruntinio vandens lygio svyravimai, spartėja hidrologiniai procesai, o upelių nuotėkis tampa vis labiau priklausomas nuo ankstesnių metų meteorologinių sąlygų. Šie pokyčiai rodo didėjantį hidrologinį nepastovumą.
4. Nors bendras kritulių kiekis kai kuriuose KMS baseinuose didėja, vandens balanso procesai tampa sudėtingesni dėl didėjančios evapotranspiracijos, kintančio gruntinio vandens režimo ir

nevienodo kritulių pasiskirstymo tarp sezonų. Todėl klimato kaitos poveikis vandens ištekliams tampa vis labiau regioniškai diferencijuotas.

5. Saulės spinduliuotės intensyvumas, ypač fotosintetiškai aktyviosios spinduliuotės (FAR), ilgalaikėje perspektyvoje didėjo, sudarydamas palankesnes sąlygas augalų produktyvumui. Tačiau pastaraisiais metais stebimas šios tendencijos silpnėjimas, kuris gali būti susijęs su didesniu debesuotumu, didėjančiu kritulių kiekiu ir oro drėgme.
6. Pažemio ozono koncentracijos per didžiąją stebėjimų laikotarpio dalį mažėjo, tačiau pastaraisiais metais kai kuriuose stotyse registruojami pirmieji jų didėjimo požymiai. Tai rodo, kad klimato kaita gali pradėti keisti fotocheminių procesų intensyvumą ir sudaryti prielaidas didesniam ozono poveikiui miško ekosistemoms ateityje.
7. Per pastaruosius 32 m. atmosferos apkrova sieros ir azoto junginiais reikšmingai sumažėjo dėl sėkmingo tarptautinių oro taršos mažinimo priemonių įgyvendinimo. Tačiau meteorologinių sąlygų kaita vis labiau lemia teršalų pernašą, chemines transformacijas ir iškritas, todėl klimato kaita tampa svarbiu atmosferos cheminės sudėties reguliavimo veiksniu.
8. Klimato kaitos sąlygomis didėja aplinkos procesų tarpusavio sąveika. Temperatūros, kritulių, Saulės spinduliuotės, oro drėgmės, vandens režimo ir atmosferos cheminės sudėties pokyčiai veikia ne izoliuotai, bet kaip tarpusavyje susijusi sistema, lemianti miško ekosistemų funkcionavimą ir jų atsparumą aplinkos pokyčiams.
9. Regioniniai skirtumai tarp Aukštaitijos, Žemaitijos ir Dzūkijos KMS rodo, kad klimato kaitos poveikis ekosistemoms nėra vienodas. Skirtingas hidrologinis režimas, medynų struktūra, dirvožemio savybės ir meteorologinės sąlygos lemia nevienodą jų jautrumą ir prisitaikymą.
10. Ilgalaikis kompleksinis monitoringas leidžia ne tik įvertinti vykstančius aplinkos pokyčius, bet ir anksti nustatyti naujai formuojamas klimato kaitos grėsmes. Tyrimų rezultatai rodo, kad ateityje svarbiausiomis rizikomis gali tapti didėjantis meteorologinių ekstremumų dažnis, regioninis vandens režimo kontrastingumas, didėjanti atmosferos procesų įtaka oro taršai bei galimas pažemio ozono koncentracijų augimas. Todėl kompleksinis ilgalaikis monitoringas išlieka būtina moksline priemone klimato kaitos poveikiui vertinti ir miškų prisitaikymo strategijoms pagrįsti.

Galimos bendrosios grėsmės Lietuvos miško ekosistemoms ateityje

Ilgalaikio kompleksinio monitoringo rezultatai rodo, kad didžiausią grėsmę Lietuvos miško ekosistemoms ateityje gali kelti ne pavieniai klimato ar aplinkos veiksniai, bet jų tarpusavio sąveika. Klimato kaitai stiprėjant, vis svarbesni tampa ne vidutiniai aplinkos parametrų pokyčiai, o didėjantis jų nepastovumas, ekstremalių reiškinių dažnėjimas ir sudėtingėjantys ryšiai tarp atmosferos, dirvožemio, vandens ir biologinių procesų.

Pagrindinė ilgalaikė grėsmė gali būti tolesnis oro ir dirvožemio temperatūros kilimas, dėl kurio trumpės dirvožemio įšalo laikotarpis, spartės organinės medžiagos skaidymasis, keisis maisto medžiagų apytaka ir didės vandens netekimas dėl evapotranspiracijos. Šie procesai gali pakeisti medynų augimo sąlygas, rūšių tarpusavio konkurenciją bei miško ekosistemų produktyvumą.

Ne mažesnę riziką kelia besikeičiantis hidrologinis režimas. Nors dalyje Lietuvos stebimas kritulių kiekio didėjimas, jų pasiskirstymas tampa vis netolygesnis. Dažnėjančios sausros gali būti keičiamos intensyvių kritulių ir potvynių epizodais, todėl didės dirvožemio drėgmės, gruntinio vandens ir paviršinio nuotėkio svyravimai. Tokie pokyčiai gali neigiamai paveikti medžių fiziologinę būklę, šaknų sistemų funkcionavimą ir vandens ekosistemų stabilumą.

Klimato kaita gali keisti ir atmosferos cheminę sudėtį. Nors sieros ir daugumos azoto junginių koncentracijos išlieka mažėjančios dėl sumažėjusių emisijų Europoje, meteorologinių ekstremumų dažnėjimas gali skatinti trumpalaikius azoto junginių ir pažemio ozono koncentracijų padidėjimus. Tai gali didinti oksidacinį stresą augalams ir silpninti miško ekosistemų atsparumą kitiems nepalankiems aplinkos veiksniams.

Svarbi rizika ateityje gali būti ir didėjantis regioninis klimato kaitos netolygumas. Tyrimai rodo, kad Aukštaitijos, Žemaitijos ir Dzūkijos miško ekosistemos į tuos pačius klimato veiksnius reaguoja nevienodai. Todėl vienuose regionuose gali didėti drėgmės perteklius ir vandens sąlygojamas stresas, kituose – stiprėti sausros bei vandens deficitas. Dėl to gali keistis medynų rūšinė sudėtis, produktyvumas ir bendras ekosistemų atsparumas.

Kita ilgalaikė grėsmė siejama su didėjančiu klimato ekstremalumu. Dažnėjančios karščio bangos, intensyvūs krituliai, ilgesni sausringi laikotarpiai ir spartūs sezonų perėjimai gali veikti sinergiškai, sukeldami didesnį stresą nei kiekvienas veiksnys atskirai. Tokiomis sąlygomis didėja miškų pažeidžiamumas kenkėjams, ligoms, invazinėms rūšims bei ekstremalių meteorologinių reiškinių padariniams.

Kita vertus, monitoringo rezultatai rodo ir teigiamas tendencijas. Ženkliai sumažėjusi atmosferinė sieros ir azoto junginių apkrova mažina rūgštėjimo ir eutrofikacijos riziką, o kai kuriuose regionuose didėjantis kritulių kiekis ir dirvožemio drėgnis gali gerinti vandens išteklių būklę bei didinti ekosistemų atsparumą trumpalaikėms sausroms. Tai rodo, kad būsima miško ekosistemų raida priklausys nuo pusiausvyros tarp klimato kaitos keliamų rizikų ir teigiamų aplinkos pokyčių.

Apibendrinant galima teigti, kad didžiausia ateities grėsmė Lietuvos miško ekosistemoms yra ne pats klimato šiltėjimas, o didėjantis aplinkos procesų nepastovumas ir jų tarpusavio sąveikos sudėtingėjimas. Todėl ilgalaikis kompleksinis monitoringas išlieka esmine priemone anksti nustatyti

naujai atsirandančias rizikas, įvertinti ekosistemų prisitaikymo ribas ir pagrįsti mokslu grįstas miškų prisitaikymo prie klimato kaitos strategijas.

Svarbiausias XXI amžiaus iššūkis Lietuvos miško ekosistemoms bus ne vien klimato šiltėjimas, bet didėjantis klimato sistemos nepastovumas, keičiantis atmosferos, vandens, dirvožemio ir biologinių procesų tarpusavio sąveiką bei mažinantis ekosistemų atsparumą aplinkos pokyčiams.

Bendroji prognozė

Ilgalaikio monitoringo rezultatai leidžia teigti, kad Lietuvos miško ekosistemos pereina į naują klimatinę būseną, kuriai būdinga ne tik aukštesnė oro temperatūra, bet ir vis didesnis aplinkos procesų nepastovumas.

Ateityje klimato kaitą vis labiau lems ne pavienių aplinkos veiksnių pokyčiai, bet jų tarpusavio sąveika. Temperatūros kilimas keis dirvožemio šiluminį režimą, vandens apytaką, Saulės spinduliuotės poveikį ir atmosferos cheminę sudėtį, o šių procesų visuma nulems miško ekosistemų funkcionavimą.

Nors per pastaruosius tris dešimtmečius atmosferos apkrova sieros ir daugumos azoto junginiais reikšmingai sumažėjo dėl tarptautinių oro taršos mažinimo priemonių, klimato kaita gali pakeisti atmosferos cheminių priemaišų formavimosi, pernašos ir depozicijos dėsningumus. Didėjantis meteorologinių sąlygų kontrastingumas – karščio bangos, sausros, intensyvūs krituliai ir besikeičianti oro masių cirkuliacija – gali lemti dažnesnius trumpalaikius azoto junginių bei pažemio ozono koncentracijų padidėjimus net ir išliekant mažoms antropogeninėms emisijoms. Todėl ateityje atmosferos taršos lygį vis labiau reguliuos ne vien emisijų pokyčiai, bet ir klimato sąlygų nulemiami atmosferos procesai.

Ozono koncentracijų mažėjimą ateityje galėtų skatinti pirmiausiai Saulės spinduliuotės mažėjimas ir debesuotumas lydimas kritulių kiekio didėjimu, kas sąlygotų ir didesnę santykinę drėgmę ir žemesnę bendrą temperatūra, kuri tik po truputį pradedama stebėti.

Atvirkščiai, pažemio ozono koncentracijų didėjimą ateityje galėtų skatinti Saulės spinduliuotės pliūpsniai, sausros, lydimos karščio bangų. Nuo šių veiksnių tolesnės kaitos prognozės priklausys ir priežemio ozono susidarymas, sąlygojantis bendrą miško ekosistemų būklę ir produktyvumą.

Tikėtina, kad artimiausiais dešimtmečiais didės ekstremalių reiškinių dažnis, sezoninis kontrastingumas ir regioniniai skirtumai. Vienuose Lietuvos regionuose gali stiprėti drėgmės perteklius, kituose – dažnėti sausros epizodai, o tai lems skirtingas dirvožemio, gruntinio ir paviršinio vandens režimo bei biogeocheminių procesų kaitos kryptis. Miško ekosistemų atsparumą vis labiau lems jų gebėjimas prisitaikyti prie greitai kintančių aplinkos sąlygų, o ne prie ilgalaikių vidutinių klimato rodiklių.

Monitoringo duomenys rodo, kad daugelis pokyčių, kuriuos XXI amžiaus viduriui prognozuoja klimato kaitos scenarijai, Lietuvos miško ekosistemose jau yra prasidėję. Ryškiausi jų – spartus oro ir dirvožemio temperatūros kilimas, trumpėjantis dirvožemio įšalo laikotarpis, persitvarkantis vandens balansas, didėjantis hidrologinis nepastovumas, besikeičiantis Saulės spinduliuotės režimas, pirmieji pažemio ozono koncentracijų didėjimo požymiai ir didėjanti meteorologinių sąlygų įtaka atmosferos cheminių priemaišų dinamikai.

Todėl ilgalaikis kompleksinis miškų monitoringas tampa ne tik aplinkos būklės stebėsenos priemone, bet ir ankstyvojo perspėjimo sistema, leidžiančia laiku nustatyti klimato kaitos sukeltas ekosistemų būklės pokyčių ribas, įvertinti atmosferos taršos ir meteorologinių procesų sąveiką bei pagrįsti mokslines rekomendacijas miškų prisitaikymui prie besikeičiančio klimato.

II. MIŠKO EKOSISTEMŲ SUMEDĖJUSIOS AUGMENIJOS MONITORINGAS KOMPLEKSINIO MONITORINGO TERITORIJOSE

Miškų ekosistemos atlieka svarbų vaidmenį palaikant pasaulinį ekologinį stabilumą, teikdamos esmines ekosistemų paslaugas, įskaitant anglies sekvestraciją, biologinės įvairovės išsaugojimą ir klimato reguliavimą. Miškų būklė, kuri apibrėžiama jų atsparumu, produktyvumu ir gebėjimu išsaugoti ekologines funkcijas, įgavo išskirtinį dėmesį intensyvios klimato kaitos sąlygomis (Sarkissian ir kt., 2024; FAO, 2024). Vis daugiau pateikiama įrodymų, kad klimato kaitos sąlygojamos naujosios grėsmės, reikšmingai sąlygoja jų stabilumą ir funkcionalumą.

Pastaraisiais dešimtmečiais pasaulinės tendencijos rodo miškų būklės blogėjimą dėl kylančios temperatūros, pasikeitusių kritulių režimų ir dažnėjančių ekstremalių klimato reiškinių. Sausros, karščio bangos ir gaisrai dabar plačiai pripažįstami kaip pagrindiniai didelio masto miškų nykimo ir medžių mirtingumo veiksniai (Allen ir kt., 2015). Šie klimato veiksniai tiesiogiai veikia medžių fiziologiją, augimą ir atsinaujinimą, taip pat netiesiogiai keičia rūšių sudėtį ir ekosistemos procesus. Be to, ilgalaikė monitoringo sistema visoje Europoje rodo, kad klimato kintamumas kartu su antropogeniniu poveikiu ir toliau silpnina miškų būklę ir jų atsparumą nepalankiems aplinkos veiksniams (Lorenz ir kt., 2024).

Pastarojo laikotarpio tyrimai rodo, kad borealiniuose miškuose tiek paprastoji pušis, tiek paprasta eglė pasižymi jautriu klimato poveikiu augimui: žemesnėse platumose sausra vis labiau riboja produktyvumą, o šiauriniuose regionuose atšilimas gali paskatinti augimą (Martínez del Castillo ir kt., 2024). Tokiomis sąlygomis išryškėja vietinių medžių rūšių prisitaikymo potencialas išgyventi stresą. Paprastoji eglė paprastai yra labiau pažeidžiama sausros streso ir ja susijusių trikdžių, įskaitant žievėgraužių tipografų protrūkius bei šaknų patogenus, o paprastoji pušis linkusi būti atsparesnė vandens trūkumui (Kalliokoski ir kt., 2021; Jansons ir kt.; Venäläinen ir kt.), tačiau dažnai pažeidžiama spyglius graužiančių kenkėjų. Beržai demonstruoja skirtingą atsako reakciją, pasižyminčia didesniu atsparumu tam tikriems aplinkos poveikiams, tačiau padidėjusiu jautrumu žiemos temperatūros svyravimams ir užšalimo bei atlydžio sukeltiems hidrauliniams tikdžiams (Luomaranta ir kt., 2024).

Be klimato pokyčių, miškus vis dažniau paveikia tarpusavyje sąveikaujantys trikdžiai ir kylančios grėsmės. Biotiniai veiksniai, tokie kaip vabzdžiai ir patogenai, plečia savo paplitimo arealą ir intensyvėja šiltesnėmis sąlygomis, pažeisdami klimato streso jau nusilpusius medžius (Seidl ir kt., 2017). Be to, naujausi tyrimai rodo, kad miškų gebėjimas kaupti anglį mažėja, kas tai susiję su didėjančiu medžių mirtingumu ir ekstremaliais klimato reiškiniais (Ciais ir kt., 2025).

Tokiu būdu miško ekosistemų būklę vis labiau lemia sudėtinga klimato kintamumo, ekstremalių reiškinių ir rūšKMS būdingų fiziologinių reakcijų sąveika. Nors dabartiniu laikotarpiu registruojamas atšilimas gali paskatinti augimą mūsų miškuose, didėjantis sausros stresas ir trikdžių intensyvumas gali pakeisti šią teigiamą reakciją, ypač medynuose, kuriuose dominuoja paprastosios eglės (Ge ir kt., 2011; Kellomäki ir kt., 2006). Tikėtina, kad ši dinamika lemtų rūšių sudėties ir ekosistemų funkcionavimo pokyčius, pabrėždama adaptyvių miškų tvarkymo strategijų, skirtų atsparumui sparčiai kintančioms aplinkos sąlygoms didinti, poreikį. Daugiau kaip 30 metų vykstantus kompleksiško monitoringo programos vykdymas skirtingo regiono Lietuvos miškuose įgalina spręsti paskutiniojo laikotarpio aktualiausias problemas miškų tvarumo srityje.

2.1. Miškų būklės dinamika integruoto monitoringo stočių teritorijose

Ekologinio monitoringo sistemoje miškų būklės tyrimai užima vieną iš pagrindinių vietų. Pagal medžių būklę ir jos pokyčius sprendžiama apie vienokių ar kitokių cheminių elementų ar jų junginių kiekius aplinkoje bei jų pokyčius, o taip pat ir apie kitus biotinius ir abiotinius aplinkos faktorius. Sąlyginai nepakenktų miškų būklės dinaminiai tyrimai įgalina analizuoti būklės pokyčius ir juos sąlygojančius veiksnius regioniniu mastu. Naujausios identifikuotos grėsmės hhemiborealiniuose miškuose ypač akivaizdžios tampa ekosistemose, kuriose dominuoja paprastoji pušis (Pinus sylvestris), paprastoji eglė (Picea abies) ir sidabrinis beržas (Betula pendula). Šių rūšių būklei ir produktyvumui didelę įtaką daro klimato kintamumas ir augimo sąlygos, ypač aplinkoje, kurioje trūksta maistinių medžiagų. Naujausi tyrimai pabrėžia, kad meteorologiniai kraštutinumai vaidina lemiamą vaidmenį formuojant paprastosios pušies medynų adaptacinius atsakus oligotrofinėmis sąlygomis (Augustaitis ir Sidabriene, 2026, Augustaitis ir kt., 2021).

Darbo tikslas: nustatyti KMS teritorijose augančių medynų būklę, įvertinti išaiškintus pokyčius ir bei juos lėmusius pagrindinius biotinius ir abiotinius veiksnius.

Miškų būklės tyrimai vykdomi skritulinėse 10m spindulio ploteliuose kasmet: Aukštaitijos KMS 50, Žemaitijos KMS - 37 pastoviuose tyrimo ploteliuose ir 57 atnaujintuose tyrimo bareliuose Dzūkijos KMS baseine. Visoje stoties teritorijoje Aukštaitijoje ir Žemaitijoje būklės tyrimai buvo vykdomi 1993(94), 1996, o nuo 1998 kasmet. 2025 m. atlikta (32) 33-čia miškų būklės apskaita, o Dzūkijos KMS baseine – 10 miškų būklės apskaita.

Pagal vyraujančias medžių rūšis Aukštaitijos KMS baseine vyrauja pušynai su eglės priemaiša dažnai antrame arde. Lapuočių dalis medynuose yra neženkli.

Žemaitijos KMS baseine vyrauja eglynai, vietomis eglės auga kartu su pušimi. Mažiausiai šiame baseine sutinkamai lapuočių medžių rūšys.

Dzūkijos KMS baseine išskirtinai didžiausią dalį sudaro paprastosio pušies medžiai augantys skirtingo drėgnumo ir derlingumo miško augavietėse.

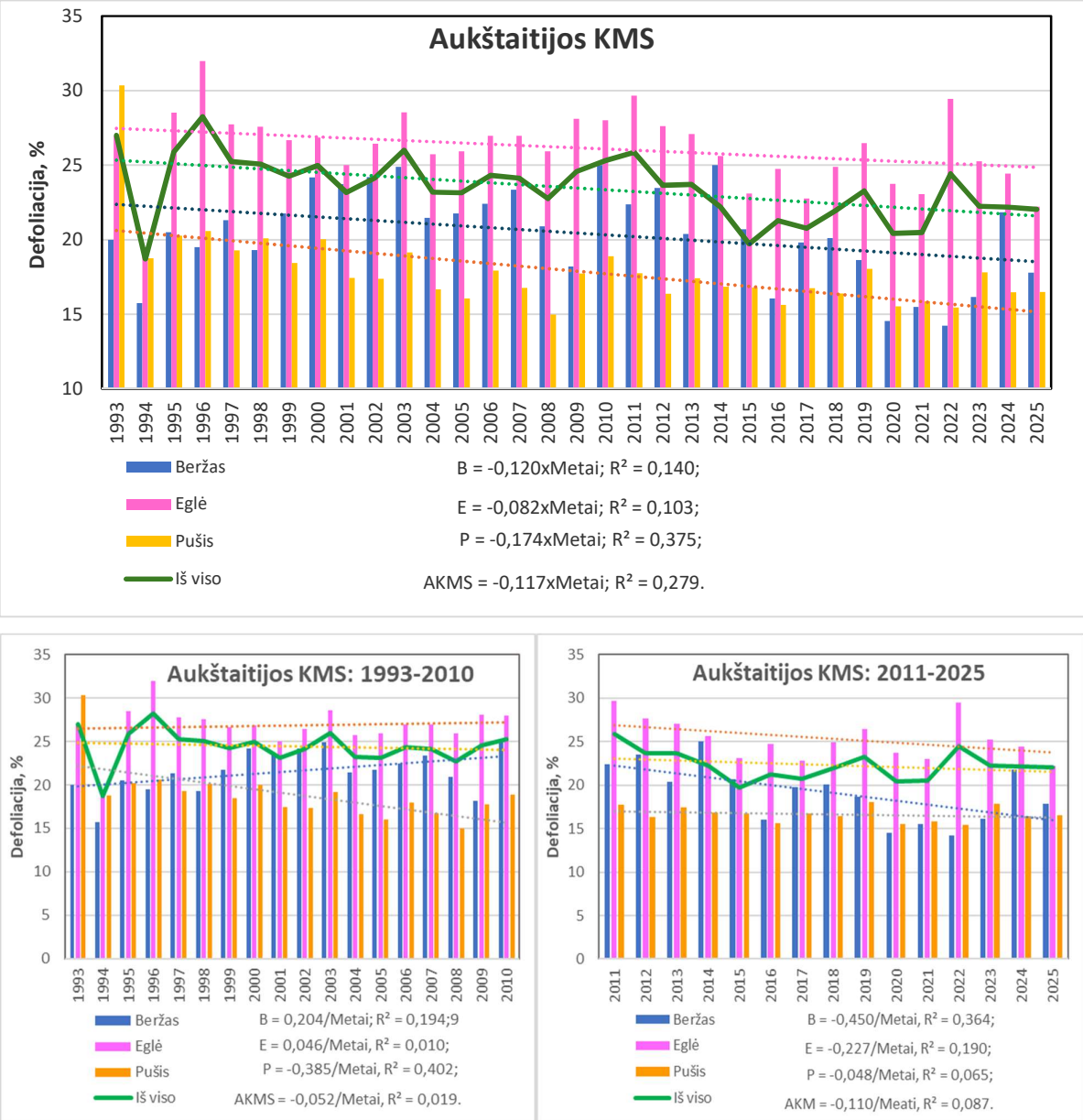
2.1.1. Aukštaitijos KMS medynų būklė ir jos kaitos intensyvumas

Aukštaitijos kompleksiško monitoringo stoties (KMS) Versminio upelio baseino tiriamuosiuose bareliuose augančių medžių lajų vidutinė defoliacija 1993–2025 m. laikotarpiu mažėjo vidutiniškai po **0,12 proc. punkto per metus**, rodydama bendrą medžių lajų būklės gerėjimo tendenciją. Ryškiausiai gerėjo šiame baseine vyraujančių paprastųjų pušų (*Pinus sylvestris*) lajų būklė – jų vidutinė defoliacija mažėjo po **0,17 proc. punkto per metus**. Beržų ir eglių lajų būklė gerėjo lėčiau – jų vidutinė defoliacija mažėjo atitinkamai po **0,12** ir **0,08 proc. punkto per metus**. Nepaisant bendros teigiamos tendencijos, atskirais metais registruoti reikšmingi medžių lajų būklės svyravimai.

Didžiausias medžių lajų būklės pablogėjimas nustatytas 1993–1996 m. laikotarpiu, kai visų tirtų rūšių vidutinė defoliacija padidėjo beveik du kartus. Paprastosios pušies vidutinė defoliacija padidėjo nuo **16,9 %** 1993 m. iki **24,1 %** 1996 m. Tai buvo prasčiausia medžių lajų būklė per visą stebėjimų laikotarpį. Kitas ryškesnis lajų būklės pablogėjimo etapas nustatytas 2010–2011 m.

2015 m. Aukštaitijos KMS baseine toliau vyko esminiai medžių lajų būklės pokyčiai, visų stebimų medžių vidutinė defoliacija siekė **19,7 %** – tai viena mažiausių reikšmių per visą tyrimų laikotarpį. Gerėjo praktiškai visų stebimų medžių lajų būklė, nors ne visada statiškai reikšmingai. Reikšmingiausiai vidutinė defoliacija mažėjo stebimų beržų, nuo 22,7 iki 14,5%. Daugiau nei 2 kartus defoliacijos sumažėjimas registruotas tarp viršaujančių beržų. Arti reikšmingumo lygmens mažėjo eglių ir pušų lajų vidutinė defoliacija, kuri sumažėjo nuo 24,5% iki 22,3%, o pušų nuo 16,8 iki 15,8%. Reikšmingiausiai pagerėjo stelbiamų ir užstelbtų šių rūšių medžių lajų vidutinė defoliacija. Viršaujančių ir vyraujančių medynuose medžių lajų defoliacija praktiškai išliko stabili. Tarp įvairių išsivystymo klasių, reikšmingiausiai vidutinė defoliacija mažėjo taip pat stelbiamų ir užstelbtų medžių lajų. Vertinant visų medžių lajų vidutinės defoliacijos pokytį matyti, kad 2015 m. stebimų medžių vidutinė defoliacija buvo viena mažiausių per visą tiriamąjį laikotarpį ir siekė 19,7%.

Po 2015 m. Aukštaitijos KMS beržų vidutinė defoliacija sumažėjo – nuo **22,7 %** iki **14,5 %**. Eglių vidutinė defoliacija sumažėjo nuo **24,5 %** iki **22,3 %**, o pušų – nuo **16,8 %** iki **15,8 %**. Didžiausias pagerėjimas nustatytas stelbiamų ir užstelbtų medžių grupėse, tuo tarpu vyraujančių ir viršaujančių medžių lajų būklė išliko beveik nepakitusi.



2.1 pav. Aukštaitijos KMS baseine augančių vyraujančių medžių rūšių lajų vidutinės defoliacijos kaita 1993-2025 m.

Lyginant laikotarpius iki 2010 m. ir po 2011 m., išryškėjo skirtingos medžių rūšių reakcijos. Pirmuoju laikotarpiu reikšmingai gerėjo tik pušų lajų būklė – jų vidutinė defoliacija mažėjo po **0,38 proc. punkto per metus**, o eglių ir beržų defoliacija didėjo atitinkamai po **0,05** ir **0,20 proc. punkto per metus**. Antruoju laikotarpiu, ypač po 2015 m., situacija pasikeitė – prasidėjo eglių ir beržų lajų būklės atsikūrimas. Jų vidutinė defoliacija mažėjo atitinkamai po **0,23** ir **0,45 proc. punkto per metus**, o pušų lajų būklė toliau gerėjo, tačiau gerokai lėtesniu tempu – po **0,05 proc. punkto per m**.

2.1 lentelė. Aukštaitijos kompleksinio monitoringo stoties teritorijose augančių įvairių išsivystymo klasių medžių vidutinė defoliacija

Medžio rūšis	Kr kl.	1993		1996		1999		2002		2005		2008		2011		2014		2017		2020		2025	
		F	N	F	N	F	N	F	N	F	N	F	N	F	N	F	N	F	N	F	N	F	N
		%	vnt.	%	vnt.	%	vnt.	%	vnt.	%	vnt.	%	vnt.	%	vnt.	%	vnt.	%	vnt.	%	vnt.	%	vnt.
ALNU GLU	V	15±…	1	15±…	1	20±…	1	25±…	1	30±	1	30±		20±	1	30±	1	70±	1	±			
ALNU GLU	D	5±…	1	15±…	1	15±…	1	20±…	1	15±	1	15±		5±	1	5±	1	10±	1	5.0±	1	10	
ALNU GLU	U	20±…	1	15±…	1	80±…	1	90±…	1			±								10.0±	1	15	
ALNU GLU		13,3±4,4	3	15,0±0,0	3	38,3±21	3	45,0±22	3	22,5±7,5	2	22,5±7,5	2	12,5±7,5	2	17.5±7.5	2	40.0±30	2	7.5±2.5	2		
BETULA SP	V	12,9±2,2	28	23,2±5,2	28	20,4±3,1	25	17,0±1,5	23	17,0±1,4	23	19,3±2,2	23	21,6±4,2	22	29.5±7.2	20	18,4±2,0	16	15.2±1.9	18	24,4±5,2	17
BETULA SP	D	12,9±2,8	21	19,3±4,3	20	15,8±1,4	18	16,7±1,4	14	14,1±1,3	16	21,9±5,4	16	17,3±4,0	15	13.5±1.4	13	15,8±1,6	12	9.4±1.0	34	12,6±1,2	32
BETULA SP	K	14,1±3,1	39	20,3±3,1	39	22,8±2,9	34	27,4±3,3	34	25,2±3,7	32	18,3±1,7	27	26,1±3,6	27	19.1±4.3	22	21,6±4.6	19	13.8±1.3	35	24,7±3,9	30
BETULA SP	U	10,9±1,3	11	24,5±7,6	11	27,5±3,5	10	37,2±8,7	9	27,9±7,5	7	33,3±8,9	6	22,0±3,4	5	36.0±16	5	17.5±2.5	2	12.5±2.5	2	15±	
BETU PEN		15,4±2,1	68	23,1±3,0	67	18,7±1,7	58	19,8±2,1	56	20,4±2,4	51	18,7±2,1	48	19,2±2,3	46	21.7±4.4	39	17,5±3,1	31	11.1±0.8	71	17,0±2,1	63
BETU PUB		8,2±1,0	31	17,6±2,8	31	26,2±2,9	29	30,2±3,2	28	21,3±2,7	27	24,6±2,7	24	28,9±4,3	23	24.8±4.4	21	21,4±1.8	18	17.8±1.6	18	29,7±4,4	17
BETULA SP		13,1±1,5	99	21,4±2,3	98	21,2±1,5	87	23,3±1,8	80	20,7±1,8	78	20,7±1,7	72	22,5±2,1	69	22.7±3.2	60	19,0±1,9	49	12.4±0.8	89	19,7±2,0	80
FRAX EXC		0±…	1	10±…	1	20±…	1	30±…	1	95±	1	±		±						±			
PICE ABI	V	11,2±1,2	78	35,6±3,5	78	19,4±1,9	62	21,0±2,9	59	13,3±0,8	53	18,5±2,6	53	14,4±1,4	47	13.7±1.2	45	14.3±1.4	41	14.7±1.9	44	11,8±1,1	33
PICE ABI	D	14,8±1,4	103	35,5±2,6	103	23,0±1,4	87	22,2±1,7	80	22,6±2,3	72	17,9±1,2	66	21,5±2,6	65	15.9±1.0	59	14,7±0,9	57	15.7±1.2	128	20,3±1,9	106
PICE ABI	K	14,9±0,8	217	33,3±1,6	216	23,4±0,6	191	23,0±0,9	185	23,8±1,1	179	21,5±1,0	169	23,5±1,4	150	21.6±1.4	137	19,3±0,8	129	20.1±1.3	154	18,5±0,9	122
PICE ABI	U	16,5±0,6	308	34,3±1,1	307	31,0±0,9	281	31,6±1,1	271	31,1±1,0	244	32,9±1,3	229	40,2±1,8	206	32.6±1.6	170	32,6±1.6	155	32.1±1.9	156	28,6±1,9	114
PICE ABI		15,2±0,4	706	34,3±0,9	704	26,3±0,5	623	26,6±0,7	599	25,9±0,7	548	25,8±0,8	517	29,7±1,1	468	24.5±0.9	411	22.7±0.8	382	22.3±0.9	482	21,5±0,9	375
PINU SYL	V	13,7±1,2	127	19,2±1,6	127	17,4±1,0	120	16,6±0,6	119	15,3±1,1	118	14,4±0,8	116	17,2±1,2	115	15.9±1.0	114	15.6±0,8	110	14.3±0.9	113	16,0±1,2	116
PINU SYL	D	22,9±3,3	52	31,6±4,3	52	18,1±1,2	44	18,1±1,2	44	16,7±2,1	44	14,5±0,9	43	17,7±1,1	43	17.0±1.0	43	18,6±1.1	43	18.5±2.2	43	16,8±1,1	41
PINU SYL	K	22,1±4,6	14	27,1±6,0	14	21,2±1,9	13	19,6±1,3	13	17,7±1,6	13	16,9±1,1	13	20,0±1,7	13	17.7±1.4	13	20,4±1.4	13	15.8±1.6	13	19,6±1,1	12
PINU SYL	U	20,0±2,5	9	45,0±11	9	35,8±13	6	25,0±6,3	5	24,0±4,3	5	28,7±6,6	4	47,5±19	4	46.7±26	3	20.0±0.0	2	17.5±2.5	2	15,0±0,0	2
PINU SYL		16,9±1,2	202	24,1±1,7	202	18,4±0,9	183	17,4±0,5	181	16,1±0,9	180	15,0±0,6	176	18,2±1,0	175	16.8±0.8	173	16.8±0.6	168	15.5±0.8	171	16,4±0,9	171
TILI COR	K	5,7±0,7	7	10,0±0,0	7	15,0±1,1	7	8,6±0,9	7	6,4±0,9	7	14,3±1,3	7	10,7±1,7	7	15.1±1.1	7	12,1±1.0	7	5.7±1.3	7	18,6±1,4	7
TILI COR	U	7,5±2,5	2	10,0±0,0	2	22,5±7,5	2	12,5±7,5	2	15,0±5,0	2	20,0±5,0	2	15,0±5	2	22.5±7.5	2	17,5±2,5	2	5.0±5.0	2	17,5±7,5	2
TILI COR		6,1±0,7	9	10,0±0,0	9	16,7±1,9	9	9,4±1,5	9	8,3±1,7	9	15,5±1,5	9	11,7±1,7	9	16.7±1.9	9	13,3±1.2	9	5.5±1.3	9	18,3±1,7	9
Visų rūšių	V	12,7±0,8	234	25,1±1,6	234	18,4±0,9	208	17,9±0,9	202	15,0±0,7	195	16,2±0,9	193	17,0±1,0	185	16.9±1.1	180	15.9±0.7	168	14.5±0.8	175	16,0±1,1	166
Visų rūšių	D	16,9±1,3	177	32,3±2,1	176	20,6±0,9	150	20,2±1,0	143	19,6±1,5	133	17,3±1,0	126	19,5±1,5	124	15.9±0.7	116	16,3±0,6	113	15.2±0.9	206	18,1±1,2	180
Visų rūšių	K	14,8±0,8	279	30,4±1,4	278	22,9±0,6	247	23,0±0,9	245	23,5±1,1	233	20,6±0,8	217	23,2±1,2	198	20.7±1.2	180	19,3±0,8	169	18.3±1.0	210	19,7±1,0	172
Visų rūšių	U	16,3±0,6	331	34,0±1,1	330	31,3±0,9	300	31,7±1,1	288	30,8±1,0	258	32,8±1,3	241	39,7±1,8	217	32.8±1.7	180	30,2±1,6	161	31.2±1.8	163	27,9±1,8	120
VISŲ RŪŠIŲ		15,2±0,4	1021	30,7±0,7	018	24,2±0,5	905	24,2±0,5	878	23,1±0,6	819	22,7±0,6	777	25,9±0,8	724	22.2±0.7	656	20,7±0.6	611	19.4±0.6	754	19,8±0,6	638

Pastaba: - būklė blogėja; - būklė gerėja; - būklė stabili.

Paskutiniuoju laikotarpiu miškų būklė buvo sąlygota 2015 m. sausros ir išskirtinai gausių kritulių 2017 m. Tokios išskirtinės meteorologines sąlygos reikšmingai paveikė paveikė medžių lajų būklę Aukštaitijos KMS baseine. Tyrimai parodė, kad 2019 m. būtent beržai yra mažiausiai prisitaikę prie dabarties klimato kaitos. Ypač gausūs krituliai pablogino beržų lajų būklę. Jų vidutinė defoliacija padidėjo 4,3%, t.y. nuo 13,2% iki 17,5%, o plaukuotųjų beržų net 5,3%, t.y. nuo 16,1% iki 21,4%. Eglių ir pušų lajų vidutinė defoliacija padidėjo žymiai mažiau. Jei pušų lajų defoliacija padidėjo 1,0%, t.y. nuo 15,8% iki 16,8%, tai eglių lajų padidėjimas siekė vos 0,4%, t.y. nuo 22,3% iki 22,7%.

Reikšmingiausiai pablogėjo pelkinėse miško augavietėse augančių beržų būklė, kurių defoliacija 2019 m. padidėjo nuo 20,3% iki 23,6%. Šį pablogėjimą lėmė ypač dominuojančių medyne ir viršaujančių (stambiausių medžių) lajų defoliacijos laipsnio padidėjimas. Tai prasto beržų adaptatyvumo prie dabartinių aplinkos sąlygų rodiklis.

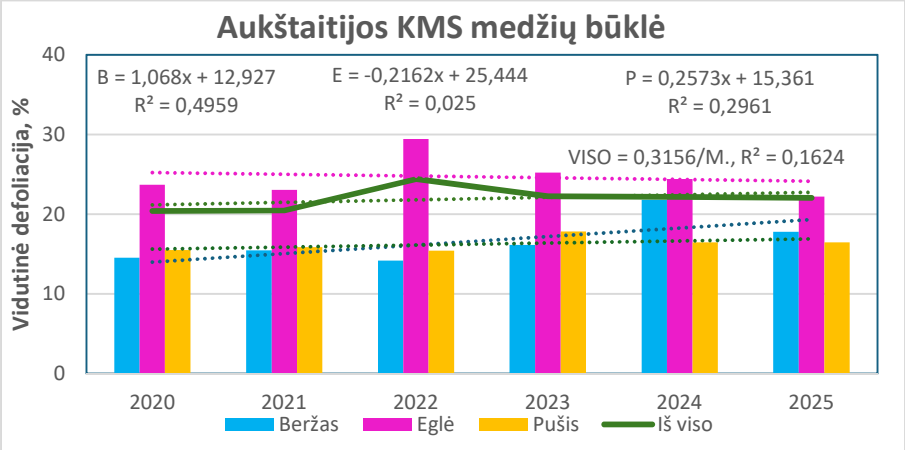
Kiek silpniau blogėjo pušų lajų būklė. Per 2019 m. jų vidutinė defoliacija padidėjo nuo 16,4 % iki 18,0 %. Intensyviausiai blogėjo viršaujančių medžių lajų būklė, kas rodo, kad būtent sausra ir karščio bangos turėjo reikšmingiausios neigiamos įtakos patiems didžiausiems ir gerai išsivysčiusiems pušies individams. Tai patvirtina mūsų nustatytus dėsningumus pušynuose, remiantis kuriais yra teigiama, kad stambiausi medyne medžiai yra jautriausi aplinkos kaitai.

2020 m. šiltos žiemos, gausių kritulių praėjusio sezono rudens ir žiemos laikotarpiu bei padidėjusio dirvožemio drėgnio poveikio rezultatas – išskirtinai intensyvus tirtų medžių lajų būklės atsikūrimas Aukštaitijos KMS baseino mišriuose spygliuočių su lapuočiais medynuose. Visų tirtų medžių lajų vidutinė defoliacija sumažėjo vidutiniškai 3,5 %, nuo 22.9% iki 19.4%. Tokios geros būklės medynai Aukštaitijos KMS buvo tik tyrimų pradžioje.

Reikšmingiausiai pagerėjo beržų lajų būklė, vidutiniškai nuo 16,7 % iki 11,1 %. Intensyviausiai gerėjo viršaujančių ir vyraujančių medynuose beržų būklė, kurių vidutinė defoliacija sumažėjo daugiau negu 5 %. Kiek silpniau gerėjo stelbiamų ir mažiausiai užstelbtų beržų būklė.

Intensyvių lajų būklės gerėjimu pasižymėjo ir eglės, nepaisant pakankamai intensyvaus jų pažeidimų dėl žievėgraužio tipografo veiklos. Medžių išsivystymo lygis neturėjo esminės įtakos lajos būklės pagerėjimo intensyvumui. Vienodai pagerėjo tiek viršaujančių, tirk ir stelbiamų eglių būklė, t.y. vidutiniškai apie 3% .

Pušų lajų būklės pagerėjimo intensyvumas kiek mažesnis negu beržų, bet didesnis negu eglių, ypač stelbiamų ir užstelbtų medžių grupėje, kur lajų vidutinė defoliacija sumažėjo iki 5 %. Viršaujančių ir vyraujančių medyne pušų lajų būklės pagerėjimas siekė panašiai kaip ir eglių, apie 3 – 4 %. Tokiam reikšmingam medžių lajų būklės pagerėjimo procesui reikšmingos įtakos galėjo turėti ypač šilta ir besniegė žiema bei gausūs krituliai praėjusio rudens ir žiemos laikotarpiais.



2.2 pav. Vyraujančių medžių rūšių būklės kaita Aukštaitijos KMS (2020-2025 m.)

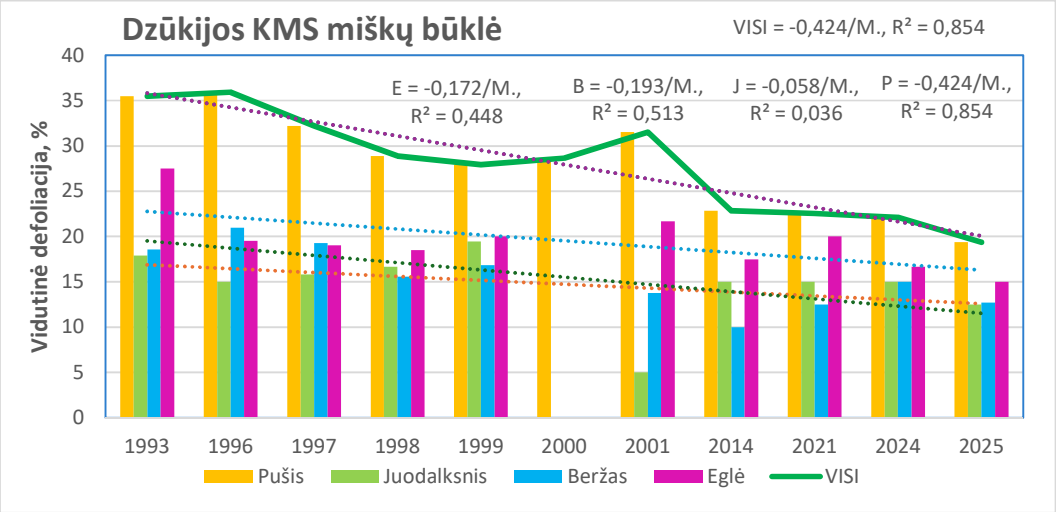
Tačiau 2021–2025 m. laikotarpiu vėl pradėti registruoti medžių lajų būklės blogėjimo požymiai. Ryškiausiai blogėjo beržų lajų būklė, tačiau tai iš dalies lėmė ir vieno tyrimų barelio (Nr. 38) medžių žūtis dėl ilgalaikio užmirkimo, kai vandens lygis pakilo daugiau kaip **20 cm virš dirvožemio paviršiaus**. Blogėjimo tendencija nustatyta ir pušų lajų būklėje – jų vidutinė defoliacija didėjo po **0,26 proc. punkto per metus**. Tuo tarpu eglių lajų būklės ilgalaikė tendencija išliko stabili, nors 2022 m. registruotas ryškus trumpalaikis būklės pablogėjimas dėl masinių **žievėgraužio tipografo** pažeidimų ir medžių žūties.

Apibendrinant galima teigti, kad per daugiau kaip tris dešimtmečius Aukštaitijos kompleksiško monitoringo stoties medynų lajų būklė iš esmės gerėjo, tačiau ši kaita nebuvo tolygi ir pasižymėjo ryškiais daugiametės dinamikos ciklais. Didžiausias lajų būklės pagerėjimas nustatytas paprastosios pušies medynuose, o beržų ir eglių būklė ryškiau gerėjo tik po 2011 metų. Nustatyta, kad medžių lajų būklės pokyčius pirmiausia lėmė meteorologinės sąlygos – sausros ir karščio bangos skatino lajų defoliacijos didėjimą, o šiltos žiemos, gausesni krituliai ir padidėjęs dirvožemio drėgnis sudarė palankias sąlygas medynų atsikūrimui. Pastaraisiais metais išryškėjo nauji rizikos veiksniai: beržų būklę neigiamai veikė ilgalaikis užmirkimas, o eglynuose reikšmingą įtaką turėjo žievėgraužio tipografo pažeidimai. Tai rodo, kad medžių lajų būklę formuoja kompleksinė klimato ir biologinių veiksnių sąveika, kurios reikšmė klimato kaitos sąlygomis ateityje gali dar didėti.

Paskutiniųjų metų medžių lajų vidutinės defoliacijos kaitos rezultatus galima būtų teigti, kad sausra ir karščio bangos neigiamai sąlygoja visų tirtų Aukštaitijos KMS baseine augančių medžių lajų būklę, tačiau jos poveikis paprastosios eglės medžiams buvo mažiausias.

2.1.2. Dzūkijos KMS medynų būklė ir jos kaitos intensyvumas.

Dzūkijos KMS upelio baseine pušynų būklę tyrimų pradžioje sąlygojo pušinio pjūklelio ir verpiko vienuolio daroma žala. Jei 1993 m. tirtų pušų vidutinė defoliacija buvo 29,5% tai 1996 m. ji pakilo iki 36,4%. Didesni neigiami būklės pokyčiai buvo užfiksuoti viršaujančių ir vyraujančių medyne medžių. Atsilikusių augime ir ypač užstelbtų pušų prasta būklė nustatyta jau 1993m., tačiau dar po 3-jų metų ji nors ir pablogėjo, bet ne taip akivaizdžiai, kaip aukštesnių išsivystymo rango medžių (1 lentelė). Intensyvus lajos pažeidimas viršaujančių medžių nebuvo limituojantis faktorius šiems medžiams, kai tuo tarpu užstelbtiems medžiams net silpnas kenkėjų pažeidimas buvo lemiamas. Tai puikiausiai įrodo gauti būklės pokyčio rezultatai už 1996-1999m. laikotarpį. 1995m. pradėjus naudoti biologinį insekticidą prieš pušini pjūklelį ir neporinį verpiką pušynų būklė pradėjo atsistatyti. Viršaujančių ir vyraujančių medžių defoliacija per šį laikotarpį sumažėjo apie 6%, atsilikusių augime apie 5% ir užstelbtų medžių defoliacija sumažėjo apie 9%. Didžiausią teigiamą užstelbtų medžių būklės pokytį sąlygojo ne šių medžių būklės atsistatymas 1999m., bet šių - labiausiai pažeistų medžių mirtingumas 1996m.



2.3 **pav.** Tirtų medžių rūšių lajos būklės kaita tiriamuoju laikotarpiu Dzūkijos KMS baseine

2014 m. atnaujinus tyrimus išryškėjo naujas Dzūkijos KMS miškų, daugiausia pušynų, būklės kaitos etapas, pasižymintis laipsnišku pušų lajų būklės gerėjimu. Ši tendencija ypač aiškiai atsiskleidė paskutiniaisiais stebėjimo metais. 2021–2025 m. visų tirtų medžių rūšių vidutinė lajų defoliacija reikšmingai mažėjo, o 2025 m. nesiekė 20 % ribos, rodančios gerą medynų būklę.

2.2 lentelė. Dzūkijos kompleksinio monitoringo stoties teritorijose augančių įvairių išsivystymo klasių medžių vidutinė defoliacija

Medžio rūšis	Kr kl.	1993		1996		1998		1999		2001		2014		2021		2024		2025					
		F	N	F	N	F	N	F	N	F	N	F	N	F	N	F	N	F	N	F	N	F	N
		%	vnt.	%	vnt.	%	vnt.	%	vnt.	%	vnt.	%	vnt.	%	vnt.	%	vnt.	%	vnt.	%	vnt.	%	vnt.
ALNU GLU	V	6,7±1,7	3	8,3±3,3	3	10,0±0,0	3	10,0±0,0	3									10,0±0,0	1				
ALNU GLU	D	12,0±2,5	5	15,0±1,6	5	15,0±2,7	5	16,0±1,9	5	5,0±0,0	1	15,0±0,0	1	15,0±0,0	1	15,0±0,0	1	15,0±0,0	1				
ALNU GLU	K	7,0±1,2	5	12,0±1,2	5	16,0±3,7	5	25,0±9,5	5	5,0±0,0	1												
ALNU GLU	U	43,0±18	5	21,3±4,2	4	23,7±3,8	4	23,8±3,8	4														
ALNU GLU		18,3±6,0	18	14,4±1,6	17	16,4±1,9	17	19,4±3,1	17	5,0±0,0	2	15,0±0,0	1	15,0±0,0	1	15,0±0,0	1	12,5±2,5	2				
ALNU INC		10,0±0,0	1	25,0±	1	20,0±0,0	1	20,0±0,0	1														
BETU PEN	V	10,5±2,0	10	30,0±11	10	15,0±9,6	10	6,1±2,1	9	17,5±7,5	2	8,3±6,0	3	0,0±0,0	1	5,0±0,0	1	5,0±0,0	1				
BETU PEN	D	14,8±1,5	20	12,7±0,9	20	11,0±0,6	20	11,0±0,9	20	±		±		±		±		12,7±1,1	22				
BETU PEN	K	15,6±2,6	8	15,6±2,7	8	16,2±2,5	8	15,0±3,0	8	20,0±0,0	1	±		±		±		15,0±5,0	2				
BETU PEN	U	30,7±8,4	15	30,0±7,3	13	24,2±4,5	13	29,2±6,6	13	±		15,0±0,0	1	25,0±0,0	1	25,0±0,0	1	15,0±0,0	1				
BETU PEN		18,6±2,6	53	21,0±3,1	51	16,0±2,3	51	15,5±2,2	50	18,3±4,4	3	10,0±4,5	4	12,5±12	2	15,0±10	2	12,7±1,0	26				
PICE ABI	V	±		-		±		±		±		±		±		±		±					
PICE ABI	D	±						±		±		±		±		±		±					
PICE ABI	K	±						±		±		±		±		±		±					
PICE ABI	U	±						±		±		±		±		±		±					
PICE ABI		27,5±9,8	12	19,5±1,7	10	18,5±2,2	10	20,0±3,2	10	21,7±4,4	3	17,5±2,5	4	20,0±2,0	4	16,7±1,7	3	15,0±5,8	3				
PINU SYL	V	19,1±0,7	336	24,1±0,6	332	20,5±0,6	332	17,9±0,7	330	18,9±0,5	284	15,4±0,4	300	17,0±0,7	281	16,6±0,7	271	16,0±0,7	270				
PINU SYL	D	20,3±0,8	342	26,8±0,6	334	22,8±0,6	332	20,2±0,5	331	22,6±0,8	262	21,6±0,9	279	21,6±1,0	238	21,7±1,1	228	19,4±0,9	226				
PINU SYL	K	29,1±1,6	234	34,9±1,3	220	30,0±1,2	212	30,4±1,8	208	35,4±2,0	143	28,0±1,7	118	27,6±2,4	95	27,3±2,5	88	23,5±2,0	86				
PINU SYL	U	58,9±1,5	459	58,6±1,4	378	51,5±1,4	331	49,3±1,4	293	59,0±1,9	203	45,9±2,7	88	45,2±3,7	59	43,2±3,9	54	38,2±3,6	51				
PINU SYL		34,4±0,8	1371	37,0±0,7	1265	31,3±0,6	1207	28,7±0,6	1162	31,8±0,8	892	22,9±0,6	785	22,5±0,7	673	22,1±0,7	641	20,0±0,6	633				
Visų rūšių	V	18,7±0,7	349	24,1±0,7	345	20,2±0,7	345	17,6±0,6	342	18,9±0,5	286	15,3±0,4	303	16,9±0,7	282	16,6±0,7	272	16,0±0,7	272				
Visų rūšių	D	19,8±0,7	369	25,8±0,6	362	22,0±0,6	359	19,7±0,5	358	22,6±0,8	263	21,6±0,9	280	21,5±1,0	239	21,7±1,1	229	18,8±0,8	249				
Visų rūšių	K	28,4±1,5	249	33,6±1,3	235	29,2±1,1	226	29,7±1,7	222	35,1±2,0	145	28,0±1,7	118	27,6±2,4	95	27,2±2,5	88	23,3±2,0	88				
Visų rūšių	U	57,2±1,4	488	56,5±1,4	403	49,4±1,4	356	47,4±1,4	318	58,5±1,9	206	44,3±2,6	93	43,3±3,6	64	41,5±3,7	58	36,5±3,4	55				
VISŲ RŪŠIŲ		33,6±0,8	1455	35,9±0,6	1345	30,4±0,6	1286	28,0±0,6	1240	31,6±0,8	900	22,8±0,6	794	22,5±0,7	680	22,1±0,7	647	19,7±0,6	664				

Pastaba: - būklė blogėja; - būklė gerėja; - būklė stabili

Viena svarbiausių pušynų būklės gerėjimo priežasčių buvo spyglius graužiančių kenkėjų populiacijų sumažėjimas. Tyrimų pradžioje jų daroma žala buvo akivaizdi, o pastaraisiais metais ji registruojama tik pavienėms pušims.

Kitų medžių rūšių būklės gerėjimą reikėtų vertinti atsargiai, nes per tiriamąjį laikotarpį reikšmingai sumažėjo tirtų medžių skaičius, todėl apskaičiuoti vidutiniai rodikliai yra mažiau patikimi.

Apibendrinus medžių būklės dinamikos rezultatus Dzūkijos KMS teritorijoje, galima teigti, kad pirmuoju tiriamuoju laikotarpiu (1993–2001 m.) medžių būklė blogėjo – vidutinė lajų defoliacija padidėjo nuo 28,8 iki 35,6 %. Antruoju laikotarpiu (2014–2025 m.) nustatytas ryškus būklės pagerėjimas – vidutinė defoliacija sumažėjo nuo 35,6 iki 27,7 %, o 2025 m. nesiekė nė 20 % ribos. Šie rezultatai rodo, kad Dzūkijos KMS medynų būklė reikšmingai pagerėjo, o svarbiausia šio proceso priežastis buvo spyglius graužiančių kenkėjų daromos žalos sumažėjimas.

2.1.3. Žemaitijos KMS medynų būklė ir jos kaitos intensyvumas

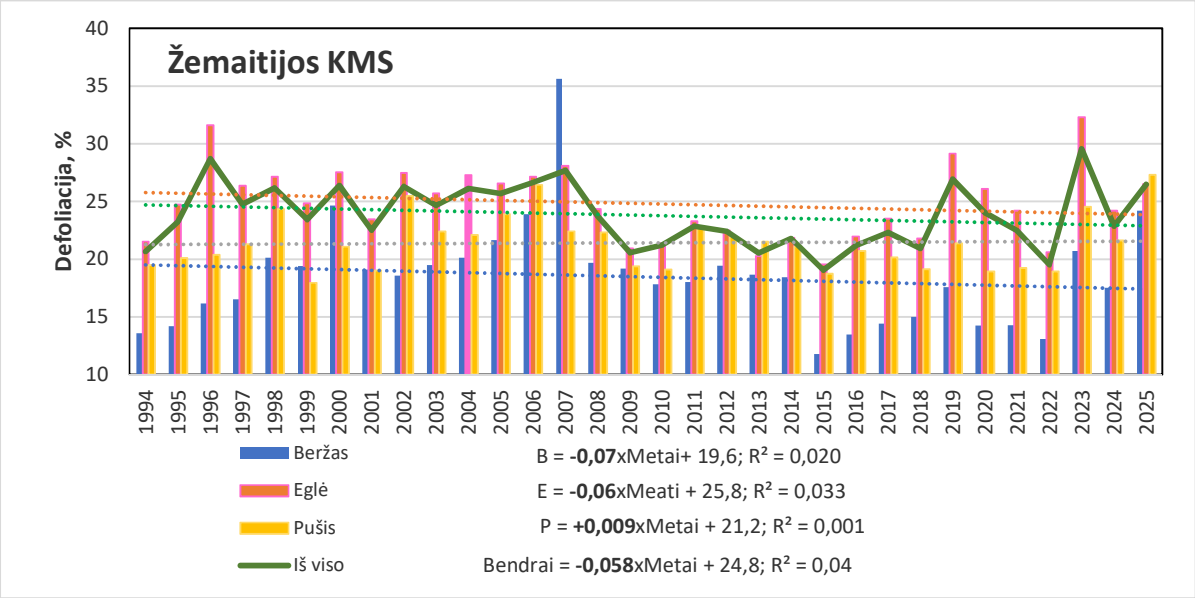
.

Žemaitijos KMS tiriamojo upelio baseino tiriamuosiuose ploteliuose augančių medžių lajų vidutinė defoliacija 1994–2025 m. tiriamuoju laikotarpiu vidutiniškai mažėjo po 0,06 % per metus. Tačiau per pastaruosius penkerius metus būklės gerėjimo intensyvumas sumažėjo, ypač eglių. Jei 2020 m. šių medžių vidutinė defoliacija per 27 metų laikotarpį mažėjo po 0,17 % per metus, tai 2025 m. mažėjimo tempas siekė tik 0,06 % per metus. Sumažėjo ir beržų būklės atsikūrimo intensyvumas – nuo vidutiniškai 0,11 % per metus (kaip ir Aukštaitijos KMS) iki 0,07 % per metus.

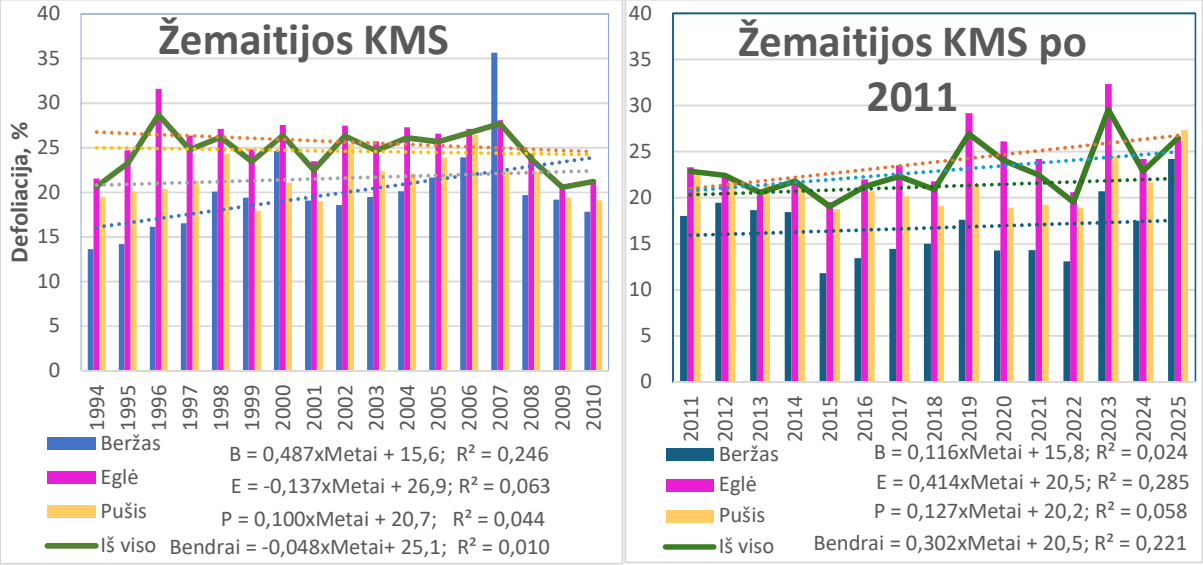
Stabiliausios būklės išliko pušys. Jų vidutinė defoliacija 2020 m. mažėjo po 0,04 % per metus, o 2025 m. jau buvo stebimas nežymus didėjimas – po 0,01 % per metus.

Žemaitijos KMS teritorijoje augančių medžių būklė kito panašiai kaip Aukštaitijos KMS medžių būklė. Per pirmąjį dvejų metų laikotarpį visų tirtų medžių vidutinė defoliacija padidėjo nuo 25 % iki 33 %. Labiausiai pablogėjo eglynų būklė – jų vidutinė defoliacija padidėjo nuo 19,7 % iki 28,7 % (1996 m.). Tai buvo blogiausia medynų būklė per pirmąjį tiriamąjį laikotarpį iki 2010 m.

2015 m. Žemaitijos KMS baseine augančių medžių lajų būklė, kaip ir Aukštaitijos KMS baseine, gerėjo. Sumažėjo beveik visų stebėtų medžių vidutinė lajų defoliacija. Didžiausias jos sumažėjimas nustatytas beržų grupėje – vidutinė defoliacija sumažėjo nuo 19,2 % iki 12,4 %. Ryškiausias pokytis nustatytas vyraujančių medynuose beržų grupėje – jų vidutinė defoliacija sumažėjo beveik du kartus, nuo 24,4 % iki 12,5 %.



2.4 pav. Žemaitijos KMS augančių vyraujančių medžių rūšių lajų defoliacijos kaita 1994-2025 m.



2.4 **pav.** Žemaitijos KMS augančių vyraujančių medžių rūšių lajų defoliacijos kaita 1994-2025 m.

Atskirais laikotarpiais tirtų medžių lajų būklė kito nevienodai. Pirmuoju laikotarpiu (iki 2010 m.) bendrą medynų būklės gerėjimą lėmė vyraujančių eglių lajų būklės gerėjimas – jų vidutinė defoliacija mažėjo po 0,13 % per metus. Tuo tarpu beržų ir pušų lajų būklė blogėjo: vidutinė defoliacija didėjo atitinkamai po 0,48 % ir 0,10 % per metus.

Antruoju tiriamuoju laikotarpiu visų tirtų medžių rūšių būklė blogėjo. Intensyviausiai blogėjo eglių būklė – jų vidutinė defoliacija didėjo po 0,41 % per metus, o beržų ir pušų – po 0,11–0,13 % per metus.

Analizuojant skirtingą socialinę padėtį medyne užimančių medžių vidutinės defoliacijos pokyčius nustatyta, kad labiausiai mažėjo viršaujančių, kiek mažiau – vyraujančių medžių vidutinė defoliacija. Tuo tarpu stelbiamų ir užstelbtų medžių lajų vidutinės defoliacijos sumažėjimas buvo statistiškai nereikšmingas ($p > 0,05$). Šie tirtų medžių lajų būklės pokyčiai lėmė vieną mažiausių vidutinės defoliacijos reikšmių per visą Žemaitijos KMS baseino stebėjimų laikotarpį – 2015 m. ji sumažėjo iki 18,9 %.

Žemaitijos KMS teritorijoje augančių medžių būklė kito panašiai kaip Aukštaitijos KMS medžių būklė. Per pirmąjį dvejų metų laikotarpį visų tirtų medžių vidutinė defoliacija padidėjo nuo 25 % iki 33 %. Labiausiai pablogėjo eglynų būklė – jų vidutinė defoliacija padidėjo nuo 19,7 % iki 28,7 % (1996 m.). Tai buvo blogiausia medynų būklė per pirmąjį tiriamąjį laikotarpį iki 2010 m.

2015 m. Žemaitijos KMS baseine augančių medžių lajų būklė, kaip ir Aukštaitijos KMS baseine, gerėjo. Sumažėjo beveik visų stebėtų medžių vidutinė lajų defoliacija. Didžiausias jos sumažėjimas nustatytas beržų grupėje – vidutinė defoliacija sumažėjo nuo 19,2 % iki 12,4 %. Ryškiausias pokytis nustatytas vyraujančių medynuose beržų grupėje – jų vidutinė defoliacija sumažėjo beveik du kartus, nuo 24,4 % iki 12,5 %.

Analizuojant skirtingą socialinę padėtį medyne užimančių medžių vidutinės defoliacijos pokyčius nustatyta, kad labiausiai mažėjo viršaujančių, kiek mažiau – vyraujančių medžių vidutinė defoliacija. Tuo tarpu stelbiamų ir užstelbtų medžių lajų vidutinės defoliacijos sumažėjimas buvo statistiškai nereikšmingas ($p > 0,05$). Šie tirtų medžių lajų būklės pokyčiai lėmė vieną mažiausių vidutinės defoliacijos reikšmių per visą Žemaitijos KMS baseino stebėjimų laikotarpį – 2015 m. ji sumažėjo iki 18,9 %.

2019 m. Žemaitijos KMS baseine augančių medžių vidutinė defoliacija padidėjo reikšmingiau negu Aukštaitijos KMS baseine. Jų vidutinė defoliacija išaugo nuo 21,2 % iki 26,8 %. Tai viena iš didžiausių vidutinės defoliacijos reikšmių šioje stotyje nuo pat tyrimų pradžios. Po sausrų 1992 ir 1994 m. stebėtų medžių vidutinė defoliacija šioje stotyje viršijo 26 % ribą. Priešingai negu Aukštaitijos KM stotyje, intensyviausiai didėjo paprastosio eglės lajų vidutinė defoliacija. 2019 m. ji išaugo nuo 22,1 % iki 28,9 %, t.y. daugiau negu 6 %. Intensyviausiai didėjo tų pačių viršaujančių ir dominuojančių medyne eglių, Jų vidutinė defoliacija padidėjo atitinkamai nuo 16,0 %iki 33,3 %ir nuo 15,2 %iki 21,3 %. Tai žievėgraužio tipografo žalos padariniai brandžiuose ir perbrendusiuose eglynuose, kuriuose šis kenkėjas dažniausiai pasirenka stambiausius, atvirai augančius paprastosios eglės egzempliorius. Pakankamai reikšmingai išaugo ir beržų lajų vidutinė defoliacija, t.y. nuo 15,4 % iki 18,1 %. Viršaujantys ir stambiausi medžiai reikšmingiausiai nukentėjo nuo sausros ir karščio bangų poveikio. Jų vidutinė defoliacija padidėjo nuo 18,3 % iki 18,3 %, t.y. 5 %.

2.3 lentelė. Žemaitijos kompleksinio monitoringo stoties teritorijose augančių įvairių išsivystymo klasių medžių vidutinė defoliacija

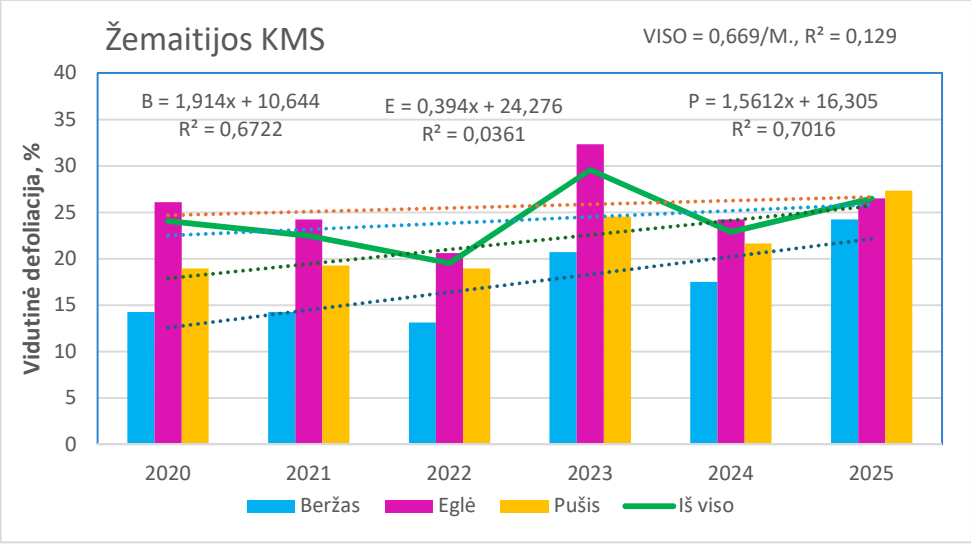
Medžio rūšis	Kr kl.	1993		1996		1999		2002		2005		2008		2011		2014		2017		2020		2025	
		F %	N vnt.	F %	N vnt.	F %	N vnt.	F %	N vnt.	F %	N vnt.	F %	N vnt.	F %	N vnt.	F %	N vnt.	F %	N vnt.	F %	N vnt.	F %	N vnt.
ACER PLA		7,5±2,5	2	10,0±0	2	10,0±0	2	7,5±2,5	2	10,0±	2	7,5±2,5	2	7,5±2,5	2	10±0.0	2	10,0±0.0	2	10,0±	2	7,5±2,5	2
BETU PEN	V	16,7±1,7	3	20,0±2,9	3	25,0±7,6	3	20,0±0,0	3	16,2±4,3	4	22,5±4,8	4	20,0±7,3	4	15,0±2,9	3	11,7±1,7	3	15,0±2,9	3	17,0±2,6	5
BETU PEN	D	12,5±1,8	14	13,6±1,0	14	13,1±1,4	13	14,6±1,5	13	23,5±6,5	13	17,0±1,5	10	14,4±1,8	9	24,4±9,5	9	13,1±1,3	8	13,1±2,0	8	20,7±6,3	14
BETU PEN	K	14,0±1,4	20	18,5±4,3	20	24,8±5,3	20	21,3±2,6	16	22,5±3,0	18	18,7±2,2	12	22,3±7,8	11	16,4±1,7	11	15,4±1,7	11	15,4±2,0	12	26,5±5,9	20
BETU PEN	U	14,2±3,0	6	16,7±2,1	6	23,0±3,4	5	22,0±3,4	5	25,0±4,5	5	47,5±3,2	2	20,0±	1	15±	1	25,0±...	1	15,0±	1	35,0±	1
BETU PEN		13,7±1,0	43	16,7±2,1	43	20,9±2,8	41	18,9±1,4	37	22,4±2,6	40	20,7±2,5	28	19,0±3,6	25	19,2±3,6	24	14,6±1,1	23	14,6±1,2	24	23,5±3,7	40
PICE ABI	V	11,9±1,0	108	19,4±2,0	108	13,1±0,8	100	14,2±1,4	99	18,5±1,5	61	18,1±1,8	55	14,6±0,9	54	18,5±2,8	54	19,0±2,9	49	28,8±4,6	46	29,1±6,0	27
PICE ABI	D	17,2±1,2	175	27,9±2,0	172	16,6±0,8	144	18,1±1,2	143	21,9±1,5	123	19,1±1,2	107	16,4±1,3	106	17,2±1,6	104	18,4±2,0	100	17,9±1,6	116	23,3±3,1	81
PICE ABI	K	23,2±1,4	126	31,2±1,9	125	26,9±1,7	116	30,5±2,2	106	26,6±1,4	111	25,0±1,5	107	23,9±1,5	105	22,6±1,5	103	24,6±1,8	97	27,3±2,4	11,3	26,0±2,5	91
PICE ABI	U	26,5±1,4	108	35,0±1,9	108	33,8±1,8	94	36,8±2,1	89	38,3±1,8	90	36,7±2,1	80	38,6±2,9	74	30,7±2,3	64	31,9±2,3	61	27,6±2,2	60	28,6±2,5	50
PICE ABI		19,5±1,9	517	28,4±1,0	513	22,0±0,7	454	24,1±0,9	441	26,6±0,8	385	24,7±0,9	349	23,3±1,0	339	21,8±1,0	325	23,1±1,1	307	24,3±1,3	335	26,0±1,6	249
PINU SYL	V	14,2±2,4	6	15,0±1,8	6	14,1±1,5	6	17,1±1,5	6	20,0±2,2	6	15,8±0,8	6	14,0±1,9	5	16,9±1,9	5	11,0±1,9	5	12,5±2,1	6	10,8±3,0	6
PINU SYL	D	18,5±2,1	61	18,8±0,8	59	16,9±1,1	56	24,0±2,3	55	22,6±1,7	53	22,3±1,4	52	22,6±2,1	51	21,3±1,3	50	20,7±1,9	50	19,5±2,1	51	24,5±2,9	49
PINU SYL	K	26,1±5,8	14	35,0±7,7	14	25,4±4,9	11	37,3±9,1	11	33,0±6,7	10	26,7±2,9	9	28,3±2,5	9	25,0±2,7	8	22,5±3,1	8	20,0±2,2	9	26,3±8,3	8
PINU SYL	U	-		-		-								±						±			
PINU SYL		19,5±1,9	81	21,4±1,6	79	17,9±1,2	73	25,3±2,3	72	23,9±1,7	69	22,3±1,2	67	22,8±1,7	65	21,1±1,1	63	20,1±1,6	63	18,9±1,6	66	23,4±2,5	63
POPU TRE	K	15,0±	1	10,0±	1	15,0±	1	15±	1	20,0±	1	25,0±	1	20±	1	25,0±.....	1	40.0±.....	1	100±	1		
QUER ROB		8,1±0,9	8	8,8±1,3	8	8,7±1,2	8	8,1±0,9	8	20,0±5,0	3	18,3±3,3	3	20,0±5,0	3	18,3±4,4	3	15,0±2,9	3	20,0±2,9	3	16,2±2,4	4
SALI CAP	U	38,0±5,1	5	29,0±1,0	5	22,0±7,2	5	20,0±16	5	23,0±1,2	5	25,0±1,6	5	20,0±2,0	4	53,7±20	4	22,5±2,5	2	20,0±5,0	2	40,0±20	2
SORB AUC	U	13,1±1,6	8	19,4±1,8	8	30,0±6,5	8	23,6±1,8	8	22,0±2,0	5	24,0±1,9	5	28,0±8,0	5	18,3±1,7	3	22,5±2,5	2	20,0±5,0	2	32,5±7,5	2
Visų rūšių	V	12,2±1,0	118	19,1±1,9	118	13,5±0,8	110	14,6±1,3	109	18,5±1,3	72	18,3±1,5	66	15,0±0,9	64	18,2±2,4	63	18,3±2,5	58	27,6±4,0	56	24,6±4,5	38
Visų rūšių	D	17,1±1,0	255	24,6±1,5	250	16,4±0,7	218	19,2±1,0	216	22,1±1,0	191	19,9±0,9	171	18,4±1,1	168	18,7±1,2	164	18,8±1,4	159	18,1±1,2	176	33,4±2,1	145
Visų rūšių	K	22,0±1,2	166	29,3±1,7	165	26,0±1,5	153	29,2±1,9	139	26,5±1,3	142	24,4±1,3	131	23,9±1,4	128	22,2±1,2	125	23,6±1,5	119	25,6±2,0	137	26,2±2,2	123
Visų rūšių	U	25,2±1,3	126	32,7±1,7	126	32,1±1,6	111	34,3±1,9	105	35,9±1,7	105	35,3±2,0	92	36,2±2,7	84	31,0±2,3	73	30,6±2,1	67	26,4±2,0	66	27,9±2,3	56
VISŲ RŪŠIŲ		18,9±0,6	665	26,4±0,9	659	21,3±0,6	592	23,6±0,8	569	24,9±0,7	506	24,0±0,7	460	22,9±0,8	444	21,8±0,8	425	22,1±0,9	403	23,0±1,0	435	25,2±1,2	362

Pastaba: - būklė blogėja; - būklė gerėja; - būklė stabili.

Atspariausios nepalankiems veiksniams Žemaitijos KMS baseine buvo paprastosios pušys. Jų vidutinė defoliacija padidėjo nuo 19,1 % iki 21,5 % , t.y. tik 2,4 %. Medžių išsivystymo laipsnis neturėjo esminės įtakos šios rūšies medžių vidutinės defoliacijos kaitai. 2019 m. visuose išsivystymo grupėse pušų vidutinė defoliacija didėjo tik po 2 % – 2,5 %. Tai gero prisitaikymo prie dabartinės aplinkos kaitos rodiklis.

2022 m. Žemaitijos KMS baseine įvyko taip pat vienas iš reikšmingiausių tirtų medžių lajų būklės pokyčių per visą tiriamąjį laikotarpį. Visų tirtų medžių lajų vidutinė defoliacija sumažėjo panašiai kaip ir Aukštaitijos KMS, t.y. vidutiniškai mažiau negu 20,0 %.

Skirtingai negu Aukštaitijos KMS, reikšmingiausiai pagerėjo eglių lajų būklė, nepaisant pakankamai intensyvaus jų pažeidimų dėl žievėgraužio tipografo veiklos, t.y. vidutiniškai nuo 28,9 % iki 24,3 %. Intensyviausiai jų tarpe gerėjo viršaujančių ir vyraujančių medynuose eglių būklė, kurių vidutinė defoliacija sumažėjo apie 5 %. Kiek silpniau gerėjo stelbiamų ir užstelbtų beržų būklė. Intensyvių lajų būklės gerėjimu pasižymėjo ir beržai. Medžių išsivystymo lygis neturėjo esminės įtakos lajos būklės pagerėjimo intensyvumui. Vienodai pagerėjo tiek viršaujančių, tirk ir stelbiamų eglių būklė, t.y. vidutiniškai apie 3% . Pušų lajų būklės pagerėjimo intensyvumas buvo silpniausias, vidutiniškai tik 2,6%. Medžių išsivystymo laipsnis taip pat neturėjo esminės įtakos šiam lajų būklės pagerėjimui. ***Reikšmingam medžių lajų būklės pagerėjimo procesui įtakos galėjo turėti taip pat ypač šilta ir besniegė žiema bei gausūs krituliai praėjusio rudens ir žiemos laikotarpiais.***



2.3 **pav.** Vyraujančių medžių rūšių būklės kaita Žemaitijos KMS (2020-2025 m.)

2020–2025 m. laikotarpiu vyko skirtingo intensyvumo medžių lajų būklės blogėjimo procesas, kuris buvo ryškesnis nei Aukštaitijos KMS baseine. Šiuo laikotarpiu labiausiai blogėjo pušų lajų būklė. Tikėtina, kad tam reikšmingos įtakos turėjo intensyvūs snieglaužos pažeidimai. Pušų vidutinė lajų defoliacija didėjo po 1,6 % per metus. Reikšmingai blogėjo ir beržų lajų būklė – jų vidutinė defoliacija didėjo po 1,9 % per metus, patvirtindama tokią pačią tendenciją, nustatytą Aukštaitijos KMS baseine.

Mažiausiu intensyvumu ir silpniausiu statistiniu reikšmingumu didėjo eglių vidutinė defoliacija – po 0,4 % per metus. Išskirtiniai eglių būklės kaitoje buvo 2023 m. Kaip ir 2022 m. Aukštaitijos KMS baseine, taip ir 2023 m. Žemaitijos KMS eglynuose buvo užregistruotas žievėgraužių protrūkis, kurio metu eglės buvo intensyviai pažeistos, o žuvusių medžių skaičius buvo vienas didžiausių per visą tiriamąjį laikotarpį.

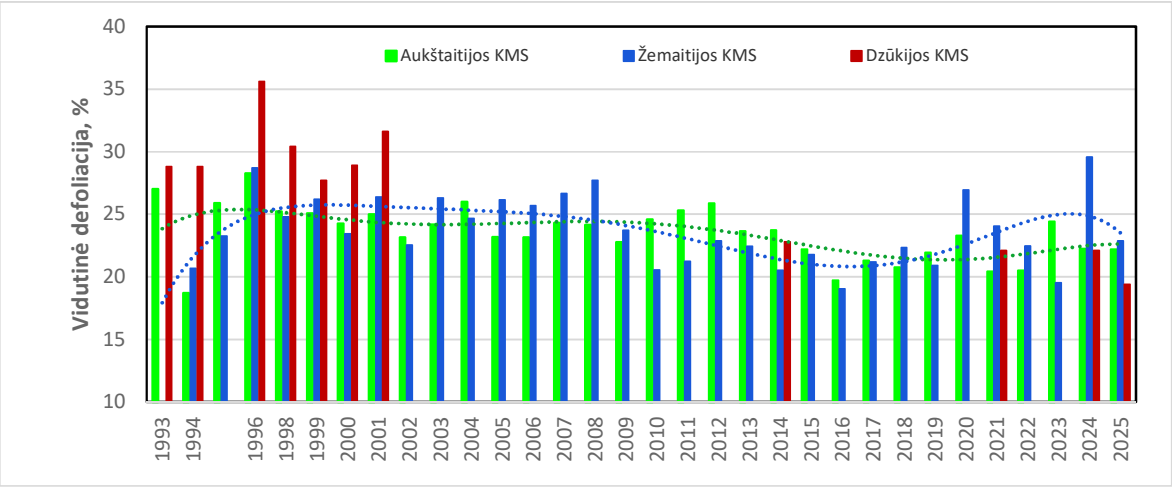
2025 m. tirtų medžių vidutinė defoliacija viršijo 25 % ribą, rodydama, kad šio regiono miškai jau priskirtini vidutiniškai pažeistiems, palyginti su silpnai pažeistais Aukštaitijos KMS baseino miškais.

Apibendrinus Žemaitijos KMS rezultataus nustatyta, kad iki 2015 m. vyravo bendras medynų būklės gerėjimas, kurį daugiausia lėmė eglių ir beržų lajų defoliacijos mažėjimas. Tuo laikotarpiu buvo užregistruota geriausia medynų būklė per visą stebėjimų laikotarpį. Nuo 2020 m. išryškėjo medžių lajų būklės blogėjimo tendencija. Labiausiai pablogėjo pušų ir beržų būklė, o eglių būklės pokyčiai buvo mažesni, nors 2023 m. eglynuose užfiksuotas žievėgraužių protrūkis. 2025 m. medynų vidutinė defoliacija viršijo 25 % ribą, rodančią, kad Žemaitijos KMS medynai iš silpnai pažeistų perėjo į vidutiniškai pažeistų medynų kategoriją. Taigi ilgalaikę medynų būklės gerėjimo tendenciją pastaraisiais metais pakeitė spartėjantis būklės blogėjimas.

2.1.4. Vyraujančių medžių rūšių būklės palyginimas tarp KM stočių

Lyginant miškų būklę tirtose KMS nustatyta, kad tyrimų pradžioje blogesne medžių lajų būkle pasižymėjo Aukštaitijos KMS augantys medžiai. Nuo 2004 m. Žemaitijos KMS augančių medžių vidutinė defoliacija pradėjo viršyti Aukštaitijos KMS medžių vidutinę defoliaciją. 2005–2007 m. šis skirtumas tapo statistiškai reikšmingas, tačiau vėlesniais metais situacija iš esmės pasikeitė. Jau 2008 m. vidutinės medžių defoliacijos skirtumai tarp stočių tapo statistiškai nereikšmingi, o 2009 m., Žemaitijos KMS medžių vidutinei defoliacijai reikšmingai sumažėjus ir tuo pačiu metu padidėjus Aukštaitijos KMS, stočių padėtis apsikeitė. 2010 m. abiejose stotyse medžių lajų būklė šiek tiek pablogėjo – vidutinė defoliacija Aukštaitijos KMS siekė 25,1 %, o Žemaitijos KMS – 21,3 %.

2009–2015 m. laikotarpiu abiejose stotyse nustatytas reikšmingas medžių lajų būklės atsikūrimas. Aukštaitijos KMS vidutinė defoliacija sumažėjo daugiau kaip 2 proc., o Žemaitijos KMS sumažėjimas siekė tik 0,8 proc. 2015 m. abiejose stotyse užregistruota viena mažiausių vidutinės medžių lajų defoliacijos reikšmių per visą stebėjimų laikotarpį – ji nesiekė 20 %,.



2.6 pav. KMS teritorijose augančių medžių būklės dinamika

2016–2020 m. laikotarpiu medžių lajų vidutinė defoliacija abiejose stotyse didėjo, tačiau Žemaitijos KMS šis procesas buvo ryškesnis. Tikėtina, kad tokius pokyčius lėmė pasikartojančios 2015–2016 m. ir 2018–2019 m. sausros. Žemaitijos KMS sausros turėjo didesnį neigiamą poveikį medžių lajų būklei, o 2017 m. gausūs krituliai nebuvo pakankami medynų būklei visiškai atsikurti. Didžiausią neigiamą poveikį tikriausiai turėjo po 2018 m. sausros netrukus sekusi dar viena sausra ir karščio bangos 2019 m., kai oro temperatūra ne kartą viršijo 30 °C.

2020–2024 m. laikotarpiu Aukštaitijos KMS medžių lajų būklė buvo statistiškai reikšmingai geresnė negu Žemaitijos KMS, nors medžių lajų būklė vėl pradėjo blogėti.

2025 m. nustatyta nors ir statistiškai nereikšminga medžių lajų būklės blogėjimo tendencija gali rodyti naujo miško ekosistemų būklės kaitos etapo pradžią.

Remiantis ilgalaikiais stebėjimais galima išskirti keturis periodiškai, maždaug kas 8–10 metų, pasikartojančius prastesnės miškų būklės etapus. Jie nustatyti apie 1996 m., apie 2006 m. (tęsėsi iki 2012 m.), apie 2020 m. (tęsėsi iki 2024 m.), kurie leidžia daryti prielaidą apie ciklišką medynų būklės kaitą, sąlygotą aplinkos veiksnių kaitos.

Išskirtinis pušų būklės kaitos bruožas nustatytas Dzūkijos KMS. Tyrimų pradžioje prasčiausia pušų būklė buvo registruota pietų Lietuvoje, tačiau paskutiniaisiais stebėjimo metais Dzūkijos KMS pušynų būklė tapo geriausia iš visų tirtų stočių. Tuo tarpu Aukštaitijos ir Žemaitijos KMS pušynų būklė pastaraisiais metais iš esmės nebesiskyrė.

2.1.5. Tirtų medžių atkritimas KM stočių baseinuose

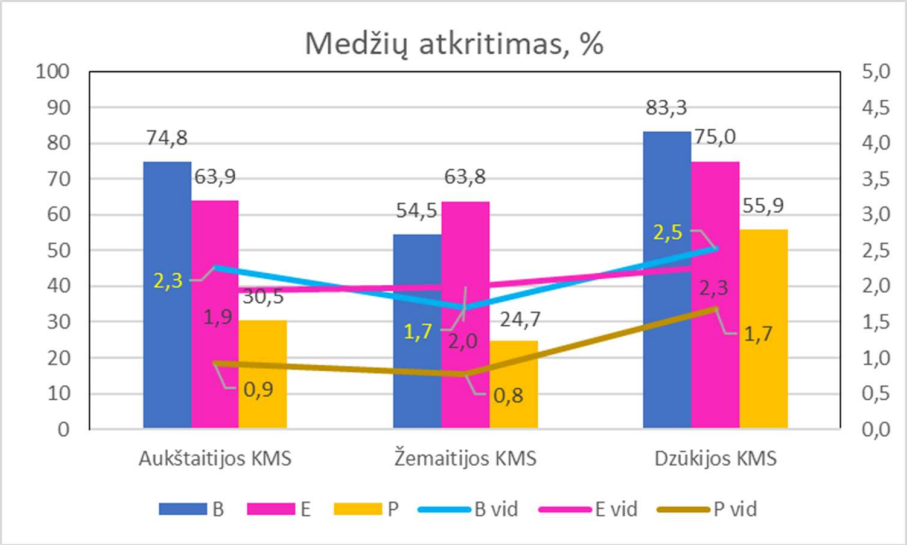
Pastarųjų dviejų dešimtmečių moksliniai tyrimai rodo, kad medžių atkritimas tampa vienu svarbiausių klimato kaitos poveikio miško ekosistemoms rodiklių. Jeigu anksčiau pagrindinis dėmesys buvo skiriamas medynų produktyvumui ir radialiajam prieaugiui, tai pastaraisiais metais vis daugiau tyrimų orientuojama į medžių mirtingumo procesus, jų priežastis bei pasekmes anglies ciklui, biologinei įvairovei ir miškų atsparumui (Allen et al., 2010; Seidl et al., 2017; Anderegg et al., 2020).

Dabartiniai tyrimai rodo, kad pagrindinės medžių atkritimo priežastys yra ne pavieniai aplinkos veiksniai, o jų kompleksinė sąveika. Ilgalaikės sausros, aukšta oro temperatūra, hidraulinės sistemos pažeidimai, anglies atsargų išsekimas, vabzdžių kenkėjų protrūkiai ir grybinių ligų plitimas sudaro tarpusavyje susijusių procesų grandinę, lemiančią spartesnį medžių žuvimą (Allen et al., 2010; Hartmann et al., 2018). Ypač pažeidžiami tampa brandūs ir perbrendę medynai, kurių gebėjimas prisitaikyti prie ekstremalių klimato sąlygų yra mažesnis.

Europos miškuose nustatyta, kad klimato šiltėjimas didina ne tik pavienių medžių mirtingumą, bet ir formuoja didelio masto medynų žuvimo židinius. Šie procesai ypač ryškūs spygliuočių medynuose, kuriuose po sausrų dažnai išplinta antriniai pažeidėjai, pirmiausia žievėgraužiai. Tuo tarpu lapuočių medžių rūšims dažniau būdingas palaipsnis prieaugio mažėjimas, ankstyvesnis lapų senėjimas ir ilgalaikis fiziologinis stresas prieš žūtį (Seidl et al., 2017; Anderegg et al., 2020). Tokie dėsningumai visiškai sutampa su šiame tyrime nustatytu didesniu beržų jautrumu karščiui ir sausrai bei padidėjusiu eglynų pažeidžiamumu dėl antrinių biotinių veiksnių.

Pastarųjų metų tyrimai pabrėžia, kad didėjantis medžių atkritimas nėra vien neigiamas reiškinys. Žuvę medžiai sudaro negyvos medienos fondą, kuris yra būtinas biologinei įvairovei palaikyti, dirvožemio formavimuisi, maisto medžiagų apytakai ir ilgalaikiam anglies kaupimui (Harmon et al., 1986; Pan et al., 2011; Lindner et al., 2024).

Medžių atkritimo dinamika, informuojanti taip pat ir apie medžio rūšies prisitaikymą prie sąlygiškai natūralių aplinksos sąlygų, rodo, kad paprastosios pušies medžių būklė išliko stabiliausią per visą tiriamąjį (32) 33 metų laikotarpį. Per šį laikotarpį dėl įvairių priežasčių Aukštaitijos KMS žuvo beveik 30%, Žemaitijos KMS 25 % ir Dzūkijos KMS 56 % šiuose stotyse stebėtų pušų. Žymiai daugiau žuvo paprastųjų eglių. Per 33 m. laikotarpį jų skaičius viršijo 63% ribą Žemaitijos KMS ir Aukštaitijos KMS baseine. Dzūkijos KMS dėl itin mažo stebėtų eglių skaičiaus, jų žuvimo intensyvumas siekė net 75 %. Pagrindinės tokio intensyvaus eglių žuvimo priežastis - brandžių ir perbrendusių eglių vėjovartų ar snieglaužų lydima eglinio žievėgraužio tipiografo invazija, ypač po sauso ir karšto pavasario.



2.7 pav. Per 32 m. laikotarpį KMS teritorijose augančių medžių atkritimo dinamika

Didžiausiu atkritimo intensyvumu pasižymėjo beržai. Žemaitijos KMS jų atkritimo intensyvumas per 32 m. laikotarpį pasiekė 55%, o Aukštaitijos KMS viršijo net 70 %. Kadangi beržai neturi tiesioginių kenkėjų iš esmės nulemiančių jų žūti, tai pagrindinėmis priežastimis sąlygojančiomis tokį aukštą beržų mirtingumą reiktų laikyti klimatines sąlygas, ir būtent sausras ir karščio bangas, prie kurių ši medžių rūšis yra prisitaikiusi blogiausiai, bei vėjalaužas ir snieglankas.

Apibendrinus gautus rezultatus būtų galima teigti, kad užregistruotus neigiamus būklės pokyčius galėjo sąlygoti nepalankios klimatinės sąlygos – sausros vegetacinio sezono viduryje, kurių pasėkoje eglynus intensyviai pažeisdavo eglinis tipografas. Reikšmingos įtakos visų medynų būklei turėjo vėjovartos, vėjalaužos ir snieglaužos - ypač Žemaitijos KMS

Pagrindine eglių žuvimo priežastis buvo eglinių tipografų pažeidimai. Paskutiniuoju laikotarpiu išskirtiniai šiuo atžvilgiu buvo 2022 m. Aukštaitijos KMS ir 2023 m. Žemaitijos KMS, kai eglių atkritimas dėl žievėgraužio siekė vienas iš didžiausių reikšmių per visą tiriamąjį laikotarpį.

2024 m. padidėjusį beržų žuvimą sąlygojo dėl užtvindymo žuvę beržai 38 tyrimo barelyje. Medžių būklės pablogėjimui 2020-2025 m. laikotarpiu išaiškinti bus atlikta detali aplinkos veiksnių kompleksiško poveikio analizė.

IŠVADOS

1. Ilgalaikiai (1993–2025 m.) tyrimai parodė, kad Lietuvos KMS miškų būklė kito ciklišk ai. Miškų būklės blogėjimo periodai kartojosi maždaug kas 8–10 metų ir buvo susiję su nepalankiomis klimato sąlygomis, vabzdžių kenkėjų protrūkiais bei ekstremaliais meteorologiniais reiškiniais.
2. Visose trijose kompleksiško monitoringo stotyse nustatyta ilgalaikė medžių lajų būklės gerėjimo tendencija, tačiau jos intensyvumas ir stabilumas skyrėsi. Didžiausias ilgalaikis vidutinės defoliacijos mažėjimas nustatytas Aukštaitijos KMS (0,12 proc. punkto per metus), silpnesnis – Žemaitijos KMS (0,06 proc. punkto per metus), o Dzūkijos KMS medynų būklė buvo labiau susijusi su atskirais intensyvių kenkėjų pažeidimų ir vėlesnio atsikūrimo etapais nei su tolygia ilgalaike kaita.
3. Aukštaitijos KMS baseine lajų būklė iš esmės gerėjo. Didžiausias lajų būklės pagerėjimas nustatytas paprastosios pušies medynuose, o beržų ir eglių būklė ryškiau gerėjo tik po 2011 metų. Tai rodo, kad medžių lajų būklę formuoja kompleksinė klimato ir biologinių veiksnių sąveika, kurios reikšmė klimato kaitos sąlygomis ateityje gali dar didėti.
4. Žemaitijos KMS medynai buvo jautriausi klimato ekstremumams ir mechaniniams pažeidimams. Pastaraisiais metais jų būklę labiausiai blogino pasikartojančios sausros, snieglaužos, vėjovartos ir eglinio žievėgraužio tipografo pažeidimai, todėl 2025 m. vidutinė medžių lajų defoliacija viršijo 25 % ribą ir rodė vidutiniškai pažeistų medynų būklę.
5. Dzūkijos KMS ryškiausias medynų būklės blogėjimas nustatytas tyrimų pradžioje dėl spyglius graužiančių kenkėjų pažeidimų pušynuose. Vėlesniu laikotarpiu pušų būklė nuosekliai gerėjo, ir paskutiniaisiais metais Dzūkijos KMS pušynai pasižymėjo geriausia būkle tarp visų tirtų stočių.
6. Paskutiniuoju laikotarpiu stebimas medžių lajų būklės blogėjimo procesas Aukštaitijos KMS ir ypač Žemaitijos KM baseine.
7. Medžių rūšių atsparumas aplinkos veiksniams buvo nevienodas. Stabiliausia būkle ir mažiausiu mirtingumu pasižymėjo paprastoji pušis, tuo tarpu didžiausias atkritimas nustatytas paprastosioms eglėms ir beržams. Eglių žūtį daugiausia lėmė žievėgraužio tipografo invazijos, kurias skatino sausros ir vėjo ar sniego pažeidimai, o beržų mirtingumą – klimato ekstremumai, pirmiausia sausros, karščio bangos bei hidrologinio režimo pokyčiai.
8. Apibendrinant galima teigti, kad didžiausiu atsparumu nepalankiems aplinkos veiksniams pasižymėjo Aukštaitijos KMS medynai, Dzūkijos KMS miškų būklę daugiausia lėmė periodiniai spyglius graužiančių kenkėjų pažeidimai, o Žemaitijos KMS medynai buvo jautriausi pastarųjų metų gamtiniams ir biotiniams stresoriams. Todėl 2025 m. geriausia medynų būklė buvo nustatyta Dzūkijos ir Aukštaitijos KMS, o prasčiausia – Žemaitijos KMS.

9. Skirtingos Lietuvos miškų ekosistemos į tuos pačius klimato ekstremumus reagavo nevienodai, o jų jautrumą labiausiai lėmė vyraujanti medžių rūšinė sudėtis, vietos augavietės sąlygos ir antrinių biotinių pažeidimų išplitimas.

Galimos miškų būklės kaitos grėsmės

Didžiausią grėsmę Lietuvos miškams ateityje gali kelti ne pavieniai klimato ekstremumai, bet pasikartojančių sausrų, karščio bangų, audrų ir antrinių biotinių pažeidimų kompleksinis poveikis, mažinantis medynų atsparumą ir spartinantis jų būklės blogėjimą..

Dažnėjančios ir intensyvėjančios vasaros sausros bei karščio bangos silpnins medžių gyvybingumą, mažins jų atsparumą aplinkos stresui ir didins lajų pažeidimus. Tyrimo rezultatai rodo, kad neigiamas sausrų poveikis dažnai pasireiškia ne iš karto, o po vienų ar kelių metų, ypač kai sausringi laikotarpiai kartojasi.

Intensyvios klimato kaitos sąlygomis gali didėti antrinių biotinių pažeidimų rizika. Nusilpę medžiai tampa jautresni vabzdžių kenkėjų, ypač eglinio žievėgraužio tipografo, pažeidimams, kurie gali lemti spartų brandžių eglynų nykimą.

Prognozuojamas ekstremalių meteorologinių reiškinių – audrų, stiprių vėjų, šlapio sniego ir kitų reiškinių – dažnėjimas gali didinti vėjovartų, vėjalaužų ir snieglaužų mastą. Tokie pažeidimai ne tik tiesiogiai blogina medynų būklę, bet ir sudaro palankias sąlygas antrinių kenkėjų plitimui.

Skirtingos medžių rūšys nevienodai reaguoja į klimato ekstremumus. Beržai ir eglės pasirodė jautresni ilgalaikiam nepalankių aplinkos veiksnių poveikiui negu paprastoji pušis, todėl klimato kaitos sąlygomis gali keistis medynų rūšinė sudėtis ir atskirų medžių rūšių konkurencingumas.

Todėl ilgalaikis kompleksiškas miškų monitoringas išlieka viena svarbiausių priemonių anksti nustatyti miškų būklės pokyčius, įvertinti kompleksinį klimato ir biologinių veiksnių poveikį bei pagrįsti prisitaikymo prie klimato kaitos priemones.

Miškų būklės prognozės

Ilgalaikiai 1993–2025 m. stebėjimų duomenys leidžia manyti, kad artimiausiais dešimtmečiais Lietuvos miškų būklę vis labiau lems klimato ekstremumų dažnis ir intensyvumas bei jų sąveika su biotiniais aplinkos veiksniais. Tikėtina, kad medžių lajų būklės kaita ir toliau išliks cikliška, tačiau nepalankių laikotarpių trukmė ir intensyvumas gali didėti.

Didžiausias neigiamas poveikis prognozuojamas eglynams, kurių pažeidžiamumą didins pasikartojančios sausros, vėjovartos, snieglaužos ir su jomis susiję eglinio žievėgraužio tipografo protrūkiai. Beržynų būklė taip pat gali blogėti dėl didėjančio jautrumo sausroms ir karščio bangoms. Tuo tarpu paprastoji pušis, remiantis ilgalaikiais stebėjimais, turėtų išlikti viena atspariausių pagrindinių medžių rūšių, nors ir jos būklė gali blogėti ilgai trunkančių ar pasikartojančių ekstremalių klimato reiškinių laikotarpiais.

Skirtingų Lietuvos regionų medynų reakcija į klimato kaitą ir toliau išliks nevienoda. Didesnis pažeidžiamumas gali išlikti Žemaitijos KMS medynuose, kuriuose pastaraisiais metais nustatytas spartesnis būklės blogėjimas, o Aukštaitijos KMS medynai, remiantis ilgalaikiais stebėjimais, gali išlikti stabilesni. Dzūkijos KMS miškų būklę ir toliau daugiausia lems spyglius graužiančių vabzdžių populiacijų dinamika ir pušynų atsparumas klimato ekstremumams.

Atsižvelgiant į tyrimų rezultatus, galima teigti, kad medžių atkritimo intensyvumas ateityje taps vienu svarbiausių miškų būklės, produktyvumo ir klimato kaitos poveikio rodiklių. Todėl ilgalaikis medžių mirtingumo, negyvos medienos kiekio ir jos destrukcijos greičio monitoringas turėtų tapti neatsiejama nacionalinės miškų stebėsenos ir anglies apskaitos sistemos dalimi.

2.2. Medžių lapijos indekso tyrimai KM stočių baseino teritorijose

FAR matavimas yra sumedėjusios augalijos produktyvumo ir jos funkcijų interpretavimo pagrindas. Pagal sugertą FAR kiekį po augalijos danga nustatomas lapijos paviršiaus ploto indeksas – augalijos dangos būklės indikatorius. Šį rodiklį papildžius medžių dendrometrinėmis charakteristikomis, kurios yra nustatomos vykdant biomasės ir bioelementų paprogramę bei medžių būklės duomenimis, kurie yra gaunami vykdant miško pažeidimų paprogramę atsirastų galimybė vertinti miško ekosistemų tvarumą globalių pokyčių sąlygomis.

Fotosintetiškai aktyvi saulės spinduliuotė – tai saulės spinduliuotės dalis, kurių bangų ilgis kinta nuo 300 iki 750 nm ir atitinkamomis sąlygomis sukelianti augalų fotosintezę. Tačiau dažniausiai tiriant FAS po augalijos danga kalbama apie saulės spinduliuotės spektrinę dalį nuo 400 iki 700 nm. Tai vienas pagrindinių ekologinių veiksnių nulemiančių produkcinio proceso vyksmą ir bioklimatinių sąlygų formavimąsi miškų ekosistemose. Kaip buvo jau minėta I skyriuje, ši Saulės spinduliuotės dalis turi reikšmingiausią tendenciją didėti pastarųjų 27 metų laikotarpi.

Iš kitos pusės šviesos FAS intensyvumą po medyno danga lemia medyno fitoelemntų, kurių didžiąją dalį sudaro asimiliaciniai organai, kiekis ir erdvinis pasiskirstymas. Tokiu būdu FAS medyne tam tikru laipsniu atspindi ne tik medyno biomasę, jo produktyvumą, bet ir būklę (Stakėnas, 2003). Todėl FAS tyrimai Kompleksiško monitoringo stotyse, kuriuose pagrindiniu mokslinių tyrimų tikslu reiktų laikyti pagrindinių bioelementų balanso tyrimus, turėtų tapti perspektyvia ateities tyrimų kryptimi.

Pagrindinis darbo tikslas – nustatyti medynų sugertos FAS dalį ir pagal ją įvertinti augalų lapijos paviršiaus ploto indeksą. Gautus duomenis naudoti medynų biomasės bei būklės tyrimuose.

Lapų ploto indeksą (LPI, angl. *Leaf Area Index*, LAI), apibrėžiamą kaip vienpusio žaliojo lapų paviršiaus plotą, tenkantį vienetiniam dirvožemio paviršiaus plotui ($m^2\ m^{-2}$), pirmasis pasiūlė Watson (1947). Šis rodiklis iš pradžių buvo taikomas žemės ūkio augalų produktyvumui vertinti, tačiau vėliau tapo vienu svarbiausių miško ekosistemų struktūrą ir funkcionavimą apibūdinančių biofizikinių parametrų. Šiuo metu LPI plačiai naudojamas miškų ekologijos, miškininkystės, hidrologijos, klimatologijos ir anglies ciklo tyrimuose.

Vienas pirmųjų autorių, pabrėžusių lapų ploto reikšmę miško produktyvumui, buvo Waring ir Schlesinger (1985). Jie parodė, kad medynų produktyvumą daugiausia lemia ne tik medžių rūšinė sudėtis ar amžius, bet ir bendras fotosintetiškai aktyvios lapijos kiekis. Vėlesniuose darbuose Waring (1983; 1998) pabrėžė, kad lapų ploto indeksas yra vienas svarbiausių rodiklių, siejančių medyno struktūrą su fotosinteze, vandens naudojimo efektyvumu ir anglies kaupimu.

Bréda (2003), apibendrindamas iki tol sukauptą patirtį, nurodė, kad LPI yra vienas svarbiausių miško lajų struktūrą apibūdinančių rodiklių, reguliuojančių saulės spinduliuotės perėmimą, fotosintezę, transpiraciją, kritulių sulaikymą bei mikroklimato formavimąsi. Kadangi lapija sudaro pagrindinį fotosintetiškai aktyvų medžių paviršių, lapų ploto indeksas glaudžiai susijęs su medynų produktyvumu, biomasės prieaugiu, anglies sekvestracija bei maisto medžiagų apytaka.

Gower, Kucharik ir Norman (1999) parodė, kad LPI yra vienas patikimiausių rodiklių, leidžiančių palyginti skirtingų medynų produktyvumą bei jų reakciją į aplinkos sąlygas. Šie autoriai pabrėžė, kad LPI tapo universaliu kintamuoju miško ekosistemų procesuose, nes tiesiogiai sieja medyno struktūrą su anglies ir vandens apykaita.

Parker (2020), apžvelgdamas daugiau kaip septynis dešimtmečius trukusius tyrimus, pažymėjo, kad lapų ploto indeksas yra ne tik daugelio ekologinių procesų pasekmė, bet ir vienas pagrindinių veiksnių, lemiančių miško ekosistemų funkcionavimą. LPI pokyčiai atspindi medynų augimą, jų reakciją į klimato svyravimus bei antropogeninius poveikius ir kartu reguliuoja energijos balansą, anglies dioksido asimiliaciją, vandens apykaitą ir bendrą ekosistemų produktyvumą. Dėl šios priežasties LPI tapo vienu pagrindinių rodiklių miško augimo, hidrologiniuose bei klimato modeliuose.

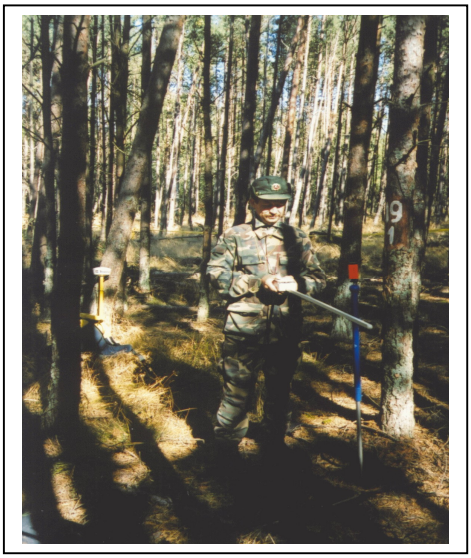
Miškininkystėje LPI plačiai taikomas vertinant medynų tankumą, lajų susivėrimą, augavietės produktyvumą ir ugdomųjų priemonių efektyvumą. Long ir Smith (1984) bei Waring (1991) parodė, kad tarp lapų ploto ir medyno tūrio prieaugio egzistuoja glaudus ryšys, todėl LPI gali būti naudojamas optimaliam medyno tankumui bei ugdymo intensyvumui nustatyti. Tačiau autoriai taip pat pažymėjo, kad didžiausias lapų ploto indeksas ne visada reiškia didžiausią produktyvumą, nes pernelyg tankiose lajose didėja savitarpio užtemdymas ir mažėja fotosintezės efektyvumas.

Pastaraisiais dešimtmečiais vis daugiau dėmesio skiriama lapų ploto indeksui kaip miškų būklės rodikliui. Bréda (2003) bei Peñuelas ir Filella (2001) nurodo, kad LPI jautriai reaguoja į įvairius aplinkos stresorius – sausras, karščio bangas, oro taršą, maisto medžiagų trūkumą, vabzdžių kenkėjų protrūkius ir ligas. Ilgalaikiai LPI pokyčiai leidžia vertinti medynų atsparumą, jų atsikūrimą po pažeidimų bei prisitaikymą prie klimato kaitos.

Didėjant nuotolinių tyrimų reikšmei, LPI tapo vienu svarbiausių rodiklių regioniniu ir globaliu mastu vertinant miškų būklę. Zheng ir Moskal (2009) apibendrino pagrindinius palydovinių, aerofotografinių, lazerinio skenavimo ir optinių metodų taikymo principus, o Fang ir bendraautoriai (2019) įvertino šių metodų tikslumą bei apribojimus. Naujausioje apžvalgoje Mthembu ir bendraautoriai (2023) parodė, kad dirbtinio intelekto metodai, bepiločiai orlaiviai ir didelės skiriamosios gebos palydoviniai duomenys leidžia vis tiksliau nustatyti LPI bei stebėti jo kaitą.

Nepaisant plataus taikymo, tikslus lapų ploto indekso nustatymas išlieka sudėtingas dėl lajų susitelkimo, šakų ir kamienų įtakos optiniams matavimams, rūšinių skirtumų bei sezoninės lapijos dinamikos (Bréda, 2003; Fang ir kt., 2019). Todėl patikimam LPI įvertinimui būtina taikyti tinkamai kalibruotus matavimo metodus ir atsižvelgti į medynų struktūrinius ypatumus.

Apibendrinant galima teigti, kad lapų ploto indeksas šiandien laikomas vienu svarbiausių integraliųjų miško ekosistemų rodiklių. Jis apibūdina medynų struktūrą, produktyvumą, fiziologinę būklę, anglies kaupimo potencialą, vandens naudojimo efektyvumą bei atsparumą aplinkos pokyčiams. Dėl glaudaus ryšio su pagrindiniais miško ekosistemų procesais LPI tapo nepakeičiamu rodikliu tiek fundamentiniuose miškų ekologijos tyrimuose, tiek ilgalaikiame miškų monitoringe ir tvaraus miškų valdymo praktikoje.



Darbo metodika

FAS matavimai atlikti JAV gamybos septometro (SUNFLECK PAR Septometer) SF-80 modeliu. Šio prietaiso 80 tarpusavyje nepriklausomų daviklių išdėstytų 1 m ilgio specialioje liniuotėje, kiekvieno matavimo metu duoda vidutinę 80 taškų FAS reikšmę, išreikštą μmol į kvadratinį metrą per sekundę (μmol/m^2).

Kiekviename tyrimo plotelyje FAS buvo matuota 7 taškuose, centre bei 7 m atstumu nuo centro kas 60° pradedant nuo Šiaurės krypties. Taip pat šiuo prietaisu kiekvieną kartą prieš pradedant matavimus tyrimo plotelyje buvo matuojamas atviros vietos FAS bei aukštimačių nustatomas saulės aukštis (kampas) bei pažymimas tikslus laikas.

Lapijos paviršiaus ploto indeksas paskaičiuotas pagal šią formulę (Norman, Jarvis, 1974):

$$L = \frac{\left[\left(1-\frac{1}{2k}\right)fb-1\right]\ln\tau}{A(1-0{,}47\,fb)},$$

Čia: k – medyno ekstinkcijos koeficientas;
Fb – tiesioginių saulės spindulių dalis bendrame FAR sraute;
A - lapijos absorbcijos koeficientas;
τ - FAR praleidimo po lajomis koeficientas.

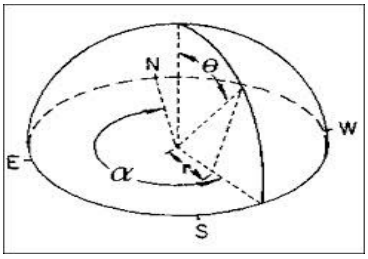
Ekstinkcijos koeficientas skaičiuojamas pagal šią formulę (Campbell, 1986):

$$k = \frac{1}{2COS\theta}$$

Čia: θ - saulės zenito kampas ir kuris nustatomas taip: θ = 90 - α, kur α - saulės aukštis (kampas);
Koeficientas A, remiantis literatūros duomenimis prilygintas 0,86.

Sugedus jau pasenusiam SUNFLECK prietaisui LAI nustatymui pradėtas naudoti naujas tokio tipo prietaisas bei papildomai hemisferinio fotoaparatas. KMS baseino tyrimo ploteliuose HemiView sistemos pagalba buvo nufotografuotos medžių lajos lapijos indeksui nustatyti.

Medžių lajų vertinimas ir LAI indekso nustatymas medyne atliktas specializuotu skaitmeniniu fotoaparatu Coolpix 8400+FC su įmontuotu hemisferiniu lešiu, dažnai dar vadinamu „žuvies akimi“ (*angl. Fish-eyes*). Šiuolaikiniuose prietaisuose naudojamas hemisferinis lęšis leidžia užfiksuoti vaizdą 180 ° kampu, o visos vaizdo pozicijos yra nukreiptos dangaus kryptimi, kuri išreiškiama zenito bei azimuto kampais. Kiekviena padėtis hemisferinėse nuotraukose yra nusakoma kryptimi, kurios atskaitos taškas yra vietovė iš kurios buvo fotografuojama, o pozicija atitinka zenito ir azimuto kampų koordinates hemisferinių koordinačių sistemoje. Taigi hemisferinėse nuotraukose naudojamas objektų aukštis yra išskaičiuojams, pasitelkiant turimus kampus, o išskirtinais atvejais norint atlikti skaičiavimus, išmetant tam tikrą kraštovaizdžio elementą (medžio stiebą), tai galima atlikti tik įvedus tam tikrus to elemento duomenis (stiebo aukštį) (Delta-T devices Ltd., Cambridge, UK).



Hemisferinio lešio vaizdo projekcija

Lauko tyrimų metu, skaitmeninis fotoaparatas su hemisferiniu lęšiu buvo sumontuotas ant trikojo stovo, kurio aukštis lygus 1 metrui. Tvirtai pastatomas stovas kiekvienoje aikštelėje buvo gulščiuojamas pagal gamintojų rekomendacijas, siekiant išlaikyti tinkamą ekspoziciją bei apertūrą. Kiekvieną kartą prieš atliekant fotogrtafavimą kamera buvo orentuojama megnetine šiaurės kryptimi. (Delta-T Devices Ltd., Cambridge, UK). Siekiant užtikrinti aukštą nuotraukų skiriamąją gebą bei išvengti metodinių nuokrypių, fotografavimas vykdytas apsiniaukusią dieną.

2.8 pav. Skaitmeninis fotoaparatas su hemisferiniu lęšiu, sumontuotu ant trikojo stovo 1 m aukštyje

Visi duomenys išanalizuoti pasitelkus specializuotą HemiView programinę įrangą, kurios techninės galimybės yra gerokai platesnės, lyginant su prieš tai naudotu prototipu „Hemisp“ programa. HemiView programinė įranga per santykinai trumpą laiką leidžia apdoroti didelį kiekį

įvairaus formato failų, greitai ir tiksliai atlikti skaičiavimus. Išskiria ir surušiuoja aikštelių specifinius bei prietaisų techninius duomenis, juos paverčia indeksiniais rodikliais, kuriuos galima išsaugoti ir kaupti *exel* formato failuose su galimybe bet kada juos koreguoti bei papildyti (Delta-T Devices Ltd., Cambridge, UK). Tyrimai apima ir kai kuriuos pagalbinius indikatorius, tokius kaip procentinis lajos atvirumas(VisSky), netiesioginė saulės spinduliuotės kiekis (ISF), tiesioginės saulės spinduliuotės kiekis (DSF), globaliosios saulės spinduliuotės kiekis (GSF) difuzinės saulės spinduliuotės kiekis virš lajos (DifAb), difuzinės saulės spinduliuotės kiekis po laja (DifBe), tiesioginės saulės spinduliuotės kiekis virš lajos DirAb, tiesioginės saulės spinduliuotės kiekis žemiau lajos (DirBe), bendros saulės spinduliuotės kiekis virš lajos (TotAB), bendros saulės spinduliuotės kiekis žemiau lajos (TotBe), elipsoidinis lapų kampinio išsidėstymo kriterijus (ELADP), vidutis lapų pokrypio kampas (MLA) (Anderson, 1964; Webb, 1999).

2.2.1. Medžių lapijos indeksas Aukštaitijos KMS baseine

Fotosintetiškai aktyvios saulės spinduliuotės matavimų rezultatai ir jų kaita per 18 metų laikotarpį pateikti 2.3 lentelėje. Tyrimų rezultatai rodo, kad paskutiniaisiais metais Fotosintetiškai aktyvios spinduliuotės intensyvumas turi tendencija didėti. Mažiausia šio parametro reikšmė buvo registruojama 2006 m. Atvirkščiai proporcingai šiems parametrams kito lapijos indeksas, kurio didžiausia reikšmė buvo nustatyta būtent 2006 m., o po šių metų medžių lajų lapijos indeksas mažėja. 2012 m. nustatytas ženklus lapijos indekso padidėjimas. Tai gerėjančios medžių lajų būklės rezultatas. Išaiškinta FAR spinduliuotės po medžių lajomis ir LAI indekso kaita pakankamai gerai sutampa su medžių lajų vidutinės defoliacijos kaita. Vidutinės defoliacijos reikšmė mažiausia buvo 2004 m., o nuo šių metų iki 2010 m. turėjo tendenciją didėti. 2012 m. medžių lajų defoliacija sumažėjo, ką ir patvirtino padidėjęs lapijos indeksas.

2013 m LAI toliau didėjo ir pasiekė 3,8 m^2/m^2 reikšmę, o 2014 m. LAI vidutinė reikšmė padidėjo net iki 4,2 m^2/m^2 . Tai viena didžiausių LAI reikšmių nustatytų Aukštaitijos KMS baseine per visą tiriamąjį laikotarpį. Didėjanti medžių lajų LAI gerai indikuoja gerėjančią medžių lajų būklę ir didėjantį prieaugį, ką patvirtina ir detalūs lajų būklės ir kamieno skersmens tyrimo rezultatai.

2015 m. nustatytas nors ir neženklus vidutinės lapijos indekso reikšmės sumažėjimas. 2020 m. FAR matavimai po augalijos danga nebuvo vykdomi dėl aparato techninio susidevėjimo. Tęsiant šiuos tyrimus būtinas naujo FAR/LAI matuoklio įsigijimas, todėl remonenduojama kas 5 m. vykdyti lajų fotografavimą hemisferiniu fotoaparatu. Tik tokiu būdu būtų galima užtikrinti gautų rezultatų kokybę ir visišką patikimumą.

2021 ir 2024 m tyrimų rezultatai parodė, kad Aukštaitijos KMS augančių medžių LAI mažėja, kas paaiškina ir vidutinės defoliacijos padidėjimą. Jei dar 2012 ir 2015 metais LAI viršijo 3 m^2/m^2, tai paskutiniaisiais metais jis nesiekia 3 m^2/m^2, o jau 2024 m. sumažėjo net iki 2 m^2/m^2. Tai prastėjančios miškų būklės rodiklis, ką patvirtina ir gauti medžių lajų visutinės defoliacijos kaitos rezultatai.

2.2.2. Medžių lapijos indeksas Žemaitijos KMS baseine

Žemaitijos KMS baseine medžių LAI tyrimai atlikti 33 tyrimo ploteliuose. Likusiuose ploteliuose, dėl suardytos medyno struktūros vykdyti LAI matavimus netikslinga.

2.4 lentelė. FAR pagrindinių komponentų ir galutinio LAI reikšmių palyginimas.

Metai	KMS	Vid	Max	Min	Std dev.	Glaudumas	Struktūra	FAR_kof	LAI
2003	LT-01	65	159	15	55	35,9	19,9	0,062	3,72
2004	LT-01	56	105	24	30	6,3	5,5	0,24	1,88
2005	LT-01	90	220	27	71	15,8	12,4	0,16	3,43
2006	LT-01	105	253	29	84	18,2	13,8	0,11	4,22
2007	LT-01	76	136	39	36	7,1	3,9	0,20	2,20
2008	LT-01	111	287	26	99	12,7	13,2	0,14	3,59
2009	LT-01	107	263	34	86	9,0	9,4	0,21	2,98
2010	LT-01	102	218	42	64	7,7	6,3	0,21	2,92
2011	LT-01	90	167	44	46	5,4	5,1	0,27	2,53
2012	LT-01	134	336	40	112	12,6	8,7	0,14	3,68
2013	LT-01	-	-	-	-	-	-	-	3,80
2014	LT-01	-	-	-	-	-	-	-	4,20
2015	LT-01	161	415	42	138	26	10	0.16	3,14
2020*	LT-01								1,959
2021	LT-01	177	449	44.8	154.2	15.3	14.0	0.15	2.73
2024	LT-01	95	152	54.7	35.4	8.5	3.8	0.30	2.09
2003	LT-03	168	346	57	108	11,2	9,3	0,17	2,49
2004	LT-03	76	125	44	29	4,4	4,8	0,29	1,58
2005	LT-03	122	291	45	91,0	8,3	11,3	0,25	2,89
2006	LT-03	95	150	54	34,5	5,5	3,4	0,27	2,62
2007	LT-03	106	205	51	56,1	6,7	4,4	0,25	2,19
2008	LT-03	143	393	27	140,1	21,6	17,1	0,13	4,45
2009	LT-03	83	216	27	67,4	14,4	11,8	0,18	3,82
2010	LT-03	86	191	31	58,5	9,2	6,3	0,33	2,51
2011	LT-03	147	314	42	100,6	8,9	8,8	0,22	2,90
2012	LT-03	86	232	19	81,2	26,5	14,3	0,11	4,90
2013	LT-03	101	267	21	93.0	18.0	17.3	0.19	3,05
2015	LT-03								2,72
2020*	LT-03								1,803
2021		161	404	48.9	133.2	9.2	14.7	0.18	2.30
2024		131	241	64.2	62.8	4.0	5.9	0.37	1.354
	LT-02								
2025									1,231

Pastaba: LAI nustatytas hemisferiniu foroaparatu, todėl duomenys nelygintini bendrame kontekste

2009-2012 m. laikotarpiu Žemaitijos KMS, kaip ir Aukštaitijos KMS baseine augančių medžių lapijos indeksas, nustatytas pagal sugertos FAR spinduliuotės kiekį, mažėjo ir tik 2012 metais vėl padidėjo abiejose stotyse.

2012-2013 m. tyrimu rezultatai rodo vieną didžiausių LAI verčių per visą tiriamąjį laikotarpį Žemaitijos KMS baseine. LAI šiais metais viršijo 3 m^2/m^2. Paskutiniųjų apskaitų duomenys rodo priešingą rezultatą. Medžių LAI reikšmingai mažėja ir ypač 2024 m., kai LAI vertė nesiekė net 1,5 m^2/m^2. Tai patvirtina ir vidutinės defoliacijos kaitos tendencijas, kad vyraujantys šiame baseine medžiai yra jau vidutiniškai pažeiti. Jų vidutinė defoliacija viršijo 25 proc.

Toks paskutiniųjų metų registruojamas LAI reikšmės sumažėjimas ir Aukštaitijos ir Žemaitijos KMS baseinuose, gali būti siejamas su medžių tankumo mažėjimu (defoliacijos padidėjimu) ir intensyviu medžių atkritumu dėl žievėgraužio tipografo žalos 2022 ir 2023 metais.

2014 m. paaiškėjo, kad Žemaitijos KMS baseine augančių medžių LAI nežymiai mažėja, ką rodo ir vidutinės defoliacijos kaita. 2015 m. registruojamas tolesnis šio proceso vyksmas. Lapijos indeksas sumažėjo iki 2,72 m2/m2. Tai gali būti dėl žievėgraužio poveikio žuvusių eglių rezultatas.

Palyginus gautus indeksus tarp stočių, nustatyta, kad Žemaitijos KMS baseine augančių medžių lapijos indeksas didesnis negu Aukštaitijos KMS, ką patvirtina ir medžių lajų defoliacijos duomenys. Paskutiniaisiais metais, kada lapijos indeksas Žemaitijos KMS pradėjo viršyti lapijos indeksą medžių augančių Aukštaitijos KMS, jų lajų būklė taip pat tapo geresnė. 2013 m. LAI nežymiai padidėjo Aukštaitijos KMS. 2014 m. Aukštaitijos KMS registruojamas tolesnis LAI didėjimas, kai tuo tarpu Žemaitijos KMS LAI sumažėjo. 2015 m. registruojamas vidutinės lapijos indekso reikšmės sumažėjimas ir Aukštaitijos ir Žemaitijos KMS baseinuose, kuris gali būti siejamas su medžių tankumo mažėjimu, t.y. intensyvesniu eglių žuvimu dėl eglinio tipografo daromos žalos, kuri Žemaitijos KMS baseine yra didesnė negu Aukštaitijos KMS.

2003-2014 m duomenys, LAI nustatimui tyrimo ploteliuose naudojant fotoaktyvios saulės spinduliuotės intensyvumą, rodo nežymų LAI augimą,m ką patvirtina LAI duomenys nustatyti hemisferinio foro aparatu 2010 ir 2020 m.

2015 m. nustatytas nors ir neženklus vidutinės lapijos indekso reikšmės sumažėjimas. Tai gali būti siejamas ir su metodikos kaita. Tęsiant šiuos tyrimus įsigytas naujas FAR/LAI matuoklis, o kas 5 m. atliekamas lajų fotografavimas hemisferiniu fotoaparatu, medyno struktūrai registruoti.

2021-2024 m. Aukštaitijos KMS baseine augančių miškų LAI indeksas yra didesnis negu Žemaitijos KMS, ką patvirtina ir vidutinės defoliacijos kaitą tais metais. Tokiu būdu LAI nustatytas FAR spinduliuotės matuokliu gerai atspindi bendrą miškų būklę KMS baseinuose.

2.2.3. Medžių LAI, nustatytų hemisferiniu fotoaparatu, pokyčių analizė

2020 m. buvo atliktas antras, o 2025 jau trečias Aukštaitijos KMS medynų fotografavimas hemisferinio fotoaparatu, kas įgalino vertinti ne tik medyno struktūros pokyčius, bet ir bendro augalijos indekso (LAI) kaitą lyginant su 2010 m. Trečią kartą fotografavimas atliktas ir Žemaitijos KMS bei pirmą kartą Dzūkijos KMS baseine.

Hemisferiniu fotoaparatu nustatytų LAI reikšmių analizė parodė (2.4 lentelė), kad per visą tiriamąjį laikotarpį miškų būklė turėtų gerėti, kadangi jų lapijos plotas didėja, kas didina jų bendrą produktyvumą ir biomasę. Gauti rezultatai kiek tai prieštarauja nustatytai vidutinės defoliacijos kaita, tačiau reikia pažymėti, kad šiuo atveju didelį poveikį LAI nustatyti turi kylantis pomiškis, kuris padidina LAI net ir medynuose, kurie yra jau keletą metų žuvę dėl kenkėjų daromos žalos.

Palyginus KMS baseine augančių medžių vidutinį LAI indeksą, matyti, kad tankiausia miško danga pasižymi Aukštaitijos KMS, kur LAI siekia 2 m^2/m^2, kiek mažesnis LAI Žemaitijos KMS – 1,9 m^2/m^2 ir mažiausias Dzūkijos KMS LAI – 1,2. Tokia LAI kaita turi gerai atsispindėti šių KMS baseine augančių miškų biomasės kaitoje, kuri bus analizuojama kitame skyriuje.

Pateikti LAI nustatyti hemisferinio fotoaparatu 2010-2025 m. taip pat įrodo, kad medynų būklė KM stočių baseinų teritorijose gerėja, nors ne visuose tyrimo ploteliuose. Ten kur buvo registruoti kenkėjų židiniai ar intensyvios vėjalaužos ar snieglaužos, medynų vidutinis LAI indeksas mažėjo. Medynuose kurie nepatyrė tokio poveikio, medžių LAI turėjo tendenciją didėti, taip pagrįsdami išvadą, gautą nagrinėjant LAI nustatytą matuojant foto aktyvios saulės spinduliuotės intensyvumą tyrimo ploteliuose.

Apibendrinti LAI rezultatai nustatyti hemisferiniu fotoaparatu nerodo esminių medynų pokyčių, dėl intensyvaus miško atžėlimo pažeistuose plotuose. 2010-2025 m. laikotarpiu LAI abiejose stotyse pasidėjo nereikšmingai, vos po 0,008 m^2/m^2.

2.5 lentelė. LAI reikšmės Aukštaitijos ir Žemaitijos KMS 2011-2025 m.

Nr.	Aukštaitijos KMS				Žemaitijos KMS				Dzūkijos KMS	
	2011	2020	2025	Pokytis	2011	2020	2025	Pokytis	Nr.	2025
1	1,535	1,514	1,37	-0,011					1	1,428
2	2,249	1,53	1,581	-0,052	1,915	2,237	2,805	0,060	2	1,444
3	2,229	2,002	1,252	-0,065	1,958	1,7	1,73	-0,018	3	1,224
4	1,536	1,758	1,796	0,019	2,013	2,267	2,34	0,024	4	1,778
5	1,584	1,018	0,835	-0,055	1,513	1,747	1,341	-0,008	5	1,081
6	1,669	1,733	1,546	-0,007	1,99	2,01	2,038	0,003	6	1,126
7	2,138	2,104	1,785	-0,023	1,357	1,301	1,207	-0,010	7	1,645
8	1,696	1,362	1,495	-0,017	1,422	1,467	1,616	0,013	8	0,470
9	1,628	1,606	1,811	0,011	2,629	1,858	2,115	-0,043	9	1,640
10	2,413	2,524	2,155	-0,015		1,579	1,817	0,048	10	1,437
11	1,509	1,462	1,809	0,018	2,335	1,848	2,235	-0,013	11	1,096
12	2,001	2,011	2,045	0,003	1,699	2,023	2,242	0,039	12	0,954
13	1,746	2,274	2,181	0,034	1,956	1,906	2,002	0,002	13	1,093
14	2,069	1,761	2,4	0,017	1,374	1,082	1,211	-0,014	14	0,954
15	2,198	1,91	1,918	-0,021	1,166	1,225	1,919	0,048	15	1,638
16	2,383	2,407	2,829	0,028	1,725	1,717	2,682	0,060	16	1,264
17	1,798	1,843	2,157	0,023	1,705	1,649	1,277	-0,028	17	1,349
18	1,47	1,928	2,117	0,047	2,089	1,705	1,039	-0,071	18	1,131
19	2,198	2,164	2,039	-0,011	2,058	1,827	1,499	-0,038	20	1,645
20		1,772	1,897	0,025	1,935	1,745	1,117	-0,054	21	1,296
21	1,341	1,671	1,778	0,032	1,698	2,323	2,022	0,029	22	1,012
22	1,751	1,717	1,9	0,009	2,06	1,938	2,51	0,027	23	1,396
23	2,128	2,712	2,036	0,002	1,841	2,141	2,159	0,024	24	1,412
24	2,546	2,454	2,286	-0,018	2,525	1,761	2,857	0,011	25	1,580
25	2,059	1,819	1,858	-0,016	1,49	1,875	1,248	-0,010	26	1,225
26	1,88	2,079	2,461	0,039	2,079	2,141	2,103	0,002	27	1,229
27	2,087	2,033	2,038	-0,004	1,467	1,575	1,702	0,016	28	0,793
28	2,091	2,12	2,42	0,021	1,522	1,45	1,257	-0,018	29	1,694
29	2,583	2,041	2,06	0,024	1,559	2,028	1,529	0,004	30	1,247
30	1,596	1,767	2,011	0,028	1,453	1,69	1,937	0,034	31	1,358
31	2,17	1,839	2,655	0,026	1,594	1,862	2,091	0,035	32	0,975
32	1,622	1,857	1,972	0,025		2,06	2,423	0,073	33	1,407
33	1,57	2,378	2,183	0,049					34	1,129
34		2,423	2,766	0,069	1,975	2,085	2,398	0,028	35	0,948
35		2,348	3,364	0,203	1,145	1,355	1,737	0,040	36	1,033
36	1,567	1,573	1,993	0,027	2,273	2,226	2,565	0,018	37	1,289
37	1,952	2,125	2,7	0,049	1,557	1,546	1,249	-0,019	38	1,505
38	2,29	2,394	1,462	-0,051					39	1,189
39	2,075	2,089	1,905	-0,011					40	1,141
40	1,724	2,518	2,911	0,085					41	1,426
41	2,07	1,766	1,898	-0,015					42	1,602
42	1,922	1,742	2,051	0,006					45	1,091
43	2,012	2,565	2,685	0,050					46	1,302
44	1,355	1,224	1,659	0,017					47	0,832
45	2,228	2,225	2,123	-0,007					48	0,981
46		1,509	1,757	0,050					50	1,270
47			2,005	0,000					51	1,167
48		1,88	1,368	-0,102					52	1,300
49		1,946	1,332	-0,123					54	0,232
50		2,137	1,809	-0,065					55	1,111
									56	1,393
									57	1,145
									58	1,114
Iš viso	**1,921**	**1,948**	**2,013**	**0,008**	**1,790**	**1,799**	**1,886**	**0,008**		**1,231**

2.2.4. Medžių lapijos indekso (LAI) kaita Aukštaitijos ir Žemaitijos KMS baseinuose

Ilgalaikiai tyrimai parodė, kad medžių lapijos indeksas (LAI) abiejose kompleksiško monitoringo stotyse glaudžiai siejosi su fotosintetiškai aktyvios spinduliuotės (FAR) skvarba po medžių lajomis ir medžių lajų defoliacijos kaita. Didėjant LAI, mažėjo po lajomis patenkantis FAR kiekis ir gerėjo medžių lajų būklė, o mažėjant LAI buvo registruojamas didesnis fotosintetiškai aktyvios spinduliuotės intensyvumas bei didesnė medžių lajų defoliacija.

Tiek Aukštaitijos, tiek Žemaitijos KMS didžiausios LAI reikšmės nustatytos 2012–2014 m. laikotarpiu, kai medžių lajų būklė buvo viena geriausių per visą stebėjimų laikotarpį. Šiuo metu daugelyje tyrimo barelių LAI viršijo 3 $m^2\ m^{-2}$, o tai rodė gerą medynų gyvybingumą, didesnį fotosintetinį potencialą ir palankias augimo sąlygas.

Po 2015 m. abiejose stotyse pradėta registruoti nuosekli LAI mažėjimo tendencija, kuri ypač išryškėjo 2021–2024 m. laikotarpiu. Šiuo metu LAI reikšmės reikšmingai sumažėjo, o tai sutapo su didėjančia medžių lajų defoliacija ir blogėjančia medynų būkle. Ryškiausias LAI sumažėjimas nustatytas Žemaitijos KMS, kur 2024 m. jis sumažėjo iki mažiau kaip 1,5 $m^2\ m^{-2}$, tuo tarpu Aukštaitijos KMS išliko apie 2 $m^2\ m^{-2}$. Šie pokyčiai rodo spartesnį medynų struktūros retėjimą ir intensyvesnį medžių gyvybingumo mažėjimą Žemaitijos regione.

LAI mažėjimą tikėtina lėmė kompleksinis aplinkos veiksnių poveikis – didėjanti medžių defoliacija, intensyvus eglių atkritimas dėl žievėgraužio tipografo pažeidimų, taip pat sausrų ir kitų klimato ekstremumų sukeltas medynų retėjimas. Gauti rezultatai rodo, kad LAI jautriai reaguoja į medynų struktūros ir būklės pokyčius bei gerai atspindi ilgalaikę miškų būklės kaitą.

Hemisferiniu fotoaparatu nustatytų LAI reikšmių analizė parodė kiek kitokią ilgalaikę tendenciją. Bendrasis LAI 2010–2025 m. laikotarpiu abiejose stotyse nežymiai didėjo – vidutiniškai tik apie 0,008 $m^2\ m^{-2}$ per metus, o tai rodytų nežymų medynų lapijos kiekio ir bendro produktyvumo didėjimą. Tačiau šiuos rezultatus reikėtų vertinti atsargiai, nes hemisferinė fotografija registruoja ne tik medžių lajas, bet ir intensyviai besivystantį pomiškį bei atžėlimą. Dėl šios priežasties pažeistuose ar net žuvusiuose medynuose pomiškio lapija gali kompensuoti viršutinio medyno praradimą ir lemti didesnes bendrąsias LAI reikšmes, nors vyraujančio medyno būklė iš tikrųjų blogėja.

Nepaisant to, hemisferinės fotografijos duomenys patvirtino, kad medynuose, kurių nepažeidė vabzdžių kenkėjai, vėjovartos ar snieglaužos, LAI turėjo tendenciją didėti, o pažeistuose plotuose reikšmingai mažėjo. Tai rodo, kad abu taikyti metodai vienodai jautriai identifikuoja vietinius medynų pažeidimus, tačiau skirtingai atspindi bendrą medyno struktūrą dėl pomiškio įtakos.

Palyginus kompleksiško monitoringo stočių duomenis nustatyta, kad didžiausias vidutinis LAI būdingas Aukštaitijos KMS medynams (apie 2,0 $m^2\ m^{-2}$), šiek tiek mažesnis – Žemaitijos KMS

(apie 1,9 m^2 m^{-2}), o mažiausias – Dzūkijos KMS (apie 1,2 m^2 m^{-2}). Šie skirtumai atspindi nevienodą medynų tankumą, produktyvumą ir biomasės kaupimo potencialą skirtinguose Lietuvos regionuose.

Apibendrinant galima teigti, kad LAI, nustatytas pagal fotosintetiškai aktyvios spinduliuotės matavimus, yra jautrus vyraujančio medyno lajų būklės rodiklis ir gerai atspindi defoliacijos pokyčius. Tuo tarpu hemisferine fotografija nustatytas LAI geriau apibūdina bendrą augalijos dangos struktūrą ir produktyvumą, tačiau gali pervertinti pažeistų medynų būklę dėl intensyvaus pomiškio ir atžėlimo vystymosi. Todėl ilgalaikiame miškų monitoringe abu metodai vienas kitą papildo ir leidžia išsamiau įvertinti medynų struktūros bei jų būklės pokyčius.

Išvados

1. Nustatytas glaudus ryšys tarp lapijos indekso (LAI), fotosintetiškai aktyvios spinduliuotės (FAR) ir medžių lajų defoliacijos. LAI, apskaičiuotas pagal FAR matavimus, gerai atspindi medynų lajų būklę ir gali būti naudojamas kaip integruotas ankstyvasis miškų būklės bei medynų gyvybingumo indikatorius.
2. Hemisferinės fotografijos metodu nustatytas LAI geriau apibūdina bendrą augalijos dangos struktūrą ir produktyvumą negu vyraujančio medyno būklę. Intensyvus pomiškio ir atžėlimo vystymasis pažeistuose medynuose gali kompensuoti viršutinio medyno nykimą, todėl šiuo metodu nustatyti LAI pokyčiai buvo nežymūs – 2010–2025 m. laikotarpiu LAI didėjo vidutiniškai tik po 0,008 m^2 m^{-2}.
3. Palyginus stočių duomenis nustatyta, kad didžiausias vidutinis LAI nustatytas Aukštaitijos KMS (apie 2,0 m^2 m^{-2}), šiek tiek mažesnis – Žemaitijos KMS (apie 1,9 m^2 m^{-2}), o mažiausias – Dzūkijos KMS (apie 1,2 m^2 m^{-2}). Šie skirtumai atspindi nevienodą medynų tankumą, produktyvumą ir jų gebėjimą kaupti biomasę.
4. Tyrimų rezultatai rodo, kad kompleksinis medžių lajų defoliacijos, medžių atkritimo, lapijos indekso ir aplinkos veiksnių stebėjimas leidžia patikimai įvertinti ilgalaikę miškų ekosistemų būklės kaitą bei laiku nustatyti neigiamų procesų pradžią, todėl šie rodikliai turėtų išlikti viena svarbiausių Lietuvos miškų monitoringo sistemos dalių.

2.3. KMS baseinų teritorijose augančių medynų biomasės ir bioelementų pokyčiai

Miškų biomasė yra vienas svarbiausių miško ekosistemų funkcionavimo rodiklių, integruojantis medynų produktyvumą, anglies kaupimą, bioelementų akumuliaciją ir bendrą ekosistemų atsparumą aplinkos pokyčiams. Ji apima visą gyvosios organinės medžiagos masę ir sudaro vieną didžiausių sausumos anglies telkinių. Kaip pažymi M. G. R. Cannell (1982) ir H. Pretzsch (2009), medynų biomasės dinamika atspindi kompleksinį medyno amžiaus, augavietės našumo, rūšinės sudėties, aplinkos sąlygų ir natūralių trikdžių poveikį, todėl laikoma vienu patikimiausių ilgalaikės miško ekosistemų raidos rodiklių. Borealiniai ir hemiborealiniai miškai yra ypač svarbūs pasaulinėje anglies sekvestracijoje, nes sukaupia didelius anglies ir kitų makroelementų kiekius tiek augmenijoje, tiek dirvožemyje (Jørgensen ir kt., 2021; Bąk ir kt., 2024).

Be anglies kaupimo, miškų biomasė yra glaudžiai susijusi su ekosistemų produktyvumu, bioelementų apytaka ir dirvožemio derlingumu. Didesnė biomasė paprastai rodo intensyvesnį pirminį produktyvumą, didesnę struktūrinę įvairovę ir efektyvesnį maisto medžiagų ciklą, kuris palaiko biologinę įvairovę ir didina ekosistemų stabilumą. F. S. Chapin III, P. A. Matson ir P. M. Vitousek (2011) pabrėžia, kad bioelementai nuolat cirkuliuoja tarp gyvosios biomasės, paklotės, dirvožemio ir atmosferos, o C. E. Prescott (2002) parodė, jog biomasės pokyčiai tiesiogiai veikia dirvožemio derlingumą ir miško produktyvumą. Borealinėse ir hemiborealinėse ekosistemose lėtas organinės medžiagos irimas sudaro palankias sąlygas ilgalaikiam anglies bei maisto medžiagų kaupimuisi.

Pastaraisiais dešimtmečiais miškų biomasės reikšmė dar labiau išaugo dėl klimato kaitos. Y. Pan ir bendraautoriai (2011) nustatė, kad pasaulio miškai sugeria reikšmingą antropogeninės kilmės anglies dioksido dalį ir yra vienas svarbiausių klimato kaitos švelninimo veiksnių. Tačiau vis dažniau pasikartojančios sausros, karščio bangos, audros, vėjovartos, snieglaužos ir vabzdžių kenkėjų protrūkiai keičia biomasės kaupimosi procesus ir anglies balansą. G. B. Bonan (2008) bei M. Pietrzykowski ir bendraautoriai (2024) pabrėžia, kad intensyvėjant gamtiniams trikdžiams miškai tam tikrais laikotarpiais gali iš anglies kaupėjų tapti anglies šaltiniu.

Hemiborealiniuose miškuose biomasės dinamika priklauso ne tik nuo klimato, bet ir nuo medžių rūšinių savybių. Paprastosios pušies (*Pinus sylvestris*) biomasės kaupimasis glaudžiai susijęs su augavietės sąlygomis ir klimato kintamumu, ypač oligotrofiniuose dirvožemiuose (Augustaitis ir kt., 2021; Augustaitis ir Sidabrienė, 2026). Paprastoji eglė (*Picea abies*) yra jautresnė sausroms, karščio bangoms ir žievėgraužio tipografo (*Ips typographus*) pažeidimams, todėl klimato šiltėjimo sąlygomis jos biomasės kaupimasis gali mažėti, o mirtingumas didėti. Sidabrinis beržas (*Betula pendula*) svarbus mišrių medynų komponentas, didinantis ekosistemų produktyvumą ir atsparumą,

tačiau jis taip pat jautriai reaguoja į ilgalaikes sausras ir kitus klimato ekstremumus (Slepetienė ir kt., 2025).

Miškų biomasės pokyčiai neatsiejami nuo negyvos medienos susidarymo ir destrukcijos procesų. Dar M. E. Harmon ir bendraautoriai (1986) įrodė, kad negyva mediena yra ne tik reikšminga anglies ir bioelementų saugykla, bet ir svarbi daugelio organizmų buveinė. Vėlesni tyrimai (Russell ir kt., 2015; Pastorelli ir kt., 2023) parodė, kad negyva mediena aktyviai dalyvauja anglies ir maisto medžiagų apytakoje bei reguliuoja biologinės įvairovės palaikymą. Medienos destrukcijos intensyvumą lemia medžių rūšis, medienos fizikinės savybės, temperatūra, drėgmės režimas bei skaidytojų bendrijų aktyvumas. Tláskal ir bendraautoriai (2021) nustatė, kad grybai ir bakterijos medienos irimo procese atlieka viena kitą papildančias funkcijas, o Zeng ir bendraautoriai (2024) pabrėžė svarbų bestuburių vaidmenį spartinant organinės medžiagos skaidymą ir bioelementų grįžimą į dirvožemį.

Klimato ir miškų biomasės ryšys yra sudėtingas ir netiesinis. Nors didėjanti atmosferos CO_2 koncentracija gali skatinti medžių augimą, šį poveikį dažnai riboja vandens ir maisto medžiagų trūkumas, ypač oligotrofiniuose dirvožemiuose. Tuo pačiu metu dažnėjantys ekstremalūs klimato reiškiniai – sausros, karščio bangos, audros, gaisrai ir vabzdžių kenkėjų protrūkiai – tampa pagrindiniais biomasės mažėjimo veiksniais (Rossi ir kt., 2025). Pastarųjų metų apžvalginiai tyrimai (Wijas ir kt., 2024) rodo, kad dėl klimato kaitos spartėja negyvos medienos kaupimasis, tačiau kartu keičiasi ir jos destrukcijos greitis bei anglies išsilaikymo trukmė miško ekosistemose.

Todėl ilgalaikė medynų biomasės, bioelementų atsargų ir negyvos medienos destrukcijos stebėsena yra viena svarbiausių priemonių vertinant miško ekosistemų būklę ir jų atsaką į klimato kaitą. Kompleksiškai analizuojant gyvosios biomasės kaupimąsi, medžių mirtingumą, negyvos medienos irimą ir bioelementų apytaką galima geriau suprasti ekosistemų produktyvumą lemiančius procesus, prognozuoti jų pokyčius ir parengti moksliškai pagrįstas adaptyvaus miškų valdymo priemones. Prognozuojama, kad ateityje hemiborealiniuose miškuose paprastoji pušis išlaikys didžiausią stabilumą, tuo tarpu eglynuose ir beržynuose dėl didesnio jautrumo sausroms, kenkėjams ir kitoms klimato ekstremalijoms biomasės mažėjimo rizika bus didesnė. Šių procesų pažinimas yra būtina sąlyga siekiant išsaugoti miškų produktyvumą, anglies kaupimo potencialą ir ekosistemų atsparumą ateities klimato sąlygomis.

Šiame skyriuje analizuojami ilgalaikiai medynų biomasės, bioelementų atsargų ir negyvos medienos destrukcijos pokyčiai Lietuvos kompleksinio monitoringo stočių miškuose. Ypatingas dėmesys skiriamas Aukštaitijos, Žemaitijos ir Dzūkijos kompleksinio monitoringo stočių medynų

skirtumams, biomasės kaupimosi, bioelementų apytakos, medžių mirtingumo ir negyvos medienos destrukcijos tarpusavio ryšiams bei jų kaitai kintančių aplinkos ir klimato sąlygomis.

Pagal integruoto monitoringo programą įsteigtų stočių teritorijose medynų inventorizacija ar medynų biomasės bei bioelementų kiekio tyrimai vykdomi kas 5 metai. Per visą tiriamąjį laikotarpį biomasės tyrimai atlikti stočių įkūrimo metais, po to 1999, 2003, 2010, 2015, 2020 ir 2025 m.

Vienas iš pagrindinių Integruoto monitoringo tikslų yra hidrologiniu požiūriu pakankamai gerai izoliuotuose mažų upelių baseinuose nustatyti ir sekti teršiančių medžiagų ir maistinių medžiagų srautus, kontroliuoti jų balansą bei vertinti vykstančius biologinius pokyčius, o taip pat nustatyti medžių būklės bei jų prieaugio ir žuvimo intensyvumą visoje tiriamoje teritorijoje. Todėl buvo nustatyta:

1. gyvų medžių bendra biomasė;
2. pagrindinių maistinių elementų kiekis medžių biomasėje;
3. bendras gyvų ir žuvusių medžių skaičius bei jų pasiskirstymą pagal medžio rūšį ir skersmenį;
4. medžių biomasės pokytis per tiriamąjį laikotarpį, t.y. nuo 1993(94) iki 2020 m.;
5. Bendras medienos tūrio pokytis bei išlikusių gyvų medžių prieaugis.

Biomasės nustatymas yra pirmas ir pagrindinis žingsnis cheminių elementų persiskirstymui bei cirkuliacijai nustatyti uždarame upelio baseine. Medžių biomasės duomenys renkami kompleksiškai jungiant medynų kartografavimą su medžių pagrindinių taksacinių charakteristikų nustatymu tyrimo ploteliuose, reprezentuojančiuose kiekvieną uždaro upelio baseino medyną. 2010 m. biomasei nustatyti pirmą kartą panaudota spektrinė zoninė aerofoto nuotrauka. 2025 m. medžių apskaitai visame baseline atliktas ir miškų lažerinis skenavimas LIDAR technologijomis, įgyvendinant tarptautinio projekto Forest -4.0 tikslus ir uždavinius.

Darbo tikslas**:** pagal tarptautinę integruoto monitoringo programą Lietuvos KM stočių teritorijose nustatyti augančių medžių biomasę bei pagrindinių bioelementų kiekį bei išaiškinti pagrindinius jų pokyčius.

Vykdant "Medžių bioelementų bei medynų biomasė" paprogramę, nustatomas atskirų medžių rūšių: gyvų (NUM_LD), žuvusių (NUM_DD), išverstų medžių (NUM_FD) bei kelmų (NUM_SD) pasiskirstymas pagal skersmenį; gyvų medžių pasiskirstymas pagal jų aukštį (NUM_LH), pagal lajos aukštį (NUM_LCL) bei pagal lajos plotį (NUM_LCW). Taip pat visi gyvi medžiai ir atskirai pagal rūšį suskirstomi į gyvybingumo grupes: sveiki, pažeisti bei mirštantys. Šių tyrimų rezultatai pateikti lentelėse.

2.3.1. Aukštaitijos KMS baseino medynų struktūros, tūrio ir jo prieaugio kaita 1993-2025 m.

Medžių bioelementų atsargų ir medynų biomasės kaitai įvertinti panaudoti 1993, 1999, 2003, 2010, 2015, 2020 ir 2025 m. atliktų apskaitų duomenys, gauti vykdant išsamią medynų inventorizaciją 50-yje pastoviųjų tyrimo plotelių. Kadangi tiesioginiai medžių biomasės matavimai nebuvo atlikti, remtasi metodikoje rekomenduojamais artimiausio regiono biomasės tyrimų duomenimis. Atskirų medžių biomasės frakcijų masė apskaičiuota naudojantis Lietuvos miškų instituto parengtomis biomasės lentelėmis (Таблицы, 1982), o pagrindinių bioelementų kiekiai medžių biomasėje nustatyti pagal KM programos metodinius nurodymus (*Manual ...* , 1998).

Aukštaitijos KMS Versminio upelio baseine vyrauja daugiaardžiai spygliuočių medynai. Didžiausią jų dalį sudaro seni ir perbrendę pušynai su viena ar keliomis jaunesnėmis eglės kartomis.

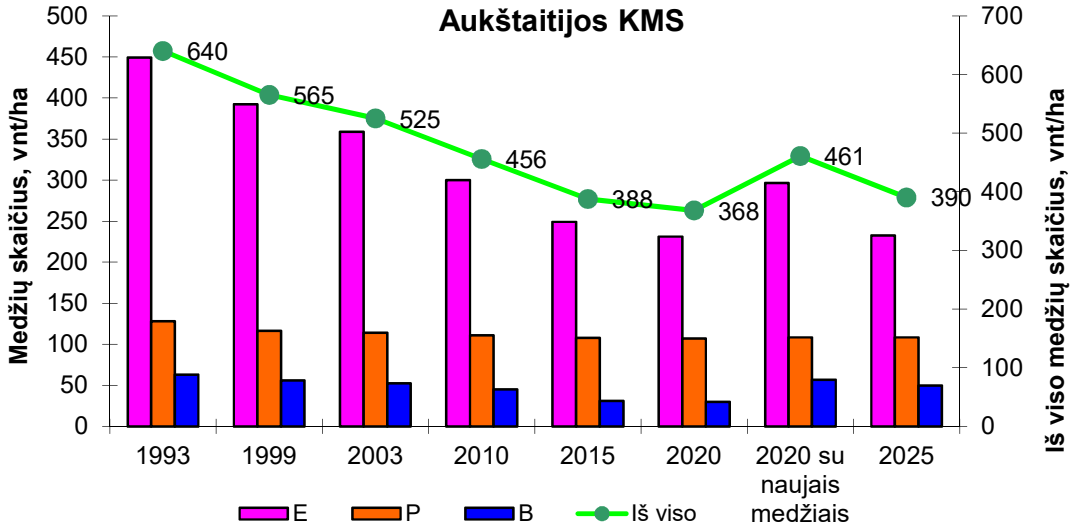
Nustatyta, kad per 1993–2020 m. laikotarpį gyvų medžių skaičius viename hektare vidutiniškai sumažėjo nuo 651 iki 368 vnt., arba 43,5 %. Tai atitinka vidutinį 1,6 % metinį stebėtų medžių sumažėjimą. 2020–2025 m. laikotarpiu, papildžius apskaitą naujais medžiais, kurių skersmuo pasiekė 10 cm, jų skaičius laikinai padidėjo iki 461 vnt./ha, tačiau po penkerių metų dėl natūralaus medžių atkritimo vėl sumažėjo iki 390 vnt./ha.

Vienas iš tyrimo plotelių, esantis už rezervato ribų, po masinio kenkėjų pažeidimo buvo visiškai iškirstas. 2020 m. šiame plote, jau susiformavusiame jaunuolyne, įsteigtas naujas pastovusis tyrimo plotelis (2.9 pav.). 2014 m. pradėtas kirsti ir gretimas tyrimo plotelis. Jame miško atkūrimo darbai dar tik vykdomi, todėl tikėtina, kad medyno atsikūrimą bus galima įvertinti tik po 5–10 metų.

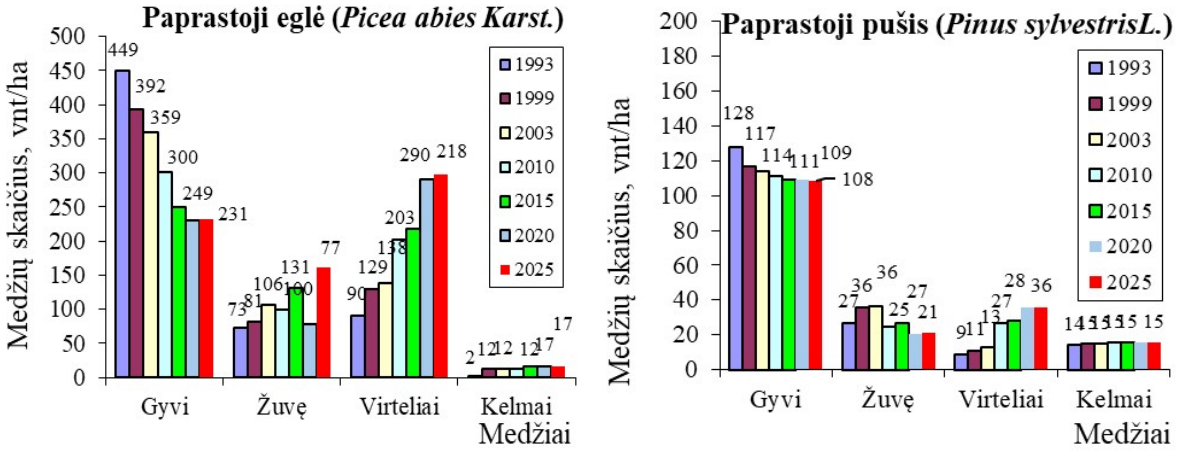
2020 m. papildomai į apskaitą buvo įtrauktas dar vienas jaunuolyne įsteigtas tyrimo plotelis bei visi medžiai, kurių kamieno skersmuo pasiekė ne mažiau kaip 10 cm. Dėl to bendras apskaitomų medžių skaičius padidėjo iki 461 vnt./ha, tačiau 2025 m. dėl natūralaus medžių žuvimo jis vėl sumažėjo iki 390 vnt./ha.

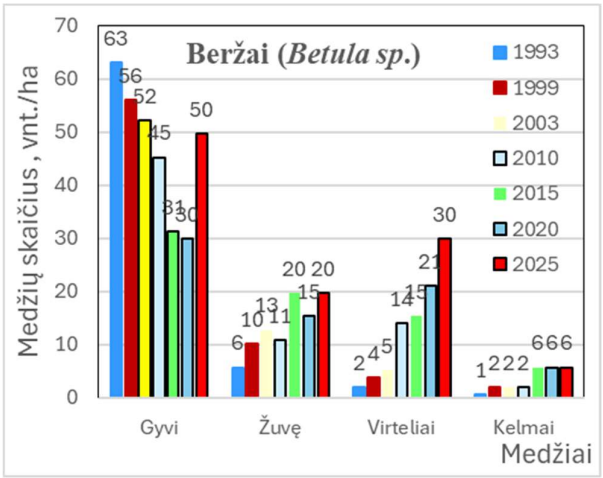
Paprastosios pušies ir paprastosios eglės medžių skaičiaus dinamika (2.9–2.10 pav.) rodo, kad per visą tiriamąjį laikotarpį pušų skaičius sumažėjo nuo 128 iki 108 vnt./ha, t. y. 16,4 %. Paprastųjų eglių skaičius sumažėjo nuo 449 iki 231 vnt./ha (48,5 %), o beržų – nuo 63 iki 30 vnt./ha (52,3 %). Vidutiniškai tai sudarė atitinkamai 0,6 %, 1,8 % ir 1,9 % šių rūšių medžių metinį sumažėjimą. Kadangi viename tyrimo plotelyje po brandžių medžių iškirtimo ne rezervatinėje teritorijoje susiformavo jaunuolynas, jame į apskaitą buvo įtraukti naujai užaugę medžiai. Dėl to apskaitomų beržų skaičius padidėjo iki 50 vnt./ha.

Analizuojant medynų skersploščių sumos (ΣG) pokyčius nustatyta, kad per 32 metų laikotarpį eglių ir beržų skersploščių suma sumažėjo atitinkamai daugiau kaip 2,8 ir 1,2 m^2/ha, o pušų skersploščių suma padidėjo daugiau kaip 2 m^2/ha.

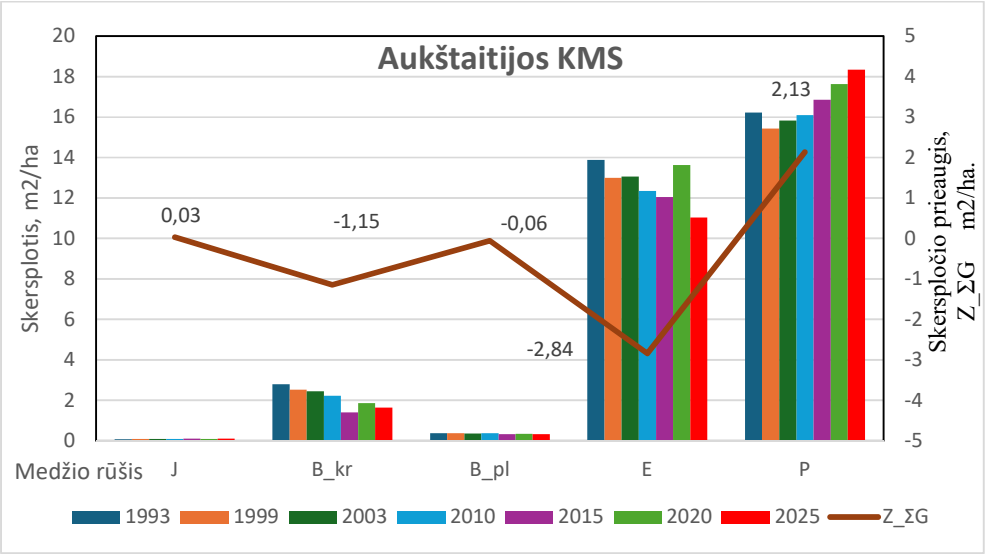


2.9 pav. Gyvų medžių skaičiaus kaita Aukštaitijos KMS 1993-2025 m. laikotarpiu





2.10 pav. Aukštaitijos KMS baseino pagrindinių rūšių medžių skaičiaus kaita.



2.11 pav. Aukštaitijos KMS baseino pagrindinių rūšių visų tirtų medžių skersplotis ir jo prieaugis 1 ha (Z_ΣG) per 1993-2025 m. laikotarpį.

Išlikusių gyvų medžių skerspločių sumos prieaugis tarp tirtų rūšių yra priešingas. Didžiausių prieaugiu pasižymėjo išlikusios eglės, kurių šis rodiklis sudarė net 6 m²/ha per tiriamąjį laikotarpį. Kiek silpnesniu prieaugiu pasižymėjo pušys – apie 4 m²/ha ir silpniausių ar beveik neregistruojamu prieaugiu pasižymėjo beržai – vos 0,5 m²/ha per visą tiriamąjį laikotarpį. Tokiu būdu bendras likusių gyvų medžių prieaugis Aukštaitijos KMS baseine sudarė 10,5 m²/ha.

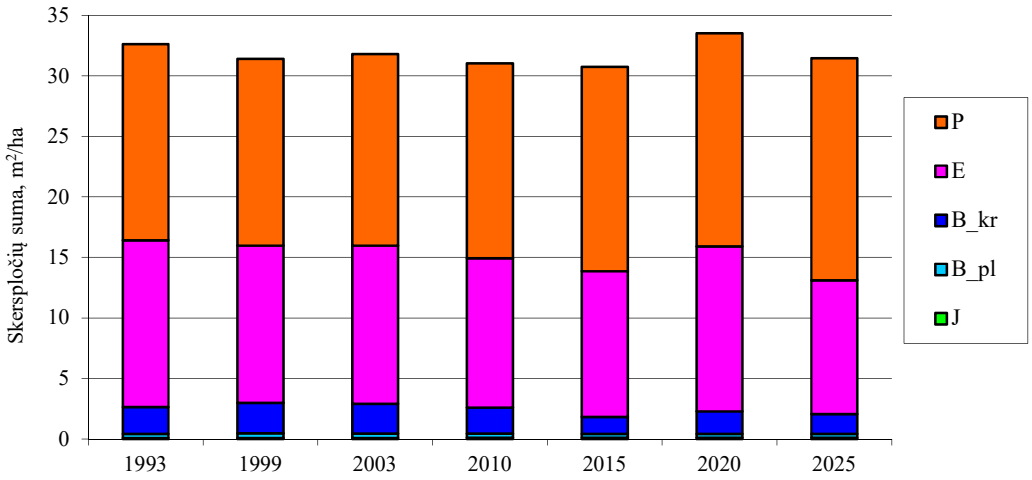
Per stebėjimų laikotarpį žuvusių medynų vietoje natūraliai susiformavo jaunuolynai. Medžiams pasiekus didesnį kaip 10 cm skersmenį, juose buvo įsteigti nauji tyrimo plotai, o į apskaitą papildomai įtraukti 167 medžiai. Dėl to 2020 m. vidutinis apskaitomų medžių skaičius padidėjo beveik 100 vnt./ha: paprastųjų eglių (65 vnt./ha) ir beržų (27 vnt./ha). Tai rodo, kad žievėgraužio tipografo pažeistuose eglynuose pagrindinė atsikurianti medžių rūšis išlieka paprastoji eglė.

Pagal skerspločių sumą Aukštaitijos KMS baseine vyrauja pušynai. Jų ΣG 1999–2025 m. padidėjo nuo 15,4 iki 18,3 m²/ha. Tuo tarpu eglių skerspločių suma sumažėjo nuo 13,8 iki 11,0 m²/ha, o beržų – nuo 2,5 iki 1,6 m²/ha. Šiuos pokyčius daugiausia lėmė vėjovartos, vėjalaužos, snieglaužos ir pasikartojantys žievėgraužio tipografo pažeidimai brandžiuose eglynuose.

Beržų skerspločių suma kito analogiškai eglių skerspločių sumai. Tyrimų pradžioje abiejų rūšių gyvų beržų skerspločių suma 1 ha baseino plote sudarė vidutiniškai 2,5 m²/ha, tai 2025 m. šis rodiklis sumažėjo iki 1,6 m²/ha priskaitant naujai įkurtus tyrimo plotelius. Tai taip pat vėjalaužų ir snieglaužų rezultatas, o taip pat ir vėjavartų, nuo kurių paskutiniuoju laikotarpiu reikšmingiausiai nukenčia beržai.

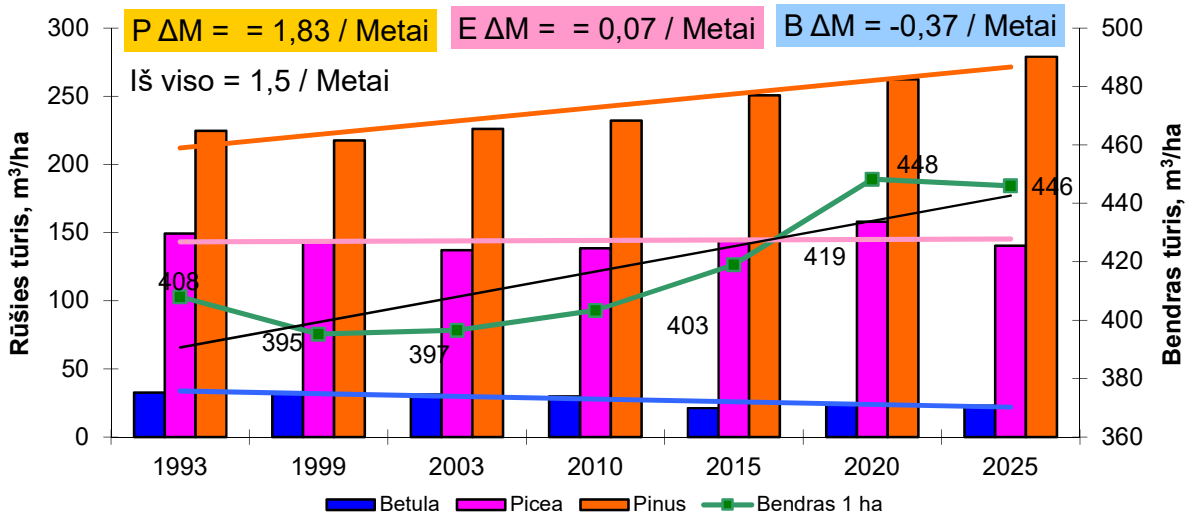
Tokiu būdu Aukštaitijos KMS teritorijos medynų skerspločių suma 1993-2025 m. laikotarpiu praktiškai išlieka stabili. Jei tyrimų pradžioje siekė 33,3 m^2/ha, tai 2015 m. sumažėjo iki 30,7 m^2/ha, o 2020 m. padidėjo iki 31,62 m^2/ha, ir įskaitant ir prieaugį, t.y. medžius, kurių skersmuo pradėjo viršyti 10 cm – 33,5 m^2/ha (2.9 pav.). Paskutiniaisiais 2025 m. skerspločių bendra suma sumažėjo iki 31,5 m^2/ha. Tai brandžių ir perbrendusių medynų vystymosi eigos būdingas bruožas, kai medžių mirtingumas susilygina su atsikūrimu.

Apibendrinus medžių mirtingumo, atsikūrimo ir prieaugio rezultatus matyti, kad per 32 m. laikotarpį natūraliai besivystančios miško ekosistemos produktyvumas praktiškai išliko stabilus, nors net su priaugusiais medžiais palaipsniui mažėja, t.y. per 32 metus sumažėjo 1,2 m^2/ha***. Tai naujas procesas pirmą kartą užregistruotas Aukštaitijos KMS, Ažvinčių sengirėje.***



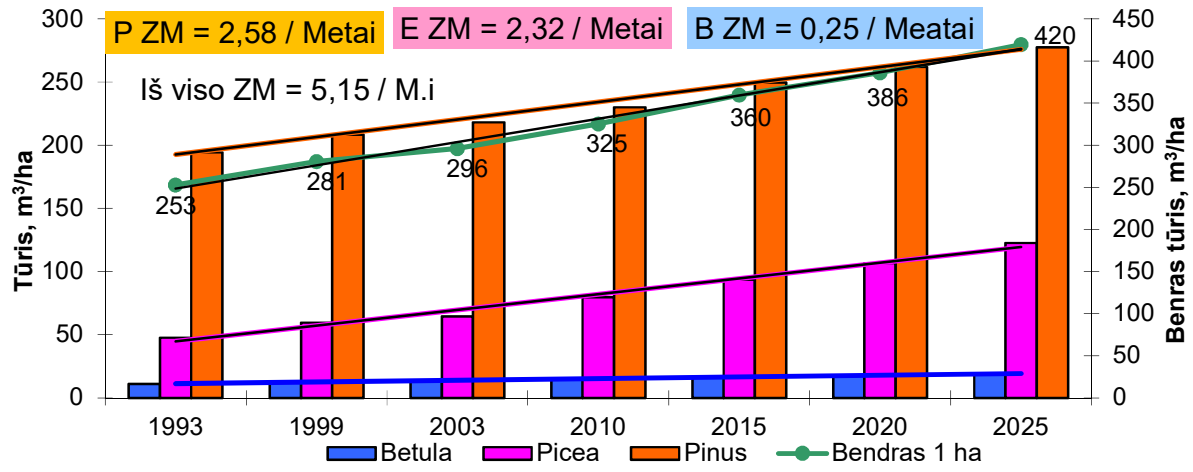
2.12 pav. Aukštaitijos KMS baseine augančių medžių skerspločių sumos kaita 1993-2025 m.

Gyvų medžių tūrio ir jo pokyčio analizė parodė (2.13 pav.), kad Aukštaitijos KMS baseine augančių medžių tūris per 33 m. padidėjo, įskaitant medžių atkritimą. Didžiausiu teigiamu tūrio pokyčiu pasižymėjo pušys, kurių tūris įskaitant ir medžių iškritimą, padidėjo nuo 225 m^3/ha iki 279 m^3/ha, t.y. 19,35 %, kas sudarytų po 1,7 m^3 per metus. Didžiausiu neigiamu tūrio pokyčiu pasižymėjo beržai. Jų tūris vidutiniškai (įskaitant medžių atkritimą) mažėjo nuo 33 m^3 iki 23 m^3/ha, kas sudarytų 33 % arba po -0,3 m^3/ha per metus. Eglių tūrio kaita demonstravo stabilią būseną, t.y. jų atritimas ir prieaugis praktiškai buvo lygūs.



2.13 pav. Vyraujančių rūšių medžių tūrio pokytis 1 ha Aukštaitijos KMS baseine 1993 – 2025 m.

Norint įvertinti, kurių medžių prieaugis buvo intensyviausias, atskirai panagrinėtas išlikusių gyvų 2025 m. medžių tūrio prieaugis, t.y. nagrinėjant tūrio kaitą buvo eliminuotas žuvusių medžių poveikis tūrio kaitai.



2.14 pav. Vyraujančių medžių rūšių 2020 m. išlikusių gyvų medžių ir jų suminis (iš viso) tūris Aukštaitijos KMS baseine 1993 – 2020 m. laikotarpiu

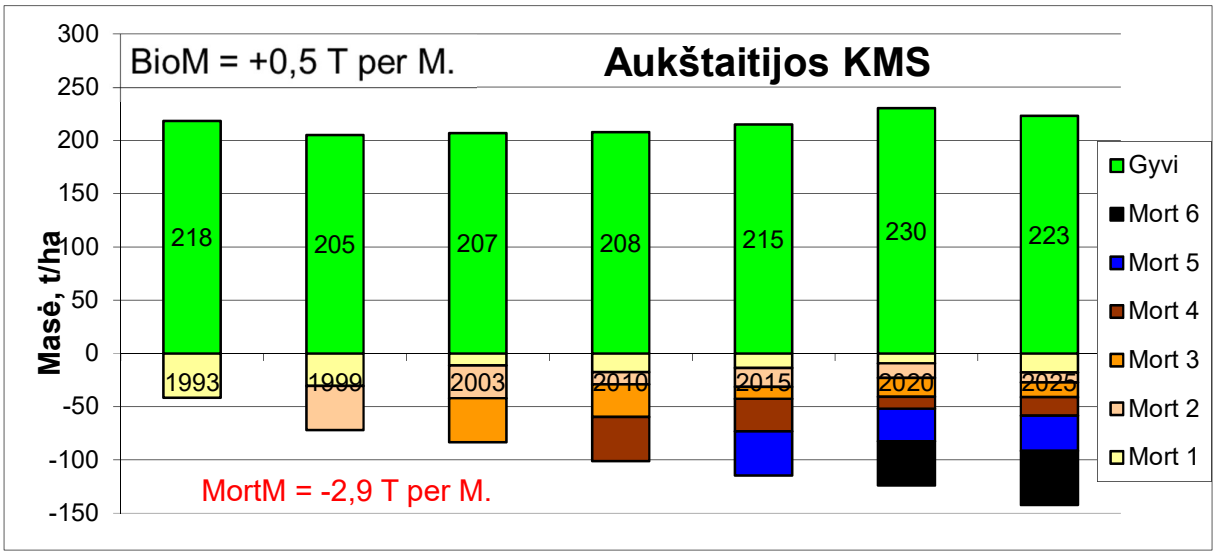
Didžiausią tūrio prieaugį demonstravo eglės (2.14 pav.). Per 32 m. laikotarpį tik išlikusių gyvų eglių tūris padidėjo nuo 48 m^3 iki 123 m^3/ha, t.y. daugiau nei 2,5 kartus, ar po 2,3 m^3/ha per metus. Kiek mažesniu tūrio prieaugiu pasižymėjo pušys. Jų tūris per 32 m. padidėjo nuo 194 m^3 iki 277 m^3/ha, kas sudaro beveik 30 % ar po 2,6 m^3/ha per metus. Beržų tūrio prieaugis padidėjo nuo 11 m^3 iki 19 m^3/ha, kas sudaro 43 %, ar po 0,25 m^3/ha per metus.

Tokiu būdu ***Aukštaitijos KMS baseino miškų, kurie priklauso vienam seniausių Ažvinčių sengirės rezervatui, išlikusių gyvų medžių tūrio prieaugis sudarė po 5,15 m m^3/ha per metus, kai tuo tarpu dar 2020 m. Šis rodiklis siekė 5,7 m^3/ha per metus***.

2.3.2. Aukštaitijos KMS medynų biomasė ir pagrindinių bioelementų kiekiai

Apskaičiavus augančių medžių stiebų, šakų, spyglių biomasę, nustatyta, kad Aukštaitijos KMS 1 ha baseino plote augančių medynų biomasė nuo 1993 iki 1999 metų dėl medžių iškritimo sumažėjo vidutiniškai nuo 218t iki 205t/ha, t.y. 13 t/ha arba 5%. 1999-2015 m. laikotarpiu stebimas, nors ir neženklus gyvosios organinės masės didėjimas, nuo 205 t/ha iki 212 t/ha. Tokiu būdu gyvosios biomasės kiekis didėjo po 0.44 t/ha.

Iki 2015 m. reikšmingai augo mort masės kiekis Aukštaitijos KMS baseino 1 ha plote. Jei dar tyrimų pradžioje negyvos medienos kiekis tyrimo plotuose siekė vos po 43 t/ha, tai paskutiniaisiais metais jos kiekis jau turėjo sudaryti 118 t/ha, t.y. per 22 m laikotarpį kasmet Aukštaitijos baseine negyvos medienos masė didėjo po 3,4t/ha. Bendras biomasės balansas rodo, kad per 22 metų laikotarpį Aukštaitijos KMS baseino 1 ha bendra biomasė didėjo nuo 261t/ha iki 330 t/ha, arba po 3,1 t/ha per metus, kas sudarytų virš 5 m^3 medienos prieaugio hektare.



2.15 pav. Gyvos ir negyvos (Mort) organinės masės, priklausomai nuo jos destrukcijos laipsnio balansas Aukštaitijos KMS baseine 1993-2025 m.

Medienos suirimo laipsnis: Mort 1 – šviežiai žuvę medžiai; Mort 6 – visiškai suįrę medžiai.

Per šį laikotarpį intensyviausiai didėjo pušynų gyvoji biomasė. Padidėjimas sudarė nuo 105t/ha iki 119 t/ha. Stabili biomasė išliko eglynų, kuri svyravo priklausomai nuo metų apie 80 t/ha ir reikšmingai mažėjo lapuočių gyvoji biomasė – sumažėjimas sudarė nuo 21t/ha iki 13t/ha.

2020 m. registruojami vieni reikšmingiausių pokyčių miško ekosistemose. Žuvusių medžių skaičius buvo artimas mažiausioms reikšmėms kaip ir 2003 m.

2025 m. pasižymėjo naujų medžių indėliu į biomasės kaitą Aukštaitijos KMS ir padidėjusiu atkritimu 2022 m. dėl žievėgraužio pažeidimų. Gyvų medžių masė sumažėjo iki 223 t/ha, o mort masė išaugo nuo 124 t/ha iki 143 t/ha.

2025 m. pagal medžių kamienų suirimo laipsnį mort masė pasiskirstė taip: Mort 1 – 18%, Mort 2 – 9 %, Mort 3 – 14 %, Mort 4 – 18 %, Mort 5 – 33 % ir Mort 6 – 51 %. Apibendrinus gautus rezultatus galima teigti, kad apie 50 % visų per visą stebėjimą žuvusių medžių mediena, pastaruoju laikotarpiu yra susiskaldžiusi jau be jokių likusių požymių. Tai sausros ir ypač intensyvios kenkėjų invazijos rezultato padariniai, kurie pastaruoju laikotarpiu Aukštaitijos miškuose jau nestebimi.

Gyvų medžių biomasės kaitoje nustatyti ryškūs pokyčiai. Iki 2020 m. medynų biomasė vidutiniškai padidėjo iki 230 t/ha, įskaitant naujus į apskaitą įtrauktus medžius (prieaugį), o jos pokytis lyginant su 1999 m. padidėjo 25,7 t/ha, arba 1,22 t/ha per metus. Paskutinysis 5 m. laikotarpis parodė, kad gyvų medžių masė reikšmingai sumažėjo iki 223 t/ha, t.y. masės padidėjimas sumažėjo iki 0,7 t/ha per m.

Priklausomai nuo biomasės pokyčių keitėsi ir bioelementų kiekis. Per 1999-2025 metų laikotarpį padidėjo atitinkamai: N +28 kg/ha (1.1 kg/m.); P 4.5 kg/ha (0.17 kg/m.); K 12.5 kg/ha (0.5 kg/m.); Ca 11.2 kg/ha (0.4 kg/m.); Mg 4.3 kg/ha (0.17 kg/m) ir Fe 0 kg/ha (0,0 kg/m.) ir Mn 3.3 kf/ha (0.13 kg/m.). Tai sudaro 9-10 % šių lementų kiekio lyginant su 1999 m.

Negyvosios medienos kiekis, kuris per 32 metų laikotarpį dūlėjo bei iš dalies kaupėsi ir praturtino dirvožemį, didėjo nuo 41 t iki 143 t/ha, kas sudarė po 3.2 t/ha per metus. Ypač reikšmingai didėjo eglių mort masė – 73 t/ha arba po 2,3 t/ha per metus; beveik 3 kartus mažesniu intensyvumo padidėjo pušų – 14,7 t/ha arba 0,55 t/ha per metus ir kiek tai dar mažiau lapuočių medžių rūšių – 12,1 t/ha arba 0,38 t/ha per metus.

Per tiriamąjį laikotarpį nuo 1993 iki 2025 į atmosfera grįžo ar pateko į dirvožemį su krituliais 145 kg/ha azoto, 12.8 kg/ha P, 53 kg/ha K, 115 kg/ha Ca, 19 kg/ha Mg, 6 kg/ha Fe, 26 kg/ha Mn ir 32 kg/ha S/ha.

2.6 lentelė. Aukštaitijos KMS baseino 1 ha augančių medžių atskirų frakcijų biomasė (t) ir bioelementų kiekiai (kg) 1993 - 2025m.

	1993				1999				2010				2015				2020				2025			
Rodiklis	Stiebas	Šakos	Spygliai	Iš viso	Stiebas	Spygliai	Iš viso	Iš viso	Stiebas	Šakos	Spygliai	Iš viso	Stiebas	Šakos	Spygliai	Iš viso	Stiebas	Šakos	Spygliai	Iš viso	Stiebas	Šakos	Spygliai	Iš viso
	Paprastoji eglė																							
Masė	71,5	12,0	3,9	87,5	67,5	11,0	3,3	81,8	64,4	10,6	3,0	77,9	66.02	11.1	3.0	80.2	72,98	12,28	3,35	88,62	61,95	10,44	2,82	75,21
N	51,49	69,62	50,96	172,06	48,58	63,83	42,88	155,29	46,38	61,24	38,90	146,52	47.54	64.45	39.12	151.12	52,55	71,23	43,42	167,20	44,61	60,56	36,49	141,66
P	3,58	7,56	5,35	16,49	3,37	6,93	4,50	14,81	3,22	6,65	4,09	13,96	3.30	7.00	4.11	14.41	3,65	7,74	4,56	15,95	3,10	6,58	3,83	13,51
K	18,59	27,37	18,81	64,77	17,54	25,09	15,83	58,46	16,75	24,07	14,36	55,18	17.17	25.34	14.44	56.94	18,98	28,00	16,03	63,00	16,11	23,81	13,47	53,39
Ca	52,20	52,69	18,22	123,12	49,26	48,31	15,33	112,90	47,02	46,35	13,91	107,28	48.20	48.79	13.99	110.97	53,28	53,92	15,52	122,72	45,23	45,84	13,05	104,11
Mg	7,87	7,44	4,01	19,32	7,42	6,82	3,38	17,62	7,09	6,55	3,06	16,70	7.26	6.89	3.08	17.23	8,03	7,61	3,42	19,06	6,81	6,47	2,87	16,16
Fe	0,23	6,48	0,24	6,95	0,22	5,94	0,20	6,36	0,21	5,70	0,18	6,09	0.21	6.00	0.18	6.39	0,23	6,63	0,20	7,07	0,20	5,64	0,17	6,01
Mn	8,87	16,13	3,30	28,30	8,37	14,79	2,77	25,93	7,99	14,19	2,52	24,69	8.19	14.94	2.53	25.65	9,05	16,51	2,81	28,37	7,68	14,03	2,36	24,08
Na	3.58	0.12	0.08	3.77	3.37	0.11	0.07	3.55	3.22	0.11	0.06	3.39	3.30	0.11	0.06	3.47	3,65	0,12	0,07	3,84	3,10	0,10	0,06	3,26
S	32.18	1.56	0.31	34.06	30.36	1.43	0.26	32.06	25.76	1.06	0.15	26.97	25.75	1.00	0.12	26.87	28,46	1,11	0,13	29,70	24,16	0,94	0,11	25,21
Zn	0.72	0.60	0.20	1.51	0.67	0.55	0.17	1.39	0.64	0.53	0.15	1.32	0.66	0.56	0.15	1.37	0,73	0,61	0,17	1,51	0,62	0,52	0,14	1,28
Cu	0.55	0.08	0.03	0.66	0.52	0.07	0.03	0.61	0.50	0.07	0.02	0.59	0.51	0.07	0.02	0.60	0,56	0,08	0,03	0,67	0,48	0,07	0,02	0,56
B	0.07	0.12	0.04	0.23	0.07	0.11	0.03	0.21	0.06	0.11	0.03	0.20	0.07	0.11	0.03	0.21	0,07	0,12	0,03	0,23	0,06	0,10	0,03	0,19
	Paprastoji pušis																							
Masė	88.48	17.66	3.40	109.54	84.90	16.97	3.15	105.03	90.58	18.21	3.34	112.13	95.98	19.38	3.61	118.98	101.3	20.49	3.80	125.59	107,5	21,81	3,94	133,20
N	52.20	90.40	46.53	189.13	50.09	86.91	43.11	180.11	53.44	93.24	45.60	192.28	56.63	99.22	49.40	205.25	59.76	104.9	51.99	216.69	63,40	111,6	53,80	228,85
P	2.65	9.89	13.31	25.85	2.55	9.51	12.33	24.38	2.72	10.20	13.04	25.96	2.88	10.85	14.13	27.86	3.04	11.48	14.87	29.39	3,22	12,21	15,39	30,82
K	21.23	41.14	13.75	76.13	20.38	39.55	12.74	72.67	21.74	42.43	13.48	77.65	23.04	45.15	14.60	82.79	24.31	47.75	15.37	87.43	25,79	50,81	15,90	92,50
Ca	42.47	44.14	10.28	96.89	40.75	42.44	9.52	92.71	43.48	45.52	10.07	99.08	46.07	48.45	10.91	105.43	48.62	51.24	11.49	111.34	51,58	54,51	11,89	117,98
Mg	13.27	10.59	3.06	26.93	12.74	10.18	2.84	25.76	13.59	10.93	3.00	27.52	14.40	11.63	3.25	29.28	15.19	12.30	3.42	30.91	16,12	13,08	3,54	32,74
Fe	0.22	1.06	0.18	1.46	0.21	1.02	0.17	1.40	0.23	1.09	0.18	1.50	0.24	1.16	0.19	1.60	0.25	1.23	0.20	1.69	0,27	1,31	0,21	1,79
Mn	4.16	15.59	1.42	21.17	3.99	14.99	1.32	20.29	4.26	16.08	1.39	21.73	4.51	17.11	1.51	23.13	4.76	18.10	1.59	24.44	5,05	19,25	1,64	25,95
Na	4.42	0.18	0.14	4.74	4.25	0.17	0.03	4.45	4.53	0.18	0.03	4.74	4.80	0.19	0.04	5.03	5.06	0.20	0.04	5.31	5,37	0,22	0,04	5,63
S	39.81	2.30	0.27	42.38	38.21	2.21	0.25	40.67	36.23	1.82	0.17	38.22	37.43	1.74	0.14	39.32	39.51	1.84	0.15	41.50	41,91	1,96	0,16	44,03
Zn	0.44	0.35	0.10	0.90	0.42	0.34	0.09	0.86	0.45	0.36	0.10	0.92	0.48	0.39	0.11	0.98	0.51	0.41	0.11	1.03	0,54	0,44	0,12	1,09
Cu	0.09	0.08	0.02	0.18	0.08	0.08	0.01	0.18	0.09	0.08	0.02	0.19	0.10	0.09	0.02	0.20	0.10	0.09	0.02	0.21	0,11	0,10	0,02	0,22
B	0.09	0.18	0.03	0.30	0.08	0.17	0.03	0.29	0.09	0.18	0.03	0.31	0.10	0.19	0.04	0.33	0.10	0.20	0.04	0.34	0,11	0,22	0,04	0,36

2.6 lentelės tęsinys.

	1993				1999				2010				2015				2020				2025			
Rodiklis	Stiebas	Šakos	Spygliai	Iš viso	Stiebas	Spygliai	Iš viso	Iš viso	Stiebas	Šakos	Spygliai	Iš viso	Stiebas	Šakos	Spygliai	Iš viso	Stiebas	Šakos	Spygliai	Iš viso	Stiebas	Šakos	Spygliai	Iš viso
	Lapuočiai																							
Masė	18.21	2.67	0.29	21.17	16.94	2.50	0.26	19.69	14.95	2.22	0.23	17.39	11.21	1.62	0.19	13.02	13,74	1,94	0,23	15.79	12,65	1,80	0,20	14,65
N	18.94	13.28	6.63	38.85	17.61	12.44	5.88	35.93	15.55	11.05	5.16	31.76	11.66	8.07	4.30	24.02	14,29	9,67	5,26	29.74	13,16	8,97	4,57	26,70
P	1.09	1.04	0.35	2.48	1.02	0.97	0.31	2.30	0.90	0.87	0.27	2.04	0.67	0.63	0.23	1.53	0,82	0,76	0,28	1.89	0,76	0,70	0,24	1,70
K	4.92	2.64	1.87	9.42	4.57	2.47	1.66	8.70	4.04	2.20	1.45	7.69	3.03	1.60	1.21	5.84	3,71	1,92	1,48	7.24	3,42	1,78	1,29	6,49
Ca	9.83	9.63	2.32	21.78	9.15	9.02	2.06	20.22	8.07	8.01	1.81	17.89	6.05	5.85	1.51	13.41	7,42	7,01	1,84	16.52	6,83	6,50	1,60	14,94
Mg	2.73	1.52	0.80	5.05	2.54	1.42	0.71	4.67	2.24	1.27	0.62	4.13	1.68	0.92	0.52	3.12	2,06	1,11	0,63	3.86	1,90	1,03	0,55	3,47
Fe	0.07	0.08	0.02	0.17	0.07	0.07	0.02	0.16	0.06	0.06	0.02	0.14	0.04	0.05	0.02	0.11	0,05	0,06	0,02	0.13	0,05	0,05	0,02	0,12
Mn	1.24	0.61	0.30	2.15	1.15	0.57	0.27	1.99	1.02	0.51	0.23	1.76	0.76	0.37	0.19	1.33	0,93	0,45	0,24	1.64	0,86	0,41	0,21	1,48
Na	0.91	0.03	0.01	0.95	0.85	0.02	0.01	0.88	0.75	0.02	0.01	0.78	0.56	0.02	0.01	0.58	0,69	0,02	0,01	0.71	0,63	0,02	0,01	0,66
S	8.19	0.35	0.02	8.56	7.62	0.32	0.02	7.97	5.98	0.22	0.01	6.21	4.37	0.15	0.01	4.52	5,36	0,17	0,01	5.47	4,93	0,16	0,01	5,10
Zn	0.18	1.84	0.02	2.04	0.17	1.72	0.02	1.91	0.15	1.53	0.01	1.69	0.11	1.12	0.01	1.24	0,14	1,34	0,01	1.53	0,13	1,24	0,01	1,38
Cu	0.02	0.02	0.00	0.04	0.02	0.02	0.00	0.04	0.01	0.02	0.00	0.03	0.01	0.01	0.00	0.02	0,01	0,01	0,00	0.03	0,01	0,01	0,00	0,03
B	0.02	0.03	0.01	0.05	0.02	0.02	0.01	0.05	0.01	0.02	0.00	0.04	0.01	0.02	0.00	0.03	0,01	0,02	0,00	0.04	0,01	0,02	0,00	0,03
	Iš viso Aukštaitijos KMS 1 ha teritorijoje																							
Masė	178.2	32.33	7.63	218.15	169.3	30.48	6.72	205.0	169.9	30.99	6.57	207.49	173.2	32.11	6.82	212.15	188,0	34,72	7,39	230.6	182,1	34,05	6,95	223,07
N	122.6	173.3	104.1	400.0	116.3	163.2	91.9	369.2	115.4	165.5	89.7	370.6	115.8	171.7	92.8	380.4	126,6	185,8	100,7	414.83	121,2	181,2	94,87	397,21
P	7.32	18.49	19.01	44.82	6.94	17.41	17.14	41.49	6.83	17.71	17.40	41.95	6.85	18.49	18.47	43.80	7,51	19,97	19,71	47.34	7,08	19,49	19,46	46,04
K	44.74	71.15	34.43	150.32	42.49	67.11	30.23	139.83	42.52	68.70	29.29	140.51	43.23	72.10	30.25	145.58	47,00	77,68	32,87	158.13	45,31	76,40	30,66	152,37
Ca	104.5	106.5	30.82	241.8	99.16	99.76	26.91	225.83	98.57	99.89	25.79	224.25	100.3	103.1	26.41	229.81	109,3	112,2	28,85	251.5	103,6	106,9	26,54	237,03
Mg	23.87	19.56	7.87	51.30	22.70	18.43	6.92	48.05	22.91	18.74	6.69	48.34	23.34	19.44	6.85	49.63	25,28	21,02	7,47	53.97	24,83	20,58	6,97	52,38
Fe	0.52	7.62	0.44	8.59	0.50	7.03	0.39	7.92	0.49	6.86	0.38	7.73	0.50	7.21	0.39	8.10	0,54	7,92	0,43	8.94	0,52	7,00	0,40	7,91
Mn	14.26	32.34	5.02	51.62	13.51	30.35	4.36	48.22	13.26	30.78	4.14	48.18	13.46	32.42	4.23	50.11	14,75	35,05	4,63	54.66	13,59	33,70	4,21	51,50
Na	8.91	0.32	0.23	9.46	8.47	0.30	0.11	8.88	8.50	0.31	0.10	8.91	8.66	0.32	0.10	9.09	9,40	0,35	0,11	9.88	9,10	0,34	0,10	9,55
S	80.19	4.20	0.61	85.00	76.19	3.96	0.54	80.69	67.98	3.10	0.33	71.40	67.55	2.89	0.27	70.72	73,33	3,12	0,30	76.90	71,00	3,06	0,28	74,35
Zn	1.34	2.79	0.32	4.45	1.27	2.61	0.28	4.16	1.25	2.42	0.26	3.93	1.25	2.06	0.27	3.58	1,37	2,36	0,30	4.08	1,28	2,20	0,27	3,76
Cu	0.66	0.17	0.05	0.88	0.62	0.16	0.04	0.83	0.60	0.16	0.04	0.81	0.62	0.17	0.04	0.83	0,68	0,18	0,05	0.91	0,60	0,18	0,04	0,82
B	0.18	0.32	0.08	0.58	0.17	0.30	0.07	0.54	0.17	0.31	0.07	0.55	0.17	0.32	0.07	0.56	0,19	0,35	0,08	0.61	0,18	0,34	0,07	0,59

2.7 lentelė. Aukštaitijos KMS baseino 1 ha žuvusių medžių atskirų frakcijų biomasė ir bioelementų kiekiai 199 - 2025 m.

	1993				1999				2010				2015				2020				2025			
Rodiklis	Stiebas	Šakos	Spygliai	Iš viso	Stiebas	Spygliai	Iš viso	Iš viso	Stiebas	Šakos	Spygliai	Iš viso	Stiebas	Šakos	Spygliai	Iš viso	Stiebas	Šakos	Spygliai	Iš viso	Stiebas	Šakos	Spygliai	Iš viso
	Paprastoji eglė																							
Masė	16.60	3.02	0.00	19.63	29.13	5.24	0.00	34.38	47.86	8.45	0.00	56.31	57.17	10.08	0.00	67.25	64,64	11,19	0	75,83	79,26	13,76	0	93,03
N	11.95	17.54	0.00	29.49	20.98	30.41	0.00	51.38	34.46	49.01	0.00	83.47	41.16	58.46	0.00	99.62	46,54	64,91	0	111,45	57,07	79,82	0	136,89
P	0.83	1.91	0.00	2.74	1.46	3.30	0.00	4.76	2.39	5.32	0.00	7.72	2.86	6.35	0.00	9.21	3,23	7,05	0	10,28	3,96	8,67	0	12,63
K	4.32	6.90	0.00	11.21	7.57	11.95	0.00	19.53	12.44	19.26	0.00	31.71	14.86	22.98	0.00	37.84	16,81	25,52	0	42,32	20,61	31,38	0	51,99
Ca	12.12	13.28	0.00	25.39	21.27	23.02	0.00	44.28	34.94	37.09	0.00	72.03	41.73	44.25	0.00	85.98	47,19	49,13	0	96,31	57,86	60,42	0	118,28
Mg	1.83	1.88	0.00	3.70	3.20	3.25	0.00	6.46	5.27	5.24	0.00	10.50	6.29	6.25	0.00	12.54	7,11	6,94	0	14,05	8,72	8,53	0	17,25
Fe	0.05	1.63	0.00	1.69	0.09	2.83	0.00	2.92	0.15	4.56	0.00	4.72	0.18	5.44	0.00	5.63	0,21	6,04	0	6,25	0,25	7,43	0	7,69
Mn	2.06	4.06	0.00	6.12	3.61	7.05	0.00	10.66	5.94	11.36	0.00	17.29	7.09	13.55	0.00	20.64	8,02	15,04	0	23,06	9,83	18,50	0	28,33
Na	0.83	0.03	0.00	0.86	1.46	0.05	0.00	1.51	2.39	0.08	0.00	2.48	2.86	0.10	0.00	2.96	3,23	0,11	0	3,34	3,96	0,14	0	4,10
S	7.47	0.39	0.00	7.86	13.11	0.68	0.00	13.79	19.15	0.84	0.00	19.99	22.30	0.91	0.00	23.20	25,21	1,01	0	26,22	30,91	1,24	0	32,15
Zn	0.17	0.15	0.00	0.32	0.29	0.26	0.00	0.55	0.48	0.42	0.00	0.90	0.57	0.50	0.00	1.08	0,65	0,56	0	1,21	0,79	0,69	0	1,48
Cu	0.13	0.02	0.00	0.15	0.22	0.03	0.00	0.26	0.37	0.05	0.00	0.42	0.44	0.06	0.00	0.50	0,50	0,07	0	0,57	0,61	0,09	0	0,70
B	0.02	0.03	0.00	0.05	0.03	0.05	0.00	0.08	0.05	0.08	0.00	0.13	0.06	0.10	0.00	0.16	0,06	0,11	0	0,18	0,08	0,14	0	0,22
	Paprastoji pušis																							
Masė	16,28	3,15	0,00	19,42	25,00	4,89	0,00	29,89	27,87	5,46	0,00	33,33	30,04	5,90	0,00	35,94	27,74	5,43	0	33,17	27,88	5,46	0	33,35
N	9,60	16,11	0,00	25,71	14,75	25,04	0,00	39,79	16,44	27,97	0,00	44,41	17,72	30,21	0,00	47,94	16,36	27,80	0	44,17	16,45	27,97	0	44,42
P	0,49	1,76	0,00	2,25	0,75	2,74	0,00	3,49	0,84	3,06	0,00	3,90	0,90	3,30	0,00	4,21	0,83	3,04	0	3,87	0,84	3,06	0	3,90
K	3,91	7,33	0,00	11,24	6,00	11,40	0,00	17,40	6,69	12,73	0,00	19,42	7,21	13,75	0,00	20,96	6,66	12,65	0	19,31	6,69	12,73	0	19,42
Ca	7,81	7,87	0,00	15,68	12,00	12,23	0,00	24,23	13,38	13,66	0,00	27,03	14,42	14,75	0,00	29,17	13,31	13,58	0	26,89	13,38	13,66	0	27,04
Mg	2,44	1,89	0,00	4,33	3,75	2,93	0,00	6,68	4,18	3,28	0,00	7,46	4,51	3,54	0,00	8,05	4,16	3,26	0	7,42	4,18	3,28	0	7,46
Fe	0,04	0,19	0,00	0,23	0,06	0,29	0,00	0,36	0,07	0,33	0,00	0,40	0,08	0,35	0,00	0,43	0,07	0,33	0	0,40	0,07	0,33	0	0,40
Mn	0,77	2,78	0,00	3,54	1,17	4,32	0,00	5,49	1,31	4,82	0,00	6,13	1,41	5,21	0,00	6,62	1,30	4,79	0	6,10	1,31	4,82	0	6,13
Na	0,81	0,03	0,00	0,85	1,25	0,05	0,00	1,30	1,39	0,05	0,00	1,45	1,50	0,06	0,00	1,56	1,39	0,05	0	1,44	1,39	0,05	0	1,45
S	7,32	0,41	0,00	7,73	11,25	0,64	0,00	11,88	11,15	0,55	0,00	11,69	11,71	0,53	0,00	12,25	10,82	0,49	0	11,31	10,87	0,49	0	11,37
Zn	0,08	0,06	0,00	0,14	0,12	0,10	0,00	0,22	0,14	0,11	0,00	0,25	0,15	0,12	0,00	0,27	0,14	0,11	0	0,25	0,14	0,11	0	0,25
Cu	0,02	0,01	0,00	0,03	0,02	0,02	0,00	0,05	0,03	0,02	0,00	0,05	0,03	0,03	0,00	0,06	0,03	0,02	0	0,05	0,03	0,02	0	0,05
B	0,02	0,03	0,00	0,05	0,02	0,05	0,00	0,07	0,03	0,05	0,00	0,08	0,03	0,06	0,00	0,09	0,03	0,05	0	0,08	0,03	0,05	0	0,08

2.7 lentelės tęsinys.

	1993				1999				2010				2015				2020				2025			
Rodiklis	Stiebas	Šakos	Spygliai	Iš viso	Stiebas	Spygliai	Iš viso	Iš viso	Stiebas	Šakos	Spygliai	Iš viso	Stiebas	Šakos	Spygliai	Iš viso	Stiebas	Šakos	Spygliai	Iš viso	Stiebas	Šakos	Spygliai	Iš viso
	Lapuočiai																							
Masė	3.21	0.50	0.00	3.71	4,73	0,70	0,00	5,43	7,97	1,19	0,00	9,17	12,95	2,02	0,00	14,97	12,72	1,95	0	14,67	13,79	2,09	0	15,88
N	3.34	2.47	0.00	5.81	4,92	3,51	0,00	8,42	8,29	5,94	0,00	14,24	13,47	10,08	0,00	23,55	13,23	9,69	0	22,92	14,34	10,39	0	24,73
P	0.19	0.19	0.00	0.39	0,28	0,27	0,00	0,56	0,48	0,47	0,00	0,94	0,78	0,79	0,00	1,57	0,76	0,76	0	1,52	0,83	0,81	0	1,64
K	0.87	0.49	0.00	1.36	1,28	0,70	0,00	1,97	2,15	1,18	0,00	3,33	3,50	2,00	0,00	5,50	3,44	1,93	0	5,36	3,72	2,07	0	5,79
Ca	1.74	1.79	0.00	3.52	2,55	2,54	0,00	5,10	4,31	4,31	0,00	8,61	6,99	7,30	0,00	14,30	6,87	7,02	0	13,89	7,45	7,54	0	14,98
Mg	0.48	0.28	0.00	0.76	0,71	0,40	0,00	1,11	1,20	0,68	0,00	1,88	1,94	1,15	0,00	3,10	1,91	1,11	0	3,02	2,07	1,19	0	3,26
Fe	0.01	0.01	0.00	0.03	0,02	0,02	0,00	0,04	0,03	0,03	0,00	0,07	0,05	0,06	0,00	0,11	0,05	0,06	0	0,11	0,06	0,06	0	0,12
Mn	0.22	0.11	0.00	0.33	0,32	0,16	0,00	0,48	0,54	0,27	0,00	0,82	0,88	0,47	0,00	1,35	0,87	0,45	0	1,31	0,94	0,48	0	1,42
Na	0.16	0.00	0.00	0.17	0,24	0,01	0,00	0,24	0,40	0,01	0,00	0,41	0,65	0,02	0,00	0,67	0,64	0,02	0	0,66	0,69	0,02	0	0,71
S	1.45	0.06	0.00	1.51	2,13	0,09	0,00	2,22	3,19	0,12	0,00	3,31	5,05	0,18	0,00	5,23	4,96	0,18	0	5,14	5,38	0,19	0	5,57
Zn	0.03	0.34	0.00	0.37	0,05	0,49	0,00	0,53	0,08	0,82	0,00	0,90	0,13	1,40	0,00	1,53	0,13	1,34	0	1,47	0,14	1,44	0	1,58
Cu	0.00	0.00	0.00	0.01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,02	0,01	0,01	0,00	0,03	0,01	0,01	0	0,03	0,01	0,01	0	0,03
B	0.00	0.00	0.00	0.01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,02	0,01	0,02	0,00	0,03	0,01	0,02	0	0,03	0,01	0,02	0	0,03
	Iš viso Aukštaitijos KMS 1 ha teritorijoje																							
Masė	36,09	6,67	0,00	42,76	58,86	10,84	0,00	69,69	83,71	15,11	0,00	98,81	100,2	18,00	0,00	118,16	105,1	18,57	0	123,67	120,9	21,31	0	142,25
N	24,90	36,12	0,00	61,02	40,64	58,96	0,00	99,60	59,20	82,92	0,00	142,12	72,35	98,75	0,00	171,10	76,14	102,4	0	178,54	87,86	118,2	0	206,05
P	1,51	3,86	0,00	5,37	2,49	6,32	0,00	8,81	3,71	8,85	0,00	12,56	4,54	10,44	0,00	14,98	4,83	10,85	0	15,68	5,63	12,54	0	18,17
K	9,09	14,72	0,00	23,81	14,85	24,05	0,00	38,90	21,29	33,17	0,00	54,46	25,57	38,73	0,00	64,30	26,90	40,09	0	66,99	31,02	46,17	0	77,20
Ca	21,67	22,93	0,00	44,60	35,82	37,79	0,00	73,60	52,62	55,06	0,00	107,68	63,15	66,30	0,00	129,45	67,37	69,73	0	137,10	78,69	81,61	0	160,30
Mg	4,75	4,05	0,00	8,80	7,66	6,59	0,00	14,25	10,64	9,20	0,00	19,84	12,74	10,94	0,00	23,68	13,18	11,31	0	24,48	14,97	13,00	0	27,97
Fe	0,11	1,84	0,00	1,94	0,17	3,15	0,00	3,32	0,25	4,93	0,00	5,18	0,31	5,86	0,00	6,17	0,33	6,43	0	6,75	0,38	7,82	0	8,20
Mn	3,04	6,96	0,00	10,00	5,11	11,53	0,00	16,64	7,79	16,45	0,00	24,24	9,38	19,22	0,00	28,60	10,18	20,28	0	30,47	12,08	23,80	0	35,88
Na	1,80	0,07	0,00	1,87	2,94	0,11	0,00	3,05	4,19	0,15	0,00	4,34	5,01	0,18	0,00	5,19	5,25	0,19	0	5,44	6,05	0,21	0	6,26
S	16,24	0,87	0,00	17,11	26,49	1,41	0,00	27,89	33,48	1,51	0,00	34,99	39,06	1,62	0,00	40,68	40,99	1,67	0	42,66	47,16	1,92	0	49,08
Zn	0,28	0,56	0,00	0,84	0,46	0,85	0,00	1,31	0,70	1,36	0,00	2,05	0,85	2,02	0,00	2,87	0,91	2,01	0	2,92	1,07	2,24	0	3,31
Cu	0,15	0,04	0,00	0,18	0,25	0,06	0,00	0,31	0,40	0,09	0,00	0,49	0,48	0,10	0,00	0,59	0,54	0,11	0	0,65	0,65	0,13	0	0,78
B	0,04	0,07	0,00	0,10	0,06	0,11	0,00	0,17	0,08	0,15	0,00	0,23	0,10	0,18	0,00	0,28	0,11	0,19	0	0,29	0,12	0,21	0	0,33

2.3.3. Žemaitijos KMS baseino medynų struktūros, tūrio ir jo prieaugio kaita 1993-2025 m. laikotarpiu

Medžių bioelementų bei medynų biomasės kaitos įvertinimui panaudoti 1994, 1999, 2003, 2010, 2015, 2020 ir 2025 metų apskaitų duomenys, kurie gauti vykdant pilna medynų inventorizaciją Žemaitijos KMS baseine 37 pastoviuose tyrimo ploteliuose.

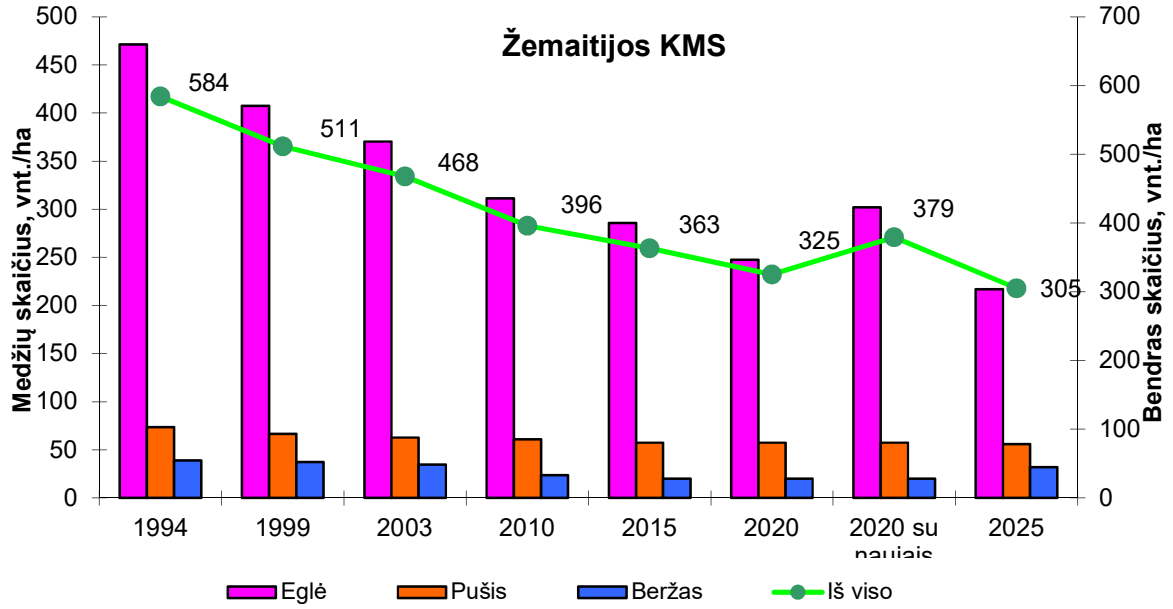
Nustatyta, kad iki 2015 m. laikotarpio 1 ha plote gyvų medžių vidutiniškai sumažėjo nuo 605 iki 372 (38,5% arba 1,8% per metus). Paprastosios pušies ir eglės medžių dinamika rodo (50 pav.), kad pušies iškritimas siekė 22.9% (1,1% per m.). Dėl žievėgraužio tipografo ir nepalankių klimatinių veiksnių (vėjalaužų ir vėjavartų) eglės žuvimo intensyvumas pasiekė 39,2% (1.9% per m.). Beržų iškritimas buvo intensyviausias (kaip ir Aukštaitijos KMS) ir sudarė 48,7% arba 2,3 % per metus.

Tokiu būdu eglių atsparumas nepalankiems aplinkos veiksniams buvo aukščiausias Žemaitijos KMS, pušų – Aukštaitijos KMS, o beržų žuvimo intensyvumas, kuris siekė beveik 50% visų tirtų beržų buvo vienodas abiejose stotyse. Tai gali būt pateikiamas kaip įrodymas, kad beržų atsparumas intensyviai besikeičiančioms aplinkos sąlygomis yra, skirtingai negu manytą, pakankamai ribotas.

Iki 2020 m. laikotarpį Žemaitijos KMS tirtų medžių skaičius sumažėjo nuo 584 iki 325 vnt/ha ir tai sudarė beveik 45 % visų stebėtų medžių. Intensyviausiai sumažėjo eglių, kiek mažiau beržų ir mažiausiai pušų.

Žuvusių medynų vietoje susiformavo ir atsikūrė jaunuolynai kaip ir Aukštaitijos KMS. Čia augantiems medžiams pasiekus kamieno skersmenį didesnį negu 10 cm, buvo išskirti tyrimo ploteliai telesniam medynų vystymosi ypatumams tirti. Tokiuose žuvusiuose medynuose buvo atkurti tyrimai, papildomai į apskaitą įtraukiant 60 medžių. Tokiu būdu 2020 m. tirtų medžių skaičius padidėjo vidutiniškai beveik 55 vnt./ha ir tik eglių. Beržų papildomai į apskaitą nebuvo įtraukta. Paprastoji eglė buvo ta pagrindinė medžių rūšis, kuri labai gerai atsikūrė žuvusioje nuo eglinio tipografo pažeidimų eglynų vietoje.

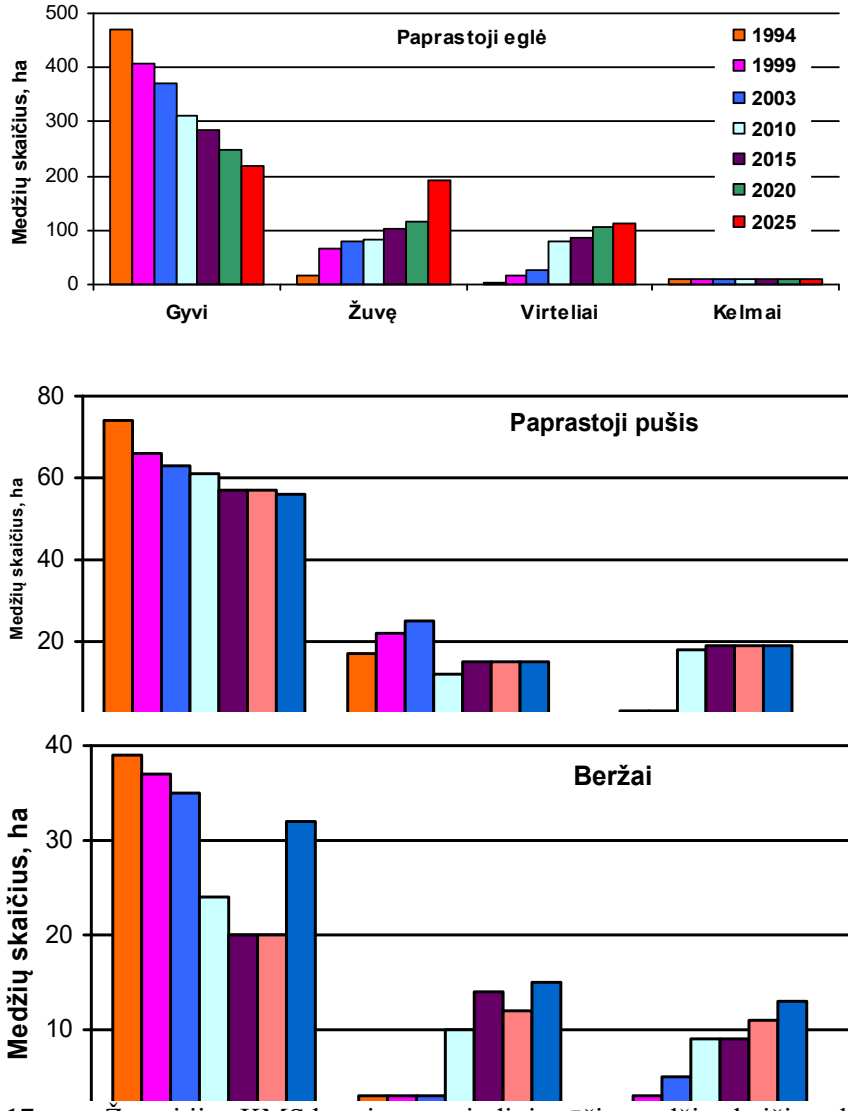
Per paskutinįjį 2021-2025 m. laikotarpį stebimų medžių skaičius sumažėjo nuo 379 iki 305 vnt./ha. ***ir tai sudarė beveik 20 % visų stebėtų medžių. Intensyviausiai sumažėjo eglių, ypač 2023 m., kiek mažiau beržų ir mažiausiai pušų.***



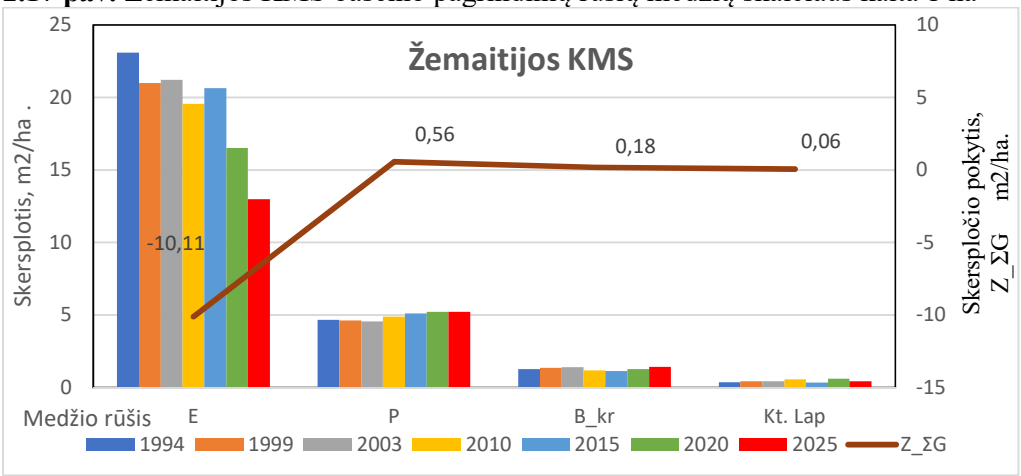
2.16 pav. Gyvų medžių skaičiaus 1 ha kaita Žemaitijos KMS 1994-2025 m. laikotarpiu

Tiriant medžių skersploščių sumos pokytį bei išlikusių gyvų medžių skersploščių sumos pokytį (2.18 pav.), nustatyta, kad kaip ir Aukštaitijos KMS baseine, čia augančių eglių kamienų skersploščių pakytis yra neigiamas, t.y medžių atkritimas yra intensyvesnis negu jų prieaugis. ***Per 31 m. laikotarpį Žemaitijos KMS eglių kamienų skersploščių suma sumažėjo nuo 23,5 iki 13 m^2/ha arba apie 0,34 m^2/ha per metus. Pušų kamienų skersploščių sumos pokytis buvo teigiamas ir siekė apie 0,6 m^2/ha, o beržų praktiškai išliko nepakitęs.***

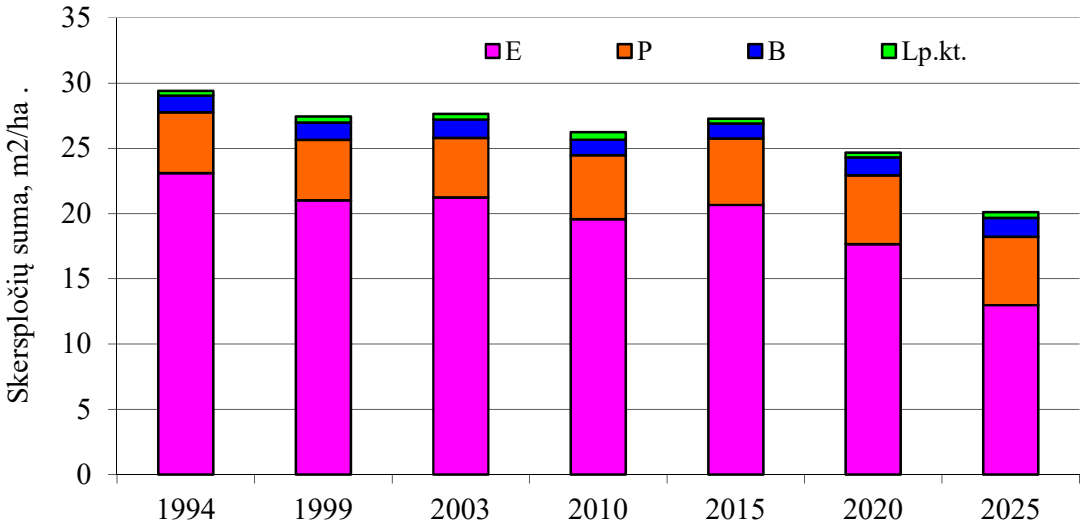
Intensyviausiu prieaugiu, kaip ir Aukštaitijos KMS, pasižymėjo išlikusios eglės. Šios rūšies ***medžių vidutinis skersploščių sumos prieaugis per tiriamąjį laikotarpį sudarė net apie 7 m^2/ha arba apie 0,33 m^2/ha (1,62 %) skersploščių sumos per metus. Pušų skersploščių sumos prieaugis per tiriamąjį laikotarpį sudarė apie 1,2 m^2/ha arba apie 0,06 m^2/ha (1,284 %) skersploščių sumos per metus. Beržų prieaugis buvo mažiausias ir sudarė tik apie 0,6 m^2/ha arba 0,03 m^2/ha per m.***



2.17 pav. Žemaitijos KMS baseino pagrindinių rūšių medžių skaičiaus kaita 1 ha

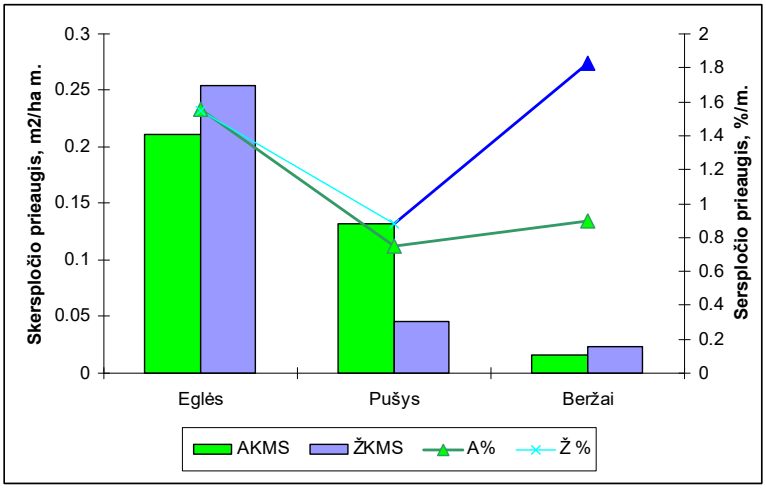


2.18 pav. Žemaitijos KMS baseino pagrindinių rūšių medžių skersplotis ir jų skersploščių pokytis 1 ha (Z_ΣG) 1994-2025 m. laikotarpiu



2.19 pav. Žemaitijos KMS baseine augančių medžių skerspločių sumos kaita 1993-2020 m.

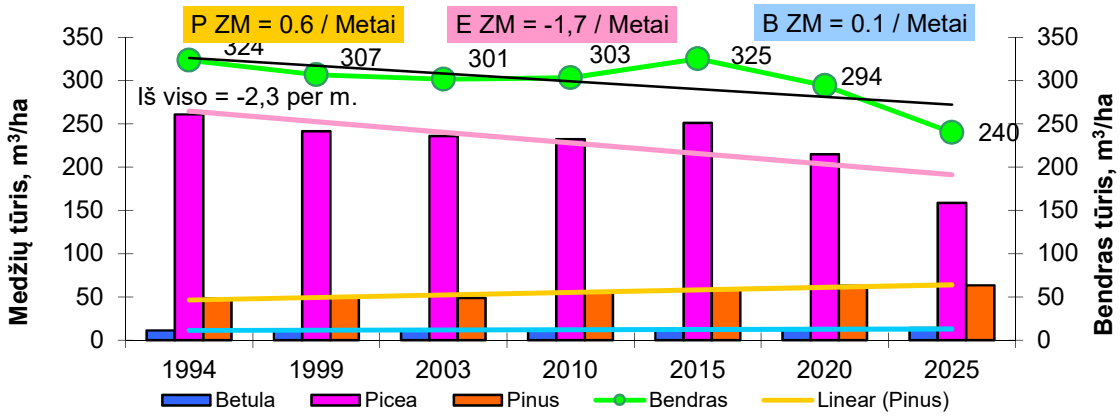
Palyginus tirtų medynų išlikusių gyvų medžių metinius skerspločių prieaugius (2.20 pav.) tarp stočių nustatyta, kad eglių metiniai skerspločių sumos prieaugiai kiek didesni yra Žemaitijos KMS baseine negu Aukštaitijos KMS. Pušų prieaugis yra didesnis Aukštaitijos KMS ir maždaug vienodu prieaugiu pasižymi beržai***. Palyginus išlikusių gyvų medžių skerspločių prieaugį nustatyta, kad Aukštaitijos KMS baseine augančių medžių skerspločių prieaugis sudaro 0,36 m²/ha per metus o Žemaitijos KMS – 0,32 m²/ha per metus.*** Tai paaiškinama tuo, kad Aukštaitijos KMS baseine vyrauja brandūs ir prebrendę pušynai su eglės priemaiša, o Žemaitijos KMS baseine – bręstantys ir brandūs eglynai, kurie ir pasižymi didesniu produktyvumu.



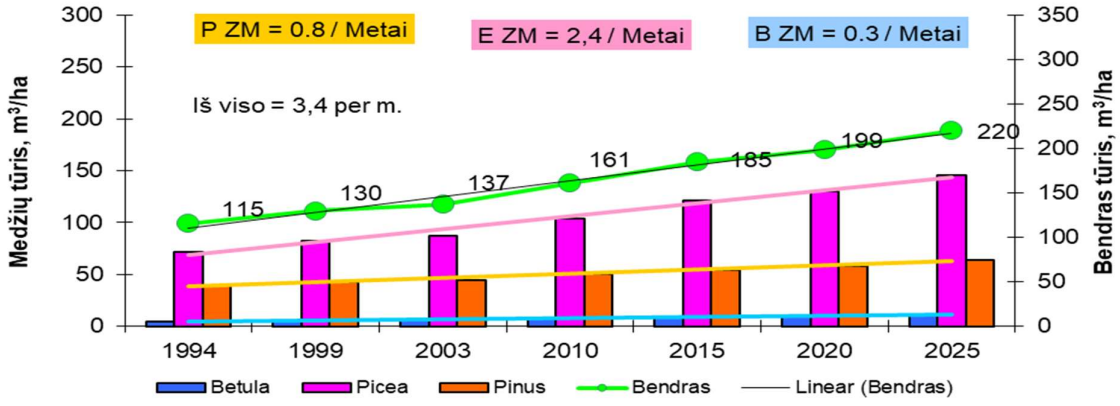
2.20 pav. Išlikusių gyvų medžių metiniai skerspločių prieaugiai Aukštaitijos ir Žemaitijos KMS baseinų 1 ha plote.

Apibendrinus skersploščių sumos tyrimo rezultatus nustatyta, kad Žemaitijos KMS 1 ha augančių medžių skersploščių suma 1994 m. pagal rūšį buvo pasiskirsčiusi taip: pušis – 4,6, eglė – 22, beržai bei kitos rūšys apie – apie 1,8 m^2/ha. 2025 m. skersploščių suma tirtų medžių rūšių buvo: pušis – 5,2 m^2/ha, eglė – 13 m^2/ha, beržai bei kitos rūšys apie – apie 1,4 m^2/ha (2.19 pav.). ***Tokiu būdu Žemaitijos KMS teritorijoje augančių medynų skersploščių suma per tiriamąjį 31 m. laikotarpį vidutiniškai pakito nuo 29,4 m^2/ha iki 20,1 m^2/ha, t.y. sumažėjo 9,3 m^2/ha arba 32 %, o išlikusių gyvų medžių skersploščių prieaugis sudarė 8,8 (nuo 18,3 iki 27,1 m^2/ha) arba 32,6 % (1,55 %/m.).***

Tirtų medžių tūrio ir jo pokyčio analizė parodė, kad Žemaitijos KMS baseine augančių medžių tūris per 31 m. laikotarpį sumažėjo nuo 323 m^3/ha iki 240 m^3/ha, t.y. -83,6 m^3/ha arba -2,7 m^3/ha per metus. Didžiausiu tūrio sumažėjimo intensyvumu pasižymėjo eglės. Jų bendras tūris sumažėjo -102 m^3/ha arba 3,3 m^3/ha per metus. Beržų tūrio pokytis buvo artimas 1 m^3/ha, o pušų tūrio pokytis buvo teigiamas ir siekė 15 m^3/ha arba 0,5 m^3/ha per metus.



2.21 pav. Vyraujančių rūšių gyvų medžių tūrio pokytis Žemaitijos KMS baseine 1994 – 2025 m.



2.22 pav. Vyraujančių rūšių 2020 m. išlikusių gyvų medžių ir jų suminis (iš viso) tūris Žemaitijos KMS baseine 1994 – 2020 m. laikotarpiu

Norint įvertinti, kurių medžių prieaugis buvo intensyviausias, atskirai panagrinėtas išlikusių gyvų 2025 m. medžių tūrio prieaugis, t.y. nagrinėjant tūrio prieaugį buvo eliminuotas žuvusių medžių poveikis tūrio kaitai.

Didžiausią tūrio prieaugį demonstravo per visą tiriamąjį laikotarpį išlikusios gyvos eglės. ***Per 31 m. laikotarpį tik išlikusių gyvų eglių tūris padidėjo po 2,4 m^3/ha per metus. Kiek mažesniu tūrio prieaugiu pasižymėjo pušys, po 0,8 m^3/ha per metus. Beržų tūrio prieaugis po 0,3 m^3/ha per metus. Tokiu būdu Žemaitijos KMS baseino miškų išlikusių gyvų medžių tūrio prieaugis sudarė po 3,5 m^3/ha per metus.***

2.3.4. Žemaitijos medynų biomasė ir ir pagrindinių bioelementų kiekiai

Apskaičiavus augančių medžių stiebų, šakų spyglių biomasę, nustatyta, kad Žemaitijos KMS 1 ha baseino plote augančių medynų biomasė nuo 1993 iki 1999 metų dėl medžių iškritimo sumažėjo vidutiniškai nuo 196t iki 185t/ha, t.y. apie 10 t/ha arba 5% biomasės. Per antrąjį tyrimų laikotarpį, t.y. nuo 1999 iki 2003 m. biomasė nežymiai dar padidėjo iki 187t/ha, tačiau jau per kitą laikotarpį vėl sumažėjo iki 179 t/ha. Paskutiniuoju 2010-2015 m. laikotarpiu medžių iškritimo intensyvumas buvo vienas iš mažesnių, dėl ko užregistruotas bedros gyvosios biomasės padidėjimas iki 189 t/ha.

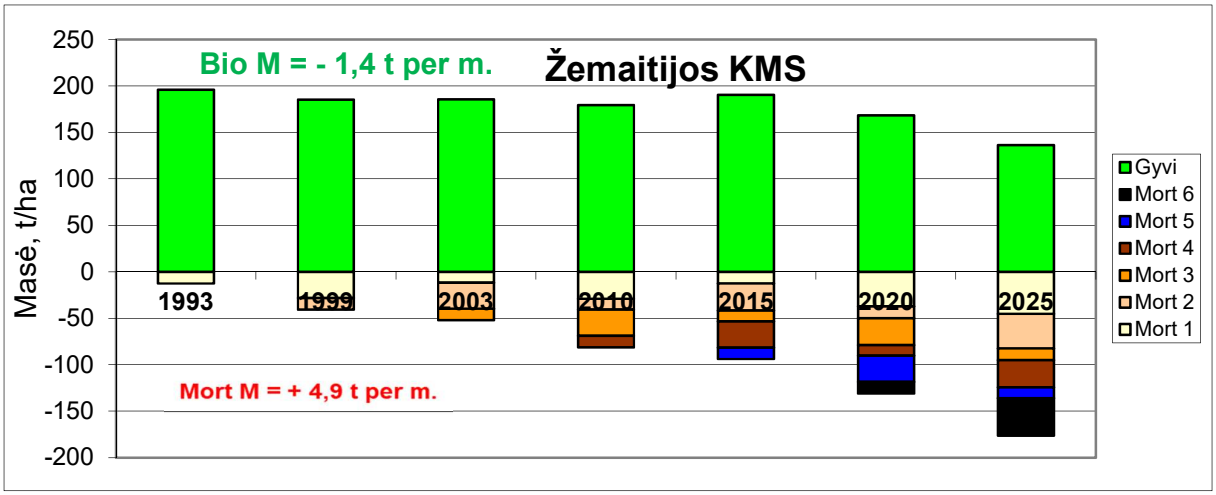
Išskirtiniai 2020 m. rezultatai. Per 5 m. laikotarpį gyvų medžių biomasė sumažėjo nuo 190 iki 169 t/ha, t.y 21 t/ha arba daugiau nei 10 %. Toks intensyvus sumažėjimas buvo sąlygotas žievėgraužio tipografo pažeidimų, dėl ko paskutiniuoju laikotarpiu net 36 t/ha padidėjo negyvos medienos kiekis, pagrinde eglių medienos biomase. Toks gyvosios biomasės svyravimas yra žievėgraužio tipografo ir nepalankių klimatinių veiksnių poveikio rezultatas.

Dar intensyvesniu masės sumažėjimu pasižymėjo paskutinysis 2021-2025 m. laikotarpis. Tik per šį laikotarpį medynų tūris sumažėjo 32 m2/ha arba dar beveik 20%. Tai vėl gi įvyko dėl intensyvių kenkėjų pažžeidimų 2023 m.

Paskirsčius medieną pagal jos suirimo laipsnį nustatyta, kad 2020 m. švieži sausuoliai sudarė Mort 1 36,5 t/ha, Mort 2 – 12,6 t/ha, Mort 3 29,1 t/ha, Mort 4 11,5 t/ha, Mort 5 28,1 t/ha ir visiškai, be likusių žymių suirę Mort 6 12,5 t/ha.

2025 m. švieži sausuoliai sudarė Mort 1 45,3 t/ha, Mort 2 – 37 t/ha, Mort 3 12,6 t/ha, Mort 4 29,1 t/ha, Mort 5 11,5 t/ha ir visiškai, be likusių žymių suirę Mort 6 40,6 t/ha.

Kai kenkėjų poveikis eglynams minimalūs, medynų biomasės augimas tampa reikšmingų. Tiriant tik išlikusių gyvų iki 2025 m. medžių biomasės prieaugį nustatytas 67,8 t/ha prieaugis, arba 2,6 t/ha (1,75%) prieaugis per metus.



2.23 pav. Gyvos ir negyvos organinės masės balansas Žemaitijos KMS baseine 1993-2020 m.

Pagrindinių medynų biomasės bei bioelementų tyrimo rezultatai parodė (1 lentelė), kad Žemaitijos KMS teritorijoje augančių medynų biomasė 1994 m. sudarė 184 t/ha, kurioje pagrindinių bioelementų kiekiai buvo tokie: azotas 339,6 kg/ha, fosforas 33,7 kg/ha, kalis 126,3 kg/ha, kalcis 239,5 kg/ha. Priklausomai nuo bioelemento, jų kiekis per 6 metų laikotarpį sumažėjo panašiai kaip ir Aukštaitijos KMS. 2010 m. medynų biomasė buvo 178,5 t/ha, kurioje pagrindinių bioelementų kiekiai buvo tokie: azotas 327,2 kg/ha, fosforas 32,7 kg/ha, kalis 122,1 kg/ha, kalcis 230,0 kg/ha, mangano 51,9 kg/ha, magnio 39,3 kg/ha ir sieros 11 kg/ha.

2015 m. medynų biomasė sudarė 190 t/ha, kurioje pagrindinių bioelementų kiekiai buvo tokie: azotas 347 kg/ha, fosforas 34,6 kg/ha, kalis 129,6 kg/ha, kalcis 245,7 kg/ha, mangano 51,9 kg/ha, magnio 55,8 kg/ha. Per 5rių metų laikotarpį 2010-2015 bioelementų kiekis Žemaitijos KMS sumažėjo apie 3-4%

2020 m. gyvų medžių biomasė sumažėjo ir sudarė 169 t/ha. kurioje pagrindinių bioelementų kiekiai buvo tokie: azotas 312 kg/ha, fosforas 29,6 kg/ha, kalis 117,9 kg/ha, kalcis 235,3 kg/ha, mangano 55,3 kg/ha, magnio 36,1 kg/ha. Per 5rių metų laikotarpį 2015-2020 bioelementų kiekis Žemaitijos KMS sumažėjo apie 10%

2025 m. gyvų medžių biomasė sumažėjo nuo 169 iki 136 t/ha, arba 33 t/ha., kurioje pagrindinių bioelementų kiekiai buvo tokie: azotas 215 kg/ha, fosforas 24 kg/ha, kalis 95 kg/ha, kalcis 190 kg/ha, mangano 44,5 kg/ha, magnio 29 kg/ha. Per 5rių metų laikotarpį 2020-2025 bioelementų kiekis Žemaitijos KMS sumažėjo virš 10%.

2.8 lentelė. Žemaitijos KMS baseino 1 ha augančių medžių atskirų frakcijų biomasė ir bioelementų kiekiai 1994 - 2025 m.

	1994				1999				2010				2015				2020				2025			
Rodiklis	Stiebas	Šakos	Spygliai	Iš viso	Stiebas	Spygliai	Iš viso	Iš viso	Stiebas	Šakos	Spygliai	Iš viso	Stiebas	Šakos	Spygliai	Iš viso	Stiebas	Šakos	Spygliai	Iš viso	Stiebas	Šakos	Spygliai	Iš viso
	Paprastoji eglė																							
Masė	131,9	23,46	5,41	160,76	120,9	21,64	4,77	147,34	114,5	20,48	4,45	139,43	123.3	22.50	4.62	150.45	104,57	18,92	3,97	127,46	76,56	13,77	2,97	93,30
N	94,96	136,1	70,08	301,13	87,07	125,5	61,83	274,39	82,44	118,8	57,61	258,83	88.80	130.5	59.82	279.10	75,29	109,7	51,38	236,40	55,12	79,85	38,48	173,45
P	6,59	14,78	7,36	28,74	6,05	13,63	6,49	26,17	5,73	12,90	6,05	24,68	6.17	14.17	6.28	26.62	5,23	11,92	5,40	22,54	3,83	8,67	4,04	16,54
K	34,29	53,50	25,87	113,66	31,44	49,33	22,82	103,60	29,77	46,69	21,26	97,73	32.07	51.30	22.08	105.44	27,19	43,13	18,96	89,29	19,90	31,39	14,20	65,50
Ca	96,28	103,0	25,06	224,34	88,28	94,98	22,11	205,37	83,59	89,91	20,60	194,09	90.03	98.77	21.39	210.18	76,34	83,05	18,37	177,76	55,89	60,44	13,76	130,08
Mg	14,51	14,55	5,52	34,58	13,30	13,41	4,87	31,59	12,60	12,70	4,54	29,83	13.57	13.95	4.71	32.23	11,50	11,73	4,05	27,28	8,42	8,54	3,03	19,99
Fe	0,42	12,67	0,33	13,42	0,39	11,68	0,29	12,36	0,37	11,06	0,27	11,69	0.39	12.15	0.28	12.82	0,33	10,22	0,24	10,79	0,24	7,43	0,18	7,86
Mn	16,35	31,54	4,54	52,42	15,00	29,08	4,00	48,08	14,20	27,53	3,73	45,45	15.29	30.24	3.87	49.40	12,97	25,43	3,32	41,72	9,49	18,50	2,49	30,49
Na	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	6.17	0.22	0.09	6.48	5,23	0,19	0,08	5,50	3,83	0,14	0,06	4,02
S	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	48.10	2.02	0.18	50.31	40,78	1,70	0,16	42,64	29,86	1,24	0,12	31,22
Zn	1,32	1,17	0,27	2,76	1,21	1,08	0,24	2,53	1,15	1,02	0,22	2,39	1.23	1.12	0.23	2.59	1,05	0,95	0,20	2,19	0,77	0,69	0,15	1,60
Cu	1,02	0,15	0,04	1,21	0,93	0,14	0,04	1,10	0,88	0,13	0,03	1,05	0.95	0.14	0.04	1.13	0,81	0,12	0,03	0,96	0,59	0,09	0,02	0,70
B	0,00	0,23	0,05	0,29	0,00	0,22	0,05	0,26	0,00	0,20	0,04	0,25	0.12	0.22	0.05	0.39	0,10	0,19	0,04	0,33	0,08	0,14	0,03	0,24
	Paprastoji pušis																							
Masė	20,54	3,87	0,85	25,26	20,90	3,96	0,88	25,73	22,93	4,39	0,93	28,24	22.99	4.41	0.92	28.33	25,25	4,86	1,00	31,12	25,64	4,96	0,97	31,57
N	12,12	19,80	11,68	43,60	12,33	20,27	11,97	44,57	13,53	22,46	12,66	48,64	13.57	22.60	12.61	48.78	18,18	28,20	13,01	59,40	18,46	28,79	12,57	59,82
P	0,62	2,17	3,34	6,12	0,63	2,22	3,42	6,27	0,69	2,46	3,62	6,76	0.69	2.47	3.61	6.77	1,26	3,06	1,37	5,69	1,28	3,13	1,32	5,73
K	4,93	9,01	3,45	17,39	5,02	9,23	3,54	17,78	5,50	10,22	3,74	19,46	5.52	10.29	3.73	19.53	6,57	11,09	4,80	22,46	6,67	11,32	4,64	22,62
Ca	9,86	9,67	2,58	22,11	10,03	9,90	2,64	22,57	11,01	10,97	2,80	24,77	11.04	11.04	2.79	24.86	18,43	21,35	4,65	44,43	18,71	21,79	4,49	45,00
Mg	3,08	2,32	0,77	6,17	3,13	2,38	0,79	6,30	3,44	2,63	0,83	6,90	3.45	2.65	0.83	6.93	2,78	3,01	1,03	6,82	2,82	3,08	0,99	6,89
Fe	0,05	0,23	0,05	0,33	0,05	0,24	0,05	0,34	0,06	0,26	0,05	0,37	0.06	0.26	0.05	0.37	0,08	2,63	0,06	2,77	0,08	2,68	0,06	2,82
Mn	0,97	3,41	0,36	4,74	0,98	3,50	0,37	4,84	1,08	3,87	0,39	5,34	1.08	3.90	0.38	5.36	3,13	6,54	0,84	10,51	3,18	6,67	0,81	10,66
Na	1,03	0,04	0,01	1,07	1,04	0,04	0,01	1,09	1,15	0,04	0,01	1,20	1.15	0.04	0.01	1.20	1,26	0,05	0,02	1,33	1,28	0,05	0,02	1,35
S	9,24	0,50	0,07	9,81	9,40	0,51	0,07	9,99	10,32	0,57	0,07	10,96	8.97	0.40	0.04	9.40	9,85	0,44	0,04	10,33	10,00	0,45	0,04	10,48
Zn	0,10	0,08	0,03	0,21	0,10	0,08	0,03	0,21	0,11	0,09	0,03	0,23	0.11	0.09	0.03	0.23	0,25	0,24	0,05	0,55	0,26	0,25	0,05	0,55
Cu	0,02	0,02	0,00	0,04	0,02	0,02	0,00	0,04	0,02	0,02	0,00	0,05	0.02	0.02	0.00	0.05	0,19	0,03	0,01	0,23	0,20	0,03	0,01	0,24
B	0.02	0.03	0.00	0.05	0.02	0.05	0.00	0.07	0.03	0.05	0.00	0.08	0.02	0.04	0.01	0.08	0,03	0,05	0,01	0,08	0,03	0,05	0,01	0,08

2.8 lentelės tęsinys.

	1993				1999				2010				2015				2020				2025			
Rodiklis	Stiebas	Šakos	Spygliai	Iš viso	Stiebas	Spygliai	Iš viso	Iš viso	Stiebas	Šakos	Spygliai	Iš viso	Stiebas	Šakos	Spygliai	Iš viso	Stiebas	Šakos	Spygliai	Iš viso	Stiebas	Šakos	Spygliai	Iš viso
	Lapuočiai																							
Masė	9,07	1,22	0,15	10,44	10,01	1,38	0,16	11,55	9,43	1,35	0,14	10,91	8.89	1.32	0.14	10.35	9,18	1,38	0,20	10,76	9,85	1,46	0,22	11,53
N	9,43	6,07	3,47	18,97	10,41	6,86	3,62	20,90	9,80	6,71	3,27	19,78	9.24	6.57	3.26	19.08	6,61	7,99	2,64	17,24	7,09	8,45	2,82	18,36
P	0,54	0,48	0,18	1,20	0,60	0,54	0,19	1,33	0,57	0,53	0,17	1,26	0.53	0.51	0.17	1.22	0,46	0,87	0,28	1,60	0,49	0,92	0,30	1,71
K	2,45	1,21	0,98	4,63	2,70	1,36	1,02	5,09	2,54	1,33	0,92	4,80	2.40	1.31	0.92	4.63	2,39	3,14	0,97	6,50	2,56	3,32	1,04	6,92
Ca	4,90	4,40	1,22	10,51	5,41	4,97	1,27	11,65	5,09	4,86	1,14	11,09	4.80	4.76	1.14	10.71	6,70	6,05	0,94	13,69	7,19	6,39	1,01	14,60
Mg	1,36	0,69	0,42	2,47	1,50	0,79	0,43	2,72	1,41	0,77	0,39	2,57	1.33	0.75	0.39	2.48	1,01	0,85	0,21	2,07	1,08	0,90	0,22	2,21
Fe	0,04	0,04	0,01	0,08	0,04	0,04	0,01	0,09	0,04	0,04	0,01	0,09	0.04	0.04	0.01	0.09	0,03	0,74	0,01	0,79	0,03	0,79	0,01	0,83
Mn	0,62	0,28	0,16	1,05	0,68	0,32	0,16	1,16	0,64	0,31	0,15	1,10	0.60	0.30	0.15	1.06	1,14	1,85	0,17	3,16	1,22	1,96	0,18	3,36
Na	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0.44	0.01	0.01	0.46	0,46	0,01	0,00	0,48	0,49	0,01	0,00	0,51
S	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3.47	0.12	0.01	3.59	3,58	0,12	0,01	3,71	3,84	0,13	0,01	3,98
Zn	0,09	0,84	0,01	0,94	0,10	0,95	0,01	1,06	0,09	0,93	0,01	1,03	0.09	0.91	0.01	1.01	0,09	0,07	0,01	0,17	0,10	0,07	0,01	0,18
Cu	0,01	0,01	0,00	0,02	0,01	0,01	0,00	0,02	0,01	0,01	0,00	0,02	0.01	0.01	0.00	0.02	0,07	0,01	0,00	0,08	0,08	0,01	0,00	0,09
B	0,00	0,01	0,00	0,02	0,00	0,01	0,00	0,02	0,00	0,01	0,00	0,02	0.01	0.01	0.00	0.02	0,01	0,01	0,00	0,02	0,01	0,01	0,00	0,03
	Iš viso Žemaitijos KMS 1 ha teritorijoje																							
Masė	161,5	28,55	6,42	196,5	151,8	26,97	5,81	184,6	146,9	26,21	5,52	178,6	155.2	28.23	5.68	189.13	139,0	25,16	5,18	169,34	112,0	20,19	4,16	136,39
N	116,5	162,0	85,24	363,71	109,8	152,6	77,42	339,86	105,8	147,9	73,53	327,25	111.6	159.7	75.70	346.96	100,1	145,9	67,03	313,03	80,67	117,1	53,87	251,63
P	7,75	17,42	10,89	36,06	7,27	16,39	10,11	33,77	6,98	15,88	9,84	32,70	7.39	17.16	10.06	34.61	6,95	15,85	7,04	29,84	5,60	12,72	5,66	23,98
K	41,67	63,72	30,30	135,68	39,16	59,92	27,38	126,46	37,82	58,25	25,92	121,99	39.98	62.89	26.73	129.60	36,14	57,36	24,74	118,25	29,13	46,03	19,88	95,04
Ca	111,0	117,1	28,85	256,96	103,7	109,9	26,02	239,59	99,68	105,7	24,54	229,95	105.9	114.6	25.32	245.75	101,5	110,5	23,96	235,89	81,79	88,62	19,26	189,68
Mg	18,95	17,56	6,71	43,22	17,94	16,58	6,09	40,61	17,45	16,10	5,76	39,31	18.35	17.35	5.93	41.63	15,29	15,60	5,28	36,17	12,33	12,52	4,24	29,08
Fe	0,51	12,94	0,38	13,83	0,48	11,96	0,35	12,79	0,46	11,36	0,33	12,15	0.49	12.45	0.34	13.28	0,44	13,59	0,31	14,34	0,36	10,90	0,25	11,51
Mn	17,94	35,23	5,05	58,22	16,66	32,89	4,53	54,08	15,92	31,71	4,26	51,89	16.98	34.44	4.40	55.82	17,24	33,81	4,34	55,39	13,89	27,13	3,49	44,51
Na	1,03	0,04	0,01	1,07	1,04	0,04	0,01	1,09	1,15	0,04	0,01	1,20	7.76	0.28	0.11	8.15	6,95	0,25	0,10	7,31	5,60	0,20	0,08	5,89
S	9,24	0,50	0,07	9,81	9,40	0,51	0,07	9,99	10,32	0,57	0,07	10,96	60.53	2.54	0.23	63.30	54,21	2,26	0,21	56,68	43,70	1,82	0,17	45,68
Zn	1,51	2,09	0,31	3,91	1,41	2,11	0,27	3,80	1,35	2,04	0,26	3,65	1.44	2.12	0.27	3.83	1,39	1,26	0,26	2,91	1,12	1,01	0,21	2,34
Cu	1,05	0,17	0,05	1,27	0,96	0,16	0,04	1,17	0,91	0,16	0,04	1,11	0.98	0.17	0.04	1.19	1,07	0,16	0,04	1,27	0,86	0,13	0,03	1,02
B	0,00	0,29	0,07	0,35	0,00	0,27	0,06	0,33	0,00	0,26	0,06	0,32	0.16	0.28	0.06	0.50	0,14	0,25	0,05	0,44	0,11	0,20	0,04	0,36

2.9 lentelė. Žemaitijos KMS baseino 1 ha žuvusių medžių atskirų frakcijų biomasė ir bioelementų kiekiai 1994 - 2025 m.

	1993				1999				2010				2015				2020				2025			
Rodiklis	Stiebas	Šakos	Spygliai	Iš viso	Stiebas	Spygliai	Iš viso	Iš viso	Stiebas	Šakos	Spygliai	Iš viso	Stiebas	Šakos	Spygliai	Iš viso	Stiebas	Šakos	Spygliai	Iš viso	Stiebas	Šakos	Spygliai	Iš viso
	Paprastoji eglė																							
Masė	8.21	1.42	0.00	9.63	30.37	5.34	0.00	35.72	69.02	12.46	0.00	81.48	69.02	12.46	0.00	81.48	99,11	18,14	0,00	117,26	135,7	24,85	0,00	160,12
N	5.91	8.24	0.00	14.15	21.87	31.00	0.00	52.87	49.70	72.24	0.00	121.94	49.70	72.24	0.00	121.94	71,36	105,2	0,00	176,59	97,39	144,2	0,00	241,55
P	0.41	0.89	0.00	1.30	1.52	3.37	0.00	4.89	3.45	7.85	0.00	11.30	3.45	7.85	0.00	11.30	4,96	11,43	0,00	16,39	6,76	15,66	0,00	22,42
K	2.13	3.24	0.00	5.37	7.90	12.19	0.00	20.08	17.95	28.40	0.00	46.34	17.95	28.40	0.00	46.34	25,77	41,37	0,00	67,14	35,17	56,67	0,00	91,84
Ca	5.99	6.23	0.00	12.23	22.17	23.46	0.00	45.63	50.39	54.68	0.00	105.07	50.39	54.68	0.00	105.07	72,35	79,65	0,00	152,00	98,74	109,1	0,00	207,86
Mg	0.90	0.88	0.00	1.78	3.34	3.31	0.00	6.65	7.59	7.72	0.00	15.31	7.59	7.72	0.00	15.31	10,90	11,25	0,00	22,15	14,88	15,41	0,00	30,29
Fe	0.03	0.77	0.00	0.79	0.10	2.89	0.00	2.98	0.22	6.73	0.00	6.95	0.22	6.73	0.00	6.95	0,32	9,80	0,00	10,11	0,43	13,42	0,00	13,85
Mn	1.02	1.91	0.00	2.93	3.77	7.18	0.00	10.95	8.56	16.74	0.00	25.30	8.56	16.74	0.00	25.30	12,29	24,38	0,00	36,67	16,77	33,40	0,00	50,18
Na	0.41	0.01	0.00	0.42	1.52	0.05	0.00	1.57	3.45	0.12	0.00	3.58	3.45	0.12	0.00	3.58	4,96	0,18	0,00	5,14	6,76	0,25	0,00	7,01
S	3.69	0.18	0.00	3.88	13.67	0.69	0.00	14.36	26.92	1.12	0.00	28.04	26.92	1.12	0.00	28.04	38,65	1,63	0,00	40,29	52,75	2,24	0,00	54,99
Zn	0.08	0.07	0.00	0.15	0.30	0.27	0.00	0.57	0.69	0.62	0.00	1.31	0.69	0.62	0.00	1.31	0,99	0,91	0,00	1,90	1,35	1,24	0,00	2,60
Cu	0.06	0.01	0.00	0.07	0.23	0.03	0.00	0.27	0.53	0.08	0.00	0.61	0.53	0.08	0.00	0.61	0,76	0,11	0,00	0,88	1,04	0,16	0,00	1,20
B	0.01	0.01	0.00	0.02	0.03	0.05	0.00	0.08	0.07	0.12	0.00	0.19	0.07	0.12	0.00	0.19	0,10	0,18	0,00	0,28	0,14	0,25	0,00	0,38
	Paprastoji pušis																							
Masė	1.93	0.34	0.00	2.28	3.03	0.55	0.00	3.58	4.16	0.75	0.00	4.91	5.74	1.06	0.00	6.80	4,48	0,82	0,00	5,29	6,40	1,19	0,00	7,59
N	1.14	1.76	0.00	2.90	1.79	2.79	0.00	4.58	2.45	3.86	0.00	6.32	3.39	5.43	0.00	8.82	3,22	4,73	0,00	7,95	4,61	6,89	0,00	11,50
P	0.06	0.19	0.00	0.25	0.09	0.31	0.00	0.40	0.12	0.42	0.00	0.55	0.17	0.59	0.00	0.77	0,22	0,51	0,00	0,74	0,32	0,75	0,00	1,07
K	0.46	0.80	0.00	1.27	0.73	1.27	0.00	2.00	1.00	1.76	0.00	2.76	1.38	2.47	0.00	3.85	1,16	1,86	0,00	3,02	1,67	2,71	0,00	4,37
Ca	0.93	0.86	0.00	1.79	1.46	1.36	0.00	2.82	2.00	1.89	0.00	3.88	2.76	2.65	0.00	5.41	3,27	3,58	0,00	6,85	4,68	5,22	0,00	9,89
Mg	0.29	0.21	0.00	0.50	0.45	0.33	0.00	0.78	0.62	0.45	0.00	1.08	0.86	0.64	0.00	1.50	0,49	0,51	0,00	1,00	0,70	0,74	0,00	1,44
Fe	0.00	0.02	0.00	0.03	0.01	0.03	0.00	0.04	0.01	0.05	0.00	0.06	0.01	0.06	0.00	0.08	0,01	0,44	0,00	0,45	0,02	0,64	0,00	0,66
Mn	0.09	0.30	0.00	0.39	0.14	0.48	0.00	0.62	0.20	0.67	0.00	0.86	0.27	0.94	0.00	1.21	0,56	1,10	0,00	1,65	0,79	1,60	0,00	2,39
Na	0.10	0.00	0.00	0.10	0.15	0.01	0.00	0.16	0.21	0.01	0.00	0.22	0.29	0.01	0.00	0.30	0,22	0,01	0,00	0,23	0,32	0,01	0,00	0,33
S	0.87	0.04	0.00	0.91	1.36	0.07	0.00	1.44	1.66	0.08	0.00	1.74	2.24	0.10	0.00	2.33	1,75	0,07	0,00	1,82	2,50	0,11	0,00	2,60
Zn	0.01	0.01	0.00	0.02	0.02	0.01	0.00	0.03	0.02	0.02	0.00	0.04	0.03	0.02	0.00	0.05	0,04	0,04	0,00	0,09	0,06	0,06	0,00	0,12
Cu	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0,03	0,01	0,00	0,04	0,05	0,01	0,00	0,06
B	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.02	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,02

2.9 lentelės tęsinys.

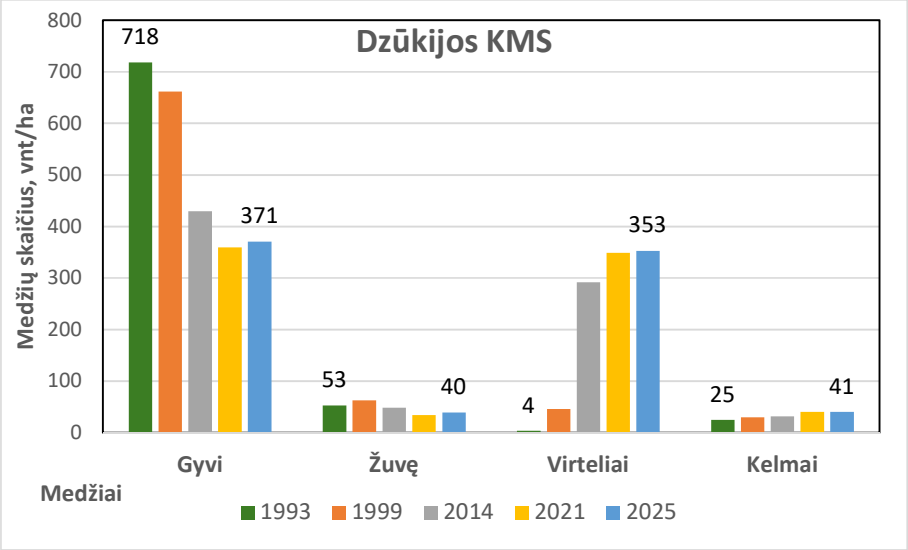
	1993				1999				2010				2015				2020				2025			
Rodiklis	Stiebas	Šakos	Spygliai	Iš viso	Stiebas	Spygliai	Iš viso	Iš viso	Stiebas	Šakos	Spygliai	Iš viso	Stiebas	Šakos	Spygliai	Iš viso	Stiebas	Šakos	Spygliai	Iš viso	Stiebas	Šakos	Spygliai	Iš viso
	Lapuočiai																							
Masė	0.52	0.07	0.00	0.58	1.17	0.16	0.00	1.33	3.77	0.50	0.00	4.26	5.66	0.76	0.00	6.42	6,81	0,96	0,00	7,77	7,69	1,10	0,00	8,79
N	0.54	0.33	0.00	0.87	1.22	0.81	0.00	2.03	3.92	2.47	0.00	6.39	5.88	3.79	0.00	9.67	4,90	5,58	0,00	10,48	5,54	6,39	0,00	11,93
P	0.03	0.03	0.00	0.06	0.07	0.06	0.00	0.13	0.23	0.19	0.00	0.42	0.34	0.30	0.00	0.64	0,34	0,61	0,00	0,95	0,38	0,69	0,00	1,08
K	0.14	0.07	0.00	0.21	0.32	0.16	0.00	0.48	1.02	0.49	0.00	1.51	1.53	0.75	0.00	2.28	1,77	2,19	0,00	3,96	2,00	2,51	0,00	4,51
Ca	0.28	0.24	0.00	0.52	0.63	0.59	0.00	1.22	2.03	1.79	0.00	3.82	3.05	2.74	0.00	5.80	4,97	4,22	0,00	9,19	5,62	4,84	0,00	10,45
Mg	0.08	0.04	0.00	0.12	0.18	0.09	0.00	0.27	0.57	0.28	0.00	0.85	0.85	0.43	0.00	1.28	0,75	0,60	0,00	1,35	0,85	0,68	0,00	1,53
Fe	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.01	0.00	0.03	0.02	0.02	0.00	0.04	0,02	0,52	0,00	0,54	0,02	0,59	0,00	0,62
Mn	0.04	0.02	0.00	0.05	0.08	0.04	0.00	0.12	0.26	0.11	0.00	0.37	0.38	0.17	0.00	0.56	0,84	1,29	0,00	2,14	0,95	1,48	0,00	2,43
Na	0.03	0.00	0.00	0.03	0.06	0.00	0.00	0.06	0.19	0.00	0.00	0.19	0.28	0.01	0.00	0.29	0,34	0,01	0,00	0,35	0,38	0,01	0,00	0,40
S	0.23	0.01	0.00	0.24	0.53	0.02	0.00	0.55	1.51	0.05	0.00	1.56	2.21	0.07	0.00	2.27	2,65	0,09	0,00	2,74	3,00	0,10	0,00	3,10
Zn	0.01	0.05	0.00	0.05	0.01	0.11	0.00	0.12	0.04	0.34	0.00	0.38	0.06	0.52	0.00	0.58	0,07	0,05	0,00	0,12	0,08	0,06	0,00	0,13
Cu	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0,05	0,01	0,00	0,06	0,06	0,01	0,00	0,07
B	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0,01	0,01	0,00	0,02	0,01	0,01	0,00	0,02
	Iš viso Žemaitijos KMS 1 ha teritorijoje																							
Masė	10.66	1.83	0.00	12.49	34.57	6.05	0.00	40.63	68.92	12.24	0.00	81.15	80.42	14.28	0.00	94.70	110,4	19,92	0,00	130,32	149,4	27,14	0,00	176,51
N	7.59	10.33	0.00	17.92	24.87	34.60	0.00	59.47	50.28	70.04	0.00	120.33	58.97	81.46	0.00	140.43	79,49	115,5	0,00	195,03	107,5	157,4	0,00	264,98
P	0.50	1.11	0.00	1.61	1.68	3.74	0.00	5.42	3.40	7.54	0.00	10.94	3.96	8.74	0.00	12.70	5,52	12,55	0,00	18,07	7,47	17,10	0,00	24,57
K	2.74	4.11	0.00	6.84	8.94	13.62	0.00	22.56	17.87	27.29	0.00	45.17	20.85	31.62	0.00	52.47	28,70	45,42	0,00	74,12	38,83	61,89	0,00	100,72
Ca	7.20	7.34	0.00	14.54	24.26	25.41	0.00	49.67	48.55	51.90	0.00	100.45	56.20	60.08	0.00	116.27	80,59	87,45	0,00	168,04	109,0	119,2	0,00	228,20
Mg	1.27	1.13	0.00	2.40	3.97	3.73	0.00	7.70	7.90	7.55	0.00	15.44	9.30	8.79	0.00	18.09	12,14	12,35	0,00	24,49	16,43	16,83	0,00	33,26
Fe	0.03	0.79	0.00	0.82	0.11	2.92	0.00	3.03	0.22	5.99	0.00	6.21	0.26	6.81	0.00	7.07	0,35	10,76	0,00	11,11	0,48	14,66	0,00	15,14
Mn	1.14	2.23	0.00	3.37	3.99	7.70	0.00	11.69	8.01	15.54	0.00	23.56	9.21	17.85	0.00	27.07	13,69	26,77	0,00	40,46	18,52	36,48	0,00	55,00
Na	0.53	0.02	0.00	0.55	1.73	0.06	0.00	1.79	3.45	0.12	0.00	3.57	4.02	0.14	0.00	4.16	5,52	0,20	0,00	5,72	7,47	0,27	0,00	7,74
S	4.80	0.24	0.00	5.03	15.56	0.79	0.00	16.35	27.57	1.22	0.00	28.79	31.36	1.28	0.00	32.65	43,06	1,79	0,00	44,85	58,25	2,44	0,00	60,69
Zn	0.10	0.12	0.00	0.22	0.33	0.39	0.00	0.72	0.67	0.91	0.00	1.57	0.78	1.17	0.00	1.94	1,10	1,00	0,00	2,10	1,49	1,36	0,00	2,85
Cu	0.07	0.01	0.00	0.08	0.24	0.04	0.00	0.28	0.48	0.08	0.00	0.55	0.54	0.09	0.00	0.63	0,85	0,13	0,00	0,98	1,15	0,17	0,00	1,32
B	0.01	0.02	0.00	0.03	0.03	0.06	0.00	0.10	0.07	0.12	0.00	0.19	0.08	0.14	0.00	0.22	0,11	0,20	0,00	0,31	0,15	0,27	0,00	0,42

2.3.5. Dzūkijos KMS baseino medynų struktūros, tūrio ir jo prieaugio kaita 1993-2025 m. laikotarpiu

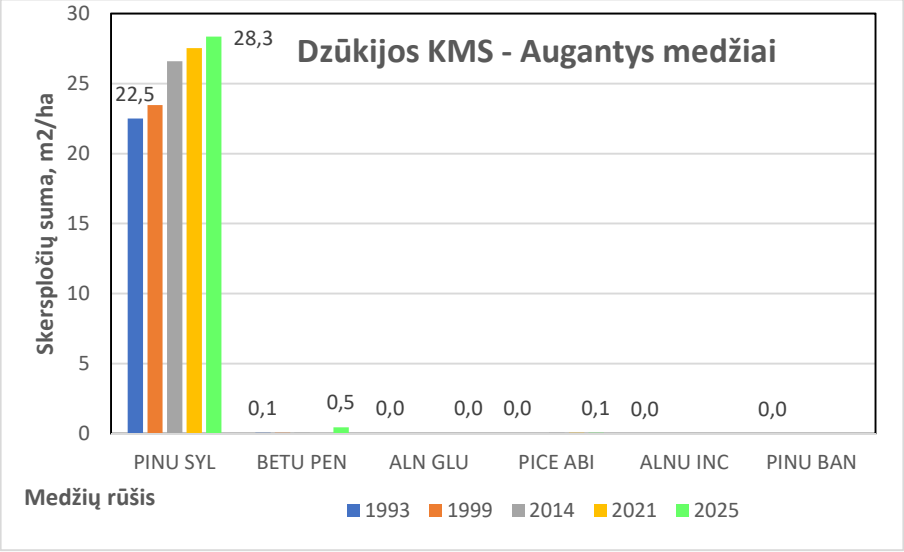
Pirmos apskaitos rezultatai parodė, kad Dzūkijos KMS Šlaitinio upelio baseine vyrauja gryni pribręstantys ir brandūs pušies medynai. Pakartojus tyrimus, nustatyta, kad per 6 m. laikotarpį 1 ha plote gyvų medžių vidutiniškai sumažėjo nuo 718 iki 662 (7,8%), o padidėjo žuvusių nuo 53 iki 63 bei virtelių nuo 4 iki 46.

ΣG analizė parodė, kad visų tirtų rūšių medžių prieaugis Dzūkijos KMS viršija jų iškritimą, ko pasėkoje ΣG didėja (2.24 pav.). Pušies ΣG prieaugis sudaro 20,5 m2/ha arba po 0,64 m2/ha per metus. Spyglius graužiančių entokenkėjų paplitimas 1994-97 m. neturėjo esminės įtakos medžių prieaugiui.

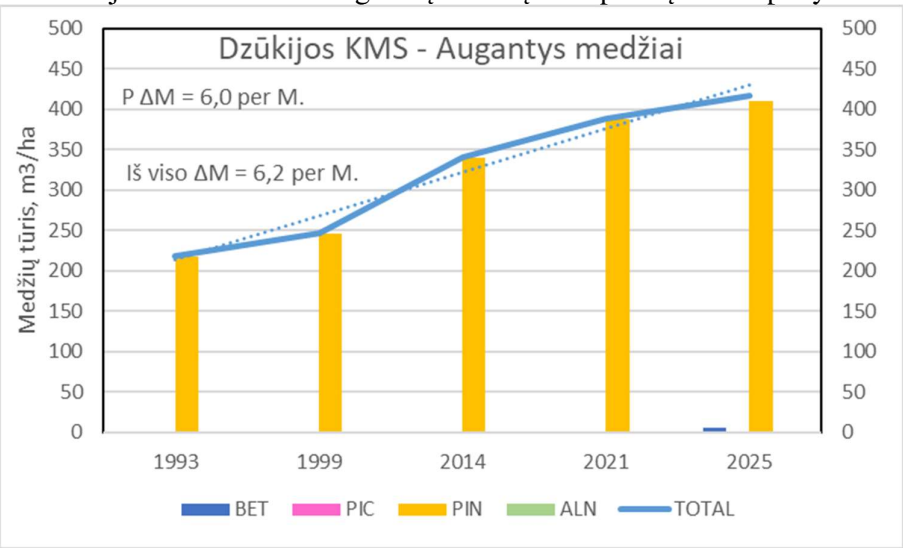
Apibendrinant rezultatus nustatyta, kad gyvų medžių skersploščių suma 1 ha vidutiniškai padidėjo nuo 25,9 m^2/ha iki 26,9 m^2/ha, o žuvusių - nuo 0,7 m^2/ha iki 0,8 m^2/ha.



2.24pav. Dzūkijos KMS baseino paprastosios pušies medžių dinamika

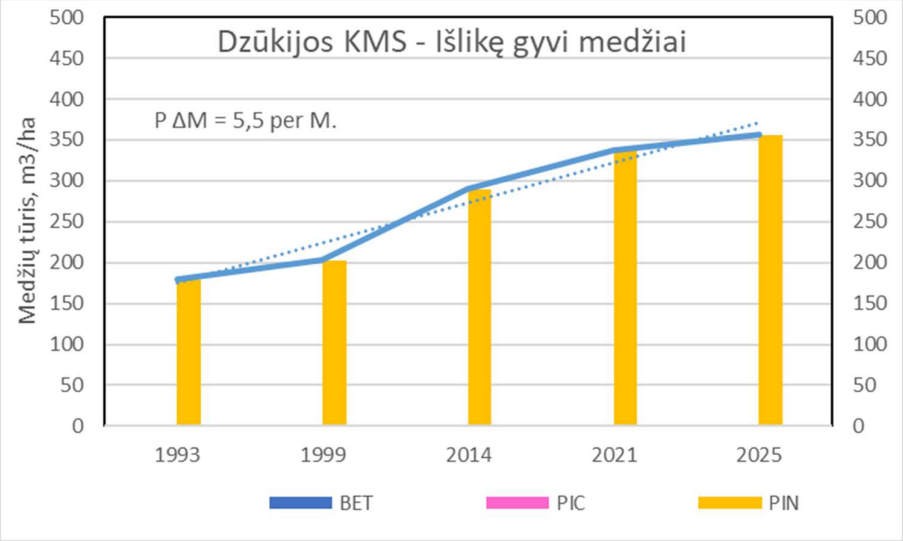


2.25 pav. Dzūkijos KMS baseino augančių medžių skersploščių sumos pokytis



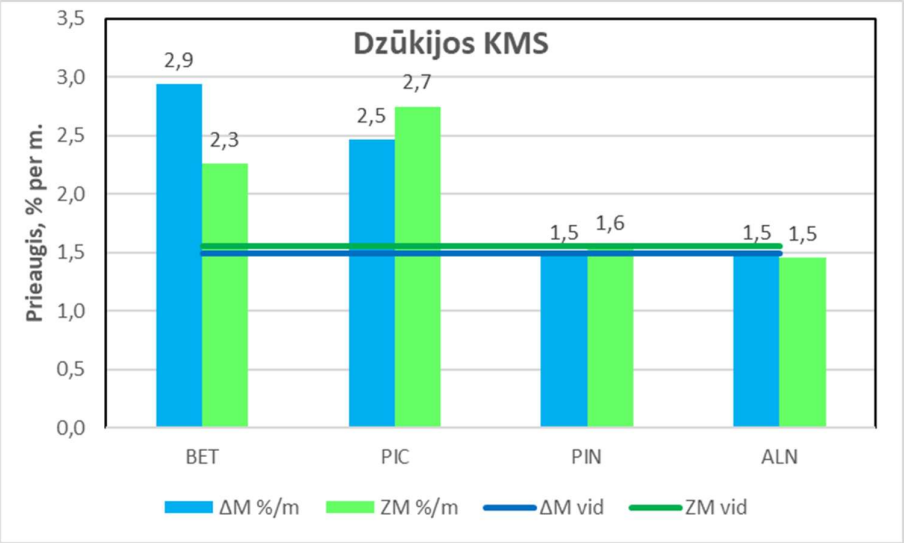
2.26 pav. Vyraujančių rūšių gyvų medžių tūrio pokytis Dzūkijos KMS baseine 1994 – 2025 m.

Norint įvertinti, kurių medžių prieaugis buvo intensyviausias, atskirai panagrinėtas išlikusių gyvų 2025 m. medžių tūrio prieaugis, t.y. nagrinėjant tūrio dinamiką buvo eliminuotas žuvusių medžių poveikis tūrio kaitai.



2.27 pav. Vyraujančių rūšių 2025 m. išlikusių gyvų medžių ir jų suminis (iš viso) tūris Žemaitijos KMS baseine 1994 – 2025 m. laikotarpiu

Kadangi Dzūkijos KMS vyrauja paprastoji pušis, tai šios rūšies medynuose tūrio pokytis sudarė 6.0 m3/ha per m., o tūrio prieaugis 5,5 m3/ha per m. Santykinais dydžiais tūrio prieaugis viršijo pokyti siekdamas atitinkamai 1,46 ir 1,55 % per m.



2.28 pav. Vyraujančių rūšių 2025 m. išlikusių gyvų medžių (eliminavus žuvusiuosius) tūrio prieaugio ir jų tūrio pokyčių (įskaitant nudžiūvimą ir naujų medžių įtraukimą) kaitos intensyvumo palyginimas dzūkijos KMS baseine 1994 – 2025 m. laikotarpiu

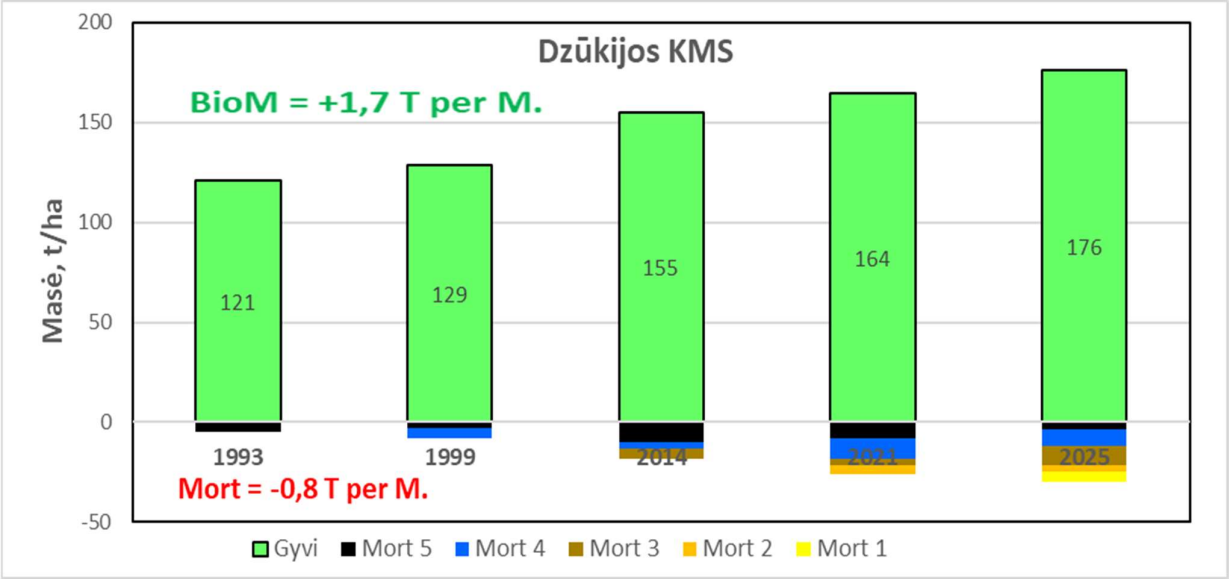
Palyginamoji vyraujančių rūšių 2025 m. išlikusių gyvų medžių (eliminavus žuvusiuosius) tūrio prieaugio ir jų tūrio pokyčių (įskaitant nudžiūvimą ir naujų medžių įtraukimą) kaitos intensyvumo analizė parodė, kad dėl naujų medžių įtraukimo tūrio pokytis beržynuose viršijo jų prieaugį, o kitų rūšių medynuose reikšmingai nesiskyrė dėl labai mažo medžių atkritimo.

2.3.6. Dzūkijos KMS medynų biomasė ir pagrindinių bioelementų kiekiai

Apskaičiavus augančių medžių stiebų, šakų, spyglių biomasę, nustatyta, kad Dzūkijos KMS 1 ha baseino plote augančių medynų biomasė per tiriamąjį laikotarpį padidėjo nuo 121 t iki 176 t/ha, t.y. 55 t/ha arba 31,2%, kas sudarytų po 1,8 t/ha arba 1 % per metus atitinkamai.

Per tą patį laikotarpį mort masė išaugo nuo 5 t/ha iki 30 t/ha, kas sudarytų apie 0,8 t/ha per m. Tai ženkliai mažesnis kiekis mort masės lyginant su Aukštaitijos ir ypač Žemaitijos KMS.

Pagal medžių kamienų suirimo laipsnį mort masė pasiskirstė taip: Mort 1 –5,1 arba 5.8%, Mort 2 8,3 arba 9.4 %, Mort 3 – 18 arba 20.6 %, Mort 4 26,3 arba 30.0%, Mort 5 30 arba– 34,2 %.

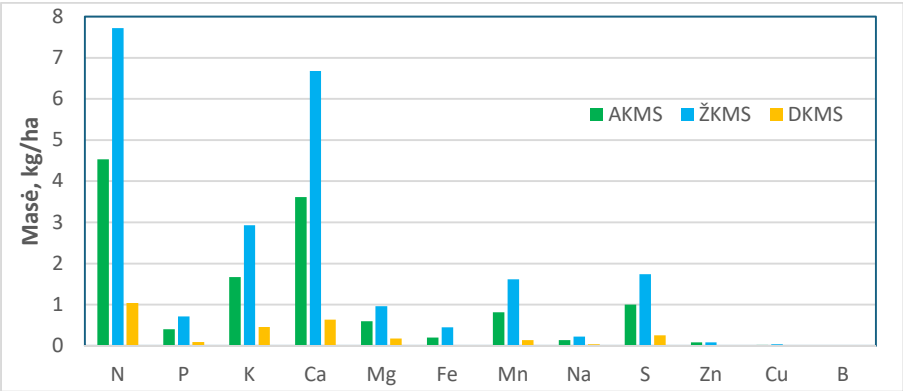


2.29 pav. Gyvos ir negyvos (Mort) organinės masės, priklausomai nuo jos destrukcijos laipsnio balansas Szūkijos KMS baseine 1993-2025 m.

Medienos suirimo laipsnis: Mort 1 – šviežiai žuvę medžiai; Mort 6 – visiškai sujrę medžiai.

Apibendrinus gautus rezultatus galima teigti, kad apie 30 % visų per visą stebėjimą žuvusių medžių mediena, pastaruoju laikotarpiu yra susiskaldžiusi jau be jokių likusių požymių. Tai sausros ir ypač intensyvios kenkėjų invazijos rezultato padariniai, kurie šiandieną Dz8kijos miškuose jau nepastebimi.

Palyginus bioelementų kiekius mort masėje formavimosi intensyvumą tarp stočių nustatyta, kad Žemaitijos KMS mort masė formuojasi intensyviau, bei su ja į dirvožemį patenka daugiau bioelementų negu Aukštaitijos KMS baseine ir ypač Dzūkijos KMS, kur pušų atkritimas kelis kart mažesnis negu kitose KM stotyse..



2.30 pav. Metinis bioelementų kiekių mort masėje formavimosi intensyvumas per 1993(94)-2025 m. tiriamąjį laikotarpį Aukštaitijos ir Žemaitijos KMS baseinų 1ha plote.

2.10 lentelė. Dzūkijos KMS baseino 1 ha augančių medžių atskirų frakcijų biomasė (t) ir bioelementų kiekiai (kg) 1993 - 2025m.

	1993				1999				2014				2021				2025							
Rodiklis	Stiebas	Šakos	Spygliai	Iš viso	Stiebas	Spygliai	Iš viso	Iš viso	Stiebas	Šakos	Spygliai	Iš viso	Stiebas	Šakos	Spygliai	Iš viso	Stiebas	Šakos	Spygliai	Iš viso	Stiebas	Šakos	Spygliai	Iš viso
	Paprastoji pušis																							
Masė	97,5	18,4	3,83	119,7	103,	19,6	4,17	127,5	126,4	24,35	5,11	155,88	134,9	26,17	5,35	166,38	139,7	27,16	5,57	172,44				
N	57,50	94,08	52,35	203,93	61,17	100,5	57,03	218,69	74,58	124,7	69,88	269,15	79,57	133,9	73,14	286,68	82,43	139,1	76,13	297,62				
P	2,92	10,29	14,97	28,19	3,11	10,99	16,31	30,41	3,79	13,64	19,99	37,42	4,05	14,65	20,92	39,62	4,19	15,21	21,77	41,18				
K	23,39	42,81	15,47	81,68	24,88	45,73	16,86	87,47	30,34	56,74	20,65	107,73	32,37	60,97	21,61	114,95	33,53	63,29	22,50	119,31				
Ca	46,78	45,94	11,57	104,28	49,76	49,06	12,60	111,43	60,68	60,88	15,44	137,00	64,73	65,42	16,16	146,31	67,06	67,90	16,82	151,78				
Mg	14,62	11,02	3,45	29,09	15,55	11,78	3,76	31,08	18,96	14,61	4,60	38,17	20,23	15,70	4,82	40,74	20,96	16,30	5,01	42,27				
Fe	0,24	1,10	0,21	1,55	0,26	1,18	0,22	1,66	0,32	1,46	0,27	2,05	0,34	1,57	0,29	2,19	0,35	1,63	0,30	2,28				
Mn	4,58	16,22	1,60	22,40	4,87	17,33	1,74	23,94	5,94	21,50	2,13	29,58	6,34	23,11	2,23	31,67	6,57	23,98	2,32	32,87				
Na	4,87	0,18	0,15	5,21	5,18	0,20	0,04	5,42	6,32	0,24	0,05	6,62	6,74	0,26	0,05	7,06	6,99	0,27	0,06	7,31				
S	43,86	2,39	0,31	46,55	46,65	2,55	0,33	49,54	50,56	2,44	0,26	53,26	53,94	2,62	0,27	56,83	54,49	2,44	0,22	57,15				
Zn	0,49	0,37	0,11	0,97	0,52	0,39	0,13	1,04	0,63	0,49	0,15	1,27	0,67	0,52	0,16	1,36	0,70	0,54	0,17	1,41				
Cu	0,10	0,08	0,02	0,20	0,10	0,09	0,02	0,21	0,13	0,11	0,02	0,26	0,13	0,12	0,02	0,28	0,14	0,12	0,03	0,29				
B	0,10	0,18	0,04	0,32	0,10	0,20	0,04	0,34	0,13	0,24	0,05	0,42	0,13	0,26	0,05	0,45	0,14	0,27	0,06	0,47				
	Lapuočiai																							
Masė	0,24	0,04	0,01	0,29	0,26	0,04	0,01	0,32	0,23	0,04	0,01	0,28	0,16	0,03	0,01	0,20	1,84	0,33	0,09	2,27				
N	0,25	0,20	0,33	0,78	0,27	0,22	0,32	0,81	0,24	0,20	0,28	0,71	0,17	0,14	0,19	0,50	1,92	1,65	2,10	5,67				
P	0,01	0,02	0,02	0,05	0,02	0,02	0,02	0,05	0,01	0,02	0,01	0,04	0,01	0,01	0,01	0,03	0,11	0,13	0,11	0,35				
K	0,06	0,04	0,09	0,20	0,07	0,04	0,09	0,20	0,06	0,04	0,08	0,18	0,04	0,03	0,05	0,13	0,50	0,33	0,59	1,42				
Ca	0,13	0,14	0,12	0,39	0,14	0,16	0,11	0,41	0,12	0,14	0,10	0,36	0,09	0,10	0,07	0,26	1,00	1,20	0,74	2,93				
Mg	0,04	0,02	0,04	0,10	0,04	0,02	0,04	0,10	0,03	0,02	0,03	0,09	0,02	0,02	0,02	0,06	0,28	0,19	0,25	0,72				
Fe	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,02				
Mn	0,02	0,01	0,01	0,04	0,02	0,01	0,01	0,04	0,02	0,01	0,01	0,04	0,01	0,01	0,01	0,03	0,13	0,08	0,09	0,30				
Na	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,09	0,00	0,00	0,10				
S	0,11	0,01	0,00	0,11	0,12	0,01	0,00	0,12	0,09	0,00	0,00	0,10	0,06	0,00	0,00	0,07	0,72	0,03	0,00	0,75				
Zn	0,00	0,03	0,00	0,03	0,00	0,03	0,00	0,03	0,00	0,03	0,00	0,03	0,00	0,02	0,00	0,02	0,02	0,23	0,01	0,25				
Cu	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01				
B	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01				

2.10 lentelės tęsinys.

	1993				1999				2014				2021				2025							
Rodiklis	Stiebas	Šakos	Spygliai	Iš viso	Stiebas	Spygliai	Iš viso	Iš viso	Stiebas	Šakos	Spygliai	Iš viso	Stiebas	Šakos	Spygliai	Iš viso	Stiebas	Šakos	Spygliai	Iš viso	Stiebas	Šakos	Spygliai	Iš viso
Masė																								
N																								
P																								
K																								
Ca																								
Mg																								
Fe																								
Mn																								
Na																								
S																								
Zn																								
Cu																								
B																								
	Iš viso Dzūkijos KMS 1 ha teritorijoje																							
Masė	97,70	18,41	3,84	119,96	103,9	19,67	4,19	127,79	126,6	24,39	5,12	156,15	156,6	30,39	6,22	193,23	164,2	31,89	6,57	202,66				
N	57,75	94,28	52,68	204,71	61,44	100,7	57,36	219,50	74,82	124,9	70,16	269,86	92,49	155,6	85,06	333,13	97,84	163,2	90,75	351,82				
P	2,94	10,31	14,99	28,24	3,13	11,01	16,33	30,46	3,81	13,65	20,00	37,46	4,70	17,01	24,28	45,99	4,99	17,79	25,39	48,17				
K	23,46	42,85	15,56	81,87	24,95	45,77	16,95	87,67	30,40	56,78	20,73	107,91	37,60	70,76	25,14	133,49	39,47	73,79	26,78	140,05				
Ca	46,91	46,08	11,68	104,67	49,90	49,22	12,71	111,84	60,80	61,03	15,54	137,36	75,19	76,00	18,82	170,02	78,94	80,16	20,36	179,46				
Mg	14,66	11,05	3,49	29,19	15,59	11,80	3,79	31,18	19,00	14,63	4,63	38,26	23,49	18,23	5,61	47,34	24,63	19,12	6,11	49,86				
Fe	0,24	1,10	0,21	1,56	0,26	1,18	0,23	1,66	0,32	1,46	0,28	2,05	0,39	1,82	0,33	2,55	0,41	1,90	0,36	2,67				
Mn	4,60	16,23	1,61	22,44	4,89	17,34	1,75	23,98	5,96	21,51	2,14	29,61	7,37	26,81	2,60	36,77	7,76	27,91	2,80	38,48				
Na	4,89	0,18	0,15	5,22	5,20	0,20	0,04	5,44	6,33	0,24	0,05	6,63	7,83	0,30	0,06	8,20	8,21	0,32	0,07	8,60				
S	43,97	2,39	0,31	46,67	46,77	2,56	0,33	49,66	50,65	2,44	0,26	53,35	62,65	3,04	0,31	66,00	64,04	2,87	0,26	67,17				
Zn	0,49	0,40	0,12	1,00	0,52	0,42	0,13	1,07	0,63	0,51	0,15	1,30	0,78	0,63	0,19	1,60	0,83	0,90	0,20	1,93				
Cu	0,10	0,08	0,02	0,20	0,10	0,09	0,02	0,21	0,13	0,11	0,02	0,26	0,16	0,14	0,03	0,32	0,16	0,14	0,03	0,34				
B	0,10	0,18	0,04	0,32	0,10	0,20	0,04	0,34	0,13	0,24	0,05	0,42	0,16	0,30	0,06	0,52	0,16	0,32	0,07	0,55				

2.11 lentelė. Dzūkijos KMS baseino 1 ha žuvusių medžių atskirų frakcijų biomasė ir bioelementų kiekiai 1993 - 2025 m.

	1993				1999				2014				2021				2025							
Rodiklis	Stiebas	Šakos	Spygliai	Iš viso	Stiebas	Spygliai	Iš viso	Iš viso	Stiebas	Šakos	Spygliai	Iš viso	Stiebas	Šakos	Spygliai	Iš viso	Stiebas	Šakos	Spygliai	Iš viso	Stiebas	Šakos	Spygliai	Iš viso
	Paprastoji pušis + eglė																							
Masė	4,23	0,82	0,00	5,05	6,90	1,35	0,00	8,25	14,94	2,92	0,00	17,87	21,77	4,27	0,00	26,04	24,85	4,87	0,00	29,72				
N	2,50	4,19	0,00	6,69	4,07	6,91	0,00	10,99	8,82	14,98	0,00	23,79	12,85	21,85	0,00	34,70	14,66	24,93	0,00	39,6				
P	0,13	0,46	0,00	0,59	0,21	0,76	0,00	0,96	0,45	1,64	0,00	2,09	0,65	2,39	0,00	3,04	0,75	2,73	0,00	3,5				
K	1,02	1,91	0,00	2,92	1,66	3,15	0,00	4,80	3,59	6,81	0,00	10,40	5,23	9,94	0,00	15,17	5,96	11,34	0,00	17,3				
Ca	2,03	2,05	0,00	4,08	3,31	3,38	0,00	6,69	7,17	7,31	0,00	14,48	10,45	10,67	0,00	21,12	11,93	12,17	0,00	24,1				
Mg	0,63	0,49	0,00	1,13	1,04	0,81	0,00	1,85	2,24	1,75	0,00	4,00	3,27	2,56	0,00	5,83	3,73	2,92	0,00	6,6				
Fe	0,01	0,05	0,00	0,06	0,02	0,08	0,00	0,10	0,04	0,18	0,00	0,21	0,05	0,26	0,00	0,31	0,06	0,29	0,00	0,4				
Mn	0,20	0,72	0,00	0,92	0,32	1,19	0,00	1,52	0,70	2,58	0,00	3,28	1,02	3,77	0,00	4,79	1,17	4,30	0,00	5,5				
Na	0,21	0,01	0,00	0,22	0,35	0,01	0,00	0,36	0,75	0,03	0,00	0,78	1,09	0,04	0,00	1,13	1,24	0,05	0,00	1,3				
S	1,90	0,11	0,00	2,01	3,11	0,18	0,00	3,28	5,98	0,29	0,00	6,27	8,71	0,43	0,00	9,14	9,69	0,44	0,00	10,1				
Zn	0,02	0,02	0,00	0,04	0,03	0,03	0,00	0,06	0,07	0,06	0,00	0,13	0,11	0,09	0,00	0,19	0,12	0,10	0,00	0,2				
Cu	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,03	0,02	0,02	0,00	0,04	0,02	0,02	0,00	0,0				
B	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,02	0,01	0,03	0,00	0,04	0,02	0,04	0,00	0,06	0,02	0,05	0,00	0,1				
	Lapuočiai: Beržai + Juodlksnis																							
Masė	0,01	0,00	0,00	0,02	0,02	0,00	0,00	0,01	0,15	0,02	0,00	0,03	0,23	0,04	0,00	0,04	0,23	0,04	0,00	0,05				
N	0,02	0,01	0,00	0,03	0,02	0,02	0,00	0,04	0,15	0,11	0,00	0,26	0,24	0,18	0,00	0,42	0,24	0,18	0,00	0,42				
P	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,02	0,01	0,01	0,00	0,03	0,01	0,01	0,00	0,03				
K	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,04	0,02	0,00	0,06	0,06	0,04	0,00	0,10	0,06	0,04	0,00	0,10				
Ca	0,01	0,01	0,00	0,02	0,01	0,01	0,00	0,02	0,08	0,08	0,00	0,16	0,13	0,13	0,00	0,26	0,13	0,13	0,00	0,26				
Mg	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,02	0,01	0,00	0,03	0,04	0,02	0,00	0,06	0,04	0,02	0,00	0,06				
Fe	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00				
Mn	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,02	0,02	0,01	0,00	0,02	0,02	0,01	0,00	0,02				
Na	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01				
S	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,06	0,00	0,00	0,06	0,09	0,00	0,00	0,10	0,09	0,00	0,00	0,09				
Zn	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,02	0,00	0,02	0,00	0,03	0,00	0,02	0,00	0,03				
Cu	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00				
B	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00				

2.11 lentelės tęsinys.

	1993				1999				2014				2021				2025							
Rodiklis	Stiebas	Šakos	Spygliai	Iš viso	Stiebas	Spygliai	Iš viso	Iš viso	Stiebas	Šakos	Spygliai	Iš viso	Stiebas	Šakos	Spygliai	Iš viso	Stiebas	Šakos	Spygliai	Iš viso	Stiebas	Šakos	Spygliai	Iš viso
Masė																								
N																								
P																								
K																								
Ca																								
Mg																								
Fe																								
Mn																								
Na																								
S																								
Zn																								
Cu																								
B																								
	Iš viso Dzūkijos KMS 1 ha teritorijoje																							
Masė	4,25	0,82	0,00	5,07	6,92	1,35	0,00	8,26	15,09	2,95	0,00	17,89	22,01	4,30	0,00	26,08	25,09	4,90	0,00	29,77				
N	2,51	4,20	0,00	6,71	4,09	6,93	0,00	11,03	8,97	15,09	0,00	24,05	13,09	22,03	0,00	35,12	14,91	25,11	0,00	40,01				
P	0,13	0,46	0,00	0,59	0,21	0,76	0,00	0,97	0,46	1,65	0,00	2,10	0,67	2,40	0,00	3,07	0,76	2,74	0,00	3,50				
K	1,02	1,91	0,00	2,93	1,66	3,15	0,00	4,81	3,63	6,84	0,00	10,46	5,29	9,98	0,00	15,27	6,03	11,38	0,00	17,41				
Ca	2,04	2,05	0,00	4,09	3,32	3,39	0,00	6,71	7,25	7,39	0,00	14,64	10,58	10,80	0,00	21,38	12,06	12,30	0,00	24,36				
Mg	0,64	0,49	0,00	1,13	1,04	0,81	0,00	1,85	2,26	1,77	0,00	4,03	3,30	2,58	0,00	5,88	3,76	2,94	0,00	6,70				
Fe	0,01	0,05	0,00	0,06	0,02	0,08	0,00	0,10	0,04	0,18	0,00	0,21	0,06	0,26	0,00	0,31	0,06	0,29	0,00	0,36				
Mn	0,20	0,72	0,00	0,92	0,33	1,19	0,00	1,52	0,71	2,59	0,00	3,30	1,04	3,78	0,00	4,82	1,18	4,31	0,00	5,49				
Na	0,21	0,01	0,00	0,22	0,35	0,01	0,00	0,36	0,75	0,03	0,00	0,78	1,10	0,04	0,00	1,14	1,25	0,05	0,00	1,30				
S	1,91	0,11	0,00	2,02	3,12	0,18	0,00	3,29	6,03	0,30	0,00	6,33	8,80	0,43	0,00	9,23	9,78	0,44	0,00	10,22				
Zn	0,02	0,02	0,00	0,04	0,03	0,03	0,00	0,06	0,08	0,07	0,00	0,15	0,11	0,11	0,00	0,22	0,13	0,12	0,00	0,25				
Cu	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,02	0,01	0,00	0,03	0,02	0,02	0,00	0,04	0,03	0,02	0,00	0,05				
B	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,02	0,02	0,03	0,00	0,04	0,02	0,04	0,00	0,07	0,03	0,05	0,00	0,07				

Priklausomai nuo biomasės pokyčių keitėsi ir bioelementų kiekis. ***Per 1993-2025 metų laikotarpį padidėjo atitinkamai: N +147 kg/ha (4.6 kg/m.); P +19.9kg/ha (0,62 kg/m.); K 58,2 kg/ha (1,8 kg/m.); Ca 74,8 kg/ha (2,3 kg/m.); Mg 20,7 kg/ha (0,64 kg/m.); Fe 1,11 kg/ha (0,03 kg/m) ir Mn 16,0 kg/ha (0,5 kg/m.).***

Negyvosios medienos kiekis, kuris ***per 32 metų laikotarpį didėjo bei iš dalies kaupėsi ir praturtino dirvožemį, nuo 33,4 t iki 116,8 t/ha, kas sudarė po 3,1 t/ha per metus. Ypač reikšmingai didėjo eglių mort masė – 55,9 t/ha arba po 2,1 t/ha per metus; beveik 3 kartus mažesniu intensyvumo padidėjo pušų – 14,7 t/ha arba 0,55 t/ha per metus ir kiek tai dar mažiau lapuočių medžių rūšių – 12,8 t/ha arba 0,47 t/ha per metus.***

Per tiriamąjį laikotarpį nuo 1993 iki 2025 į atmosfera grįžo ar pateko į dirvožemį su krituliais 147 kg/ha azoto, 20 kg/ha P, 58 kg/ha K, 75 kg/ha Ca, 21 kg/ha Mg, 1.1 kg/ha Fe, 16 kg/ha Mn ir 21 kg/ha S/ha.

2.3.7. KMS medynų būklės ir biomasės kaitos palyginamoji analizė

Aukštaitijos KMS baseine per 1993–2025 m. laikotarpį nustatyta besikeičianti medynų struktūros kaita. Gyvų medžių skaičius sumažėjo nuo 651 iki 368 vnt./ha (−43,5 %), vėliau dėl atsikūrimo ir naujų medžių įtraukimo, 2020 m. jų skaičius padidėjo iki 461 vnt./ha, tačiau iki 2025 m. vėl sumažėjo iki 390 vnt./ha. Tai rodo brandžių ir perbrendusių medynų ciklinę kaitą, kurioje atsikūrimas iš dalies kompensuoja mirtingumą.

Rūšinėje struktūroje didžiausias nuosmukis fiksuotas eglynams (−48,5 %) ir beržynams (−52,3 %), tuo tarpu pušys mažėjo lėčiau (−16,4 %), išlaikydamos santykinai stabilesnę populiaciją. Skerspločių sumos (ΣG) analizė rodo, kad eglių ir beržų indėlis mažėjo, o pušų – didėjo, todėl bendras medynų struktūrinis stabilumas iš esmės išlaikytas (apie 31–33 m²/ha).

Biomasės dinamika rodo, kad bendras produktyvumas ilgą laiką didėjo (iki ~330 t/ha), tačiau pastaraisiais metais sumažėjo iki ~223 t/ha dėl padidėjusio atkritimo ir kenkėjų (ypač žievėgraužio tipografo) poveikio. Tuo pat metu negyvos medienos kiekis išaugo nuo 41 iki 143 t/ha, o apie 50 % jos šiuo metu yra stipriai suirusi, kas rodo intensyvų organinės medžiagos skaidymosi etapą.

Tūrio prieaugis išliko teigiamas, tačiau silpnėja (nuo ~5,7 iki ~5,15 m³/ha/metus). Didžiausią prieaugį išlaiko eglės ir pušys, o beržų indėlis yra minimalus. Bioelementų dinamika atspindi bendrą biomasės augimą – jų kiekis didėja, tačiau lėtai, proporcingai struktūros pokyčiams.

Apibendrinant, Aukštaitijos KMS miškai išlieka santykinai stabilios, bet senėjančios sistemos stadijoje: struktūrinis stabilumas išlaikomas, tačiau didėja mirtingumo ir atkritimo reikšmė. Pagrindinės grėsmės yra kenkėjų (ypač žievėgraužio tipografo) protrūkiai, su klimato ekstremumais susiję streso veiksniai ir didėjantis negyvos medienos kiekis, kuris keičia anglies bei maistinių medžiagų balansą. Prognozuojama, kad ateityje pušynai išliks stabiliausi, eglynai bus labiausiai pažeidžiami, o bendras medynų produktyvumas labiau priklausys nuo atsikūrimo ir trikdžių dažnio nei nuo grynojo prieaugio.

Žemaitijos KMS baseine per visą tiriamąjį laikotarpį stebimas nuoseklus gyvų medžių mažėjimas: iki 2015 m. jų skaičius sumažėjo nuo 605 iki ~372 vnt./ha (apie 38,5 %), o iki 2020 m. – iki ~325 vnt./ha (apie 45 %). 2021–2025 m. laikotarpiu mažėjimas tęsėsi, ir 2025 m. fiksuota ~305 vnt./ha, rodanti tolesnį, bet lėtesnį retėjimo tempą.

Rūšinė struktūra išliko nevienoda: didžiausi nuostoliai nustatyti eglėms (~39 % ir daugiau, ypač dėl kenkėjų bei vėjovartų), kiek mažesni beržams (~49 %), o mažiausi – pušims (~23 %). Tai atsispindi ir struktūriniuose rodikliuose: eglių skersploščių suma ilgainiui reikšmingai sumažėjo (nuo 23,5 iki 13 m²/ha), beržų išliko stabili, o pušų net šiek tiek didėjo.

Nepaisant medžių iškritimo, išlikusių medžių prieaugis iš dalies kompensavo nuostolius. Didžiausias jis buvo eglių (~7 m²/ha), mažesnis pušų (~1,2 m²/ha), o beržų – minimalus (~0,6 m²/ha). Dėl to bendras medynų skersploščių suma sumažėjo apie 32 %, tačiau išlikusių medžių struktūra išliko aktyvi ir produktyvi.

Biomasės dinamika rodo ryškius svyravimus: iki 2015 m. ji kito nedaug, tačiau po 2020 m. fiksuotas reikšmingas sumažėjimas (iki ~169 t/ha), susijęs su kenkėjų protrūkiais ir klimatiniais stresais. Tuo pat metu didėjo negyvos medienos dalis, ypač eglynų frakcijoje, o 2021–2025 m. laikotarpiu procesas dar sustiprėjo.

Apibendrinant, Žemaitijos KMS pasižymi nuosekliu medynų retėjimu ir biomasės persiskirstymu iš gyvos į negyvąją dalį. Eglynai yra labiausiai kintanti ir jautriausia struktūros dalis, pušynai – santykinai stabilesni, o beržynai pasižymi ribotu regeneraciniu ir kompensaciniu pajėgumu.

Dzūkijos KMS baseine per tiriamąjį laikotarpį nustatytas nuoseklus, bet lėtesnis nei kitose stotyse medynų struktūros kitimas. Augančių medžių biomasė padidėjo nuo 121 iki 176 t/ha (apie 55 t/ha arba 31,2 %), rodydama stabilų, bet vidutinio intensyvumo medynų produktyvumo augimą.

Negyvos medienos (mort) kiekis didėjo nuo 5 iki 30 t/ha (apie 0,8 t/ha per metus), tačiau išliko gerokai mažesnis nei Aukštaitijos ir ypač Žemaitijos KMS, kas rodo mažesnį medžių žuvimo mastą ir silpnesnį kenkėjų bei ekstremalių veiksnių poveikį.

Mort struktūra rodo vyraujančią vidutinio ir pažengusio irimo stadiją: didžiausią dalį sudarė Mort 4–5 klasės, o šviežiai žuvusių medžių (Mort 1–2) dalis buvo santykinai maža. Tai rodo, kad dauguma žuvusių medžių jau yra perėjusi į vėlyvas irimo stadijas.

Apibendrinant, Dzūkijos KMS pasižymi santykinai stabilia ir mažiau pažeista miško sistema: gyvos biomasės augimas išlieka teigiamas, o negyvos medienos kaupimasis – ribotas. Tai rodo mažesnį trikdžių intensyvumą ir lėtesnę ekosistemos transformaciją, palyginti su kitomis tirtomis KMS.

Miškų būklės ir struktūros palyginimas tarp KMS stočių parodė, kad Aukštaitijos KMS baseine augančių miškų biomasė 1 ha viršija 200 t/ha, kai tuo tarpu Žemaitijos KMS nesiekia 150 t/ha, o Dzūkijos KMS viršija 150 t/ha ribą. Tai rodo aiškią produktyvumo gradientą: didžiausia biomasė fiksuojama Aukštaitijoje, vidutinė – Dzūkijoje, o mažiausia – Žemaitijoje.

Pagal biomasės kaitą ir negyvos medienos formavimąsi nustatyta aiški stočių diferenciacija: Žemaitijos KMS mort masė formuojasi intensyviausiai, todėl su ja į dirvožemį patenka daugiau bioelementų nei Aukštaitijos KMS, ir ypač Dzūkijos KMS, kur pušų atkritimas yra kelis kartus mažesnis nei kitose KMS. Tai rodo, kad Dzūkijoje biogeocheminiai srautai yra silpnesni ir stabilesni, o Žemaitijoje – intensyviausi ir labiausiai dinamiški.

Pagrindinės išvados

1. **Miškų produktyvumo gradientas aiškus tarp regionų** – Aukštaitijos KMS pasižymi didžiausia gyvos biomasės sankaupa (>200 t/ha), Dzūkija užima tarpinę padėtį (>150 t/ha), o Žemaitija yra mažiausiai produktyvi (<150 t/ha). Tai rodo ryškų ekologinį ir struktūrinį gradientą Lietuvoje.
2. **Negyvos medienos (mort) formavimosi intensyvumas skiriasi tarp stočių** – Žemaitijos KMS išsiskiria didžiausiu mort masės formavimusi ir intensyviausiu bioelementų grįžimu į dirvožemį, Aukštaitijoje šis procesas yra vidutinio intensyvumo, o Dzūkijoje – mažiausias.
3. **Ekosistemų dinamikos kontrastas** – Žemaitija pasižymi didžiausiais svyravimais ir didžiausiu medžių žuvimo bei irimo intensyvumu, Aukštaitija – santykinai subalansuota, bet dinamiška sistema, o Dzūkija – stabiliausia ir mažiausiai trikdoma sistema.
4. **Biogeocheminiai srautai priklauso nuo medynų pažeidimų intensyvumo** – intensyviausi bioelementų srautai į dirvožemį nustatyti Žemaitijoje, mažiausi Dzūkijoje, kas tiesiogiai susiję su kenkėjų, klimato streso ir medžių žuvimo mastu.

Galimos grėsmės ir prognozės

Remiantis Aukštaitijos, Žemaitijos ir Dzūkijos KMS ilgalaikiais duomenimis, pagrindinės grėsmės siejamos su besikartojančiais klimato ekstremumais (sausros, vėtros, šlapio sniego epizodai) ir su jais susijusia biotinių veiksnių (ypač žievėgraužio tipografo) aktyvumo kaita. Aukštaitijos KMS išlieka santykinai stabilesnė sistema, tačiau pastaraisiais metais matomas gyvų medžių masės mažėjimas ir didėjantis mort masės suirimo laipsnis rodo perėjimą į fazę, kurioje medžių mirtingumas pradeda viršyti prieaugį, o ekosistemos atsparumas palaipsniui silpnėja. Žemaitijos KMS tuo tarpu išlieka labiausiai pažeidžiama sistema, kurioje kenkėjų protrūkiai ir ekstremalios meteorologinės sąlygos lemia staigius biomasės nuostolius ir spartų medynų struktūros irimą.

Dzūkijos KMS, nors šiuo metu pasižymi mažesniu mort masės kiekiu ir lėtesniu jos formavimusi, rodo kitokio tipo riziką – struktūriškai atviresnius, pušų dominuojamus medynus su mažesniu LAI, didesniu šviesos pralaidumu ir ribotu pomiškio indėliu. Tai reiškia mažesnį bendrą organinės medžiagos srautą į dirvožemį, tačiau kartu ir didesnį jautrumą sausroms bei dirvožemio drėgmės deficitui, kuris ateityje gali stiprinti produktyvumo svyravimus.

Prognozuojama, kad visose trijose stotyse pagrindinis veiksnys išliks klimato svyravimai, tačiau jų poveikis skirsis pagal ekosistemos struktūrą. Aukštaitijos KMS tikėtinas lėtas perėjimas į mažesnio produktyvumo, bet santykinai stabilios struktūros būseną, Žemaitijos KMS – didesnė staigių nuostolių ir kenkėjų protrūkių rizika, galinti toliau mažinti gyvų medžių tūrį, o Dzūkijos KMS – laipsniškas sausros poveikio stiprėjimas, galintis ateityje didinti medžių iškritimą ir mort masės kaupimą, ypač pušynuose. Bendras visų stočių scenarijus rodo ekosistemų stabilumo mažėjimą ir didėjantį jautrumą ekstremaliems meteorologiniams įvykiams, net jei momentiniai biomasės rodikliai kai kuriose vietose dar išlieka santykinai stabilūs.

.

2.4. Medžių pažeidimai KMS teritorijose.

Medžių pažeidimų registravimas yra vienas svarbiausių miškų būklės stebėsenos elementų, leidžiantis nustatyti ne tik esamą medynų būklę, bet ir anksti identifikuoti neigiamus aplinkos pokyčius, galinčius turėti įtakos miškų produktyvumui, biologinei įvairovei, anglies kaupimui ir ekosistemų atsparumui. Medžių pažeidimai atspindi kompleksinį įvairių biotinių ir abiotinių veiksnių poveikį, todėl laikomi vienais jautriausių miško ekosistemų būklės indikatorių (Ferretti ir kt., 2024; Potočić ir kt., 2024).

ICP IM programoje nuo 1993 m. medžių pažeidimų registravimas atliekamas kasmet pagal vieningą metodiką visose dalyvaujančiose šalyse. Šios programos pagrindinis tikslas – ilgalaikis miško ekosistemų būklės stebėjimas, leidžiantis įvertinti oro taršos, klimato kaitos, ekstremalių meteorologinių reiškinių, dirvožemio savybių, biologinių pažeidėjų ir kitų aplinkos veiksnių poveikį miškams.

Svarbiausias ICP IM programoje registruojamas medžių gyvybingumo rodiklis yra lajų defoliacija, tačiau kartu sistemingai registruojami ir visi matomi pažeidimų simptomai bei jų priežastys. Pagal ICP IM metodiką kiekvienam medžiui nustatomas pažeidimo tipas, jį sukėlęs veiksnys, pažeidimo lokalizacija ir intensyvumas. Registruojami vabzdžių, grybinių ligų, sausros, šalnų, vėjo, sniego, gaisrų, oro taršos, laukinių gyvūnų bei žmogaus veiklos sukelti pažeidimai. Tokia kompleksinė informacija leidžia ne tik įvertinti medžių būklę konkrečiais metais, bet ir nustatyti ilgalaikes miškų kaitos priežastis.

Kasmetinis pažeidimų registravimas yra ypač svarbus todėl, kad dauguma nepalankių aplinkos veiksnių veikia ne iš karto. Daugelio autorių tyrimai rodo, kad po sausrų, karščio bangų ar kitų ekstremalių klimato reiškinių medžių gyvybingumas dažnai pradeda blogėti tik po vienerių ar net kelerių metų. Dėl to vienkartiniai tyrimai negali atskleisti tikrosios miško ekosistemų reakcijos į stresą, o ilgalaikės stebėsenos duomenys leidžia nustatyti priežastinius ryšius tarp klimato svyravimų, medžių pažeidimų, augimo sulėtėjimo ir medžių žuvimo (Ferretti ir kt., 2024).

Pastaraisiais metais klimato kaitos sąlygomis Europoje sparčiai didėja sausrų, karščio bangų, audrų, vėjalaužų, snieglaužų bei žievėgraužio tipografo protrūkių dažnis. Šių veiksnių kompleksinis poveikis dažnai sukelia ne pavienius pažeidimus, bet visų medynų gyvybingumo mažėjimą. Todėl vien defoliacijos įvertinimo nepakanka – būtina kartu registruoti ir pažeidimų priežastis, nes tik jų analizė leidžia nustatyti pagrindinius medynų būklės blogėjimo veiksnius bei prognozuoti tolimesnę miškų raidą (Timmermann ir kt., 2024; Potočić ir kt., 2024).

Naujausiose miškų monitoringo studijose pabrėžiama, kad medžių pažeidimai yra ankstyviausias signalas apie miško ekosistemų destabilizaciją. Pažeidimų registravimas leidžia prognozuoti galimą medžių augimo sumažėjimą, lapijos indekso (LAI) mažėjimą, biomasės pokyčius, anglies kaupimo silpnėjimą ir būsimą medžių mirtingumą. Dėl šios priežasties medžių pažeidimų stebėsena šiandien laikoma ne tik miškų sveikatingumo, bet ir klimato kaitos poveikio vertinimo bei adaptyvaus miškų valdymo pagrindu (Ferretti ir kt., 2024).

Ilgos stebėjimų sekos yra ypač svarbios siekiant atskirti natūralią brandžių medynų raidą nuo klimato kaitos, oro taršos ar biologinių pažeidėjų sukeltų pokyčių bei pagrįsti adaptyvias miškų valdymo priemones. Pagrindinis darbo tikslas – išaiškinti medžių pažeidimo priežastis bei jų intensyvumą visoje KMS teritorijoje.

Darbo metodika

Medžių pažeidimų vertinimui panaudoti Amerikietiško miškų monitoringo programos metodiniai reikalavimai (FHM Guide, 1984, 1987). Pagal šios programos reikalavimus registruojama medžio pažeidimo sritis, pažeidimo rūšis, intensyvumas bei nustatoma pagrindinė pažeidimo priežastis, jei ją įmanoma identifikuoti. Medžių pažeidimų sritys ir rūšys bei jų intensyvumas pateiktas 2.9 lentelėje.

2.12 lentelė. Medžių pažeidimų vietos, pažeidimų rūšys ir jų intensyvumas

Pažeidimo rūšis	*Kodas*	*Pažeidimo intensyvumas*	*Kodas*	***Medžio pažeidimo sritis***	Kodas
Vėžys	1	1-100%	0-9	Nėra pažeidimų	0
Grybų vaisiakūniai ir kt. pūvančios medienos požymiai	2	Nėra	-	Šaknys ir kelminė kamieno dalis	1
Atviros žaizdos	3	1-100%	0-9	Šaknys ir apatinė kamieno dalis	2
Sakotakių pažeidimas	4	1-100%	0-9	Apatinė kamieno dalis	3
Nulaužtas kamienas	11			Visas kamienas	4
Nutrauktos šaknys > 1 m nuo kelmo	13	1-100%	0-9	Viršutinė kamieno dalis	5
Nulenktas kamienas	15	1-100%	0-9	Lajos kamienas	6
Viršūninio ūglio ar viršūnės netekimas	21	1-100%	0-9	Šakos	7
Sausos ar nulaužytos šakos gyvojoje lajoje.	22	1-100%	1-9	Ūgliai	8
Ūglių šluotos ar vilkūgliai	23	10-99%	1-9	Lapai, spygliai	9
Ūglių ir lapų pažeidimai	24	10-99%	1-9		
Eglinio topografo pažeidimai	25				
Briedžių pažeidimai	33				
Užmirkimas	35	100			

2.4.1 Aukštaitijos KMS medžių pažeidimai bei pagrindinės priežastys

Nustatyta, kad per tiriamąjį laikotarpį daugiausiai pažeista išlieka medžių kamienų apatinė dalis (3). Pažeidimai šioje srityse jau daugelį metų beveik siekia ar viršija 50% visų užregistruotų pažeidimų. Kiek mažiau pažeistas lajos kamienas (6) – iki 27% pažeidimų. Tai stipraus vėjo padarinys. Kitoms medžio sritKMS tenka žymiai mažiau pažeidimų. Pažeidimai šaknų ir priekelminėje kamieno srityse indikavo vėjavartas, kurių AKMS baseine buvo užregistruota iki 5,3 % visų medžių. Visame kamiene (4), viršutiniame kamieno dalyje (5) ir šakose (7) užregistruota maždaug iki 6% visų pažeidimų. ***2019 m. pradėti registruoti lapijos pažeidimai dėl pasikartojančios sausros (9). Tai menkai išsivystę ar nesuformavę lapai/spygliai, kurie didino medžių lajų defoliacijos laipsnį. Tokių medžių užregistruota virš 1,2 %. 2020 m. šių pažeidimų kiekis praktiškai liko nepakitęs. Taip pat nuo šių metų dažnai registruojami pažeidimai ir priekelminėje dalyje ir ypač paskutiniaisiais 2025 m. 2025 m. ženkliai išaugo ir pažeidimai lapijoje, kuriuos dažniausiai sąlygojo snieglaužos ar karščio bangos ir sausra.***

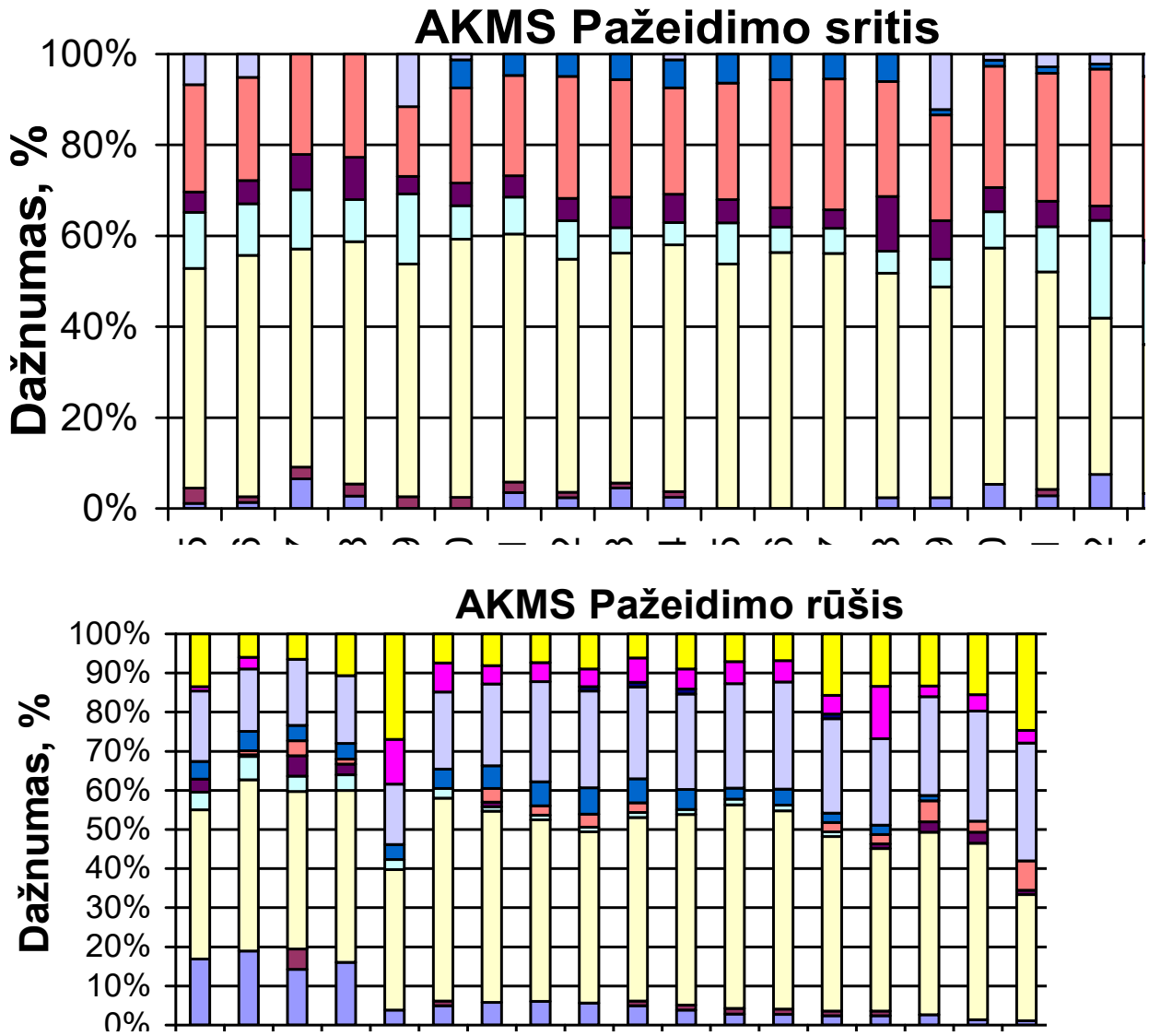
Tiriamuoju laikotarpiu iš nustatytų pažeidimų dažniausiai pasikartojantis pažeidimas buvo: atviros žaizdos (3). Šis pažeidimas viršijo 46% visų pažeidimų (2.31 pav.). Tai įvairaus senumo bei intensyvumo elnių nulopyti eglių kamienai. 25% pažeidimų sudarė viršūninio ūglio ar viršūnės netekimas (21), kurį sąlygojo snieglaužos ir vėjalaužos. Eglinio topografo, ūglių ir lapų pažeidimai 2020 m. viršijo kaip ir 2019 m. 13 %, o vėžiniai susirgimai ir įvairūs kamieno nulenkimai dėl smarkaus vėjo sudarė apie 3 % visų pažeidimų.

2020 m. daugiausiai pažeistos buvo paprastosios eglės, kurios sudarė virš 80% visų pažeistų medžių, ar apie 30% visų stebėtų eglių. 5% visų pažeidimų teko beržams, ar 1% visų stebėtų beržų ir 10% visų pažeistų medžių pušKMS, ar 5% visų stebėtų pušų. 2025 m. išsiskyrė beržai, kurių vienas barelis visas žuvo dėl užtvindymo. Vandens lygis pakilo 20 cm virš žemės paviršiaus. Dėl šios priežasties padidėjo ir pažeidimų priekelminėje medžio kamieno dalyje.

2025 m. be šaknų užtvindymo, taip pat buvo nustatyti ir žievėgraužio tipografo pažeidimai bei reikšmingai sumažėjęs vėjavartų ar snieglaužų pažeidimai šaknų ar priekelminėje medžio dalyje.

2020-2025 m. laikotarpiu ***daugiausiai pažeistos buvo paprastosios eglės, kurios sudarė virš 80% visų pažeistų medžių, ar apie 30% visų stebėtų eglių. 5% visų pažeidimų teko beržams, ar 1% visų stebėtų beržų ir 10% visų pažeistų medžių pušKMS, ar 5% visų stebėtų pušų.***

Apibendrinus gautų tyrimų rezultatus, nustatyta, kad iki 2022 m. pažeidimų priežastys ir pažeidimų sritys medyje praktiškai iš esmės nekito, išskyrus reikšmingai kintantį eglinio tipografo pažeidimų intensyvumą ir paskutiniaisiais metais lapų/spyglių pažeidimus dėl pasikartojančių sausrų.



2.31 pav. Aukštaitijos KMS medžių pažeidimų pasiskirstymo pagal pažeistą sritį ir pagal rūšį kaita.

Pažesita medžio sritis: 1. - šaknys ir priekelminė dalis (iki 30 cm); 2. šaknys ir apatinė kamieno dalis; 3. - apatinė kamieno dalis; 4. visas kamienas; 5. - viršutinė kamieno dalis; 6. - lajos kamienas; 7 – šakos; 9 – lapai, spygliai;

Pažeidimo rūšis: Kamieno ir šaknų pažeidimai: 1. – vėžys; 3, - atviros žaizdos; 4. –sakotakių pažeidimas; 11 – nulaužtas kamienas; 15 – nulenktas kamienas. Pažeidimai medžio lajoje: 21 - viršūninio ūglio ar viršūnės netekimas; 24 – ūglių – lapų pažeidimai; 25 – eglinio tipografo pažeidimai; 35 – šaknų užtvindimas

2.32 pav. Užtvindymo pažeisti ir žuvę eglės ir beržai.

Atskirais metais šis pažeidimas lėmė išskirtinai aukštą medžių iškritimo intensyvumą stacionaruose. Didelę žalą miškų būklei vis dažniau daro smarkios audros ir gausus sniegas, kurių padariniai – išversti ir sulaužyti medžiai bei jų kamienai. Pažeidžiamų vietų ir priežasčių struktūra pažeistiems medžiams žūvant, ir naujoms priežastKMS atsirandant. 2025 m. naujas pažeidimas – beržų žuvimas dėl užtvindymo.

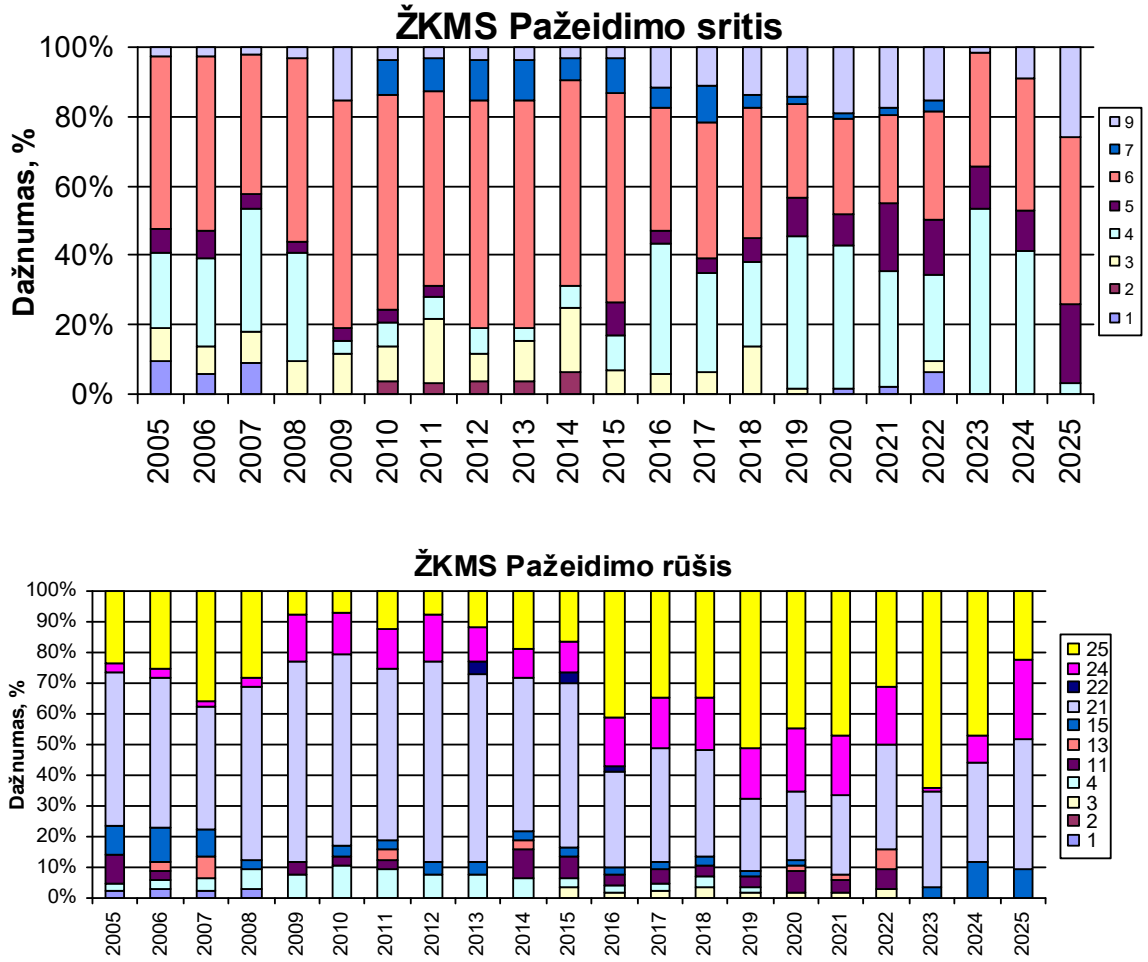
2.4.2. Žemaitijos KMS medžių pažeidimai bei pagrindinės priežastys

Žemaitijos KMS teritorijoje daugiausiai pažeidimų rasta viso kamieno srityje (4). Pažeidimai šioje srityje padidėjo iki 41% visų užregistruotų pažeidimų. Tai žievėgraužio tipografo medžio pažeidimo sritis. Pažeidimai lajos kamiene siekė 27 %. Padidėjo dėl pasikartojančių sausrų pažeistų lapų ar spyglių (9) – 19 % ir viršutinės kamieno dalies pažeidimų (5) –9 %. Mažiausiai pažeidimų registruota šakų (7) srityje ir apatinėje kamieno dalyje (3). Šaknų ir priekelminėje (1-2) srityse paskutiniaisiais metais pažeidimų nerasta.

Paskutinysis laikotarpis išsiskyrė padažnėjusiais pažeidimais lajos kamiene, lapijoje ir kamieno apatinėje dalyje, o sumažėjo pažeidimų visame kamiene.

Nustatyta, kad dažniausiai pasikartojantis pažeidimas buvo po pasikartojančių sausrų eglinio tipografo pažeidimai (25). Išsiskirė 2023 metai, kai šio kenkėjo pažeidimai sudarė apie 60 % visų pažeidimų. Po tokio protrūkio šis kenkėjų židinys slopo ir jau 2025 m. jų pažeidimai sudarė tik 23 %.

Daugiausiai pažeistos buvo paprastosios eglės, kurios sudarė virš 80% visų pažeistų medžių ir apie 15% pušys.



2.33 pav. Žemaitijos KMS medžių pažeidimų pasiskirstymo pagal pažeistą sritį ir pagal rūšį kaita.

Pažesita medžio sritis: 1. - šaknys ir priekelminė dalis (iki 30 cm); 2. šaknys ir apatinė kamieno dalis; 3. - apatinė kamieno dalis; 4. visas kamienas; 5. - viršutinė kamieno dalis; 6. - lajos kamienas; 7 – šakos; 9 – lapai, spygliai;

Pažeidimų rūšis: Kamieno ir šaknų pažeidimai: 1. – vėžys; 3, - atviros žaizdos; 4. –sakotakių pažeidimas; 11 – nulaužtas kamienas; 15 – nulenktas kamienas. Pažeidimai medžio lajoje: 21 - viršūninio ūglio ar viršūnės netekimas; 22 – šakų pažeidimai; 24 – ūglių – lapų pažeidimai; 25 – žievėgraužio tipografo pažeidimai.

Apibendrinus gautų tyrimų rezultatus, nustatyta, kad paskutiniuoju laikotarpiu (2006-2025 m.), Žemaitijos KMS iš esmės pakito pažeidimo rūšis ir pažeidimų sritys medyje. Po intensyvių snieglaužų ar vėjavartų ir bepasikartojančių sausrų 2015-2016, 2018-2019 m. labai suintensyvėjo žievėgraužio tipografo veikla, kurio rezultatas papildomai žuvusios eglės ypač 2023 m. Dėl sausrų pasikartojantys šio kenkėjo protrūkiai gali būtų įvardijami kaip jau susiformavusi nauja ***grėsmė saugomų teritorijų eglynams Vakarų Lietuvos regione..***

2.4.3. KM stočių teritorijose augančių medžių pažeidimų ir pagrindinių priežasčių kaita.

Apibendrinus 22 metų pažeidimų tyrimo rezultatus Aukštaitijos KMS nustatyta, kad paskutiniuoju laikotarpiu sumažėjo pažeidimų priekelminėje, šaknų srityje (sumažėjo vėjavartų) ir kamieno srityje, tačiau vėl pradėjo didėti pažeidimai lajoje (2.8 pav.). Iš pažeidimo rūšių išsiskiria žievėgraužio tipografo pažeidimai, lajos netekimas dėl snieglaužų ar vėjalaužų bei įvairaus senumo atviros žaizdos. 2015-2018 m. laikotarpis išsiskiria neregistruotais pažeidimais šaknų, kelmo bei apatinėje kamieno srityje. Tai rodo, kad nebuvo registruoti reikšmingesni vėjo bei sniego verčiamų bei laužiamų medžių. Žievėgraužio tipografo pažeidimų intensyvumas Aukštaitijos KMS baseine nors kiek tai padidėjo nuo 2018 m., Paskutiniuoju laikotarpiu jis išlieka pakankamai stabiliame lygmenyje. Kasmet pažeidžiama apie 15 % stebimų perberendusių eglių. Po besikartojančių sausrų 20015, 2016, 2018 ir 2019 m. šio kenkėjo pažeidimų skaičius neturi tendencijos didėti, kaip kaip Žemaitijos KMS baseine.

22 metų pažeidimų tyrimo rezultatai Žemaitijos KMS parodė, kad dėl pasikartojančių sausrų žievėgraužis tipografas dažniausiai pažeidžia visą eglės kamieną, ko pasėkoje tokie medžiai žūsta. 2011-2014 m. dėl gausos sniego poveikio akivaizdūs šakų išlaužymo atvejai. 2015 m. pagausėjo pažeidimų viršutinėje kamieno dalyje. Išskirtinis pažeidimas – eglinio tipografo žala. Po 2015, 2016, 2018 ir 2019 m. sausrų Žemaitijos KMS baseine pradeda formuotis šio kenkėjo židinys.

2019-2021 m. dėl suintensyvėjusių žievėgraužio pažeidimų dalis eglių, kurių viršūmimė stebo dalis buvo pažeista vėjalaužų ir snieglaužų žuvo. Dėl šios priežasties sumažėjo eglės medžių su tokiais pažeidimai ir padidėjo kenkėjų pažeistų eglių skaičius. Paskutiniaisiais metais tokių eglių pažeidimai sudaro iki 50 % kasmet.

Šio kenkėjo pažeidimų skaičius viršija 50 % visų registruotų miške pažeidimų ir 12,2% visų stebėtų eglių. Tai besiformuojanti nauja grėsmė brandiems ir perbrendusiems eglynams Vakarų Lietuvos regiono miškams.

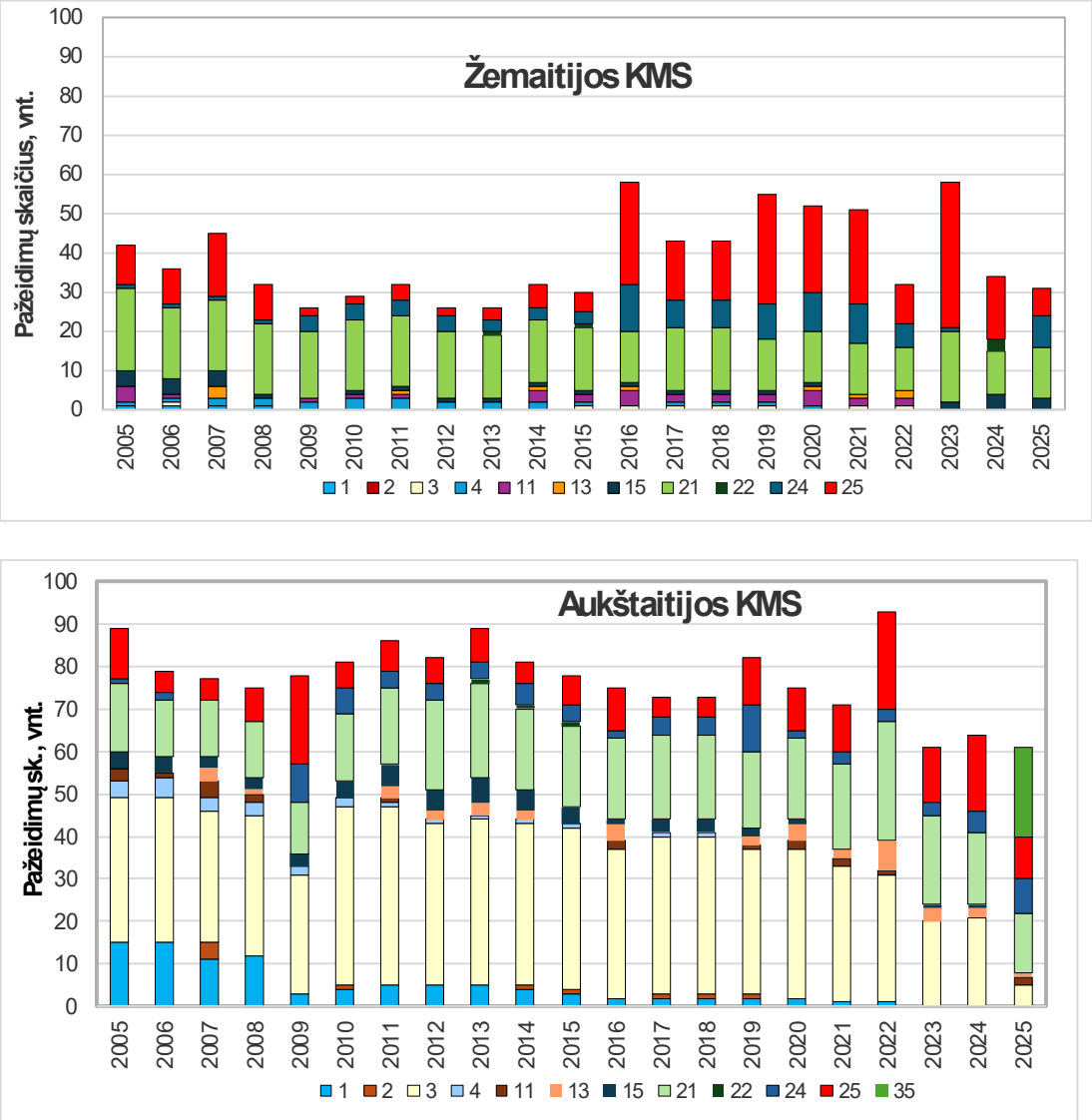
2022 m. išsiskyrė žievėgraužio tipografo pažeidimų mažėjimu Žemaitijos KMS ir šių pažeidimų reikšmingu padidėjimu Aukštaitijos KMS.

Aukštaitijos KMS nustatyta, kad paskutiniuoju laikotarpiu sumažėjo pažeidimų prie kelminėje, šaknų srityje (sumažėjo vėjavartų) ir kamieno srityje, tačiau vėl pradėjo didėti pažeidimai lajoje (2.8 pav.). Iš pažeidimo rūšių išsiskiria žievėgraužio tipografo pažeidimai, lajos netekimas dėl snieglaužų ar vėjalaužų bei įvairaus senumo atviros žaizdos. 2015-2018 m. laikotarpis išsiskiria neregistruotais pažeidimais šaknų, kelmo bei apatinėje kamieno srityje. Tai rodo, kad nebuvo registruoti reikšmingesni vėjo bei sniego verčiamų bei laužiamų medžių. Žievėgraužio tipografo

pažeidimų intensyvumas Aukštaitijos KMS baseine nors kiek tai padidėjo nuo 2018 m., Paskutiniuoju laikotarpiu jis išlieka pakankamai stabiliame lygmenyje. Kasmet pažeidžiama apie 15 % stebimų perberendusių eglių. Po besikartojančių sausrų 20015, 2016, 2018 ir 2019 m. šio kenkėjo pažeidimų skaičius neturi tendencijos didėti, kaip Žemaitijos KMS baseine.

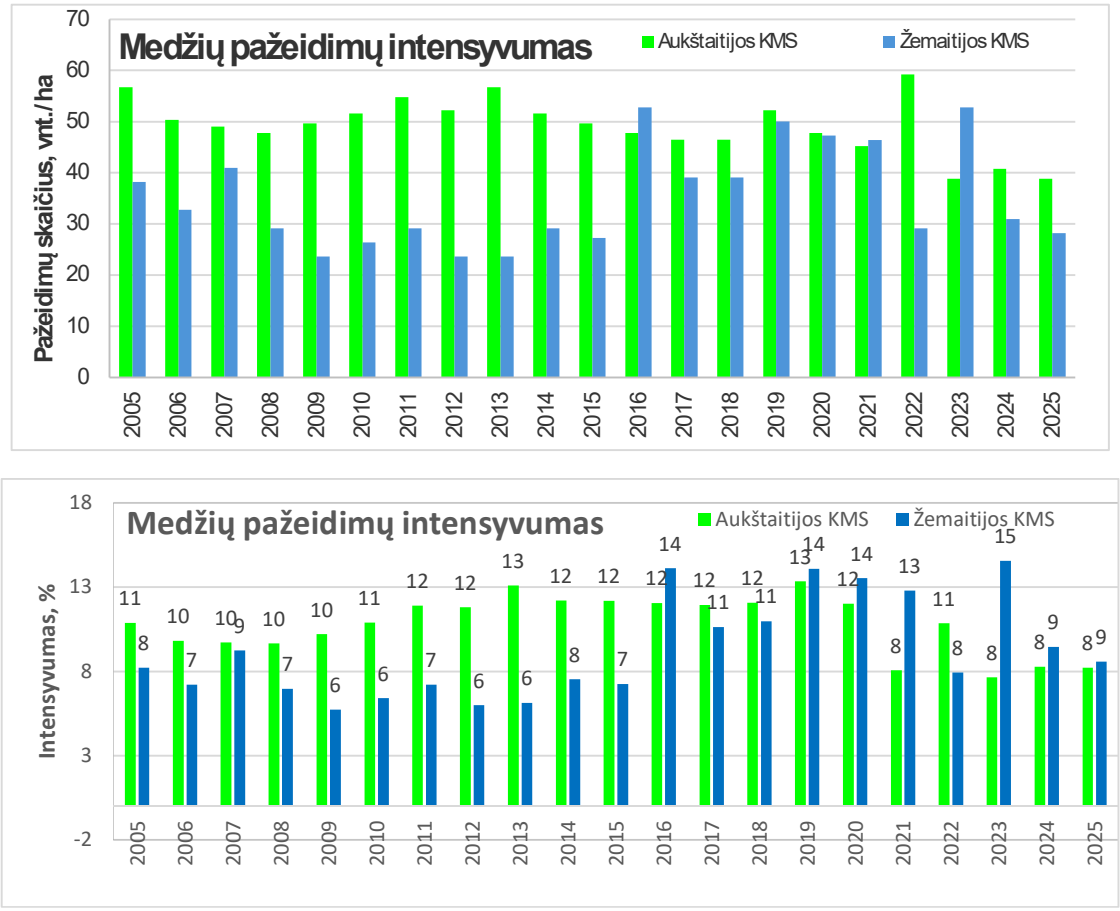
2022 m. išsiskyrė žievėgraužio tipografo pažeidimų mažėjimu Žemaitijos KMS ir šių pažeidimų reikšmingu padidėjimu Aukštaitijos KMS.

2024-2025 m. įio kenkėjo žala neviršijo daugiamečio vidurkio



2.34 pav. Nustatytų pažeidimų skaičius tirtų KMS baseinų miškuose

Pažeidimų rūšis: Kamieno ir šaknų pažeidimai: 1. – vėžys; 3, - atviros žaizdos; 4. –sakotakių pažeidimas; 11 – nulaužtas kamienas; 15 – nulenktas kamienas. Pažeidimai medžio lajoje: 21 - viršūninio ūglio ar viršūnės netekimas; 22 – šakų pažeidimai; 24 – ūglių – lapų pažeidimai; 25 – žievėgraužio tipografo pažeidimai, 35 - užtvindymas.

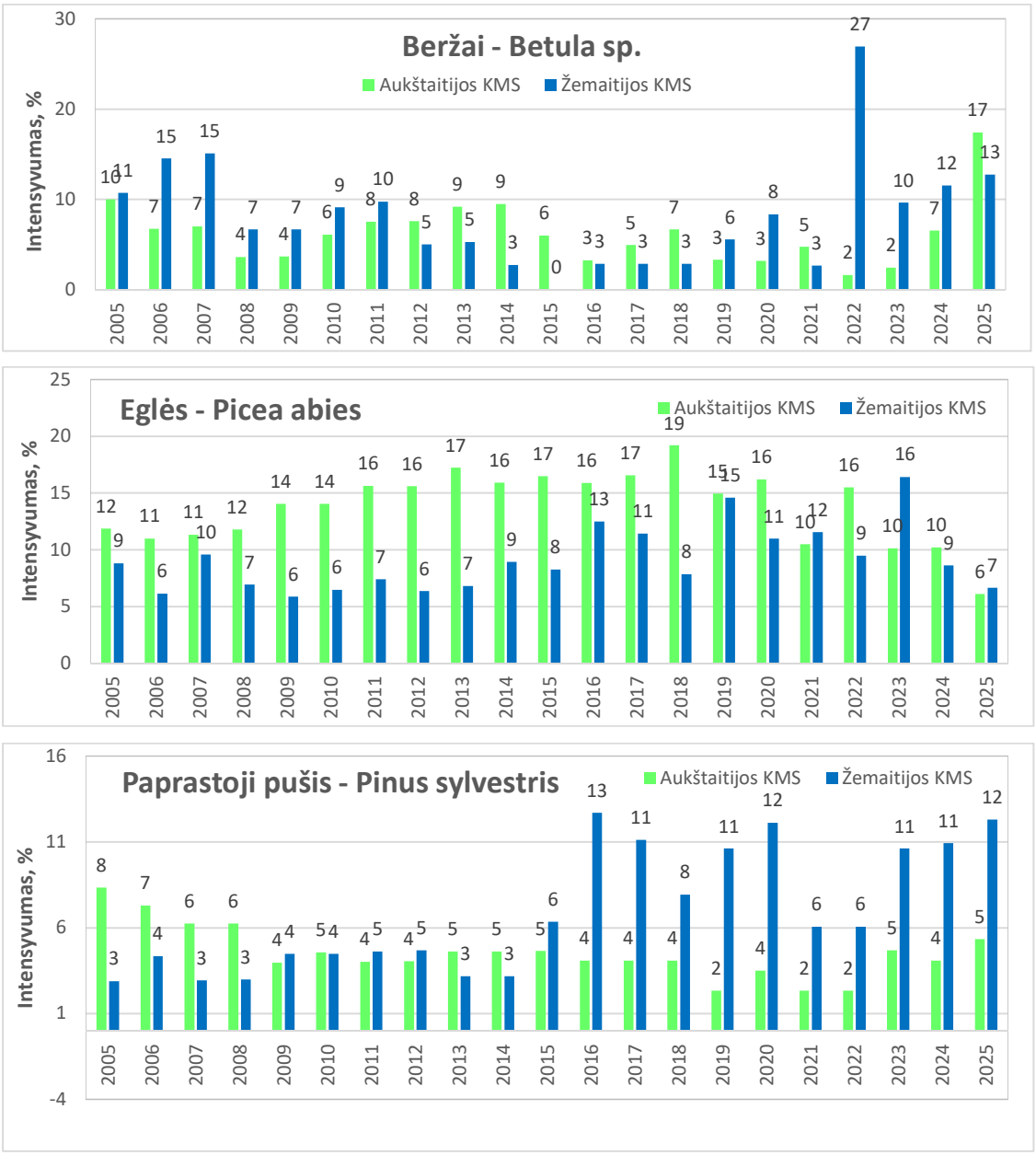


2.35 pav. Pažeistų medžių pažeidimų intensyvumo palyginimas KMS baseinų miškuose

Palyginus pažeidimo intensyvumą tarp Aukštaitijos ir Žemaitijos KMS baseinų miškų, matyti, kad tyrimų pradžioje žymiai intensyviau buvo pažeidžiami Aukštaitijos KMS baseine augantys medžiai. Šis procesas tęsėsi iki 2015 m. Po šių metų, kaip ir medžių lajų būklės kaitoje registruojamas priešingas procesas – Aukštaitijos KMS pažeidimų pradeda mažėti, o reikšmingai išaugo Žemaitijos KMS baseine augančių medžių pažeidimų skaičius, kuris jau paskutiniuoju laikotarpiu (2021-2025 m., reikšmingai viršija pažeidimų intensyvumą, nustatytą Aukštaitijos KMS.

2020 M. ĮVARDINTA GRĖSMĖ DĖL DRĖGMĖS TRŪKUMO šiame Lietuvos regione pasitvirtina. Medžių lajų būklė tapo blogesnė nei Aukštaitijos KMS, o medžių pažeidimo intensyvumas didesnis..

Atskirų medžių rūšių kaitoje matyti, kad beržų pažeidimo intensyvumas tiriamosiose stotyse reikšmingai nesiskiria. Tyrimo pradžioje daugiau pažeidimų buvo registruojama Žemaitijos KMS2012-2018 m. laikotarpiu Aukštaitijos KMS ir paskutiniuoju laikotarpiu: 2022-2024 Žemaitijos KMS, o 2025 dėl užtvinimo Aukštaitijos KMS.



2.36 pav. Pagrindinių medžių rūšių pažeidimo intensyvumo palyginimas Aukštaitijos ir Žemaitijos KMS.

Eglės intensyviau buvo pažeidžiamos Aukštaitijos KMS. Tik 2023 m. dėl žievėgraužio protrūkio Žemaitijoje, žuvusių medžių skaičius šio regiono stotyje viršijo pažeidimų skaičių Aukštaitijos KMS. Ryškiausiai skiriasi pušų pažeidimų intensyvumas. Tyrimų pradžioje iki 2015 m. pušų pažeidimo intensyvumas tarp šių stočių buvo nereikšmingas, ar net kiek tai didesnis Aukštaitijos KMS, tai po šių metų pušys Žemaitijos KMS pažeidžiamos 2-3 kartus intensyviau Žemaitijos KMS. Tai stiprių snoieglaužų rezultatas, kai dėl šlapio sniego buvo laužomos šakos ar nulaužiama ir pušies visa laja, dėl ko pušys neišvengiamai nudžiūdavo.

2.4.4. Medžių pažeidimų rezultatų apibendrinimas

2020 m. Aukštaitijos KMS teritorijoje iš 592 atrinktų viršaujančių, vyraujančių ir iš dalies stelbiamų miško medžių 65 identifikuoti seni ir švieži pažeidimai, kurie iš esmės turėjo ar galėjo turėti įtakos jų būklę. Paskutiniaisiais 2025 m. tokių pažeidimų registruota 39 vnt.

Daugiausiai pažeista išlieka medžių kamienų apatinė dalis (3). Pažeidimai šioje srityse jau daugelį metų beveik siekia ar viršija 50% visų užregistruotų pažeidimų. Kiek mažiau pažeistas lajos kamienas (6) – iki 27% pažeidimų. Tai stipraus vėjo padarinys. Kitoms medžio sritKMS tenka žymiai mažiau pažeidimų. Pažeidimai šaknų ir priekelminėje kamieno srityse indikavo vėjavartas, kurių AKMS baseine buvo užregistruota iki 5,3 % visų medžių. Visame kamiene (4), viršutiniame kamieno dalyje (5) ir šakose (7) užregistruota maždaug iki 6% visų pažeidimų.

Dažniausiai pasikartojantis pažeidimas buvo: atviros žaizdos (3). Šis pažeidimas viršijo 46% visų pažeidimų. Tai įvairaus senumo bei intensyvumo elnių nulopyti eglių kamienai. 25% pažeidimų sudarė viršūninio ūglio ar viršūnės netekimas (21), kurį sąlygojo snieglaužos ir vėjalaužos. Eglinio topografo, ūglių ir lapų pažeidimai 2020 m. viršijo kaip ir 2019 m. 13 %, o vėžiniai susirgimai ir įvairūs kamieno nulenkimai dėl smarkaus vėjo sudarė apie 3 % visų pažeidimų.

2020 m. daugiausiai pažeistos buvo paprastosios eglės, kurios sudarė virš 80% visų pažeistų medžių, ar apie 30% visų stebėtų eglių. 5% visų pažeidimų teko beržams, ar 1% visų stebėtų beržų ir 10% visų pažeistų medžių pušimas, ar 5% visų stebėtų pušų.

Žemaitijos KMS teritorijoje daugiausiai pažeidimų rasta viso kamieno srityje (4). Pažeidimai šioje srityje padidėjo iki 41% visų užregistruotų pažeidimų. Tai žievėgraužio tipografo medžio pažeidimo sritis. Pažeidimai lajos kamiene siekė 27 %. Padidėjo dėl pasikartojančių sausrų pažeistų lapų ar spyglių (9) – 19 % ir viršutinės kamieno dalies pažeidimų (5) –9 %. Mažiausiai pažeidimų registruota šakų (7) srityje ir apatinėje kamieno dalyje (3). Šaknų ir priekelminėje (1-2) srityse paskutiniaisiais metais pažeidimų nerasta.

Dažniausiai pasikartojantis pažeidimas buvo po pasikartojančių sausrų eglinio tipografo pažeidimai (25). Kurių skaičius lyginant su 2019 m. sumažėjo iki 45%. Dvigubai mažiau pažeidimų registruota lajos kamieno srityje (21) ir ūglių/lapų pažeidimų (24). Jų skaičius šioje srityje sumažėjo iki 20-22 %. Tokį šio pažeidimo registracijų skaičių sąlygojo vėl pasikartojančios vėjalaužos ir snieglaužos. Vos kelis procentus pažeidimų sudarė atviros žaizdos (3), sakotakių pažeidimai (4) ir nulaužtas kamienas (11).

Daugiausiai pažeistos buvo paprastosios eglės, kurios sudarė virš 80% visų pažeistų medžių ir apie 15% pušys.

Apibendrinus 16 metų pažeidimų tyrimo rezultatus Aukštaitijos KMS nustatyta, kad paskutiniuoju laikotarpiu mažėja pažeidimų priekelminėje, šaknų srityje (sumažėjo vėjavartų) ir kamieno srityje, tačiau vėl pradėjo didėti pažeidimai lajoje. Žievėgraužio tipografo pažeidimų intensyvumas Aukštaitijos KMS baseine nors dėl pasikartojančių sausrų padidėjo, bet išlieka maždaug panašiame lygmenyje kaip ir ankstesniais metais.

16 metų pažeidimų tyrimo rezultatai Žemaitijos KMS parodė, kad dėl pasikartojančių sausrų žievėgraužis tipografas dažniausiai pažeidžia visą eglės kamieną, ko pasėkoje tokie medžiai žūna. Šio kenkėjo pažeidimų skaičius viršija 50 % visų registruotų miške pažeidimų ir 12,2% visų stebėtų eglių. Tai besiformuojanti nauja grėsmė brandiems ir perbrendusiems eglynams Vakarų Lietuvos regiono miškams.

Tyrimų pradžioje žymiai intensyviau buvo pažeidžiami Aukštaitijos KMS baseine augantys medžiai. Šis procesas tęsėsi iki 2015 m. Po šių metų, kaip ir medžių lajų būklės kaitoje registruojamas priešingas procesas – Aukštaitijos KMS pažeidimų pradeda mažėti, o reikšmingai išaugo Žemaitijos KMS baseine augančių medžių pažeidimų skaičius, kuris jau paskutiniuoju laikotarpiu (2021-2025 m., reikšmingai viršija pažeidimų intensyvumą, nustatytą Aukštaitijos KMS.

2020 M. ĮVARDINTA GRĖSMĖ DĖL DRĖGMĖS TRŪKUMO šiame Lietuvos regione pasitvirtina. Medžių lajų būklė tapo blogesnė nei Aukštaitijos KMS, o medžių pažeidimo intensyvumas didesnis..

Beržų pažeidimo intensyvumas tiriamosiose stotyse reikšmingai nesiskiria. Tyrimo pradžioje daugiau pažeidimų buvo registruojama Žemaitijos KMS2012-2018 m. laikotarpiu Aukštaitijos KMS ir paskutiniuoju laikotarpiu: 2022-2024 Žemaitijos KMS, o 2025 dėl užtvinimo Aukštaitijos KMS.

Eglės intensyviau buvo pažeidžiamos Aukštaitijos KMS. Tik 2023 m. dėl žievėgraužio protrūkio Žemaitijoje, žuvusių medžių skaičius šio regiono stotyje viršijo pažeidimų skaičių Aukštaitijos KMS. Ryškiausiai skiriasi pušų pažeidimų intensyvumas. Tyrimų pradžioje iki 2015 m. pušų pažeidimo intensyvumas tarp šių stočių buvo nereikšmingas, ar net kiek tai didesnis Aukštaitijos KMS, tai po šių metų pušys Žemaitijos KMS pažeidžiamos 2-3 kartus intensyviau Žemaitijos KMS. Tai stiprių snoieglaužų rezultatas, kai dėl šlapio sniego buvo laužomos šakos ar nulaužiama ir pušies visa laja, dėl ko pušys neišvengiamai nudžiūdavo.

Išvados

1. Per 16 metų stebėjimų nustatyta, kad medžių pažeidimų pobūdis ir intensyvumas kito priklausomai nuo klimato sąlygų ir medynų rūšinės sudėties, o jautriausia rūšis išliko paprastoji eglė.
2. Po 2015 m. pažeidimų intensyvumas Aukštaitijos KMS mažėjo, tačiau Žemaitijos KMS reikšmingai didėjo dėl pasikartojančių sausrų ir eglinio žievėgraužio (*Ips typographus*) plitimo.
3. Pagrindiniai registruoti pažeidimai buvo susiję su vėjo, sniego ir sausrų poveikiu bei žievėgraužio pažeidimais, kurie brandžiuose eglynuose tapo svarbiausia medžių žuvimo priežastimi.
4. 2021–2025 m. Žemaitijos KMS medynuose pažeidimų intensyvumas viršijo Aukštaitijos KMS, patvirtindamas didėjančią klimato kaitos ir kenkėjų keliamą grėsmę Vakarų Lietuvos eglynams.
5. Kasmetinė pažeidimų apskaita pagal ICP Forests metodiką leidžia nustatyti neigiamas miškų būklės tendencijas, įvertinti rizikos veiksnius ir pagrįsti ilgalaikes miškų prisitaikymo prie klimato kaitos priemones.

Medžių pažeidimų grėsmės ir prognozės

Ilgalaikiai medžių pažeidimų tyrimai Aukštaitijos ir Žemaitijos kompleksiško monitoringo stotyse parodė, kad pažeidimų pobūdis ir intensyvumas per pastaruosius 16 metų reikšmingai pasikeitė. Tyrimų pradžioje didesnis pažeidimų intensyvumas buvo registruojamas Aukštaitijos KMS, tačiau nuo 2015 m. situacija pasikeitė – pažeidimų skaičius Aukštaitijos KMS palaipsniui mažėjo, o Žemaitijos KMS sparčiai didėjo. 2021–2025 m. laikotarpiu Žemaitijos KMS medžių pažeidimų intensyvumas jau reikšmingai viršijo Aukštaitijos KMS.

Abiejose stotyse jautriausia medžių rūšis išliko paprastoji eglė. Aukštaitijos KMS didžiausią neigiamą poveikį turėjo kamienų mechaniniai pažeidimai, vėjo ir sniego sukelti viršūnių lūžiai bei žievėgraužio tipografo pažeidimai. Žemaitijos KMS pagrindiniu medynų būklę lemiančiu veiksniu tapo pasikartojančių sausrų susilpnintų eglių masiniai žievėgraužio tipografo pažeidimai, kurie daugeliu atvejų baigdavosi medžių žūtimi. Šio kenkėjo pažeidimai sudarė daugiau kaip pusę visų registruotų medžių pažeidimų ir tapo pagrindine brandžių eglynų nykimo priežastimi Vakarų Lietuvos regione.

Beržų pažeidimų intensyvumas tarp stočių ilgalaikėje perspektyvoje reikšmingai nesiskyrė ir daugiausia buvo susijęs su ekstremaliomis meteorologinėmis sąlygomis – sausromis, vėjavartomis, snieglaužomis bei lokaliais užtvindymo atvejais. Tuo tarpu pušų pažeidimų dinamika tarp stočių skyrėsi ryškiausiai. Iki 2015 m. reikšmingų skirtumų nenustatyta, tačiau vėliau Žemaitijos KMS pušų pažeidimų intensyvumas tapo 2–3 kartus didesnis negu Aukštaitijos KMS. Tai daugiausia lėmė pasikartojančios šlapio sniego sukeltos snieglaužos, kurių metu buvo laužomos šakos ir viršūnės arba nulaužiamos visos lajos.

Gauti rezultatai rodo, kad pastaraisiais metais didžiausią grėsmę miškų būklei kelia ne pavieniai pažeidimai, bet kompleksinis klimato kaitos poveikis. Pasikartojančios sausros silpnina medžių fiziologinę būklę ir sudaro palankias sąlygas žievėgraužio tipografo plitimui, o dažnėjančios audros ir šlapio sniego epizodai didina mechaninių pažeidimų mastą. Šių veiksnių sąveika spartina medžių žūtį, ypač brandžiuose ir perbrendusiuose eglynuose.

Esamos tendencijos leidžia prognozuoti, kad artimiausiais dešimtmečiais didžiausia rizika išliks brandžių eglynų stabilumui, ypač Žemaitijos KMS regione. Tikėtina, kad dažnėjant sausroms ir ekstremaliems meteorologiniams reiškiniams didės žievėgraužio tipografo protrūkių dažnis, o mechaniniai medžių pažeidimai taps vis svarbesniu miškų būklę lemiančiu veiksniu. Todėl nuoseklus kasmetinis medžių pažeidimų registravimas kartu su lajų būklės, medžių augimo ir aplinkos veiksnių stebėsena išlieka viena svarbiausių priemonių anksti nustatant neigiamas miško ekosistemų kaitos tendencijas ir prognozuojant jų tolesnę raidą.

2.5. Medynų būklė augalijos tyrimų stacionaruose

1993m. Aukštaitijos kompleksinio monitoringo stotyje (KMS) buvo išskirtas vienas kartografuotas 50m × 50m tyrimo barelis visų augalijos ardų tyrimams. 1994m. įsteigus Žemaitijos KMS, joje išskirtas 40m × 40m kartografuotas augalijos tyrimo stacionaras. Taip pat pastaraisiais metais buvo praplėstas kartografuotų barelių tinklas Aukštaitijoje. Šiam tikslui panaudoti du kartografuoti bareliai, kurie buvo išskirti baseinui būdingose augavietėse medynų našumo tyrimams. Tokiu būdu medynų struktūriniai pokyčiai tiriami 2-juose Aukštaitijos ir viename – Žemaitijos KMS augalijos tyrimų stacionare. 1 kartografuotas barelis dėl labai intensyvios vėjalaužos tyrimams pasidarė netinkamas. 2017 m. vėjalaužų pažeistas augalijos tyrimų stacionaras buvo atkurtas, o čia vykdyti sumedėjusios ir žolinės augalijos tyrimai atnaujinti.

Vienas pagrindinių tikslų yra medyno struktūros kaitos analizė, kurios metu nustatomi bioindikaciniai rodikliai labiausiai atspindintys būdingiausius medynų pokyčius sąlygojamus foninės taršos bei klimatinių veiksniu. Tačiau šie tyrimai vykdomi tik kas 5 metai. Medynų būklė yra vienintelis parametras, kuris augalijos tyrimo stacionaruose nustatomas kasmet.

Darbo objektas ir metodas

Stacionaruose kas 5 metai vykdomi visų augalijos ardų tyrimai, tame tarpe ir medžių augimo ir medyno struktūros pokyčių tyrimai. Stacionare kiekvienas medis, kurio kamieno skersmuo didesnis negu 8 cm numeruojamas ir vietinės koordinačių pagalbos dėka nustatoma jo padėtis medyne. Taip pat išmatuojami pagrindiniai dendrometriniai parametrai: medžio aukštis, lajos pagrindo aukštis, kamieno skersmuo bei lajos skersmuo (spinduliai pasaulio šalių atžvilgiu). Šalia šių tyrimų nustatoma pomiškio rūšinė sudėtis bei atskirų augalų rūšių padengimo procentas. Tik medžių būklė augalijos stacionaruose vertinama kasmet. Augalijos tyrimų stacionarų pagrindinės taksacinės charakteristikos pateiktos 2.11 lentelėje.

Kaip matyti iš pateiktų duomenų Aukštaitijos KM stotyje pirmas stacionaras (AKMS_01) įkurtas natūraliai drėkinamame (Nbl), aukšto produktyvumo (B_1), brukniniame (v), perbrendusiame (A.kl. – 15) pušyne su silpnai išreikšta eglės priemaiša bei antru jos ardu ir pomiškiu.

Aukštaitijos KMS antras stacionaras (AKMS_02) įkurtas laikinai užmirkusioje pakankamai derlingoje augavietėje (Lcl) ir labai aukšto produktyvumo, kiškiakopūstiniame, perbrendusiame pušyne su nedidele eglės priemaiša bei gausiausiu jos antru ardu bei pomiškiu.

2.13 lentelė. Medynų, kuriuose išskirti tyrimo stacionarai pagrindinės taksacinės charakteristikos

Tyrimo	Medynų taksacinės charakteristikos						
stacionaras	Rūšinė sudėtis	Amžiaus klasė	Bonitetas	Skalsumas	Tūris 1 ha m3	DTG	Miško tipas
AKMS_01	9P1E	15	1	0,5	300	Nbl	*vacciniosum*
AKMS_02	9P1E+B	17	1A	0,7	440	Lcl	*oxalidosum*
AKMS_03	6E2P2B	8	3	0,6	260	Pcn	*caricosum*
ŽKMS_01	7E1P2E	8	2	0,8	370	Ncl	*myrtilius - oxalidosum*
DKMS_01	10 P	8	2	0,8	260	Nbl	*vacciniosum*

Kaip matyti iš pateiktų duomenų Aukštaitijos KM stotyje pirmas stacionaras (AKMS_01) įkurtas natūraliai drėkinamame (Nbl), aukšto produktyvumo (B_1), brukniniame (v), perbrendusiame (A.kl. – 15) pušyne su silpnai išreikšta eglės priemaiša bei antru jos ardu ir pomiškiu.

Aukštaitijos KMS antras stacionaras (AKMS_02) įkurtas laikinai užmirkusioje pakankamai derlingoje augavietėje (Lcl) ir labai aukšto produktyvumo, kiškiakopūstiniame, perbrendusiame pušyne su nedidele eglės priemaiša bei gausiausiu jos antru ardu bei pomiškiu.

Aukštaitijos KMS trečias stacionaras (AKMS_03) įkurtas pelkinėje pakankamai derlingoje miško augavietėje (Pcl), perbrendusiame eglyne su nedidele pušies ir beržo priemaiša bei eglės antru ardu bei pomiškiu. 2010 m. dėl labai stipraus vėjo virš 30% medžių buvo išversta ar sulaužyta. Paskutiniaisiais 2013 m. vėjavartos pasikartojo dar kartą. 2017 m. šis stacionaras atkurtas. 2018 m. šiame stacionare pratęsti medžių būklės ir prieaugio tyrimai, kurie buvo tęsiami ir 2020 m..

Žemaitijos KM stoties augalijos tyrimo stacionaras įkurtas vienoje iš būdingiausių eglės augavietėje – mėlyniniame-kiškiakopūstiniame eglyne su keliomis, skirtingo amžiaus eglės kartomis.

Dzūkijos KM stoties stacionaras įkurtas bręstančiame, tipingame Dzūkijos KMS baseino brukniniame pušyne. Tyrimų pradžioje iki 2001 m., šiame stacionare tyrimai buvo atliekami kasmet. Sustabdžius tyrimus jie buvo dar kelis kart kartoti 2014 ir 2021 m. Nuo 2024 metų kasmetiniai tyrimai šiame stacionare atnaujinti.

Darbo rezultatai

2.5.1. Medynų būklė Aukštaitijos KMS stacionaruose

Vienas iš pagrindinių medynų būklės rodiklių, šalia vidutinės medžių defoliacijos laikomas žuvusių medžių skaičius. Aukštaitijos KMS pirmajame stacionare medžių išsiretinimo intensyvumas siekė 1,60% per metus, t.y. per 27 m. laikotarpį žuvo 80 medžiai iš 192 užregistruotų 1993 metais. Tai sudaro 41,7 % visų medžių. Intensyviausiai sumažėjo lapuočių medžių – beržų 61,1 %, kiek mažiau žuvo eglių – 42,4 % ir mažiausiai pušų – tik 27,6 %.

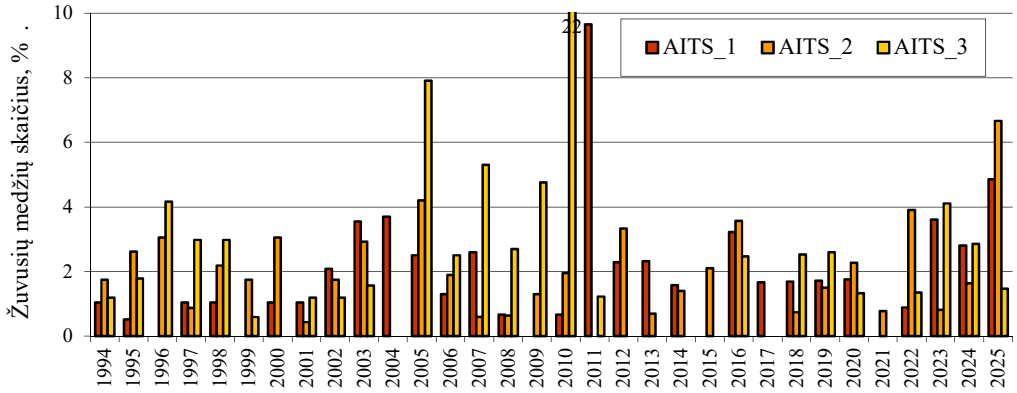
Antrasis Aukštaitijos KMS augalijos intensyvių tyrimų stacionaras, įkurtas perbrendusiame Ia boniteto pušyne, augančiame laikinai užmirkusioje, pakankamai derlingoje miško Lc augavietėje, kur GW lygis siekia apie 6-7 m.

Antrajame stacionare AKMS_02 bendras medžių iškritimas buvo didesnis. Medžių išsiretinimo intensyvumas siekė po 1,62%, t.y. per 27 m laikotarpį žuvo 100 medžiai iš 229 registruotų dar 1993. Tai sudaro 43,7 % visų stebėtų medžių. Mažiausiai žuvo lapuočių – 28,6 %, pušų iškritimas viršijo 14,9%. Intensyviausias iškritimas užfiksuotas eglių. Per tiriamąjį laikotarpį šiame stacionare žuvo net 52,3% šios rūšies medžių. Tačiau, kaip taisyklė, žūsta atsilikę augime medžiai. Kelių didesnių beržų žūties priežastis – vėjalauža. Stambiausias ir perbrendusias egles pažeidė žievėgraužis tipografas. Dėl sausros poveikio žuvo ir viena drebulė.

Trečiojo stacionaro medžių iškritimo intensyvumas didžiausias. Jis siekia net 55,9% arba 2,1% per metus. Dar 2004 m. medžių iškritimas mažai skyrėsi nuo iškritimo intensyvumo užregistruoto I stacionare. Padėtis iš esmės pasikeitė paskutiniaisiais metais, kai medžių iškritimas padidėjo virš 7%. Tai dėl žievėgraužio tipografo pažeidimų žuvusios eglės – 8 medžiai iš 110. Taip pat kelios drebulės buvo nugraužtos bebrų. Išskirtiniai 2010 m., kai dėl vėjovartų stacionaruose žuvo 26 medžiai. Iš jų tik 1 pirmame stacionare, 3 antrame, o likę 22 3-me stacionare. 2020 m. detalūs sumedėjusios augalijos tyrimai parodė, kad šiame trečiame Aukštaitijos KMS baseino stacionare yra išlikęs 74 medžiai. Per 27 m. laikotarpį šiame stacionare iš viso žuvo 55,9 % medžių, arba 2,1 % per metus, iš kurių 44,1 % beržų, 60,5 % eglių ir 38,5 % pušų.

Žuvusių medžių skaičiaus dinamika rodo (2.37 pav.), kad per tiriamąjį laikotarpį, eliminavus išskirtinius 2010-2011 metus, kasmet vidutiniškai iškrenta apie 1,6-1,7% medžių. 2016-2017 m. I stacionare žuvo atitinkamai 4 ir 2 medžiai, II -jame žuvo 5 ir 0 medžių bei III-jame 1 ir 0 medžių. 2018 m. žuvo po du medžius I ir III stacionaruose, o 1 – II stacionare. Tai vidutinis medžių atkritimo intensyvumas, kuris stebimas stacionaruose nuo pat tyrimų pradžios, t.y. 1993 m.

2019-2020 m. žuvusių medžių skaičius tirtuose stacionaruose iš esmės nesiskyrė nuo daugiamečio vidurkio, nepaisant intensyvios sausros ir karščio bangų, lydimų žievėgraužio tipografo daromos žalos.



2.37 pav. Žuvusių medžių skaičius Aukštaitijos KMS tyrimų stacionaruose 1994-2025 m. (2010 m. AITS 3 žuvo net 22% apskaitos medžių, 2013 m. tyrimai sustabdyti dėl per mažai likusių medžių – 2016 m tyrimai atnaujinti)

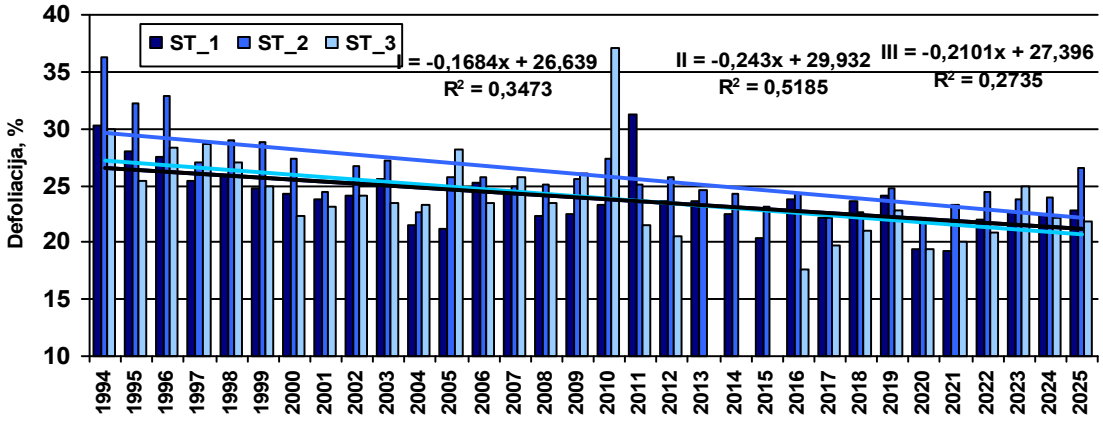
Paskutiniuoju 2021-2025 m. laikotarpiu stebimas žuvusių medžių augimas visuose trijuose stacionaruose. Ypač daug žuvusių medžių buvo registruojama 2025 m. I ir II stacionare, o III stacionare didžiausias žuvusių medžių skaičius užregistruotas 2023 m.

Medžių lajų defoliacijos duomenys rodo, kad visų medžių vidutinė defoliacija iki 2004 m. laipsniškai mažėjo. Nuo šio laikotarpio iki 2010-2011m. registruojamas, nors ir neženklus, medžių lajų vidutinės defoliacijos laipsnio augimas. Tokį defoliacijos augimą galėjo sąlygoti nepalankūs klimatiniai veiksniai. AKMS 3-io stacionaro labai aukštą defoliaciją 2005 ir 2007m.(virš 28 %) sąlygojo dėl žievėgraužio tipografo pažeidimų žuvusios eglės, o 2010 m. dėl vėjovartų žuvę medžiai.

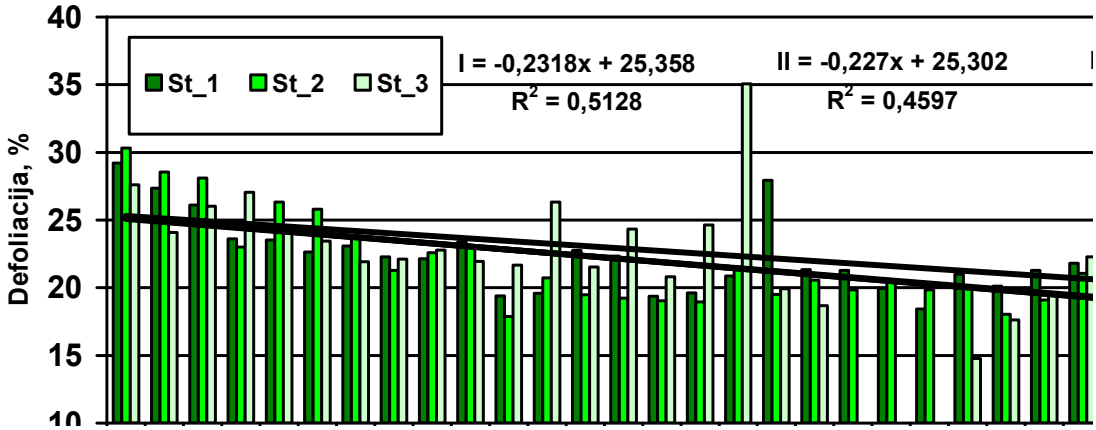
2011-2015 m. laikotarpiu visų medžių augančių Aukštaitijos KMS stacionaruose lajų vidutinė defoliacija turėjo tendenciją mažėti po 1,3 ir 0,75% per metus atitinkamai I ir II stacionaruose.

2018 m. sausra neigiamai paveikė medžių augančių tyrimo stacionaruose būklę. Visų ir tik vyraujančių medžių vidutinė defoliacija turėjo tendencija padidėti. Šį neigiamą nepalankių klimatinių veiksnių poveikį sustiprino pasikartojanti sausra 2019 m., kai I ir II stacionaruose augančių medžių lajų vidutinė defoliacija viršyjo 20%, o III-jame siekė 18%. Tai bepasikartojančių sausrų poveikio rezultatas.

Išskirtiniai 2020 m. meteorologinės sąlygos po besikartojančių sausrų 2018-2019 m. buvo ypač palankios medžių būklei ir jų augimui. Visuose tyrimų stacionaruose augančių medžių lajų būklė gerėjo kaip ir visame upelio baseine. Jų vidutinė defoliacija atitinkamai sumažėjo iki ir 20,2 %, 22,7% ir 19,9%. Ypač reikšmingai sumažėjo aukštutinio stacionaro medžių lajų defoliacija, kuri siekė apie 5%.



2.38 pav. Visų medžių vidutinės defoliacijos kaita Aukštaitijos KMS stacionaruose 1994-2020 m.



2.39 pav. 1-3 Krafto klasių medžių vidutinės defoliacijos kaita Aukštaitijos KMS stacionaruose.

Paskutiniuoju laikotarpiu 2021-2025 m., visų stacionarų medžių lajų būklė pradėjo blogėti, jų vidutinė defoliacija padidėjo apie 2-3 %.

Viršaujančių ir vyraujančių medžių lajų vidutinės defoliacijos sekoje reikšmingas mažėjimo trendas nustatytas tik natūralaus drėgnumo miško augavietėje įkurtame I stacionare ir tik iki 2015 m. Paskutiniaisiais 2015-2019 metais dėl pasikartojančių sausrų čia augančių medžių vidutinė defoliacija viršijo 21 % ribą. 2020 m. buvo vėl gi ypač palankūs čia augantiems medžiams. Vyraujančių ir viršaujančių medyne medžių vidutinė defoliacija sumažėjo net 7 %, ir tai vienas reikšmingesnių būklės atsikūrimų per visą tiriamąjį laikotarpį šiame stacionare.

2021-2025 m. šio I stacionaro medžių vidutinė defoliacija padidėjo nuo 16 iki 19%.

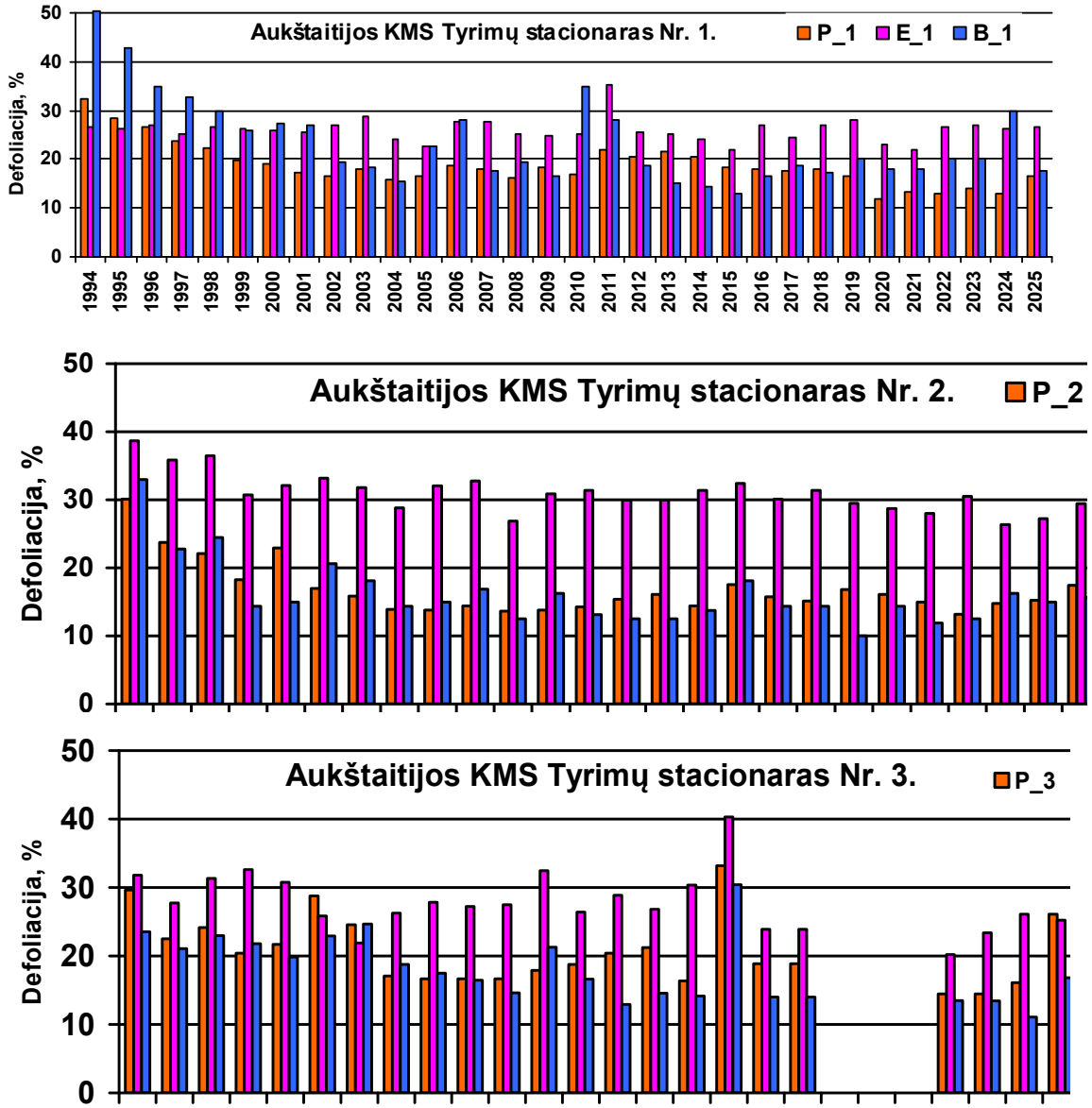
II stacionare šių medžių lajų vidutinė defoliacija praktiškai išlieka stabili (2.39 pav.). Tik 2017 m. dėl perteklinio kritulių kiekio čia augančių medžių lajų būklės atsikūrimo intensyvumas didžiausias, kaip ir 2020 m. Vidutinė viršaujančių medžių vidutinė defoliacija sumažėjo iki 18 %. Pasikartojančios 2018 ir 2019 m. sausros reikšmingai paveikė šiame stacionare augančių medžių

lajų būklę, padidindamos jų vidutinę defoliaciją iki 21 %, tačiau paskutiniųjų metų meteorologinės sąlygos turėjo reikšmingos įtakos medžių lajų būklei atsikurti.

2021-2025 m. šio II stacionaro medžių vidutinė defoliacija padidėjo nuo 19 iki 22%.

III stacianoro būklės kaitą reikšmingai sąlygojo vėjalaužs ir vėjavartos, o taip pat ir paskutiniųjų metų sausrus. Nepaisant šių nepalankių veiksnių, 2020 m. čia augančių medžių lajos būklės teigiamas pokytis vienas didžiausių per visą stebėjimo laikotarpį.

2021-2025 m. šio III stacionaro medžių vidutinė defoliacija pasiekė maksimalią reikšmę 2023m. virš 25 %, o paskutiniaisiais metais sumažėjo iki 19%.



2.40 pav. Atskirų rūšių medžių vidutinės defoliacijos kaita Aukštaitijos KMS stacionaruose

2011-2015 m. laikotarpiu I stacionare ypač reikšmingai gerėja eglių ir beržų būklė, Jų lajų vidutinė defoliacija mažėja po 2,76% ir 3,04% per metus atitinkamai. Pušų lajų vidutinė defoliacija mažėja ne taip intensyviai ir sudaro tik po 0,76% per metus. Šiuo laikotarpiu geriausia būkle pasižymi beržai, kiek didesnė vidutinė defoliacija pušų ir prasčiausios būklės išlieka šiame stacionare augančios eglės.

2015-2025 m. nepalankūs meteorologiniai veiksniai sąlygojo reikšmingą eglių lajų būklės pablogėjimą. Smarkiai padidėjo ir beržų lajų vidutinė defoliacija. Tik 2017 m. gausus kritulių kiekis turėjo reikšmingos įtakos eglių lajų būklei atsikurti, kai tuo tarpu beržų būklė ir toliau blogėjo. Dėl 2018-2019 m. sausros medžių lajų defoliacija padidėjo, o dėl didesnių kritulių kiekio lajų būklė vėl atsikūrė iki vienų geriausių vidutinės defoliacijos reikšmių per visą tiriamąjį laikotarpį.. Šį tendencija gerai atspindėjo gautus rezultatus visame Aukštaitijos KMS baseine.

2025 m. medžių vidutinė defoliacija buvo viena didžiausių per paskutinįjį 5 m. laikotarpį.

Išskirtiniai duomenys gauti tiriant pušų lajų būklės kaita. Gauti rezultatai parodė, kad pušų, augančių natūraliai drėkinamose sąlygose būklę nepalankūs klimatiniai veiksniai paveikė mažiausiai. Jų lajų būklė praktiškai nepakito ir net paskutiniaisiais 2016 m. buvo geresnė nei eglių ir beržų, o pasikartojančios sausros 2018 ir 2019 m. neturėjo jokio reikšmingo poveikio jų lajų vidutiniai defoliacijai didėti. 2019 m. čia augančių pušų lajų vidutinė defoliacija net sumažėjo 0,6%, tuo tarpu palankios 2020 m. meteorologinės sąlygos ypač paskatino formuotis tankiai lapijai, dėl ko pušų lajų defoliacija sumažėjo daugiau negu 5%.

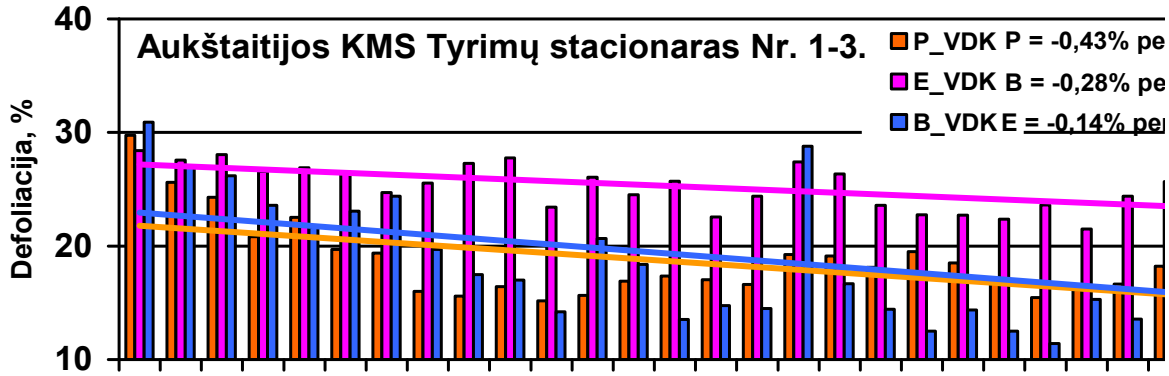
Nepaisant tokio būklės pagerėjimo, 2021-2025 m. registruojamas palaipsnis vidutinės defoliacijos augimo procesas.

Eglių lajų vidutinė defoliacija kito nereikšmingai, nors 2019 m. jos intensyvumas beveik siekė 30%. ***Tačiau ir šios rūšies medžiams palankios klimatinės sąlygos sudarė galimybę formuoti tankesnius spyglius bei padidinti prieaugį.***

2021-2025 m. laikotarpiu, nors ir nežymiai bet ir eglių defoliacija palaipsniui didėjo nuo 21 iki 23 %.

Beržų lajų būklė buvo geriausia 2015 m. Bepasikartojančios sausros reikšmingai pablogino šiame stacionare augančių beržų būklę. Vidutinė defoliacija padidėjo nuo 13 iki 20%. Tai vienas didžiausių būklės pablogėjimo rodiklių. ***Meteorologinės sąlygos, kurios buvo ypač palankios spygliuočiams medžiams, buvo mažiausiai reikšmingos beržams, nors būklės pagerėjimas 2020 m. buvo registruojamas visuose stacionaruose, tik ne toks reikšmingas, kaip spygliuočiams.***

2024 m. beržų lajų defoliacija pasiekė net 30 % ribą. Tai blogos būklės rodiklis.



2.41 pav. Atskirų rūšių visų medžių vidutinės defoliacijos kaita Aukštaitijos KMS stacionaruose.

II stacionaro medžių lajų būklės kaitos sekoje reikšmingesnių skirtumų nenustatyta. Paskurtiniuoju laikotarpiu geresne būklę medžiai šiame stacionare pasižymėjo 2015 ir 2020 m. Paskutiniuoju laikotarpių registruojamas vidų medžių vidutinės defoliacijos didėjimas. Ypač bloga beržų būklė buvo registruota 2022 ir 2024 m., kai jų vidutinė defoliacija artėjo prie 30 % ribos.

III stacionare taip pat nuo 2016 m. registruojamas palaipsnis vidutinės defoliacijos didėjimas.

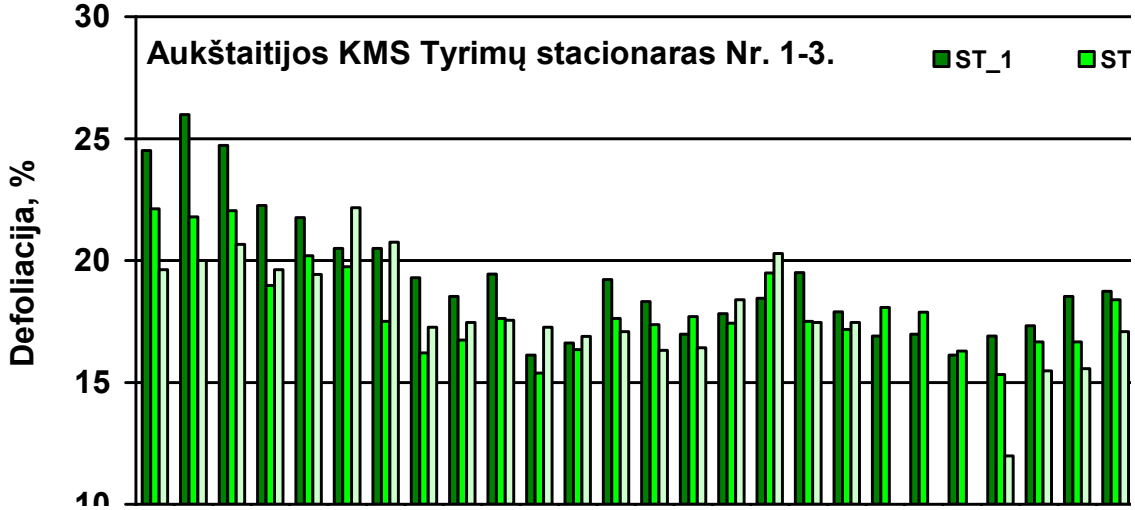
Apibendrinus rezultatus nustatyta, kad visų išsivystymo klasių eglių, augančios Aukštaitijos KMS augalijos tyrimo stacionaruose, lajų vidutinė defoliacija didžiausia. Išimtis užregistruota tik 2010 ir 2024 metais, kai eglių vidutinę defoliaciją viršijo beržų vidutinė defoliacija. Paskutiniuoju laikotarpiu eglių vidutinė defoliacija išlieka pakankamai stabiliame lygmenyje.

2020 m. dėl palankių klimatinių sąlygų, pirmiausiai dėl padidėjusio kritulių kiekio vegetacijos laikotarpiu eglių vidutinė defoliacija Aukštaitijos KMS stacionaruose sumažėjo vidutiniškai 4 %, kas rodo eglių gerą prisitaikymą prie dabartinių klimato kaitos sąlygų.

Iki 2009 m. taip pat reikšmingai mažėjo stacionaruose augančių beržų vidutinė defoliacija. Tačiau po intensyvių vėjalaužų, jų būklė reikšmingai pablogėjo 2010 m. ***2011-2016 m. registruojamas reikšmingas beržų lajų būklės atsikūrimo procesas. Vidutinė lajų defoliacija sumažėjo net iki 12%. Tik 2017-2018 m. stebimas pakankamai žymus tirtų beržų lajų defoliacijos laipsnio padidėjimas, ir ypač 2019 lyginant su 2018 m. Tai pasikartojančių sausrų poveikio rezultatas. 2020 m. palankių klimatinių sąlygų poveikio rezultatas – 3 % sumažėjusi Aukštaitijos KMS stacionarų beržų vidutinė defoliacija. Paskutinysis laikotarpis išsiskyrė beržų lajų būklės pablogėjimu ir ypač 2024 m.***

Geriausios ir pakankamai stabilios būklės išlieka pušys. Tik 2010-2013 m. laikotarpiu pušų lajų vidutinė defoliacija buvo padidėjusi iki 18-19 % ribose. Paskutiniuoju laikotarpiu, iki 2020 m. klimatiniai veiksniai taip pat pradėjo sąlygoti pušų būklės atsikūrimą, ir tik 2021-2025 m. laikotarpiu pušų lajų būklė reikšmingai pablogėjo. Jų vidutinė defoliacija išaugo net 5 %.

Eliminavus dėl nepalankių klimatinių veiksnių poveikio žuvusių medžių įtaką vidutinei defoliacijai, nustatyta, kad iki 2004 metų tirtų išlikusių gyvų medžių vidutinė defoliacija mažėjo reikšmingai po 0,5% kiekvienais metais, tačiau nuo šių metų iki 2010 m. buvo stebimas atvirkštinis procesas, medžių lajų vidutinė defoliacija didėjo reikšmingai maždaug po 0,6%.



2.42 pav. 1-3 Krafto klasių išlikusių gyvų medžių vidutinės defoliacijos kaita Aukštaitijos KMS stacionaruose

2011 - 2015 m. po nepalankių veiksnių poveikio stebimas medžių lajų būklės stabilizavimosi procesas su nereikšminga vidutinės defoliacijos mažėjimo tendencija. Tik po 2015 m. sausros ir jos epizodų 2016, 2018 ir ypač 2019 m. KMS baseinuose augančių medžių vidutinė defoliacija pradėjo reikšmingai didėti.

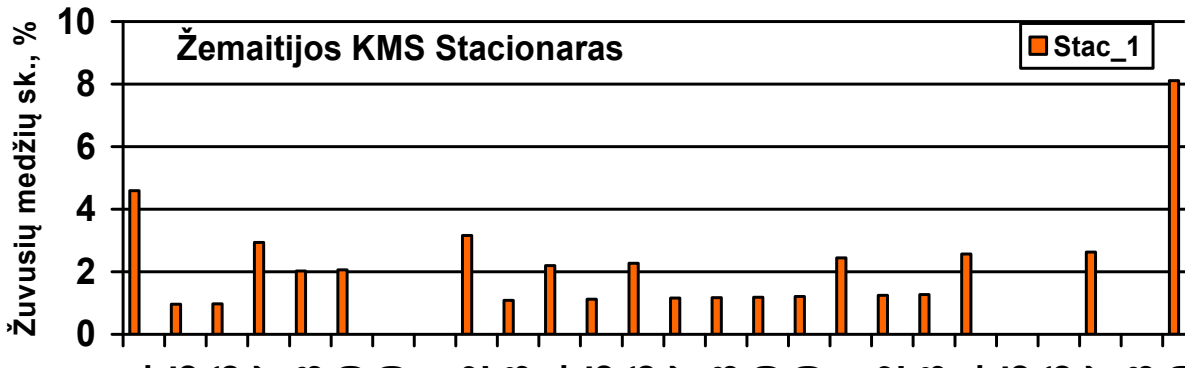
2020 m. išlikusių gyvų medžių būklė buvo analogiška kaip ir 2004 ar 2015 m. , kai tirtų medžių defoliacija svyravo apie 20 **% ir tik pačių seniausių medžių augančių antrajame stacionare medžių lajų defoliacija svyravo apie 23 %. Tai miškų geros būklės rodiklis.**

2021 – 2025 m. laikotarpiu pušų lajų būklė reguliariai blogėja. Tai naujas procesas prasidėjęs foninio užterštumo teritorijose.

2.5.2. Medyno būklė Žemaitijos KMS stacionare

Žemaitijos stacionare bendras medžių iškritimas per 25 m. laikotarpį siekia 37,6% ar 1,5% per metus. Nustatyta, kad žuvusios eglės yra įvairaus dydžio, nuo smulkių, atsilikusių augime iki stambių, dominuojančių ir viršaujančių medyne. Pagrindinė šių medžių žūties priežastis - entokenkėjai ir vejalaužos, o smulkesnių medžių – natūralus užstelbimas. 2002 metais net apie 5% eglių buvo pažeistos snieglaužos, o 2011 m. – žievėgraužio tipografo. Šiame stacionare kasmet dažniausiai žūsta tik po viena eglę. ***2014 m. dėl žievėgraužio topografo žuvo 3 eglės ir tik po 3 metų, 2017 m. vėl žuvo dvi eglės. 2018 m. žuvusių medžių stacionare neregistruota, tik vėl dėl šio kenkėjo pažeidimo, trijų eglių lajų būklė buvo įvertinta kaip labai prasta, t.y. defoliacija siekė 90 %. Tai potencialūs 2019 m. sausuoliai. 2019 m. žuvo 6 eglės.***

2015, 2018, 2020 ir 2025 m. žuvusių eglių tyrimo stacionare neregistruota, tačiau didžiausias jų skaičius nustatytas 2023 m., dėl žievėgraužio tipografo pažeidimų..

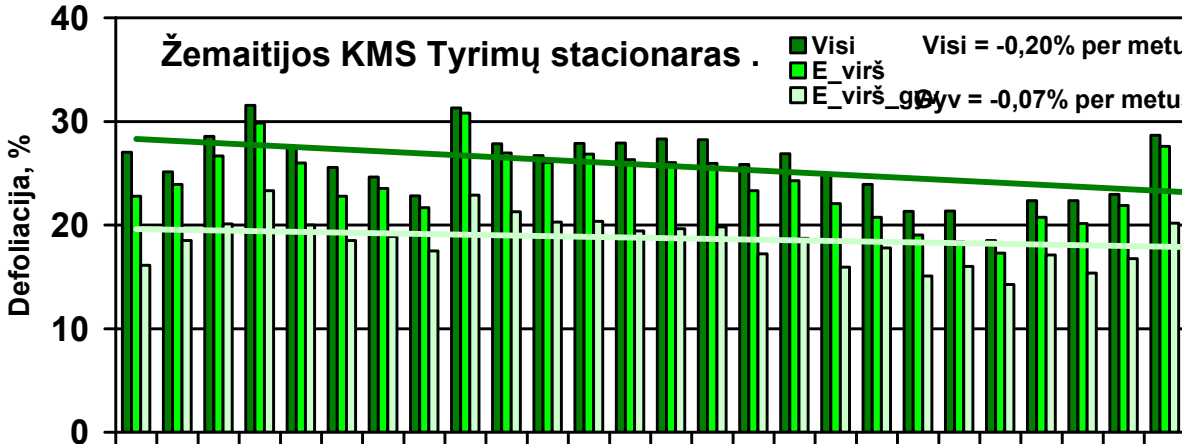


2.43 pav. Žuvusių medžių skaičius Žemaitijos KMS tyrimų stacionare 1995-2025 m.

Pagrindiniai medžių būklės kaitos parametrai Žemaitijos KMS stacionare pateikti 2.35 paveiksle. Metais, kuriais medžių vidutinė defoliacija buvo didžiausia užregistruotas ir didesnis žuvusių medžių skaičius.

Įdomu pažymėti, kad defoliacijos kaitos tendencijoms įtakos neturėjo medžių išsivystymo laipsnis. Vyraujančių ir atsilikusių augime medžių vidutinės defoliacijos kitimo pobūdis tiriamuoju laikotarpiu buvo analogiškas. Tik didesnių medžių vidutinė defoliacija buvo mažesnė, o žemesnių, atsilikusių augime – didesnė.

Didžiausias neigiamas defoliacijos pokytis užregistruotas 2002 metais. Pagrindinis veiksnys esminiai sąlygojantis medžių, pagrinde eglių, būklę buvo vasario mėnesį vykusios snieglaužos. Dėl šios priežasties pažeisti medžiai neteko vidutiniškai apie 30% lajos viršutinės dalies, o atskirais atvejais ir visos lajos. Tokiu būdu kenkėjų žalos pakartotinio išplitimo problema vėl tapo aktuali ir 2003 – 2006 m. laikotarpiu, kai eglių žuvimo intensyvumas dėl žievėgraužio viršijo 2% per metus.



2.44 pav. Visų, viršaujančių ir išlikusių gyvų viršaujančių eglių būklė Žemaitijos KMS stacionare

2008-2015 m. stebimas intensyvus tyrimo stacionare augančių medžių lajų būklės gerėjimo procesas. Vidutinės defoliacijos sumažėjimas siekia 10% per 8rių metų laikotarpį, arba po 1,25% per metus. Tik viršaujančių, vyraujančių ir iš dalies stelbiamų eglių vidutinė defoliacija mažėjo kiek silpniau, mažėjimo intensyvumas sudarė tik 5,3%, arba 0,66% per metus.

2015 m. sausra ir jos pasikartojimas 2016, 2018 ir 2019 m. neigiamai sąlygojo eglių lajų būklę Žemaitijos KMS stacionare. Būtent 2019 m. eglių vidutinė defoliacija reikšmingai didėjo ir pasiekė visų medžių – 29%, o tik viršaujančių 28 %. Tai viena didžiausių reikšmių per visą tiriamąjį laikotarpį.

Išskirtiniai 2020 m. rezultatai. Šiais metais registruotas reikšmingiausias eglių vidutinės defoliacijos sumažėjimas, net iki 17 %, t.y. beveik 10 % per metus. Tai geriausias eglių lajos būklės vidutinis parametras per visą tiriamąjį laikotarpį. Didelę įtaką tokiam sumažėjimui turėjo tai, kad 2019 m. stacionare žuvo net 6 eglės, o 2020 m. nei viena. Nepaisant šio fakto, viršaujančių ir išlikusių gyvų eglių defoliacija taip pat mažėjo, bet ne taip intensyviai. 2020 m. jų vidutinė defoliacija sumažėjo nuo 20,8 % iki 13,5 %, t.y. beveik 7 %.

2021-2025 m. laikotarpiu eglių defoliacija didėjo dėl pažeidimų, kenkėjų židiniui užgesus, 2025 m. eglių vidutinė defoliacija beveik susilygino su 2020 m. vidutine jos reikšme.

Apibendrinus gautus rezultatus, galima teigti, kad pasikartojančios sausros turėjo esminės reikšmės stacionaruose augančių medžių vidutinės defoliacijos kaitai. 2016 m. Aukštaitijos KMS ir Žemaitijos KMS tyrimų stacionaruose augančių medžių lajų defoliacija reikšmingai padidėjo, kaip ir buvo tikimąsi 2015 m. Pasikartojančios sausros 2018-2019 m. dar labiau paveikė eglių būklę bei medžių mirtingumą, dėl ko 2019 m. eglių lajų būklė buvo viena iš prasčiausių. Šiais metais žuvo virš 8 % stebimų medžių. Pagrindinė priežastis kurių buvo žievėgraužio tipografo pažeidimai. Tačiau paminėtina tai, kad palankios meteorologinės sąlygos ir pakankamas kritulių kiekis reikšmingai sąlygoja sausros pakenktų eglynų būklės atsikūrimą. vėl neigiamai paveikė eglių lajų būklę,

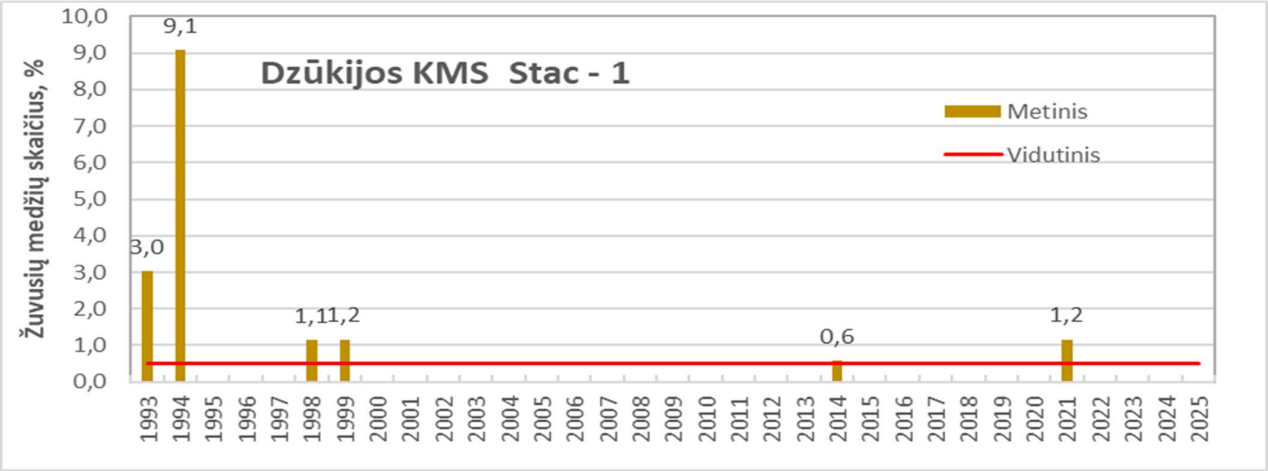
padidindama jų defoliacijos laipsnį Tik ypač gausūs kritulių. Gausūs krituliai 2017 m. kiek tai sustabdė būklės blogėjimo procesą po 2015-2016 m. sausrų, o 2020 m. net sąlygojo reikšmingiausią būklės atsikūrimo laipsnį. Tokie rezultatai rodo, kad paprastosios eglės individai yra gerai prisitaikę prie dabartinių klimatinių sąlygų, ir po sausrų iškritus gausesniems kritulių kiekiams, jos sugeba reikšmingai atkurti lajos būklę, ypač jaunesnės kartos medynuose. Perbrendusioms eglės bepasikartojančios sauros yra mirtinai pavojingos, nes tokias nusilpusias egles dažnai užpuola žievėgraužis tipografas, kurio poveikį išgyventi tokiems medžiams jau nepavyksta. Tai patvirtino 2023 m. užregistruotas didžiausias žuvusių eglių skaičius šiame stacionare.

2.5.3. Medyno būklė Dzūkijos KMS stacionare

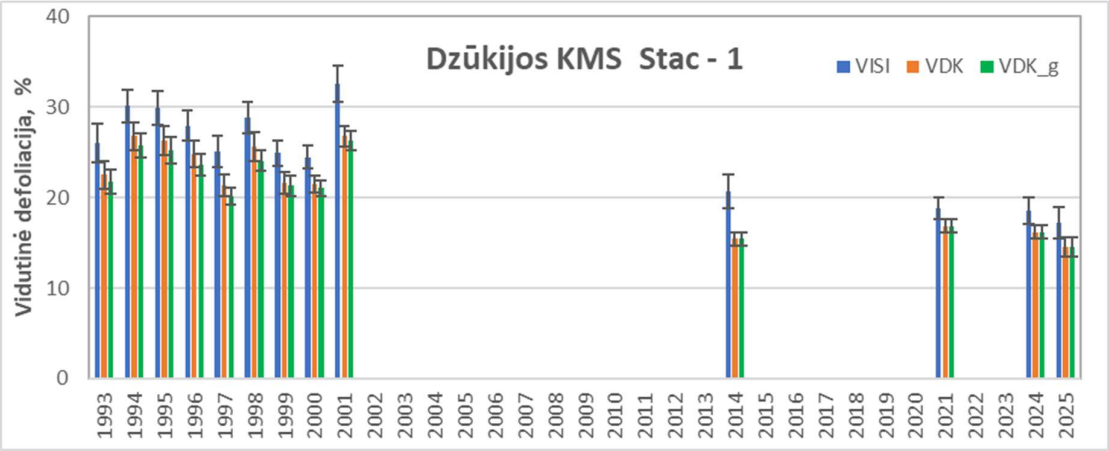
Pagrindiniai medžių būklės kaitos parametrai Dzūkijos KMS stacionare pateikti 2.35 paveiksle. Metais, kuriais medžių vidutinė defoliacija buvo didžiausia skirtingai negu Žemaitijos KMS stacionare, nebuvo registruotas ir didesnis žuvusių medžių skaičius.

Didesnis medžių iškritimas buvo registruojamas tyrimų pradžioje, kai Dzūkijos pušynai buvo masiškai pažeisti spyglius graužiančių kenkėjų. Per tiriamąjį laikotarpį registruojamas tik vos 0,5 % intensyvumo pušų džiūvimas, kuris pasireiškė vos per keletą metų. Dėl šios priežasties medžių žūtis ir vidutinė defoliacija šiame stacionare neturėjo jokio tarpusavio ryšio.

Įdomu pažymėti, kad defoliacijos kaitos tendencijoms įtakos neturėjo medžių išsivystymo laipsnis. Vyraujančių ir atsilikusių augime medžių vidutinės defoliacijos kitimo pobūdis tiriamuoju laikotarpiu buvo analogiškas. Tik didesnių medžių vidutinė defoliacija buvo mažesnė, o žemesnių, atsilikusių augime – didesnė.



2.45 pav. Žuvusių medžių skaičius Dzūkijos KMS tyrimų stacionare 1993-2025 m.



2.46 pav. Visų, viršaujančių ir išlikusių gyvų viršaujančių eglių būklė Dzūkijos KMS stacionare

Vidutinės defoliacijos kaitos rezultatai parodė pakankamai reikšmingą vidutinės defoliacijos mažėjimo trendą, kuris vidutiniškai siekė po 0,3-0,4 % per metus. Tai geriausias miškų būklės kaitos rodiklis tarp visų tirtų objektų.

Išvados

Aukštaitijos KMS tyrimų stacionaruose žuvusių medžių skaičiaus dinamika parodė, kad, neįtraukus išskirtinių 2010–2011 m., per visą tyrimų laikotarpį kasmet vidutiniškai iškrisdavo apie 1,6–1,7 % medžių. Toks atkritimo intensyvumas išliko gana stabilus nuo ilgalaikių stebėjimų pradžios 1993 m.

2021–2025 m. laikotarpiu visuose trijuose Aukštaitijos KMS stacionaruose nustatytas didėjantis medžių atkritimas. Didžiausias žuvusių medžių skaičius I ir II stacionaruose užregistruotas 2025 m., o III stacionare – 2023 m.

Medžių lajų defoliacijos analizė parodė, kad iki 2004 m. visų medžių vidutinė defoliacija nuosekliai mažėjo. Po trumpalaikio padidėjimo defoliacijos mažėjimo tendencija tęsėsi iki 2015 m. Tačiau 2016–2025 m. laikotarpiu medžių būklė pradėjo blogėti. Išimtis buvo 2020 m., kai po 2018–2019 m. sausrų susiklosčiusios palankesnės meteorologinės sąlygos skatino medžių būklės atsikūrimą. Tais metais visuose tyrimų stacionaruose, kaip ir visame Aukštaitijos KMS baseine, nustatyta mažesnė vidutinė defoliacija.

2021–2025 m. laikotarpiu visuose stacionaruose medžių lajų būklė vėl blogėjo – vidutinė defoliacija padidėjo maždaug 2–3 procentiniais punktais.

Geriausia ir stabiliausia lajų būkle visą tyrimų laikotarpį pasižymėjo paprastoji pušis. Tik 2010–2013 m. jos vidutinė defoliacija buvo padidėjusi iki 18–19 %. Iki 2020 m. palankesnės klimato sąlygos skatino pušų būklės gerėjimą, tačiau 2021–2025 m. jų būklė vėl reikšmingai pablogėjo – vidutinė defoliacija padidėjo apie 5 procentinius punktus.

Žemaitijos KMS stacionare per 25 metų laikotarpį bendras medžių atkritimas sudarė 37,6 %, arba vidutiniškai 1,5 % per metus. Nustatyta, kad žuvo įvairaus išsivystymo eglės – nuo augime atsilikusių iki vyraujančių ir viršaujančių medyne. Pagrindinės jų žūties priežastys buvo žievėgraužio tipografo pažeidimai ir vėjalaužos, o smulkesnių medžių – natūralus stelbimas.

Žievėgraužio tipografo pažeidimų dinamika buvo epizodinė. 2014 m. žuvo trys eglės, 2017 m. – dvi, o 2019 m. – šešios. 2015, 2018, 2020 ir 2025 m. žuvusių eglių neregistruota, tačiau didžiausias jų skaičius nustatytas 2023 m., kai išplito naujas žievėgraužio tipografo židinys. 2021–2025 m. eglių vidutinė defoliacija didėjo dėl kenkėjo pažeidimų, tačiau jam nuslopus 2025 m. ji beveik grįžo į 2020 m. lygį.

Dzūkijos KMS stacionare didžiausias medžių atkritimas registruotas tyrimų pradžioje, kai pušynus buvo masiškai pažeidę spyglius graužiantys kenkėjai. Vėliau pušų džiūvimo intensyvumas buvo labai mažas – vidutiniškai apie 0,5 % per metus, todėl šiame stacionare nenustatyta reikšmingo ryšio tarp medžių žūties ir vidutinės defoliacijos.

Vyraujančių ir augime atsilikusių medžių defoliacijos kitimo pobūdis buvo panašus, tačiau vyraujančių medžių vidutinė defoliacija visą laikotarpį išliko mažesnė nei augime atsilikusių medžių.

Vidutinės defoliacijos analizė parodė statistiškai reikšmingą jos mažėjimo tendenciją Dzūkijos KMS stacionare – vidutiniškai po 0,3–0,4 procentinio punkto per metus. Tai geriausias miškų būklės gerėjimo rodiklis tarp visų tirtų objektų.

Skirtingai nei Aukštaitijos KMS stacionaruose, Dzūkijos KMS 2021–2025 m. pušų lajų būklės blogėjimo tendencija nenustatyta.

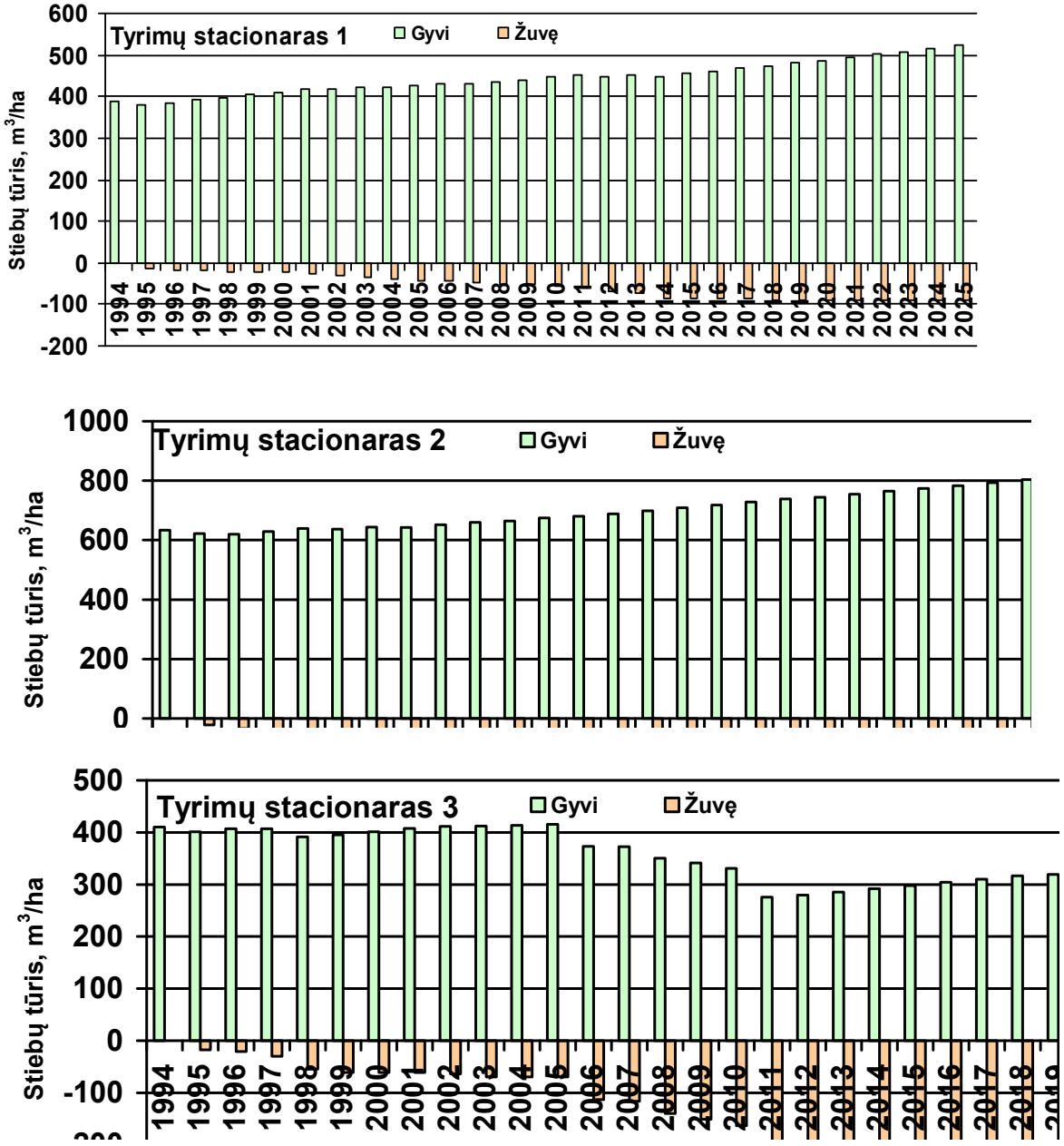
2.5.4. *KMS stacionaruose augančių medžių dendrometrinių parametrų ir tūrio prieaugio kaita 1994-2025 m. laikotarpiu*

Aukštaitijos KMS tirtų medžių stiebų tūrio analizė parodė, kad Aukštaitijos KMS I stacionare gyvų medžių tūris per 32 m. laikotarpį padidėjo nuo 388 m^3/ha iki (468 m^3/ha -2020 m.) , kas sudaro 80,5 m^3/ha arba 3,1 m^3/ha per metus. Per tą patį laikotarpį žuvusių medžių tūris didėjo iki 110 m^3/ha, t.y. 4 m^3/ha per metus. Didžiausiu prieaugiu pasižymėjo eglės 59 %, kiek mažesniu pušys 21 %, o beržų tūris sumažėjo 45 %.

II stacionare gyvų medžių tūris padidėjo nuo 632 m^3/ha iki 784 m^3/ha , t.y. 151 m^3/ha arba 5,8 m^3/ha per metus. Per tą patį laikotarpį žuvusių medžių tūris didėjo iki 119 m^3/ha, t.y. 4.6 m^3/ha per metus. Didžiausiu prieaugiu pasižymėjo drebulės, kurių prieaugis per tiriamąjį laikotarpį sudarė daugiau negu 110 %, pušų prieaugis siekė 23 %, o eglių tik 13 %. Beržų prieaugis šiame stacionare buvo vienas iš didžiausių ir siekė 38 %.

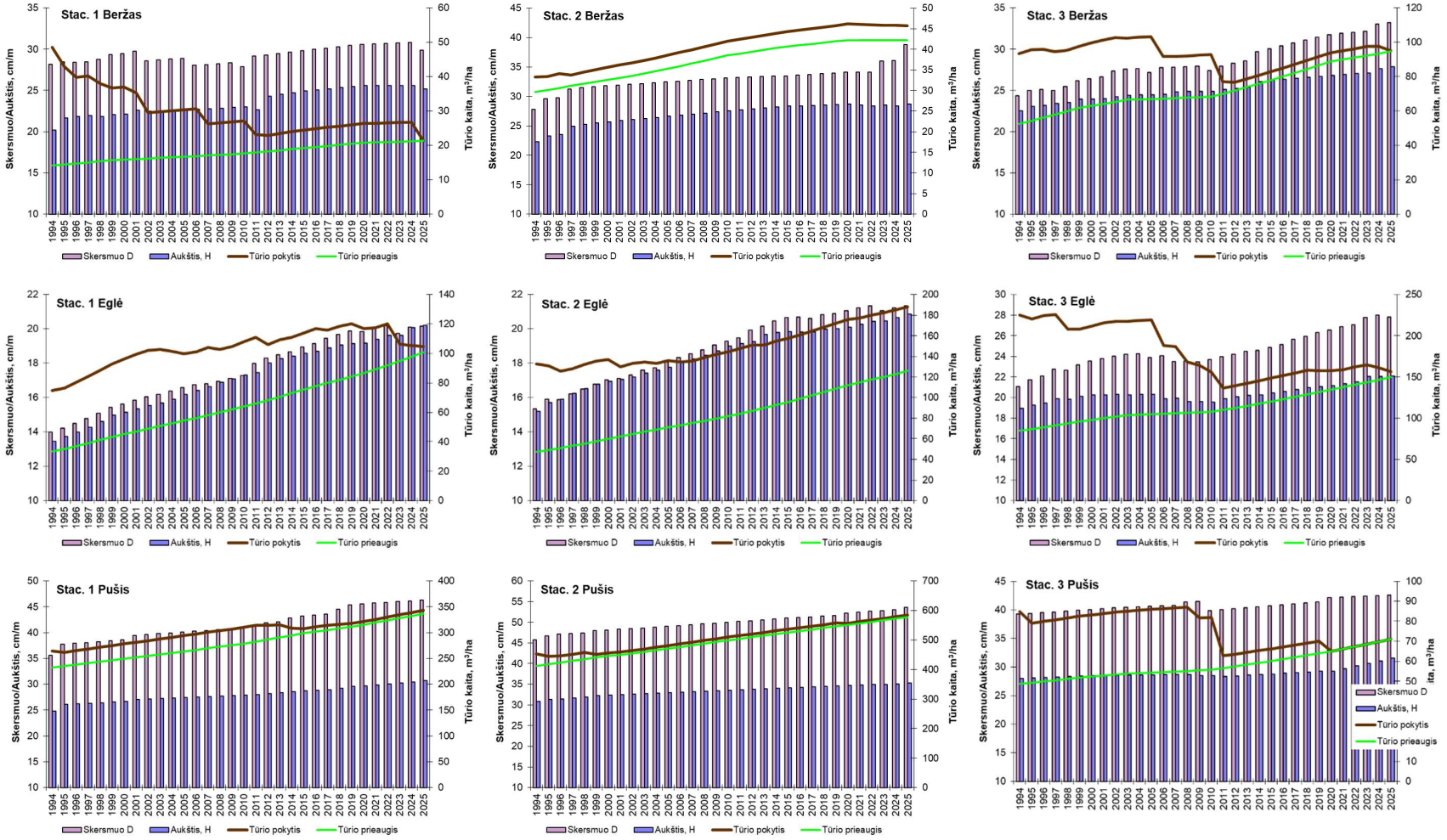
III stacionare gyvų medžių tūris dėl intensyvių vėjavartų sumažėjo nuo 410 m^3/ha iki 312 m^3/ha , t.y. 98 m^3/ha. Per tą patį laikotarpį žuvusių medžių tūris didėjo iki 245 m^3/ha, t.y. 9,4 m^3/ha per metus. Labiausiai nukentėjo drebulės. Šios medžių rūšies stacionare neliko. 30 % sumažėjo eglių tūris ir 20 % pušų.

Tirtų medžių rūšių kamieno skersmens ir aukščio analizė parodė, kad per tiriamąjį laikotarpį intensyviausiai visuose stacionaruose į skersmenį ir aukštį augo eglės, kiek mažesniu augimo intensyvumu pasižymėjo beržai ir žemiausiu, ypač į aukštį pušys.



2.47 pav. Aukštaitijos KMS augalijos tyrimų stacionaruose augančių ir žuvusių medžių tūrio kaita 1994-2025 m. laikotarpiu

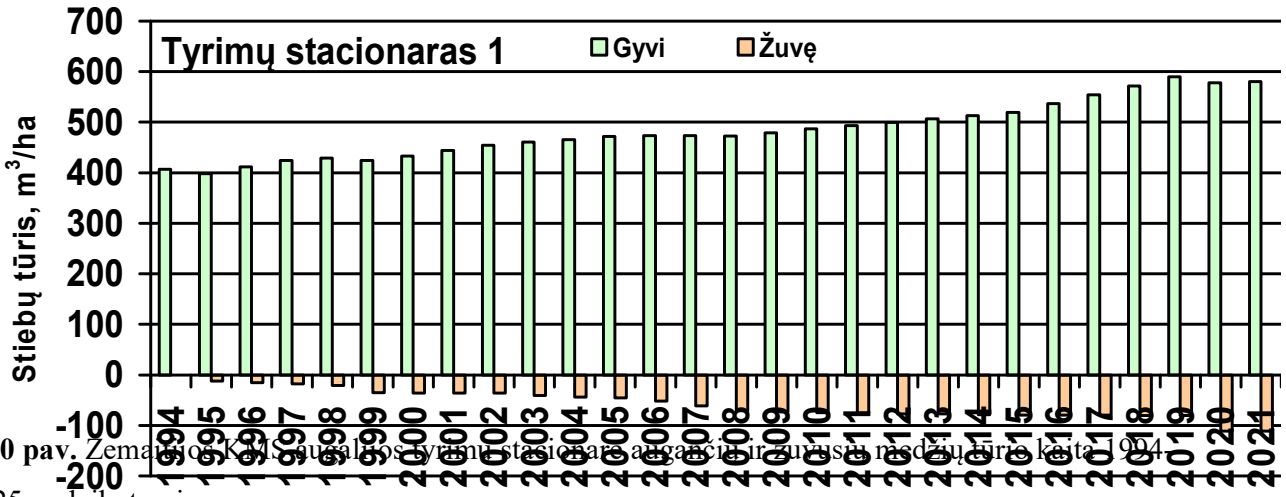
2.48 pav. Aukštaitijos KMS augalijos tyrimų stacionaruose augančių medžių tūrio kaita 1994-2025 m. laikotarpiu



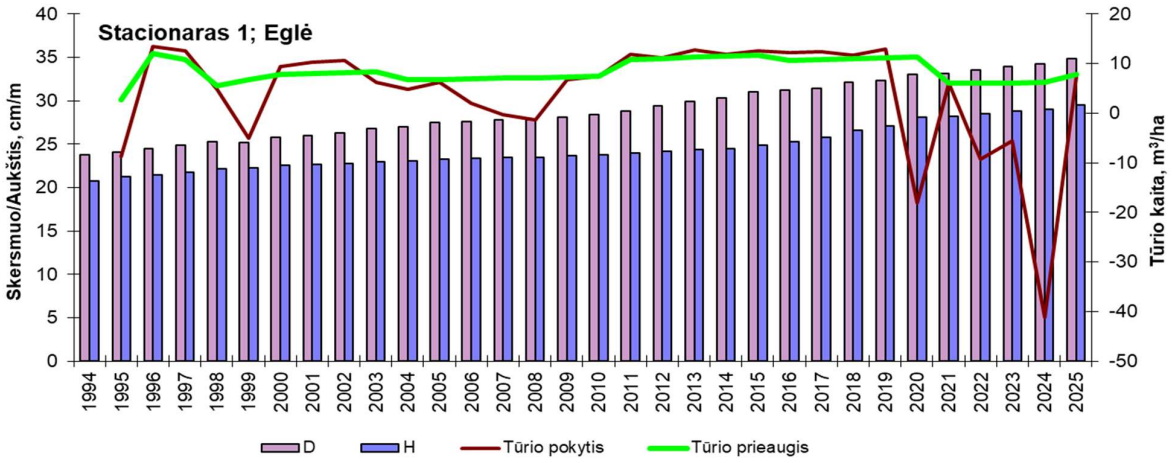
2.49 pav. Aukštaitijos KMS augalijos tyrimų stacionaruose augančių medžių dendrometrinių parametrų kaita 1994-2025 m. laikotarpiu

Žemaitijos KMS tirtų medžių stiebų tūrio analizė parodė, kad augalijos tyrimų stacionare gyvų pagrinde eglių tūris per 27 m. laikotarpį padidėjo nuo 407 m^3/ha iki 622 m^3/ha, kas sudaro 215,5 m^3/ha arba 8,3 m^3/ha per metus. Per tą patį laikotarpį žuvusių medžių tūris didėjo iki 67 m^3/ha, t.y 2,6 m^3/ha per metus.

2021-2025 m. laikotarpiu gyvų medžių tūris reikšmingai sumažėjo beveik 100 m3/ha



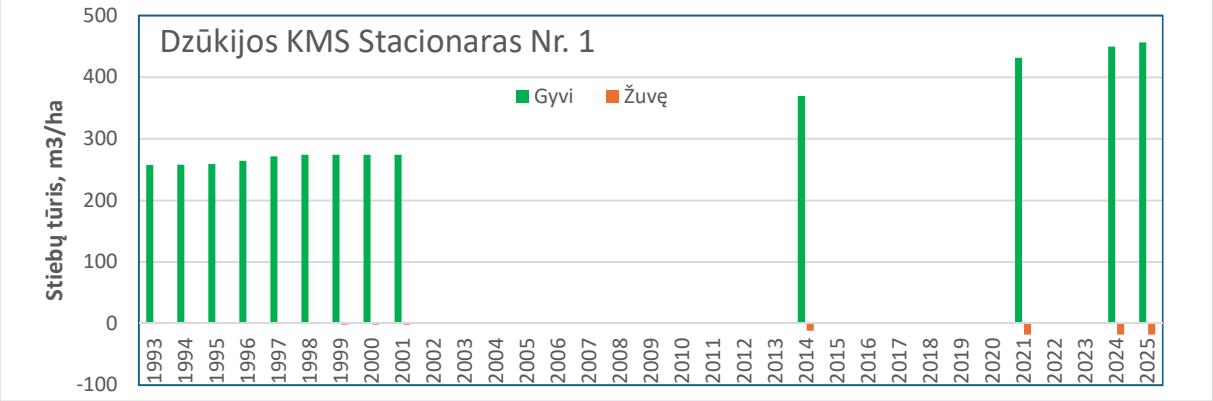
2.50 pav. Žemaitijos KMS augalijos tyrimų stacionare augančių ir žuvusių medžių tūrio kaita 1994-2025 m. laikotarpiu



2.51 pav. Žemaitijos KMS augalijos tyrimų stacionare augančių eglių dendrometrinių parametrų kaita 1994-2025 m. laikotarpiu

Tirtų medžių rūšių kamieno skersmens ir aukščio analizė parodė, kad per tiriamąjį laikotarpį intensyviau padidėjo eglių skersmuo, beveik 9,1 cm, arba 0,35 cm kasmet. Tai sudaro 38 % eglės vidutinio skersmens nustatyto 1994 m. Eglių vidutinis aukštis padidėjo beveik 7 m, 33 % nuo buvusio 1994 m. ir atitinkamai 0,27 m kasmet. Tai lėmė tokį didelį prieaugio padidėjimą šiame stacionare.

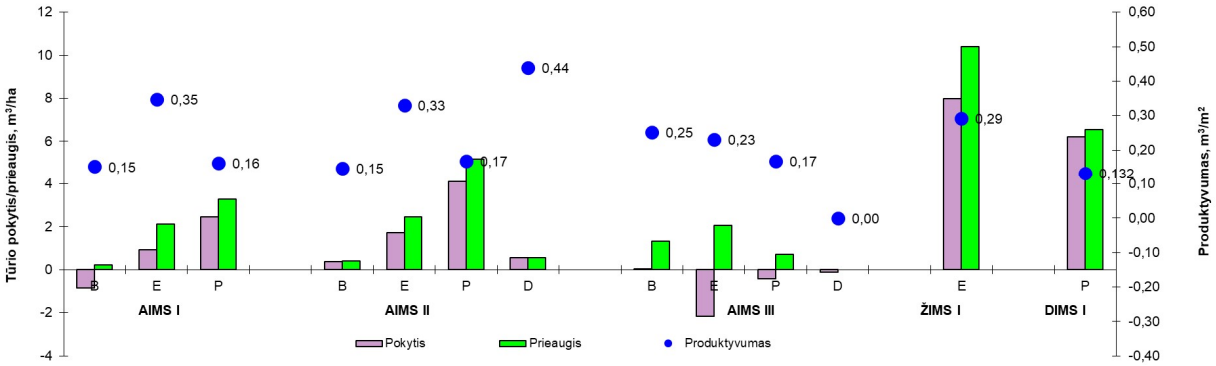
Dzūkijos KMS tirtų medžių stiebų tūrio analizė parodė, kad augalijos tyrimų stacionare gyvų pušų tūris per 32 m. laikotarpį padidėjo nuo 257 m^3/ha iki 456 m^3/ha, kas sudaro beveik 200 m^3/ha arba 6,2 m^3/ha per metus. Per tą patį laikotarpį žuvusių medžių tūris didėjo iki 0 iki 18 m^3/ha, t.y 0,5 m^3/ha per metus.



2.52 pav. Dzūkijos KMS augalijos tyrimų stacionare augančių ir žuvusių pušų tūrio kaita 1994-2025 m. laikotarpiu

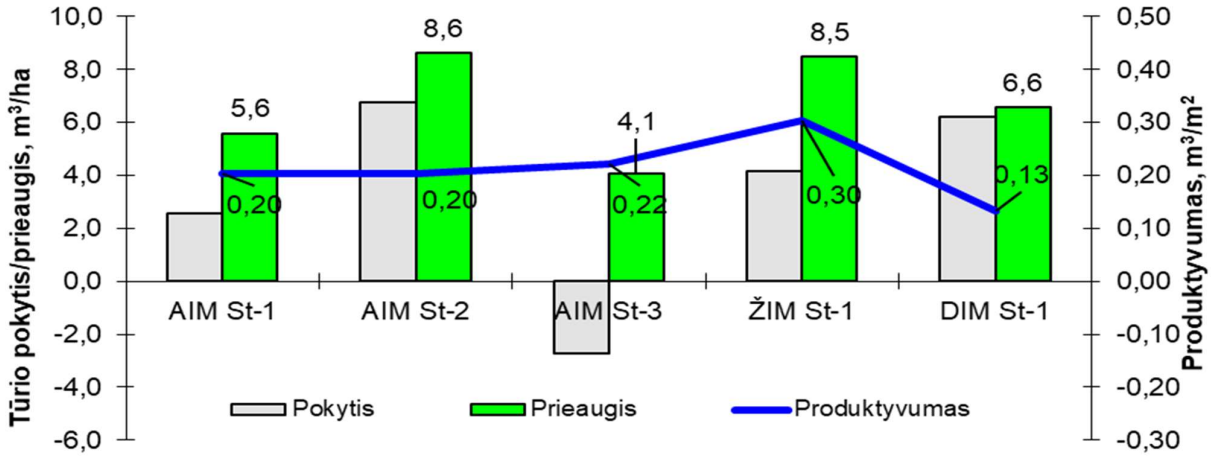
2.5.5. *KMS stacionaruose augančių medžių produktyvumas 1994-2025 m. laikotarpiu*

Apibendrinus gautus rezultatus, nustatyta, kad didžiausiu tūrio pokyčiu (įvertinant medžių nudžiūvimą) pasižymėjo eglės ir ypač Žemaitijos KMS, o pušų tūrio pokytis buvo didžiausias Aukštaitijos KMS ir ypač II stacionare. Šiame stacionare pušų prieaugis buvo didžiausias nepaisant fakto, kad jų amžius buvo taip pat didžiausias. Dėl intensyvios vėjavartos medžių tūrio pokytis ir prieaugis III stacionare nėra lygintinas su kitų stacionarų medžių produktyvumo rodikliais.

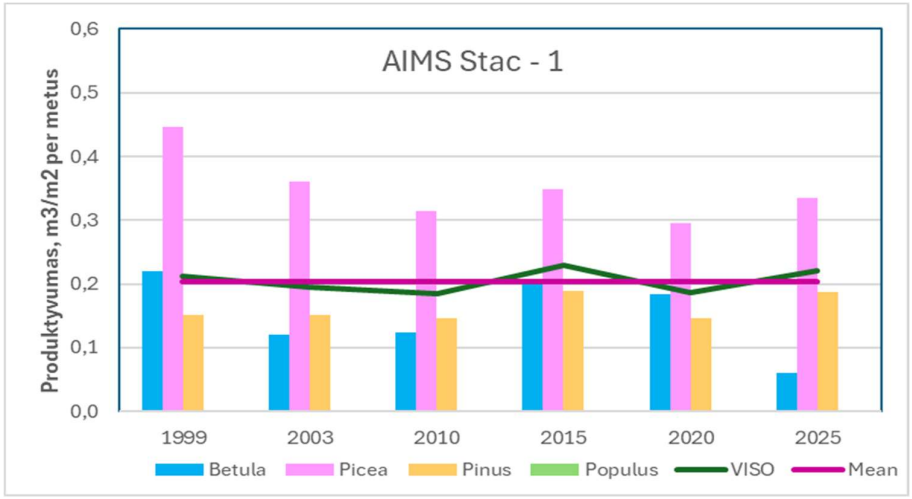


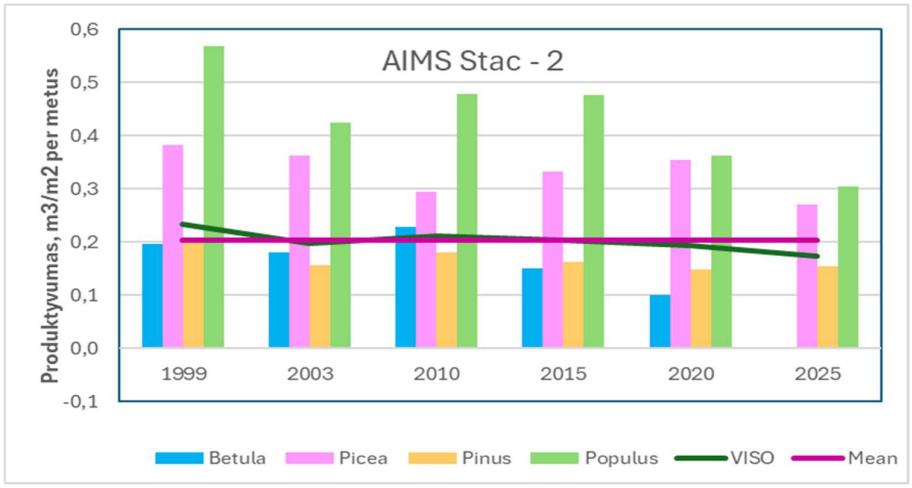
2.53 pav. KMS augalijos tyrimų stacionaruose augančių medžių rūšių tūrio pokytis ir išlikusių medžių prieaugis bei bendras produktyvumas 1994-2025 m. laikotarpiu

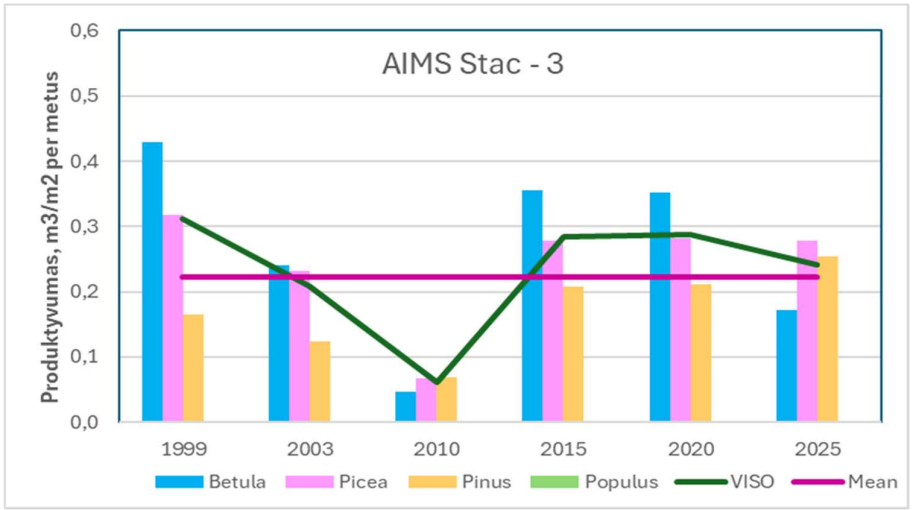
Skirtingų rūšių produktyvumo analizė parodė, Kad Aukštaitijos KMS stacionaruose pati produktyviausia medžio rūšis yra drebulė, kurios produktyvumo buvo 0,44m3/m2. Kiek mažesniu produktyvumu pasižymėjo eglės. Produktyviausios jos buvo I stacionare, kiek mažesnio produktyvumo II ir mažiausio produktyvumo III stacionare. Atitinkamai produktyvumo rodiklis kito nuo 0,35 iki 0,23 m3/m2. Žemaitijos eglių produktyvumas buvo 0,29 m3/m2, ir savo reikšme buvo tarp II ir III stacionaro produktyvumo lygmens. Pušų produktyvumas Aukštaitijoje iš esmės nesiskyrė ir sudarė 0,17 m3/m2. Dzūkijos KMS stacionare jis buvo kiek tai mažesnis – 0,13 m3/m2. Beržų produktyvumas buvo žemiausias ir siekė 0,15 m3/m2. Šie produktyvumo lygiai gerai charakterizavo šių rūšių bendrą produktyvumą Lietuvos miškuose.



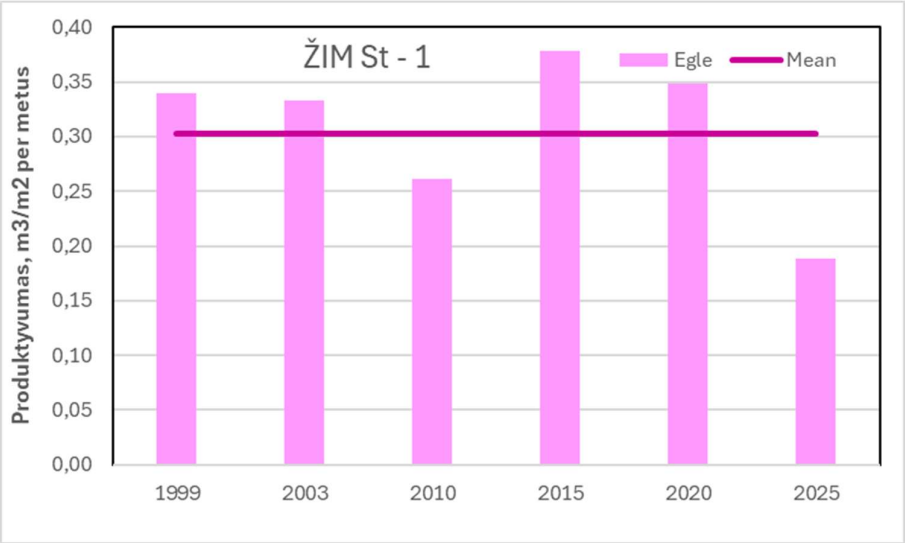
2.54 pav. KMS augalijos tyrimų stacionaruose augančių medžių bendras tūrio pokytis ir išlikusių medžių prieaugis bei bendras produktyvumas 1994-2025 m. laikotarpiu.



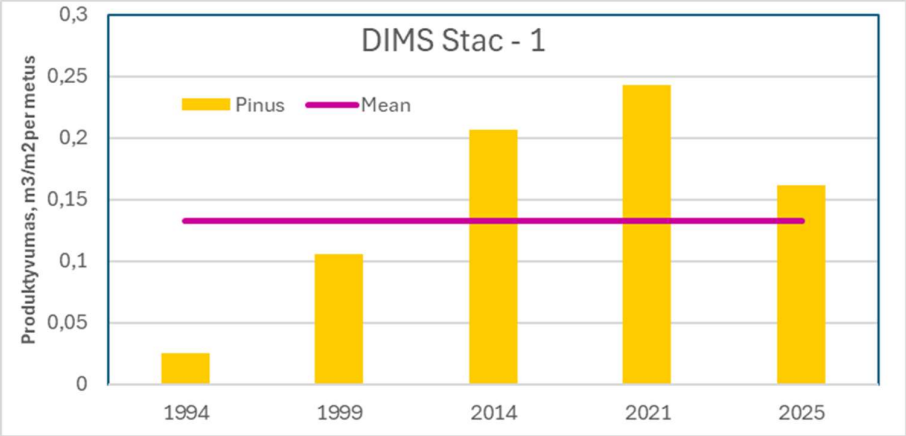




55 pav. Tirtuose stacionaruose tirtų medžių rūšių produktyvumo lygmens kaita tiriamuoju laikotarpiu.



2.56 pav. Žemaitijos KMS stacionaro eglių produktyvumo lygmens kaita tiriamuoju laikotarpiu.



2.57 pav. Dzūkijos KMS stacionaro pušų produktyvumo lygmens kaita tiriamuoju laikotarpiu.

Tirtų stacionarų produktyvumo lygmens kaita tiriamuoju laikotarpiu parodė, kad didesniu produktyvumu tirti medžiai pasižymėjo 2015 m. laikotarpiu, kas leidžia spręsti, kad tokį šio parametro kaitą turėjo apspręsti aplinkos sąlygos ir greičiausiai meteorologiniai veiksniai: drėgmės ir temperatūros santykis.

Išvados

Aukštaitijos KMS I stacionare gyvų medžių tūris per 32 m. laikotarpį padidėjo nuo 388 m^3/ha iki (468 m^3/ha -2020 m.) , kas sudaro 80,5 m^3/ha arba 3,1 m^3/ha per metus. Per tą patį laikotarpį žuvusių medžių tūris didėjo iki 110 m^3/ha, t.y. 4 m^3/ha per metus. Didžiausiu prieaugiu pasižymėjo eglės 59 %, kiek mažesniu pušys 21 %, o beržų tūris sumažėjo 45 %.

II stacionare gyvų medžių tūris padidėjo nuo 632 m^3/ha iki 784 m^3/ha , t.y. 151 m^3/ha arba 5,8 m^3/ha per metus. Per tą patį laikotarpį žuvusių medžių tūris didėjo iki 119 m^3/ha, t.y. 4.6 m^3/ha per metus. Didžiausiu prieaugiu pasižymėjo drebulės, kurių prieaugis per tiriamąjį laikotarpį sudarė daugiau negu 110 %, pušų prieaugis siekė 23 %, o eglių tik 13 %. Beržų prieaugis šiame stacionare buvo vienas iš didžiausių ir siekė 38 %.

III stacionare gyvų medžių tūris dėl intensyvių vėjavartų sumažėjo nuo 410 m^3/ha iki 312 m^3/ha , t.y. 98 m^3/ha. Per tą patį laikotarpį žuvusių medžių tūris didėjo iki 245 m^3/ha, t.y. 9,4 m^3/ha per metus. Labiausiai nukentėjo drebulės. Šios medžių rūšies stacionare neliko. 30 % sumažėjo eglių tūris ir 20 % pušų.

Tirtų medžių rūšių kamieno skersmens ir aukščio analizė parodė, kad per tiriamąjį laikotarpį intensyviausiai visuose stacionaruose į skersmenį ir aukštį augo eglės, kiek mažesniu augimo intensyvumu pasižymėjo beržai ir žemiausiu, ypač į aukštį pušys.

Žemaitijos KMS tirtų medžių stiebų tūrio analizė parodė, kad augalijos tyrimų stacionare gyvų pagrinde eglių tūris per 27 m. laikotarpį padidėjo nuo 407 m^3/ha iki 622 m^3/ha, kas sudaro 215,5 m^3/ha arba 8,3 m^3/ha per metus. Per tą patį laikotarpį žuvusių medžių tūris didėjo iki 67 m^3/ha, t.y 2,6 m^3/ha per metus.

2021-2025 m. laikotarpiu gyvų medžių tūris reikšmingai sumažėjo beveik 100 m3/ha

Tirtų medžių rūšių kamieno skersmens ir aukščio analizė parodė, kad per tiriamąjį laikotarpį intensyviau padidėjo eglių skersmuo, beveik 9,1 cm, arba 0,35 cm kasmet. Tai sudaro 38 % eglės vidutinio skersmens nustatyto 1994 m. Eglių vidutinis aukštis padidėjo beveik 7 m, 33 % nuo buvusio 1994 m. ir atitinkamai 0,27 m kasmet. Tai pagrinde ir lėmė tokį didelį prieaugio padidėjimą šiame stacionare.

Dzūkijos KMS tirtų medžių stiebų tūrio analizė parodė, kad augalijos tyrimų stacionare gyvų pušų tūris per 32 m. laikotarpį padidėjo nuo 257 m^3/ha iki 456 m^3/ha, kas sudaro beveik 200 m^3/ha arba 6,2 m^3/ha per metus. Per tą patį laikotarpį žuvusių medžių tūris didėjo iki 0 iki 18 m^3/ha, t.y 0,5 m^3/ha per metus.

Skirtingų rūšių produktyvumo analizė parodė, Kad Aukštaitijos KMS stacionaruose pati produktyviausia medžio rūšis yra drebulė, kurios produktyvumo buvo 0,44m3/m2. Kiek mažesniu produktyvumu pasižymėjo eglės. Produktyviausios jos buvo I stacionare, kiek mažesnio produktyvumo II ir mažiausio produktyvumo III stacionare. Atitinkamai produktyvumo rodiklis kito nuo 0,35 iki 0,23 m3/m2. Žemaitijos eglių produktyvumas buvo 0,29 m3/m2, ir savo reikšme buvo tarp II ir III stacionaro produktyvumo lygmens. Pušų produktyvumas Aukštaitijoje iš esmės nesiskyrė ir sudarė 0,17 m3/m2. Dzūkijos KMS stacionare jis buvo kiek tai mažesnis – 0,13 m3/m2. Beržų produktyvumas buvo žemiausias ir siekė 0,15 m3/m2. Šie produktyvumo lygiai gerai charakterizavo šių rūšių bendrą produktyvumą Lietuvos miškuose.

Tirtų stacionarų produktyvumo lygmens kaita tiriamuoju laikotarpiu parodė, kad didesniu produktyvumu tirti medžiai pasižymėjo 2015 m. laikotarpiu, kas leidžia spręsti, kad tokį šio parametro kaitą turėjo apspręsti aplinkos sąlygos ir greičiausiai meteorologiniai veiksniai: drėgmės ir temperatūros santykis.

Apibendrinanti išvada

Ilgalaikiai (1993–2025 m.) kompleksinio miškų monitoringo duomenys parodė, kad Lietuvos miškuose medynų produktyvumas iš esmės išliko didelis, tačiau jo dinamika vis labiau priklauso nuo klimato kaitos sukeltų ekstremalių meteorologinių reiškinių ir biotinių pažeidimų. Daugumoje tirtų stacionarų gyvų medžių tūris nuosekliai didėjo (3,1–8,3 $m^3\ ha^{-1}$ per metus), tačiau kartu didėjo ir negyvos medienos atsargos. Tai rodo, kad medynų produktyvumo didėjimas nebėra tiesiogiai susijęs su jų ekologinio stabilumo didėjimu.

Didžiausiu produktyvumu pasižymėjo eglės ir drebulės, o mažiausiu – beržai ir pušys. Vis dėlto nustatyta, kad produktyviausios medžių rūšys kartu buvo jautriausios ekstremaliems trikdžiams. Aukštaitijos III stacionare intensyvios vėjavartos lėmė reikšmingą gyvų medžių tūrio sumažėjimą ir spartų negyvos medienos kaupimąsi, o Žemaitijos KMS paskutiniuoju tyrimų laikotarpiu dėl žievėgraužio tipografo pažeidimų gyvų eglių tūris sumažėjo beveik 100 $m^3\ ha^{-1}$. Tuo tarpu Dzūkijos pušynuose nustatytas stabiliausias produktyvumas ir mažiausias medžių mirtingumas, patvirtinantis didesnį pušynų atsparumą dabartinėmis klimato sąlygomis sausesnėse augavietėse.

Ilgalaikiai tyrimai parodė, kad Lietuvos miškuose produktyvumo didėjimas nebūtinai reiškia didėjantį ekosistemų stabilumą. Priešingai – kartu su medienos tūrio prieaugiu didėja ir medžių mirtingumas bei negyvos medienos atsargos, todėl klimato kaitos sąlygomis miškų tvarumą vis labiau lems jų atsparumas ekstremaliems trikdžiams, o ne vien produktyvumo lygis.

Galimos grėsmės ir prognozė

Gauti rezultatai rodo, kad klimato kaitos sąlygomis didžiausią grėsmę Lietuvos miškų produktyvumui kelia ne vien laipsniškas temperatūros kilimas, bet ekstremalių reiškinių – sausrų, audrų, vėjavartų ir antrinių biotinių pažeidimų – dažnėjimas. Šių veiksnių sąveika didina medžių mirtingumą, spartina negyvos medienos kaupimąsi ir gali reikšmingai sumažinti anglies kaupimo potencialą, ypač eglynuose ir brandžiuose mišriuose medynuose.

Prognozuojama, kad artimiausiais dešimtmečiais atmosferos rūgštinančių teršalų poveikis miškų produktyvumui ir toliau mažės, tačiau klimato kaitos poveikis taps pagrindiniu medynų vystymąsi lemiančiu veiksniu. Tikėtina, kad eglynuose dažnės žievėgraužio tipografo protrūkiai, stiprės vėjavartų ir sausrų padariniai, o beržynuose dėl didėjančio šiluminio ir vandens streso toliau mažės produktyvumas. Sausesnėse augavietėse augančios pušys išliks santykinai atspariausia medžių rūšimi, tačiau ir jų produktyvumas gali mažėti ilgėjant sausros periodams.

Vertinant ilgalaikę perspektyvą, svarbiausiu tvarios miškininkystės tikslu turėtų tapti ne tik medienos prieaugio didinimas, bet ir medynų atsparumo klimato kaitai stiprinimas. Tam būtina formuoti mišrios rūšinės sudėties ir įvairiaamžius medynus, mažinti jų pažeidžiamumą vėjui ir kenkėjams, išsaugoti optimalų negyvos medienos kiekį bei užtikrinti ilgalaikį kompleksinį miškų monitoringą. Tik tokios priemonės leis išlaikyti aukštą Lietuvos miškų produktyvumą, biologinę įvairovę ir jų gebėjimą kaupti anglį besikeičiančio klimato sąlygomis.

2.6. Pagrindinių medžių rūšių kamienų radialusis prieaugis KMS baseinuose

Paprastoji pušis (*Pinus sylvestris* L.), paprastoji eglė (*Picea abies* (L.) H. Karst.) ir beržai (*Betula pendula* Roth ir *Betula pubescens* Ehrh.) yra vienos svarbiausių miškus formuojančių medžių rūšių Europoje. Jos užima didelę borealinių ir hemiborealinių miškų dalį bei reikšmingai prisideda prie medienos produkcijos, anglies kaupimo ir biologinės įvairovės palaikymo. Tačiau klimato kaitos sąlygomis šių rūšių augimo reakcijos vis labiau skiriasi dėl nevienodo ekologinio prisitaikymo ir jautrumo meteorologiniams ekstremumams (Mäkinen et al., 2002; Pretzsch et al., 2014; IPCC, 2022).

Baltijos šalyse atlikti dendrochronologiniai tyrimai parodė, kad pušų radialųjį prieaugį labiausiai skatina šiltesnės žiemos ir pakankamas kritulių kiekis gegužės–liepos mėnesiais. Tačiau ilgėjant sausroms vasaros antroje pusėje prieaugis pradeda mažėti, ypač lengvuose smėliniuose dirvožemiuose (Jansons et al., 2015; Pärn et al., 2021).

Lietuvoje atlikti ilgalaikiai tyrimai rodo, kad pušynai išlieka vieni stabiliausių miško ekosistemų. Nors sausros mažina radialųjį prieaugį, pušys pasižymi geresniu atsikūrimo potencialu nei eglės ar beržai. Lietuvos kompleksinio miškų monitoringo duomenys taip pat rodo, kad pušų lajų defoliacija ilgą laiką buvo mažiausia tarp pagrindinių medžių rūšių, o jų produktyvumas išliko gana stabilus net ir meteorologinių ekstremumų metais.

Paprastoji pušis laikoma viena ekologiškai plastiškiausių Europos medžių rūšių. Ji auga įvairiose augavietėse – nuo sausų smėlinių dirvožemių iki vidutinio drėgnumo miškų. Didžiausią produktyvumą pušis pasiekia pakankamai drėgnose, gerai aeruojamose augavietėse, tačiau dėl gilios šaknų sistemos ji išlieka viena atspariausių sausrai spygliuočių rūšių (Lévesque et al., 2013; Martinez-Vilalta & Lloret, 2016).

Dendrochronologiniai tyrimai rodo, kad Šiaurės ir Vidurio Europoje pušų radialųjį prieaugį labiausiai skatina šiltesnės žiemos, ankstyvas pavasaris ir pakankamas kritulių kiekis gegužės–liepos mėnesiais. Vis dėlto ilgėjančios vasaros sausros pradeda riboti prieaugį pietinėje ir centrinėje rūšies paplitimo dalyje, o klimato modeliai prognozuoja didėjantį augimo nepastovumą ir didesnį jautrumą ekstremaliems meteorologiniams reiškiniams (Seidl et al., 2017).

Baltijos šalyse atlikti dendrochronologiniai tyrimai parodė, kad pušų radialųjį prieaugį labiausiai skatina šiltesnės žiemos ir pakankamas kritulių kiekis gegužės–liepos mėnesiais. Tačiau ilgėjant sausroms vasaros antroje pusėje prieaugis pradeda mažėti, ypač lengvuose smėliniuose dirvožemiuose (Jansons et al., 2015; Pärn et al., 2021).

Lietuvoje atlikti ilgalaikiai tyrimai rodo, kad pušynai išlieka vieni stabiliausių miško ekosistemų. Nors sausros mažina radialųjį prieaugį, pušys pasižymi geresniu atsikūrimo potencialu nei eglės ar beržai. Lietuvos kompleksinio miškų monitoringo duomenys taip pat rodo, kad pušų lajų

defoliacija ilgą laiką buvo mažiausia tarp pagrindinių medžių rūšių, o jų produktyvumas išliko gana stabilus net ir meteorologinių ekstremumų metais.

Paprastoji eglė yra viena produktyviausių Europos medžių rūšių. Optimaliomis sąlygomis ji pasižymi dideliu tūrio prieaugiu, tačiau kartu yra viena jautriausių klimato kaitai. Eglės produktyvumą lemia pakankamas dirvožemio drėgnumas, vėsesnis mikroklimatas ir ilgesnis vegetacijos sezonas (Pretzsch et al., 2014).

Pastaraisiais dešimtmečiais daugelyje Europos regionų nustatyta, kad aukštesnė temperatūra vegetacijos pradžioje dažnai skatina eglių augimą, tačiau vasaros sausros ir karščio bangos reikšmingai mažina radialųjį prieaugį, silpnina medžių fiziologinę būklę ir didina jų jautrumą žievėgraužio tipografo (*Ips typographus*) pažeidimams (Hlásny et al., 2021). Todėl eglynuose vis dažniau stebimi kompleksiniai pažeidimai, kai sausra, vėjalaužos ir kenkėjų protrūkiai veikia kartu ir lemia spartų medžių mirtingumą.

Baltijos šalyse atlikti dendrochronologiniai tyrimai parodė, kad pušų radialųjį prieaugį labiausiai skatina šiltesnės žiemos ir pakankamas kritulių kiekis gegužės–liepos mėnesiais. Tačiau ilgėjant sausroms vasaros antroje pusėje prieaugis pradeda mažėti, ypač lengvuose smėliniuose dirvožemiuose (Jansons et al., 2015; Pärn et al., 2021).

Lietuvoje atlikti ilgalaikiai tyrimai rodo, kad pušynai išlieka vieni stabiliausių miško ekosistemų. Nors sausros mažina radialųjį prieaugį, pušys pasižymi geresniu atsikūrimo potencialu nei eglės ar beržai. Lietuvos kompleksinio miškų monitoringo duomenys taip pat rodo, kad pušų lajų defoliacija ilgą laiką buvo mažiausia tarp pagrindinių medžių rūšių, o jų produktyvumas išliko gana stabilus net ir meteorologinių ekstremumų metais.

Karpotasis (*Betula pendula*) ir plaukuotasis (*Betula pubescens*) beržai yra greitai augančios pionierinės rūšys, pasižyminčios didele ekologine amplitude. Jauname amžiuje jų produktyvumas dažnai viršija spygliuočių, tačiau brandžiuose medynuose augimo intensyvumas mažėja greičiau negu pušų ar eglių (Hynynen et al., 2010).

Beržų augimas labai priklauso nuo vandens režimo vegetacijos metu. Pakankamas kritulių kiekis birželio–rugpjūčio mėnesiais skatina radialųjį prieaugį, o aukšta temperatūra ir drėgmės trūkumas spartina lapų senėjimą, mažina fotosintezės intensyvumą ir trumpina vegetacijos laikotarpį. Dėl šių priežasčių klimato kaitos sąlygomis beržai laikomi viena jautriausių pagrindinių Europos medžių rūšių vasaros sausroms, ypač pietinėje ir pietvakarinėje paplitimo dalyje (Kellomäki & Wang, 2001; Anderegg et al., 2020).

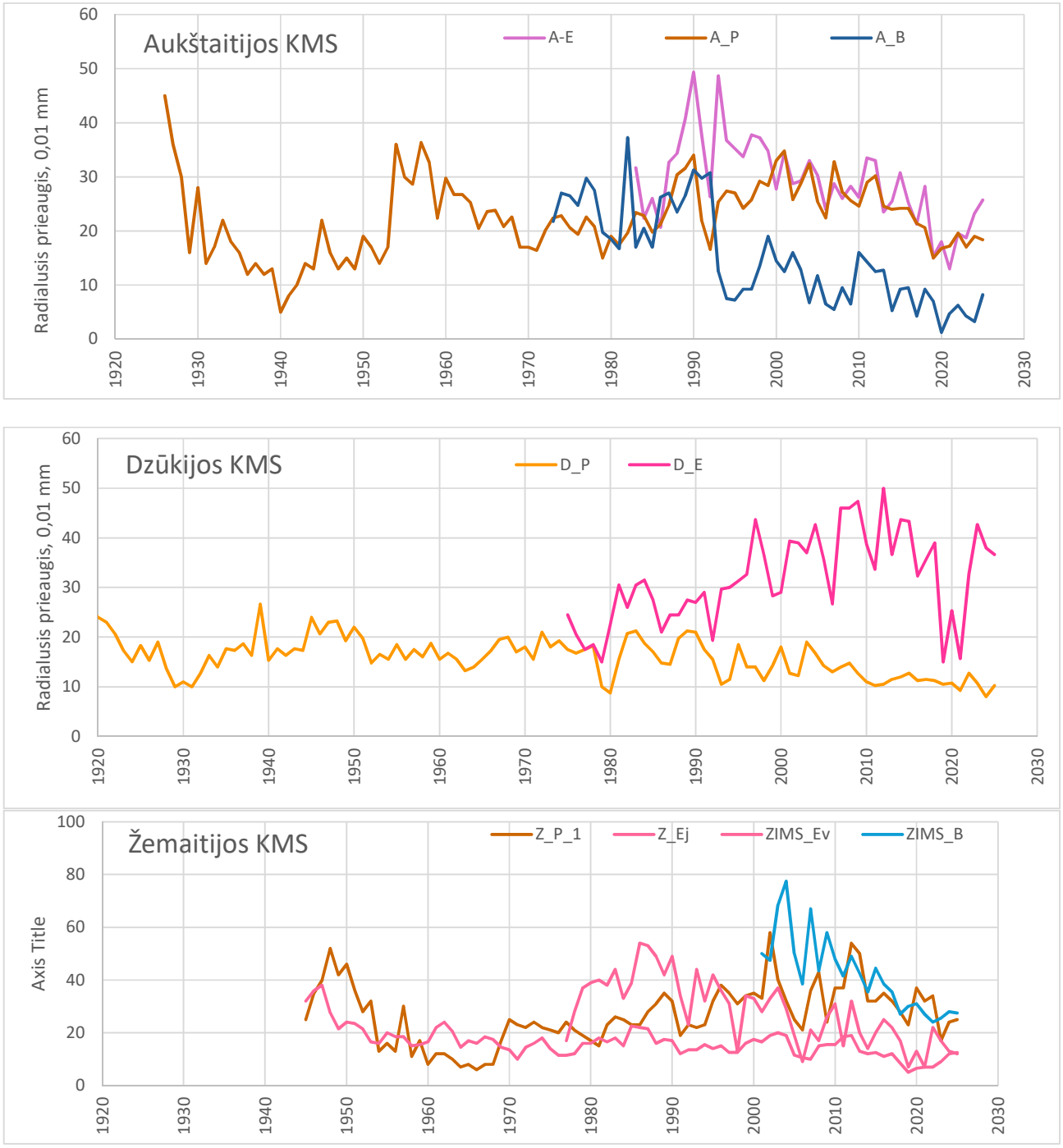
Baltijos regione ir Lietuvoje šios tendencijos tampa vis ryškesnės. Lietuvos kompleksinio miškų monitoringo duomenys rodo, kad beržų prieaugis pastaraisiais dešimtmečiais mažėjo

sparčiausiai iš visų tirtų rūšių. Nustatyta, kad jų augimą reikšmingai skatina tik pakankamas kritulių kiekis vegetacijos laikotarpiu, o vasaros karštis ir sausra lemia didesnę defoliaciją, trumpesnį lapų funkcionavimo laiką, mažesnį radialųjį prieaugį ir didesnį medžių mirtingumą.

Naujausi Europos pagrindinių medžių rūšių augimo tyrimai rodo, kad visų pagrindinių medžių rūšių augimą lemia kompleksinė klimato, dirvožemio ir atmosferos veiksnių sąveika. Svarbiausi veiksniai yra oro temperatūra, kritulių kiekis ir pasiskirstymas vegetacijos laikotarpiu, dirvožemio drėgmės režimas, maisto medžiagų prieinamumas, atmosferos azoto depozicija, pažemio ozonas bei ekstremalūs meteorologiniai reiškiniai (Pretzsch et al., 2014; IPCC, 2022).

Šiaurės Europoje vidutinis temperatūros didėjimas iki tam tikros ribos dažnai skatina spygliuočių augimą dėl ilgesnio vegetacijos sezono. Tačiau šį teigiamą efektą vis dažniau kompensuoja vasaros sausros, karščio bangos, vėjavartos ir biotiniai pažeidimai (Seidl et al., 2017). Dėl to medžių produktyvumas tampa vis labiau priklausomas ne nuo vidutinių klimato rodiklių, o nuo ekstremalių reiškinių dažnio ir intensyvumo.

Lietuvos ilgalaikiai KMS tyrimai iš esmės patvirtina Europos mastu nustatytus dėsningumus, tačiau kartu atskleidžia ir regioninius skirtumus. Nustatyta, kad paprastoji eglė išlieka produktyviausia medžių rūšis, tačiau jos stabilumą riboja kenkėjų protrūkiai ir vėjavartos. Paprastoji pušis pasižymi didžiausiu atsparumu klimato ekstremumams, todėl išlaiko stabilesnį prieaugį įvairiose augavietėse. Tuo tarpu beržai pasirodė esantys jautriausi klimato kaitos poveikiui – jų produktyvumas mažėjo, didėjo defoliacija ir medžių mirtingumas.



2.58 pav. Pagrindinių medžių rūšių radialusis kamieno metinis prieaugis.

2.6.1. Pušų būklę ir prieaugį sąlygojantys veiksniai Aukštaitijos KMS duomenų pagrindu.

Tyrimas atliktas vadovaujant VDU Miškų ir ekologijos fakulteto studentės K.Leškytės magistriniam darbui. Pusamžio pušyno būklės ir prieaugio koreliacinės analizės su meteorologiniais veiksniais rezultatai rodo, kad ne visų meteorologinių veiksnių poveikis išliko stabilus per tiriamąjį laikotarpį. Palyginus koreliacinių koeficientų reikšmes viso tiriamojo laikotarpio – 31 m. laikotarpis su išskirtais būklės gerėjimo ir blogėjimo laikotarpiais, matyti, kad tik šių meteorologinių parametrų ryšys su tirtais pušų rodikliais nepakito, ar pakito nereikšmingai: kritulių – (teigiamas tiesioginis ryšys) – einamųjų metų rugsėjis, gruodis, sausis, kovas, balandis, praeito sezono rugsėjis, gruodis, sausis, kovas, balandis, rugsėjis; (neigiamas priešingas ryšys) – abiejų sezonų gegužė. Temperatūros – (teigiamas tiesioginis ryšys)- einamojo sezono sausis, birželis, praėjusio sezono sausis, vasari, birželis; (neigiamas priešingas ryšys) – einamojo sezono rugsėjis, spalis, lapkritis, gegužė, praeito sezono rugsėjis, lapkritis, gruodis, gegužė. Prieaugio – (teigiamas tiesioginis ryšys) – einamųjų metų sezono rugsėjis, gegužė; (neigiamas priešingas ryšys) – einamojo sezono sausis, kovas, praėjusio sezono gruodis, rugsėjis.

Likusių mėnesių kritulių ir tirtų parametrų kaitos ryšys skirtingais laikotarpiais buvo skirtingas, sąlygojantis tiek būklės ir prieaugio neigiamus ar teigiamus pokyčius.

Brandaus pušyno būklės ir prieaugio koreliacinės analizės su meteorologiniais veiksniais rezultatai rodo, kad ne visų meteorologinių veiksnių poveikis išliko stabilus per tiriamąjį laikotarpį. Palyginus koreliacinių koeficientų reikšmes viso tiriamojo laikotarpio – 31 m. laikotarpis su išskirtais būklės gerėjimo ir blogėjimo laikotarpiais, matyti, kad tik šių meteorologinių parametrų ryšys su tirtais pušų rodikliais nepakito, ar pakito nereikšmingai: kritulių – (teigiamas tiesioginis ryšys) – einamųjų metų rugsėjis, gruodis, sausis, kovas, balandis, praeito sezono rugsėjis, gruodis, sausis, kovas, balandis, rugsėjis; (neigiamas priešingas ryšys) – abiejų sezonų gegužė. Temperatūros – (teigiamas tiesioginis ryšys)- einamojo sezono sausis, birželis, praėjusio sezono sausis, vasari, birželis; (neigiamas priešingas ryšys) – einamojo sezono rugsėjis, spalis, lapkritis, gegužė, praeito sezono rugsėjis, lapkritis, gruodis, gegužė. Prieaugio – (teigiamas tiesioginis ryšys) – einamųjų metų sezono rugsėjis, gegužė; (neigiamas priešingas ryšys) – einamojo sezono sausis, kovas, praėjusio sezono gruodis, rugsėjis.

Likusių mėnesių kritulių ir tirtų parametrų kaitos ryšys skirtingais laikotarpiais buvo skirtingas, sąlygojantis tiek būklės ir prieaugio neigiamus ar teigiamus pokyčius.

Pusamžio medyno kintamųjų sąveikos kaita ir daugelialypės regresijos modeliai

2 lentelė. Pusamžių pušų defoliacijos ir kamieno prieaugio (radialaus ir skersploščio) daugialypės regresijos modeliai

	Tiriamieji pušų rodikliai								**Meteorologija**	
	Defoliacija visų pušų		**Defoliacija išlikusių pušų**		**Kamieno radialusis prieaugis**		**Kamieno skersploščio prieaugis**		**Kaitos intensyvumas ir reikšmingumas**	
	b	**p**	**b**	**P**	**b**	**p**	**b**	**P**	**B**	**p**
Tm, C										
Tm II^{-1}					**-0,043**	**0,006**	**-38,802**	**0,010**	**-0,267**	**0,094**
Tm II					**-0,030**	**0,033**	**-22,630**	**0,098**	**0,285**	**0,077**
Tm VI^{-1}	**0,950**	**0,003**	**1,045**	**0,001**					**-0,028**	**0,105**
Tm VI	**0,560**	**0,060**	**0,678**	**0,018**					**0,099**	**0,142**
Tm XII	**-0,411**	**0,042**	**-0,475**	**0,013**					**-0,164**	**0,09**
Kr, mm										
Kr VII^{-1}	**0,026**	**0,036**	**0,030**	**0,011**	**-0,004**	**0,006**	**-3,731**	**0,013**	**4,183**	**0,038**
Kr VII	**0,025**	**0,011**	**0,031**	**0,002**	**-0,003**	**0,015**	**-2,711**	**0,016**	**4,183**	**0,038**
Kr X-XII	**0,014**	**0,108**	**0,015**	**0,056**	**-0,001**	**0,135**	**-1,587**	**0,087**	**2,644**	**0,260**
Statistika										
R	**0,889**		**0,922**		**0,870**		**0,861**			
R^2	**0,791**		**0,850**		**0,757**		**0,742**			
P<	**0,0004**		**0,0001**		**0,0003**		**0,0005**			
St.pakl.	**1,794**		**1,704**		**0,211**		**214,1**			

Daugialypės regresinės analizės rezultatai parodė, kad tiek visų, tiek iš ***išlikusių gyvų pušų vidutinės defoliaciją padidėjimą statistiškai reikšmingai sąlygojo kylanti birželio mėnesio ir žemėjanti gruodžio mėnesio temperatūra kartu su didėjančiu kritulių kiekiu liepos ir spalio-gruodžio mėnesiais (1-2).*** Šie parametrai paaiškino nuo 83 iki 89 proc. tirtų parametrų kaitos atitinkamai.

Daugialypės regresinės analizės rezultatai parodė, kad tiek pušų kamienų radialiojo, tiek ir jų kamienų skersploščio prieaugio mažėjimą sąlygojo kylanti oro temperatūra vasario mėnesį kartu su didėjančiu kritulių kiekiu liepos ir spalio-gruodžio mėnesiais (3-4). Šie parametrai paaiškino apie 80 proc. tirtų parametrų kaitos atitinkamai.

$$Fvisu=-8,93+0,026\times KrVII^{-1}+0,025\times KrVII+0,950\times TmVI^{-1}+0,560\times TmVI-0,411\times TmXII+$$
$$+0,013\times KrX\text{-}XII, \qquad r2=0,833; \qquad (1)$$
$$Fgyv=-15,89+0,029\times KrVII^{-1}+0,003\times KrVII+1,045\times TmVI^{-1}+0,678\times TmVI-0,475\times TmXII+$$
$$+0,015\times KrX\text{-}XII, \qquad r2=0,891; \qquad (2)$$
$$ZR=1,8-0,043\times TmII^{-1}-0,03\times TmII-0,004\times KrVII^{-1}-0,003\times KrVII-0,001\times KrX\text{-}XII,$$
$$r2=0,797; \qquad (3)$$
$$ZQ=2061,98-38,802\times TmII^{-1}-22,63\times TmII-3,731\times KrVII^{-1}-2,711\times KrVII-1,587\times KrX\text{-}XII,$$
$$r2=0,796; \qquad (4)$$

Brandaus medyno kintamųjų sąveikos kaita ir daugelialypės regresijos modeliai

4 lentelė. Brandžių pušų defoliacijos ir kamieno prieaugio (radialaus ir skerspločio) daugialypės regresijos modeliai.

	Tiriamieji pušų rodikliai								**Meteorologija**	
	Defoliacija visų pušų		**Defoliacija išlikusių pušų**		**Kamieno radialusis prieaugis**		**Kamieno skerspločio prieaugis**		**Kaitos intensyvumas ir reikšmingumas**	
	b	**p**	**b**	**p**	**b**	**P**	**b**	**p**	**b**	**p**
Tm, C										
Tm VII^{-1}					**0,083**	**0,002**	**107,01**	**0,003**	**-0,077**	**0,331**
Tm V					**0,054**	**0,026**	**64,09**	**0,052**	**-0,065**	**0,401**
Tm VI	**0,373**	**0,004**	**0,428**	**0,005**					**0,099**	**0,142**
Tm XII	**-0,149**	**0,074**	**-0,146**	**0,132**					**-0,164**	**0,09**
TmX-XII					**0,154**	**0,001**	**200,73**	**0,001**	**-0,037**	**0,813**
Kr, mm										
Kr VII^{-1}	**0,016**	**0,003**	**0,010**	**0,079**					**4,183**	**0,038**
Kr X-XII	**0,004**	**0,197**	**0,006**	**0,087**	**-0,003**	**0,002**	**-3,777**	**0,002**	**5,113**	**0,135**
Statistika										
R	**0,888**		**0,851**		**0,898**		**0,886**			
R2	**0,787**		**0,735**		**0,808**		**0,785**			
P<	**0,0001**		**0,0007**		**0,0001**		**0,0001**			
St.pakl.	**0,699**		**0,827**		**0,165**		**227,5**			

Brandaus medyno daugialypės regresinės analizės rezultatai parodė, kad tiek visų, tiek iš išlikusių gyvų ***pušų vidutinės defoliacijos padidėjimą statistiškai reikšmingai sąlygojo didėjantis liepos mėnesio kritulių kiekis, didėjanti birželio temperatūra, mažėjanti gruodžio mėnesio temperatūra, kartu su didėjančių kritulių kiekiu spalio – gruodžio mėnesiais (5-6).*** Šie parametrai paaiškino nuo 74 iki 79 proc. tirtų parametrų kaitos atitinkamai.

Daugialypės regresinės analizės rezultatai parodė, kad tiek pušų kamienų radialiojo, tiek ir jų kamienų skerspločio prieaugio didėjimą sąlygojo didėjantis kritulių kiekis spalio – gruodžio mėnesiais, mažėjant oro temperatūra liepos, gegužės mėnesiais kartu su mažėjančia spalio – gruodžio temperatūra (7-8). Šie parametrai paaiškino nuo 79 iki 81 proc. tirtų parametrų kaitos atitinkamai.

$$\mathbf{Fvisu=6,95+0,017\times KrVII^{-1}+0,373\times TmVI-0,149\times TmXII+0,004\times KrX\text{-}XII,}$$

$$\mathbf{r2=0,788;} \qquad \mathbf{(5)}$$

$$\mathbf{Fgyv=5,69+0,01\times KrVII^{-1}+0,428\times TmVI-0,146\times TmXII+0,006\times KrX\text{-}XII,}$$

$$\mathbf{r2=0,724;} \qquad \mathbf{(6)}$$

$$\mathbf{ZR=-0,88-0,003\times KrX\text{-}XII+0,083\times TmVII^{-1}+0,154\times TmX\text{-}XII+0,054\times TmV,}$$

$$\mathbf{r2=0,788;} \qquad \mathbf{(7)}$$

$$\mathbf{ZQ=-947,7-3,777\times KrX\text{-}XII+107,008\times TmVII^{-1}+200,733\times TmX\text{-}XII+64,092\times TmV,}$$

$$\mathbf{r2=0,771;} \qquad \mathbf{(8)}$$

IŠVADOS

- **Pusamžių ir brandžių pušynų būklę bei prieaugį reikšmingai lemia meteorologinės sąlygos, tačiau jų poveikis nėra pastovus.** Koreliacinė analizė parodė, kad tik dalies kritulių ir temperatūros rodiklių ryšys su pušų būkle bei prieaugiu išliko stabilus viso 31 metų tyrimo laikotarpiu, o daugumos meteorologinių veiksnių įtaka kito priklausomai nuo medynų būklės gerėjimo ar blogėjimo laikotarpių.
- **Svarbiausią įtaką pušynų būklei turėjo žiemos ir vasaros meteorologinės sąlygos.** Defoliacijos didėjimą daugiausia lėmė aukštesnė birželio oro temperatūra, žemesnė gruodžio temperatūra ir padidėjęs kritulių kiekis liepos bei spalio–gruodžio mėnesiais, o prieaugio pokyčius – temperatūros ir kritulių sąveika vegetacijos ir ramybės laikotarpiais.
- **Daugialypės regresijos modeliai pasižymėjo aukštu aiškinamuoju tikslumu.** Sudaryti modeliai paaiškino 74–89 % pušų defoliacijos ir radialiojo bei skersploščio prieaugio kaitos, patvirtindami, kad meteorologiniai veiksniai yra vieni svarbiausių pušynų būklę ir augimą lemiančių veiksnių.
- **Pušynų reakcija į klimato veiksnius priklauso nuo medyno išsivystymo stadijos.** Nors pusamžių ir brandžių medynų būklę veikė panašūs meteorologiniai veiksniai, jų reikšmingumas ir poveikio stiprumas skyrėsi, todėl skirtingo amžiaus medynai nevienodai reaguoja į besikeičiančias klimato sąlygas.
- Gauti rezultatai patvirtina, kad klimato kaitos sąlygomis pušynų būklę ir produktyvumą lemia kompleksinė meteorologinių veiksnių sąveika. **Todėl prognozuojant medynų vystymąsi ir planuojant jų stebėseną būtina vertinti ne pavienius klimato rodiklius, o jų tarpusavio sąveiką skirtingais metų laikais.**

Galimos grėsmės

- **Didėjantis klimato nepastovumas** gali dar labiau didinti pušynų jautrumą meteorologiniams ekstremumams, nes nustatyta, kad medynų būklę ir prieaugį lemia ne pavieniai, o tarpusavyje sąveikaujantys temperatūros ir kritulių režimai.
- **Besitęsiančios karščio bangos birželio mėn.** turėtų bloginti pušų būklę ir mažinti prieaugį, kas gali tapti nauja grėsme Lietuvos pušynams, kurią papildomai gali sustiprinti mažėjanti temperatūra gruodžio mėn. ir didėjantis kritulių kiekis liepos ir spalio – gruodžio mėnes, ypač brandžiuose medynuose.

- **Dažnėjantys ekstremalūs kritulių ir temperatūros svyravimai** gali mažinti medžių fiziologinį atsparumą, sudarydami palankesnes sąlygas antriniams pažeidėjams – vabzdžiams kenkėjams ir ligų sukėlėjams.
- **Brandūs pušynai gali tapti jautresni klimato kaitai** nei pusamžiai medynai, nes jų augimo reakcija į meteorologinius veiksnius tampa ryškesnė, o atsistatymo galimybės – mažesnės.

Tirtų pušynų būklės ir prieaugio prognozė

- Jei išliks dabartinės klimato kaitos tendencijos, **tikėtinas laipsniškas pušynų defoliacijos didėjimas ir augimo intensyvumo mažėjimas**, ypač po metų, pasižyminčių meteorologiniais ekstremumais.
- **Meteorologinių veiksnių įtaka medynų būklei ateityje gali dar stiprėti**, todėl didės metiniai būklės ir prieaugio svyravimai.
- Klimato kaitos sąlygomis **medynų būklę vis tiksliau bus galima prognozuoti taikant kompleksinius meteorologinius modelius**, nes jie paaiškina didžiąją dalį būklės ir prieaugio variacijos (74–89 %).
- Ilgalaikė pušynų stebėsena išliks ypač svarbi, nes tik tęstiniai stebėjimai leis laiku nustatyti medynų atsparumo pokyčius ir prognozuoti galimus produktyvumo bei gyvybingumo pokyčius.

2.6.2. Meteorologinių veiksnių poveikis žievėgraužio tipografo pažeidimų intensyvumui 2021–2025m. Aukštaitijos miškuose

Tyrimas atliktas vadovaujant VDU Miškų ir ekologijos fakulteto studento S.Sušinsko magistriniam darbui. Nustatyta, kad reikšmingiausi neigiami ryšiai nustatyti tarp eglių žūties intensyvumo ir vegetacijos laikotarpio drėgmės trūkumo rodiklių. Iš reikšmingų kintamųjų ypač išsiskyrė gegužės krituliai (r = -0,83), gegužės debesuotumas (r = -0,94), rugsėjo debesuotumas (r = -0,93) ir stipriausiai – gegužės santykinė oro drėgmė (r = -0,98). Taip pat svarbūs buvo santykinės drėgmės rodikliai vegetacijos metu: santykinė drėgmė V-VI mėn. (r = -0,85), santykinė drėgmė V-VIII mėn (r = -0,81) ir V-IX mėn. (r = -0,84). Tai rodo, kad kuo vegetacijos pradžioje ir vasaros metu buvo sausiau, tuo didesnis buvo eglynų pažeidimų mastas. Toks ryšys gali būti aiškinamas tuo, kad mažesnis kritulių kiekis ir žemesnė santykinė oro drėgmė gegužę silpnina eglių vandens režimą ir gynybines reakcijas, todėl vegetacijos pradžioje nusilpę medžiai tampa palankesni žievėgraužio tipografo plitimui.

Tuo tarpu teigiamas ryšys labiausiai išryškėjo žiemos laikotarpiu. Stipriausias buvo einamojo sezono kritulių gruodžio–kovo laikotarpiu kritulių rodiklis XII-III mėn. (r = 0,96), taip pat reikšmingas buvo rudens–žiemos santykinės drėgmės rodiklis IX-XII mėn. (r = 0,84). Toks ryšys gali būti aiškinamas tuo, kad žievėgraužio tipografo populiacija žiemoja po žieve, o dalis suaugėlių – ir miško paklotėje ar viršutiniame dirvožemio sluoksnyje, todėl švelnesnės žiemos ir geresnė sniego izoliacija padeda didesnei kenkėjų daliai sėkmingai peržiemoti ir pavasarį pradėti naują ciklą.

Apibendrinant galima teigti, kad reikšmingiausiai eglynų pažeidimų intensyvumą skatino šilta žiema ir sausra vegetacijos laikotarpiu.

Toliau, siekiant tiksliau paaiškinti pažeistų eglių tūrio kaitą, buvo sudaryti trys nuosekliai papildomi daugialypės regresijos modeliai, kurie paaiškino kokie meteorologiniai veiksniai geriausiai atspindėjo žievėgraužio tipografo sukeltų pažeidimų intensyvumą.

Pirmajame modelyje buvo analizuojami tik apibendrinantys kritulių rodikliai. Nustatyta, kad pažeistų eglių kamieno tūrio (KTM) kaitą geriausiai apibūdino einamojo sezono gegužės–liepos kritulių kiekis ir žiemos laikotarpio gruodžio–kovo kritulių suma. Sudaryta regresijos lygtis:

$$KTM = 457{,}630 - 1{,}750 \cdot \times Kr_{(V\text{-}VII)} + 10{,}025 \cdot \times Kr_{(XII\text{-}III)}$$

Šis modelis buvo statistiškai reikšmingas ($F_{(2,2)} = 88{,}127;\ p < 0{,}011$), o jo paaiškinamoji galia buvo labai didelė: $R = 0{,}994,\ R^2 = 0{,}989,\ Adjusted\ R^2 = 0{,}978$. Tai rodo, kad modelis paaiškino 98,88 % pažeistų eglių tūrio kaitos. Pagal koeficientų ženklus matyti, kad didesnis kritulių kiekis gegužės–liepos laikotarpiu buvo susijęs su mažesniu pažeidimų tūriu, o didesnis kritulių kiekis gruodžio–kovo laikotarpiu – su didesniu pažeidimų tūriu. Vadinasi, jau pirmasis modelis parodė pagrindinę tendenciją, kad didesnė žala formavosi tada, kai po palankesnio žiemos laikotarpio sekė sausesnė vegetacijos pradžia ir vasaros pirmoji pusė.

Antrajame modelyje prie kritulių rodiklių buvo pridėtas reikšmingas santykinės oro drėgmės (SD) kintamasis, t. y. gegužės santykinė oro drėgmė. Sudaryta regresijos lygtis:

$$KTM = 2551{,}05 - 1{,}227 \cdot \times Kr_{(V\text{-}VII)} + 6{,}865 \cdot \times Kr_{(XII\text{-}III)} - 27{,}634 \cdot \times SD_{(V)}$$

Šis modelis taip pat buvo statistiškai reikšmingas ($F(3,1) = 292{,}60;\ p < 0{,}043$), o jo paaiškinamoji galia dar labiau padidėjo: $R = 0{,}999,\ R^2 = 0{,}999,\ Adjusted\ R^2 = 0{,}995,$ kuris paaiškino net 99,89 % pažeistų eglių tūrio kaitos. Įtraukus gegužės santykinę oro drėgmę, išryškėjo vegetacijos pradžios drėgmės režimo svarba. Neigiamas $SD_{(V)}$ koeficientas rodo, kad mažėjant santykinei oro drėgmei gegužę, pažeistų eglių tūris didėjo. Tokį rezultatą galima sieti su tuo, kad gegužė yra vienas svarbiausių laikotarpių aktyvios vegetacijos pradžiai, todėl drėgmės trūkumas tuo metu silpnina eglių vandens režimą ir jų apsaugines reakcijas. Dėl to modelis tapo biologiškai dar geriau pagrįstas, nes be žiemos ir vasaros kritulių poveikio papildomai parodė ir sauso pavasario svarbą.

Trečiajame modelyje, be kritulių ir santykinės oro drėgmės rodiklių, buvo įtrauktas ir temperatūros kintamasis – einamojo sezono vasario–gegužės temperatūra. Sudaryta tokia lygtis:

$$KTM=5303,25+63,22 \cdot \times Tm(II\text{-}V) - 1,01 \cdot \times Kr_{(V\text{-}VII)} - 62,43 \cdot \times SD_{(V)}$$

Šis modelis buvo statistiškai reikšmingas ($F_{(3,1)}=1202,6;\ p<0,021$), o jo paaiškinamoji galia buvo didžiausia iš visų trijų modelių: $R=0,9998,\ R^2=0,9997,$ *Adjusted* $R^2=0,9989$. Taigi modelis paaiškino 99,97 % pažeistų eglių tūrio kaitos. Šiame modelyje teigiamas temperatūros koeficientas rodo, kad aukštesnė vasario–gegužės temperatūra buvo susijusi su didesniu pažeidimų tūriu, o neigiami kritulių ir santykinės oro drėgmės koeficientai dar kartą patvirtino, kad sausesnės sąlygos vegetacijos pradžioje ir pirmoje sezono pusėje skatino didesnį pažeidimų intensyvumą. Taigi trečiasis modelis jau apėmė tris svarbiausias klimatines dimensijas – šilumą, kritulius ir oro drėgmę – ir geriausiai atspindėjo bendrą meteorologinių sąlygų poveikį žievėgraužio tipografo žalai.

Tokiu būdu pirmasis modelis parodė, kad vien kritulių rodikliai jau labai gerai paaiškina pažeidimų intensyvumą ir leidžia išskirti svarbų žiemos bei vegetacijos laikotarpio kontrastą. Antrasis modelis šį aiškinimą papildė gegužės santykinės oro drėgmės rodikliu ir dar labiau sustiprino sauso pavasario reikšmę. Trečiasis modelis atskleidė jau visą svarbiausių meteorologinių veiksnių kompleksą ir parodė, kad pažeidimų intensyvumas labiausiai didėjo tada, kai šiltesnės sąlygos vegetacijos pradžioje sutapo su mažesniu kritulių kiekiu ir mažesne santykine oro drėgme.

Bendras tyrimo rezultatų apibendrinimas

Atlikti tyrimai parodė, kad 2021–2025 m. Aukštaitijos miškuose paprastosios eglės (*Picea abies*) pažeidimų, kuriuos sukėlė žievėgraužis tipografas (*Ips typographus*), intensyvumą pirmiausia lėmė meteorologinių veiksnių kompleksas. Stipriausi neigiami ryšiai nustatyti tarp pažeistų eglių tūrio ir vegetacijos pradžios drėgmės rodiklių – gegužės kritulių kiekio, santykinės oro drėgmės bei debesuotumo. Šie rezultatai rodo, kad sausa vegetacijos pradžia silpnina eglių vandens balansą, mažina sakų išsiskyrimą ir natūralų atsparumą kenkėjams, todėl sudaromos palankios sąlygos žievėgraužio tipografo populiacijos plitimui. Tuo tarpu švelnios ir pakankamai drėgnos žiemos gerina kenkėjų peržiemojimo sąlygas, didina jų išgyvenamumą ir sudaro prielaidas gausesnei pirmosios generacijos populiacijai pavasarį. Tokius dėsningumus pastaraisiais metais nustatė ir daugelis Europos autorių (Hlásny et al., 2021; Seidl et al., 2017; Marini et al., 2017).

Rezultatai patvirtino, kad svarbiausi pažeidimų intensyvumą lemiantys veiksniai yra žiemos kritulių kiekis, vegetacijos pradžios krituliai, gegužės santykinė oro drėgmė ir pavasario oro temperatūra. ors modelio aiškinamoji geba yra labai didelė, po penkerių metų jį tikslinga tikrinti ilgesnėmis stebėjimų sekomis abiejose KM stotyse.

Gauti rezultatai visiškai atitinka pastarojo dešimtmečio Europos tyrimų išvadas, kurios rodo, kad klimato šiltėjimas keičia ne tik eglių fiziologinę būklę, bet ir paties žievėgraužio tipografo populiacijų dinamiką. Aukštesnė oro temperatūra spartina vabzdžių vystymąsi, ilgina jų aktyvumo sezoną ir kai kuriuose regionuose leidžia išsivystyti papildomoms generacijoms per metus. Tuo pat metu dažnėjančios sausros mažina eglių atsparumą pažeidimams, todėl susidaro sinerginis klimato ir biotinių veiksnių poveikis, lemiantis spartų eglynų nykimą (Biedermann et al., 2019; Hlásny et al., 2021; IPCC, 2022).

Praktiniu požiūriu tyrimo rezultatai rodo, kad žiemos ir ankstyvosios vegetacijos meteorologiniai rodikliai gali būti naudojami kaip ankstyvojo perspėjimo indikatoriai prognozuojant žievėgraužio tipografo protrūkių riziką. Gegužės kritulių kiekio, santykinės oro drėgmės ir pavasario temperatūros stebėsena leistų iš anksto įvertinti galimą eglynų pažeidimų mastą ir laiku planuoti sanitarines bei prevencines miškininkystės priemones.

Atsižvelgiant į dabartines klimato kaitos tendencijas ir naujausius klimato modelius (IPCC, 2022), prognozuojama, kad Baltijos regione šiltų žiemų ir pavasario–vasaros sausrų pasikartojimo dažnis didės. Tai reiškia, kad ateityje vis dažniau formuosis meteorologinių sąlygų kompleksas, palankus žievėgraužio tipografo populiacijų gausėjimui. Todėl tikėtina, kad eglynų pažeidimų rizika išliks padidėjusi, ypač vyresnio amžiaus grynuose eglynuose, augančiuose lengvesniuose ir greičiau išdžiūstančiuose dirvožemiuose.

Ilgalaikėje perspektyvoje didžiausią reikšmę įgis mišrių medynų formavimas, medynų rūšinės ir amžiaus struktūros įvairinimas, nuolatinė meteorologinių sąlygų stebėsena bei ankstyvas kenkėjų židinių nustatymas. Tokios priemonės didins eglynų ekologinį atsparumą, mažins masinio medžių džiūvimo tikimybę ir prisidės prie tvaraus miškų vystymosi klimato kaitos sąlygomis.

Išvados

1. **Žievėgraužio tipografo (*Ips typographus*) pažeidimų mastą Aukštaitijos miškuose lėmė ne vien meteorologinės sąlygos, bet ir eglynų struktūra.** Didžiausi pažeidimai nustatyti grynuose, vyresnio amžiaus (V–VIII amžiaus klasių), I boniteto, didelio našumo eglynuose, augančiuose Lc ir Nc miško augavietėse. Tuo tarpu mišresni, jaunesni ir mažesnio našumo medynai buvo gerokai atsparesni žievėgraužio tipografo pažeidimams.
2. **Didžiausią pažeidimų intensyvumą lėmė šiltos ir drėgnos žiemos bei šilta ir sausa vegetacijos pradžia.** Sumažėję gegužės–liepos krituliai, maža gegužės santykinė oro drėgmė ir aukštesnė oro temperatūra silpnino eglių fiziologinę būklę, mažino jų apsaugines reakcijas ir sudarė palankias sąlygas žievėgraužio tipografo populiacijos plitimui.

3. **Sudaryti daugialypės regresijos modeliai parodė, kad meteorologiniai rodikliai labai tiksliai prognozuoja pažeidimų mastą.** Didžiausią prognostinę vertę turėjo žiemos kritulių kiekis, gegužės–liepos krituliai, gegužės santykinė oro drėgmė ir vasario–gegužės oro temperatūra. Tiksliausias modelis paaiškino net 99,97 % pažeistų eglių tūrio variacijos.
4. **Tyrimo rezultatai patvirtino, kad didžiausia žievėgraužio tipografo protrūkių rizika susidaro tada, kai sutampa palanki medynų struktūra ir palankios meteorologinės sąlygos.** Todėl nei klimatiniai, nei medyno struktūros veiksniai atskirai nepaaiškina pažeidimų masto – didžiausi protrūkiai formuojasi dėl jų tarpusavio sąveikos.
5. **Klimato kaitos sąlygomis žievėgraužio tipografo pažeidimų rizika tikėtina didės.** Prognozuojamas šiltesnių žiemų, ankstyvesnio pavasario ir dažnesnių vegetacijos laikotarpio sausrų pasikartojimas sudarys vis palankesnes sąlygas kenkėjo populiacijų gausėjimui ir didesniam eglynų pažeidžiamumui, ypač brandžiuose vienarūšiuose eglynuose.
6. **Siekiant didinti eglynų atsparumą, būtina taikyti kompleksines miškininkystės priemones.** Didžiausią reikšmę turi mišresnių medynų formavimas, eglynų struktūrinio vientisumo mažinimas, rūšinės įvairovės didinimas, nuolatinė meteorologinių rodiklių ir kenkėjų populiacijų stebėsena bei savalaikis sanitarinių priemonių taikymas. Tokios priemonės didintų miškų atsparumą klimato kaitos sąlygomis ir mažintų masinių žievėgraužio tipografo protrūkių tikimybę.

Lietuvos sąlygomis kiekybiškai įrodyta, kad žievėgraužio tipografo pažeidimų intensyvumą geriausiai paaiškina bendras medyno struktūros ir meteorologinių veiksnių poveikis, o ne kiekvienas iš šių veiksnių atskirai. Šis dėsningumas sudaro mokslinį pagrindą klimato kaitos sąlygomis kurti ankstyvojo perspėjimo ir eglynų pažeidimų prognozavimo sistemas.

Galimos grėsmės ir prognozė

Atlikti tyrimai parodė, kad didžiausią žievėgraužio tipografo (*Ips typographus*) protrūkių riziką lemia ne vien meteorologinės sąlygos, bet ir jų sąveika su medynų struktūra. Todėl klimato kaitos sąlygomis didžiausia grėsmė kyla brandiems, gryniems, didelio našumo eglynams, augantiems palankiose Lc ir Nc augavietėse. Tokie medynai dėl savo rūšinio vientisumo ir didelio eglių kiekio tampa ypač jautrūs sausros susilpnintų medžių kolonizacijai.

Prognozuojamas oro temperatūros kilimas, švelnesnės žiemos ir dažnesnės pavasario bei vasaros sausros sudarys vis palankesnes sąlygas žievėgraužio tipografo populiacijų gausėjimui. Šiltos

žiemos didins kenkėjų peržiemojimo sėkmę, o aukštesnė temperatūra vegetacijos laikotarpiu spartins jų vystymąsi ir kai kuriais metais gali sudaryti prielaidas išsivystyti papildomai generacijai. Tuo pačiu metu drėgmės trūkumas silpnins eglių fiziologinę būklę, mažins jų gebėjimą apsisaugoti sakų sekrecija ir didins medžių pažeidžiamumą.

Jeigu klimato kaitos tendencijos išliks, tikėtina, kad masinių žievėgraužio tipografo protrūkių dažnis ir mastas Lietuvos eglynuose didės. Nepaisant vieno didžiausio eglynų produktyvumo, dėl aplinkos kaitos gali spartėti eglynų džiūvimas, mažėti anglies kaupimo potencialas ir ekologinis stabilumas, o kartu didėti negyvos medienos kiekis bei anglies dioksido emisijos, susijusios su jos irimu.

Rekomenduojama, kad ilgalaikį eglynų atsparumą galima didinti tik taikant kompleksines prisitaikymo prie klimato kaitos priemones. Svarbiausios jų – mišresnių ir įvairiaamžių medynų formavimas, eglių dalies mažinimas didžiausios rizikos augavietėse, nuolatinė meteorologinių rodiklių ir kenkėjų populiacijų stebėsena bei ankstyvojo perspėjimo sistemų diegimas. Tokios priemonės leistų sumažinti ekonominius nuostolius, išsaugoti miškų biologinę įvairovę ir užtikrinti tvarų eglynų funkcionavimą klimato kaitos sąlygomis.

2.7. Negyva mediena, jos formavimasis ir destrukcijos greitis bei ypatumai.

Miško ekosistemos ilgą laiką buvo vertinamos pirmiausia per gyvosios biomasės produktyvumą, akcentuojant medžių augimą, medienos kaupimą ir ekonominę vertę. Toks redukcionistinis požiūris lėmė, kad negyva mediena ilgą laiką buvo laikoma antraeiliu ar net nepageidaujamu miško komponentu (Bobiec, 2002). Tačiau šiuolaikiniai ekologiniai tyrimai iš esmės pakeitė šį požiūrį, atskleisdami, kad negyva mediena yra vienas iš kertinių miško ekosistemos struktūrinių ir funkcinių elementų, turintis esminę reikšmę biologinei įvairovei, medžiagų apykaitai ir ekosistemų stabilumui.

Rikšminga dalis miško rūšių yra tiesiogiai susijusios su negyva mediena, o jos trūkumas laikomas vienu pagrindinių bioįvairovės mažėjimo veiksnių (Evans & Kelty, 2010). Lietuvoje ši problema yra ypač aktuali – nustatyta, kad net apie 80 % saugomų miško vabzdžių rūšių išlikimui didžiausią grėsmę kelia negyvos medienos stygius, o daugelio grybų ir kerpių rūšių egzistavimas taip pat tiesiogiai priklauso nuo jos kiekio ir kokybė (Augutis, 2012; Andersson & Kriukelis, 2002; Gorban et al., 2025). Tai rodo, kad negyvos medienos vaidmuo biologinės įvairovės palaikyme yra ne tik teorinis, bet ir praktiniu požiūriu kritinis.

Negyva mediena taip pat atlieka svarbų vaidmenį įvairių cheminių elementų biogeocheminiuose cikluose, ypač anglies apykaitoje. Miško ekosistemos veikia kaip reikšmingi anglies ir kitų medžiagų kaupimo ir transformavimo rezervuarai, o negyva mediena šiuose procesuose funkcionuoja kaip laikina saugykla. Irimo metu medžių sukauptos medžiagos palaipsniui grąžinamos į atmosferą arba pernešamos į dirvožemį, aplinkinius augalus, išsiplauna į dirvožeminius ir gruntinius vandenis. Negyva mediena pamažu atpalaiduodama didelius anglies, maistinių medžiagų kiekius taip prisideda prie dirvožemio formavimosi ir derlingumo (Janisch & Harmon, 2002; Russell et al., 2015). Nors absoliutus anglies ir azoto kiekis negyvoje medienoje nėra didžiausias miško ekosistemoje, jų vaidmuo yra ypač svarbus ankstyvose sukcesinėse stadijose, bei po įvairių pažaidų.

Nepaisant pripažintos ekologinės svarbos, negyvos medienos kiekiai daugelyje Europos ir Lietuvos miškų išlieka gerokai mažesni nei pirmykščiuose ar mažai žmogaus veiklos paveiktuose miškuose Preikša, 2011).. Intensyvi miškų ūkio veikla, ypač sanitariniai ir pagrindiniai kirtimai, ženkliai sumažina stambios negyvos medienos kiekius. Šis procesas laikomas viena pagrindinių priežasčių, lėmusių su negyva mediena susijusių rūšių nykimą. Tuo tarpu Lietuvoje, nors bendras miškingumas didėja, duomenų apie negyvos medienos dinamiką vis dar trūksta, ypač šalyje vyraujančiuose spygliuočių ir mišriuose miškuose.

Svarbi problematikos dalis yra susijusi ne tik su bendru negyvos medienos kiekiu, bet ir su jos struktūra, medžių rūšių įvairove (Lekoveckaitė et al. 2023) Skirtingos rūšys yra prisitaikiusios prie skirtingų negyvos medienos formų – stovinčių sausuolių, stuobrių, gulinčių virtuolių ar įvairių irimo stadijų medienos. Todėl vien tik kiekybiniai rodikliai ne visada leidžia tinkamai įvertinti ekologinę situaciją. Negyvos medienos įvairovė, jos erdvinis pasiskirstymas ir irimo stadijos sudaro kompleksinę buveinių sistemą, nuo kurios priklauso ekosistemų funkcionavimas ir stabilumas.

Papildomą aktualumą negyvos medienos tyrimams suteikia klimato kaita (Gorban et al. 2025). Nėra aiškus negyvos medienos kaip anglies kaupimo efektyvumas. Prognozuojami temperatūros ir kritulių režimo pokyčiai gali turėti reikšmingą poveikį tiek medžių mirtingumui, tiek negyvos medienos susidarymo ir irimo procesams. Viena vertus, didėjantis ekstremalių reiškinių dažnis gali padidinti negyvos medienos kiekį, tačiau tuo pačiu aukštesnė temperatūra gali spartinti jos irimą, todėl bendras poveikis ekosistemoms išlieka sudėtingai prognozuojamas. Tai kelia naujus iššūkius tiek ekologiniams tyrimams, tiek miškų valdymui.

Tyrimas atliktas vadovaujant VDU Miškų ir ekologijos fakulteto studento B.Gedrimo magistriniam darbui.

Metodika

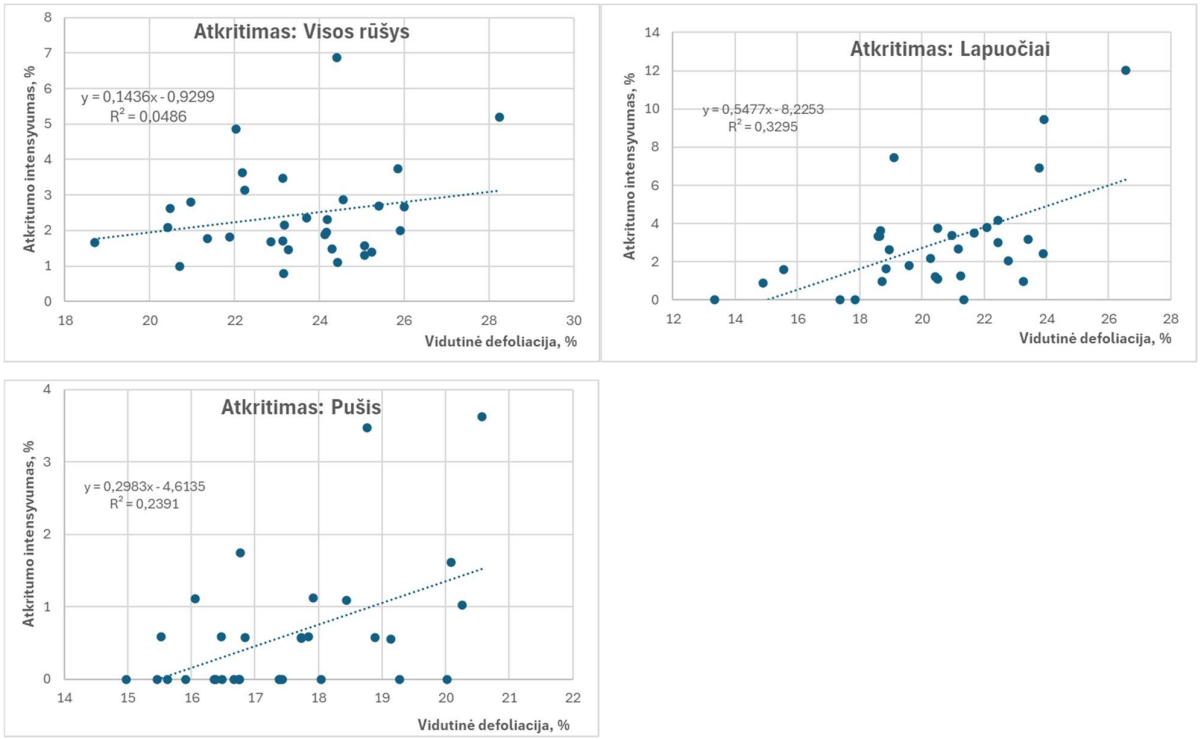
Tyrimai atlikti 2025 m. lauko darbu metu, vykdant suplanuotą, kas 5 metus vykdomą, miškų būklės ir produktyvumo apskaitą visuose trijose KM stotyse.

Tyrimų metu buvo vertinami sausuoliai, dar stovintys ir nugriuvę, bei jų medienos suirimo laipsnis. I suirimo mediena, tai švieži sausuoliai be jokių suirimo žymių, II – medienos suirimas jau yra prasidėjęs, III – vidutinis suirimo laipsnis, kai paviršinė mediena jau yra minkšta; IV suirimo laipsnis, kai mediena jau yra pasklidusi žemės paviršiuje ir V suirimo laipsnis – kai sausuolio likučiai sunkiai matomi, ar jų jau visai nėra.

2.7.1. Aukštaitijos KMS baseino negyvoji mediena, jos kiekiai ir destrukcijos greitis.

Medienos destrukcijos intensyvumas priklauso nuo medžių rūšies, klimato, medienos matmenų ir drėgmės režimo. Spartesnė destrukcija pagreitina anglies grįžimą į atmosferą, o lėtesnė – ilgina anglies kaupimo laiką negyvoje medienoje (Russell et al., 2015; Wijas et al., 2024).

Medžių lajų būklės ir jų žuvimo intensyvumo palyginamoji analizė parodė, kad medžių žūtis ne visada sutapo su blogėjančia medžių būkle. Bendrieji duomenys rodo, kad tarp šių rodiklių neegzistuoja jokio reikšmingesnio ryšio. Įvertinus medžių rūšį, nustatyta, kad lapuočių medžių žūtis turi reikšmingos įtakos jų lajų vidutinės defoliacijos kaitai, kai atkritimui didėjant, didėja ir vidutinė defoliacija. Būtent šis rodiklis reikšmingai paaiškino iki 33 % vidutinės defoliacijos kaitos.



2.59 pav. Medžių vidutinės defoliacijos ir jų žuvimo intensyvumo tarpusavio priklausomybė.

Pušų atkritimo intensyvumas taip pat lėmė ir vidutinės defoliacijos kaitą, paaiškindamas iki 24 % pastarosios kintamumo. Eglių žūtis paaiškino iki 33 % eglių vidutinės defoliacijos kintamumo. Todėl aiškinant pagrindines priežastis, pradiniame etape buvo analizuota tik temperatūrų ir kritulių mėnesinių verčių įtaką šių tirtų miško būklės parametrų kaitai.

Medžių lajos būklės ir jų žūties intensyvumo analizė parodė, kad tiriamuoju laikotarpiu Aukštaitijos KMS baseine bendrai medžių lajų būklei mažėjant po -0,11 % per metus, medžių atkritimo intensyvumas didėja po 0,04 % per metus. Nuo 2020 m. atkritimo intensyvumas pasidėjo nuo 1 iki 5 % per metus.

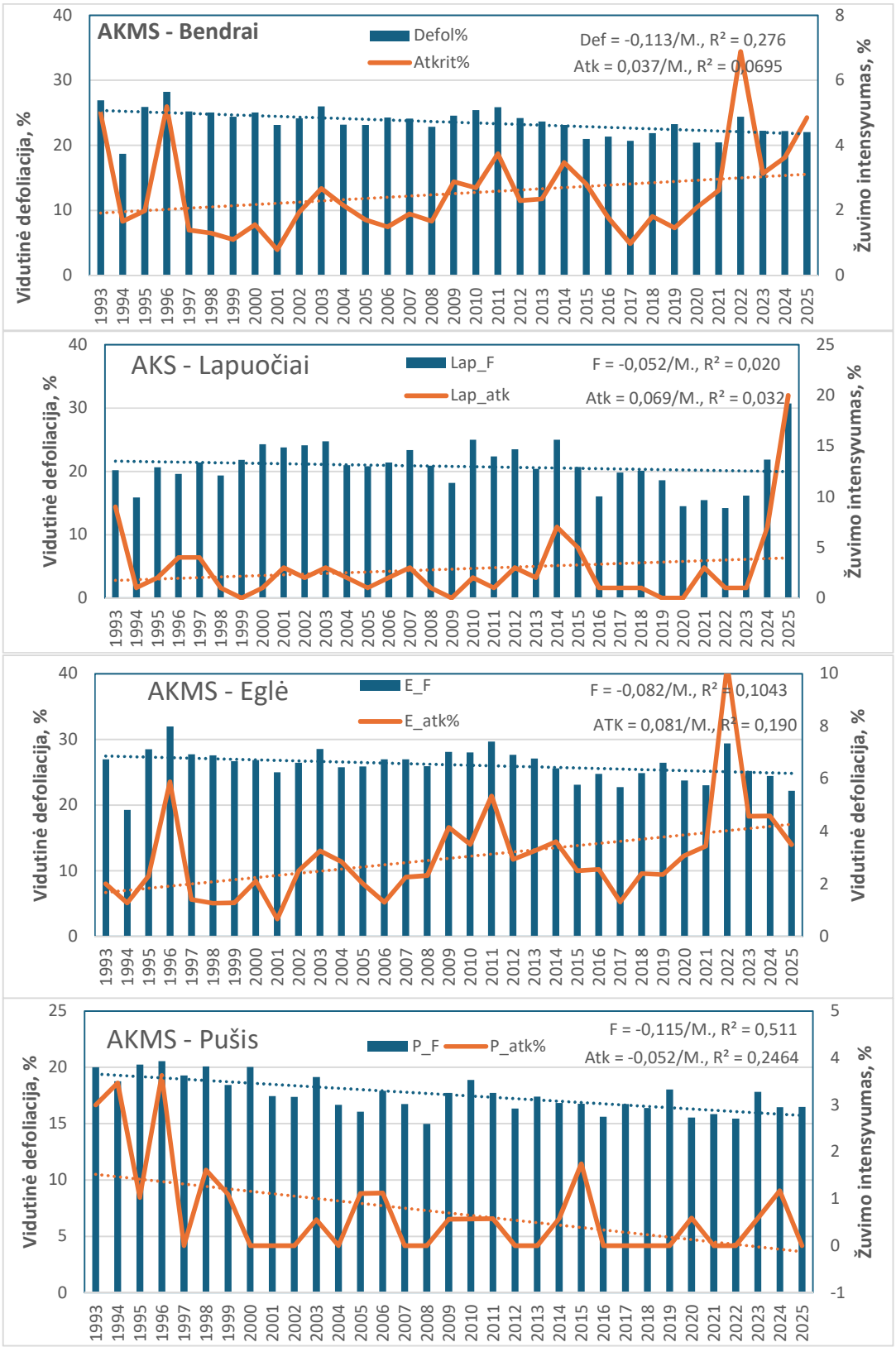
Lapuočių medžių šie tirti parametrai kito silpniausiai: Vidutinė defoliacija mažėjo vos po -0,05 % per metus, o atkritimo intensyvumas didėjo po 0,07 % per metus. Tokį atkritimo intensyvumą lėmė paskutiniaisiais metais 2023-2024 m. reikšmingai padidėjęs žuvusių lapuočių, pirmoje eilėje beržų, skaičius.

Spygliuočių medžių rūšių tiriamieji rodikliai ir jų kaita išsiskyrė reikšmingai. Eglių vidutinė defoliacija mažėjo po 0,08 % per metus, kai tuo tarpu jų atkritimas didėjo net po 0,08 % per metus. Pušų lajų vidutinė defoliacija mažėjo intensyviausiai – po -0,12 % per metus o atkritimo intensyvumas mažėjo po -0,05 % per metus. Tai geriausiai prisitaikiusios prie mūsų aplinkos sąlygų medžių rūšies parametrai.

Įvertinus medžių rūšį, nustatyta, kad lapuočių medžių žūtis turi reikšmingos įtakos jų lajų vidutinės defoliacijos kaitai, kai atkritimui didėjant, didėja ir vidutinė defoliacija. Būtent šis rodiklis reikšmingai paaiškino iki 33 % vidutinės defoliacijos kaitos. Tokiu pat patikimumu eglių atkritimo intensyvumas paaiškino jų vidutinės defoliacijos kaitą. Pušų atkritimo intensyvumas kiek tai silpniau lėmė defoliacijos kintamumą, paaiškindamas iki 24 % pastarosios kaitos.

Klimatinių rodiklių ir tirtų parametrų palyginamoji analizė rodo, kad šiltos žiemos teigiamai sąlygoja medžių lajų būklę, tik karščio bangos vegetacinio laikotarpio viduryje gali turėti neigiamos reikšmės, didindamos medžių lajų defoliaciją, ypač lapuočiams ir eglėms. Klimato atšilimas labiausiai teigiamai paveikė pušų lajų būklę. Daugeliu atveju krituliai mažino ir medžių atkritimą, išskyrus tik lapuočių medžių rūšis, pirmiausiai beržą. Labai drėgnas vegetacijos laikotarpis didino beržų atkritimą, kurį dažniausiai sąlygojo vėjavartos.

Apibendrinus gautis rezultatus buvo sukurti medžių būklės ir atkritimo intensyvumo daugialypės regresijos modeliai priklausomai atskirai nuo kritulių ir temperatūros ir galaiussiai bendrai nuo jų kompleksiško poveikio. Tokiu būdu yra išaiškinama,, kurie meteorologiniai veiksniai: temperatūra ar krituliai yra reikšmingesni medžių būklei ir jų išgyvenamumui, intensyviai besikeičiančio klimato sąlygomis.



2.60 pav. Tirtų medžių rūšių lajos vidutinės defoliacijos ir medžių atkritimo intensyvumas Aukštaitijos s KMS tiriamuoju laikotarpiu.

2.14 lentelė. Tirtų medžių rūšių vidutinės defoliacijos ir medžių mirtingumo daugialypės regresijos modeliai priklausomai nuo mėnesio kritulių kiekio Aukštaitijos KMS 1993-2025 m..

Regression Summary for Dependent Variable: **Defoliacija: Egle**
R= 0,758 R²= 0,575 F(4,28)=9,49 p<0,00006 Std.Error of estimate: 1,721

N=33	Beta	Std.Err.	B	Std.Err.	t(28)	p-level
Intercept			32,158	1,764	18,226	0,000
K_07	-0,365	0,132	-0,019	0,007	-2,771	0,010
Kr9-11	0,250	0,124	0,011	0,005	2,011	0,054
Kr3-5	-0,368	0,125	-0,023	0,008	-2,942	0,006
Kr12-1	-0,364	0,131	-0,032	0,012	-2,782	0,010

Regression Summary for Dependent Variable: **Atkritimas: Egle**
R= 0,664 R²= 0,440 F(3,29)=7,59 p<0,0007 Std.Error of estimate: 2,076

	Beta	Std.Err.	B	Std.Err.	t(29)	p-level
Intercept			8,2313	2,1790	3,7775	0,0007
K6-7	-0,3680	0,1396	-0,0165	0,0062	-2,6365	0,0133
Kr9-11	0,3037	0,1391	0,0143	0,0066	2,1826	0,0373
Kr2-5	-0,4311	0,1396	-0,0268	0,0087	-3,0886	0,0044

Regression Summary for Dependent Variable: **Defoliacija: Pusis**
R= 0,611 R²= 0,374 F(4,28)=4,18 p<0,0089 Std.Error of estimate: 2,3095

	Beta	Std.Err.	B	Std.Err.	t(28)	p-level
Intercept			20,343	2,125	9,571	0,000
K_07	-0,3380	0,1524	-0,020	0,009	-2,218	0,035
K_09	0,2661	0,1515	0,025	0,014	1,757	0,090
Kr_09	0,2678	0,1530	0,026	0,015	1,751	0,091
Kr2-5	-0,3156	0,1533	-0,020	0,010	-2,059	0,049

Regression Summary for Dependent Variable: Atkritimas: Pusis
R= 0,579 R²= 0,335 F(3,29)=4,87 p<,0073 Std.Error of estimate: 2,499

	Beta	Std.Err.	B	Std.Err.	t(29)	p-level
Intercept			7,427	2,741	2,709	0,011
K_09	0,249	0,152	0,025	0,015	1,635	0,113
K5-7	-0,389	0,152	-0,019	0,007	-2,555	0,016
Kr2-5	-0,296	0,152	-0,020	0,010	-1,951	0,061

Regression Summary for Dependent Variable: Defol: Lapuociai
R= 0,606 R²= 0,368 F(4,28)=4,07 p<0,0100 Std.Error of estimate: 2,381

	Beta	Std.Err.	B	Std.Err.	t(28)	p-level
Intercept			18,066	3,147	5,741	0,000
Kr_09	-0,273	0,153	-0,027	0,015	-1,785	0,085
K5-7	0,197	0,152	0,009	0,007	1,294	0,206
Kr5-7	0,377	0,161	0,016	0,007	2,348	0,026
Kr1-2	-0,183	0,161	-0,019	0,016	-1,139	0,264

Regression Summary for Dependent Variable: Atkrit: Lapuociai
R= 0,664 R²= 0,440 F(4,28)=5,51 p<0,0021 Std.Error of estimate: 2,253

	Beta	Std.Err.	B	Std.Err.	t(28)	p-level
Intercept			-0,880	2,581	-0,341	0,736
K4-5	0,383	0,144	0,029	0,011	2,658	0,013
Kr2-3	-0,350	0,146	-0,035	0,014	-2,393	0,024
Kr4-5	0,212	0,147	0,016	0,011	1,438	0,162
Kr6-7	0,263	0,142	0,013	0,007	1,848	0,075

2.15 lentelė. Tirtų medžių rūšių vidutinės defoliacijos ir medžių mirtingumo daugialypės regresijos modeliai priklausomai nuo mėnesio vidutinės temperatūros Aukštaitijos KMS 1993-2025 m..

Regression Summary for Dependent Variable: Defoliacija: Egle
R= 0,682 R²= 0,465 F(4,28)=6,08 p<0,0012 Std.Error of estimate: 1,933

	Beta	Std.Err.	B	Std.Err.	t(28)	p-level
Intercept			12,751	7,513	1,697	0,101
Tm_05	0,1743	0,1493	0,244	0,209	1,168	0,253
Tm_09	-0,2583	0,1466	-0,393	0,223	-1,762	0,089
T6-8	0,3405	0,1431	0,835	0,351	2,379	0,024
Tm12-1	-0,3493	0,1532	-0,352	0,154	-2,280	0,030

Regression Summary for Dependent Variable: Atkritimas: Egle
R= 0,491 R²= 0,241 F(2,30)=4,756 p<0,016 Std.Error of estimate: 2,377

	Beta	Std.Err.	B	Std.Err.	t(30)	p-level
Intercept			-19,555	7,574	-2,582	0,015
Tm_05	0,251	0,159	0,375	0,239	1,574	0,126
T6-8	0,404	0,159	1,061	0,418	2,536	0,017

Regression Summary for Dependent Variable: Defoliacija: Pusis
R= 0,608 R²= 0,370 F(3,29)=5,68 p<0,0035 Std.Error of estimate: 2,275

	Beta	Std.Err.	B	Std.Err.	t(29)	p-level
Intercept			40,669	6,953	5,849	0,000
Tm_09	-0,3651	0,1529	-0,615	0,257	-2,388	0,024
Tm9-11	-0,3049	0,1545	-0,686	0,348	-1,974	0,058
Tm6-8	-0,2270	0,1600	-0,613	0,432	-1,419	0,167

Regression Summary for Dependent Variable: Atkritimas: Pusis
R= 0,631 R²= 0,398 F(3,29)=6,407 p<,0018 Std.Error of estimate: 2,376

	Beta	Std.Err.	B	Std.Err.	t(29)	p-level
Intercept			20,799	7,729	2,691	0,012
Tm_05	0,281	0,145	0,464	0,239	1,939	0,062
Tm9-11	-0,302	0,150	-0,727	0,360	-2,019	0,053
Tm6-9	-0,416	0,149	-1,279	0,458	-2,792	0,009

Regression Summary for Dependent Variable: Defol: Lapuociai
R= 0,625 R²= 0,390 F(3,29)=6,19 p<0,0022 Std.Error of estimate: 2,298

	Beta	Std.Err.	B	Std.Err.	t(29)	p-level
Intercept			-6,452	6,378	-1,012	0,320
T_07	0,434	0,152	0,678	0,238	2,846	0,008
Tm_07	0,358	0,146	0,560	0,228	2,457	0,020
Tm3-5	0,230	0,152	0,647	0,425	1,521	0,139

Regression Summary for Dependent Variable: Atkrit: Lapuociai
R= 0,564 R²= 0,318 F(1,31)=14,48 p<0,0006 Std.Error of estimate: 2,363

	Beta	Std.Err.	B	Std.Err.	t(31)	p-level
Intercept			2,151	0,482	4,466	0,000
Tm_metu	0,564	0,148	0,097	0,025	3,806	0,001

2.16 lentelė. Tirtų medžių rūšių vidutinės defoliacijos ir medžių mirtingumo daugialypės regresijos modeliai priklausomai nuo mėnesio vidutinės temperatūros ir kritulių kiekio Aukštaitijos KMS 1993-2025 m..

Regression Summary for Dependent Variable: Defoliacija: Eegle
R= 0,809 R²= 0,654 F(6,26)=8,187 p<0,0001 Std.Error of estimate: 1,61

	Beta	Std.Err.	B	Std.Err.	t(26)	p-level
Intercept			19,840	5,856	3,388	0,002
K_07	-0,344	0,124	-0,018	0,007	-2,778	0,010
Kr9-11	0,180	0,120	0,008	0,005	1,500	0,146
Kr3-5	-0,269	0,124	-0,016	0,008	-2,165	0,040
Kr12-1	-0,246	0,136	-0,022	0,012	-1,809	0,082
T6-8	0,244	0,123	0,599	0,301	1,988	0,057
Tm12-1	-0,237	0,134	-0,239	0,135	-1,763	0,090

Regression Summary for Dependent Variable: Atkritimas: Egle
R= 0,703 R²= 0,495 F(4,28)=6,842 p<,0006 Std.Error of estimate: 2,008

	Beta	Std.Err.	B	Std.Err.	t(28)	p-level
Intercept			-3,311	6,987	-0,474	0,639
Kr9-11	0,2675	0,1362	0,013	0,006	1,964	0,060
Kr2-5	-0,3789	0,1383	-0,024	0,009	-2,739	0,011
K6-7	-0,3337	0,1365	-0,015	0,006	-2,445	0,021
T6-8	0,2444	0,1410	0,641	0,370	1,733	0,094

Regression Summary for Dependent Variable: Defoliacija: Pusis
R= 0,776 R²= 0,602 F(7,25)=5,41 p<,0007 Std.Error of estimate: 1,948

	Beta	Std.Err.	B	Std.Err.	t(25)	p-level
Intercept			41,058	6,210	6,611	0,000
K_07	-0,177	0,152	-0,010	0,009	-1,166	0,254
K_09	0,258	0,137	0,024	0,013	1,879	0,072
Kr_09	0,286	0,134	0,028	0,013	2,137	0,043
Kr2-5	-0,283	0,131	-0,018	0,008	-2,154	0,041
Tm_09	-0,179	0,165	-0,302	0,278	-1,086	0,288
Tm9-11	-0,223	0,137	-0,501	0,308	-1,626	0,117
Tm6-8	-0,319	0,139	-0,861	0,375	-2,292	0,031

Regression Summary for Dependent Variable: Atkrit: Pusis
R= 0,711 R²= 0,506 F(5,27)=5,531 p<0,001 Std.Error of estimate: 2,23

	Beta	Std.Err.	B	Std.Err.	t(27)	p-level
Intercept			23,534	7,097	3,316	0,003
K_09	0,282	0,137	0,028	0,014	2,055	0,050
Kr2-5	-0,244	0,137	-0,017	0,009	-1,789	0,085
K5-7	-0,212	0,155	-0,010	0,007	-1,365	0,184
Tm9-11	-0,286	0,141	-0,688	0,339	-2,027	0,053
Tm6-9	-0,286	0,159	-0,880	0,490	-1,798	0,083

Regression Summary for Dependent Variable: Defol: Lapuočiai
R= 0,813 R²= 0,661 F(7,25)=6,98 p<0,0001 Std.Error of estimate: 1,84

	Beta	Std.Err.	B	Std.Err.	t(25)	p-level
Intercept			0,120	5,553	0,022	0,983
Kr_09	-0,195	0,121	-0,019	0,012	-1,607	0,121
K5-7	0,242	0,134	0,011	0,006	1,813	0,082
Kr5-7	0,224	0,132	0,009	0,005	1,702	0,101
Kr1-2	-0,377	0,149	-0,038	0,015	-2,530	0,018
T_07	0,205	0,134	0,320	0,210	1,527	0,139
Tm_07	0,201	0,131	0,315	0,204	1,539	0,136
Tm3-5	0,470	0,152	1,319	0,426	3,096	0,005

Regression Summary for Dependent Variable: Atkrit: Lapuočiai
R= 0,714 R²= 0,509 F(3,29)=10,04 p<0,0001 Std.Error of estimate: 2,07

	Beta	Std.Err.	B	Std.Err.	t(29)	p-level
Intercept			3,626	1,602	2,263	0,031
Kr2-3	-0,374	0,131	-0,037	0,013	-2,848	0,008
K4-5	0,211	0,137	0,016	0,011	1,547	0,133
Tm_metu	0,459	0,137	0,079	0,024	3,354	0,002

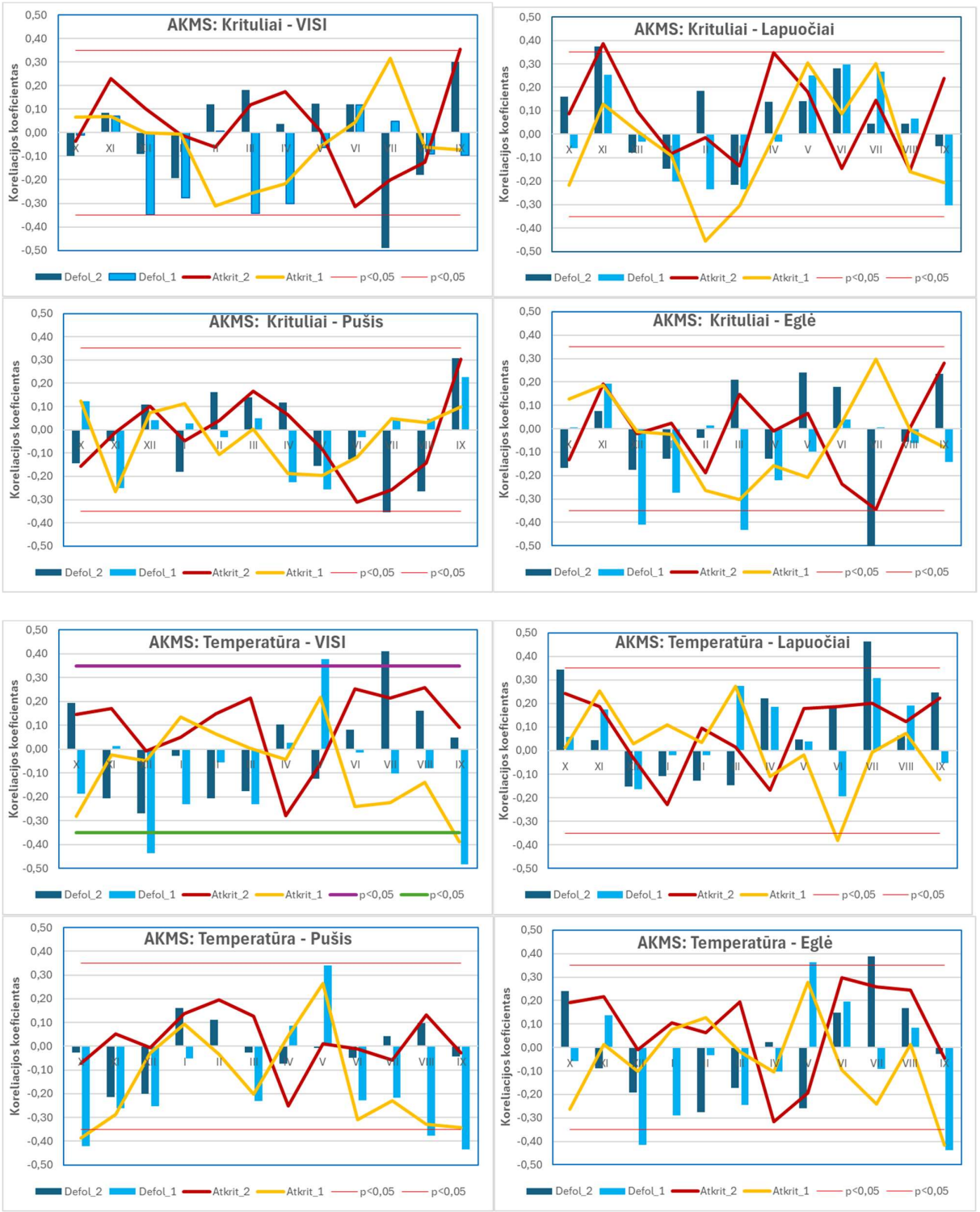
Aukštaitijos KMS baseine augančių eglių vidutinę defoliaciją lėmė krituliai liepos mėnesį praėjusio sezono kartu su einamojo sezono krituliais žiemos ir pavasario laikotarpio, kurių gausumas mažino defoliacija. Pasitvirtino jau senai nustatytas dėsningumas, kad praėjusio sezono rusens mėnesių kritulių kiekis blogina medžių būklę, indikuodami, kad tuo laikotarpiu medžių būklę teigiamai sąlygoja šiltas ir sausas ruduo. Šie meteorologiniai veiksniai paaiškino iki 60 % eglių vidutinės defoliacijos kaitos.

Eglių atkritimą skatino taip pat kritulių kiekis praėjusio sezono rudens mėnesių, o atsparumą žievėgraužiui tipografui didino praėjusio sezono vegetacijos laikotarpio ir ankstyvo pavasario kritulių kiekis. Būtent dėl ankstyviausios eglių vegetacijos, šio laikotarpio drėgmė sąlygoja eglių didelį atsparumą pažeidimams. Šie veiksniai paaiškino iki 45 % eglių atkritimo intensyvumo.

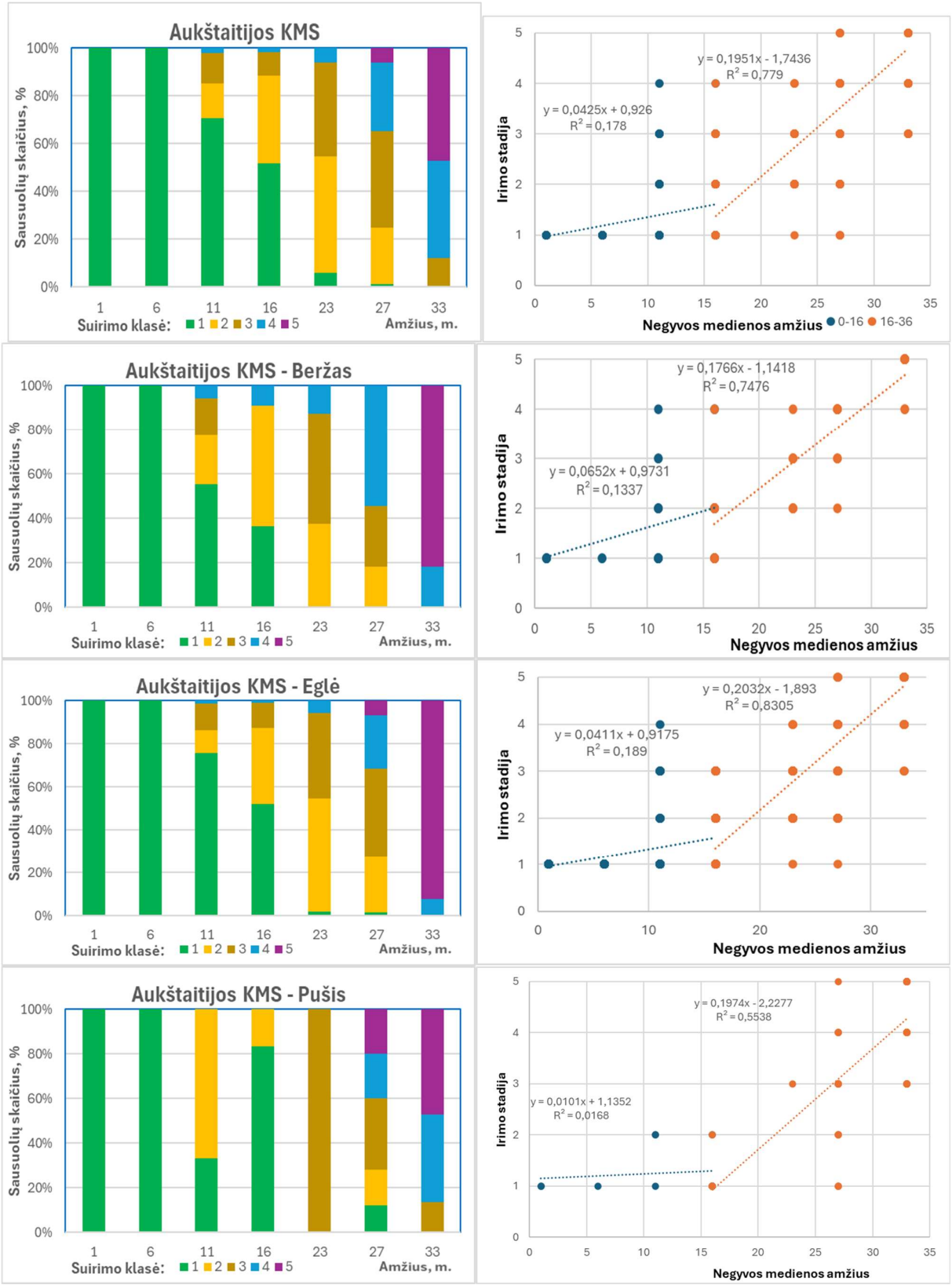
Kritulių poveikis pušų lajų defoliacijai ir atkritimui buvo kiek tai mažesnis. Praėjusio sezono kritulių kiekis liepos mėn. kartu su ankstyvo pavasario mėnesių kritulių kiekiu teigiamai sąlygojo lajų būklę, tuo tarpu rugsėjo mėn. kritulių kiekis blogino pušų lajų būklę, panašiai kaip ir eglių. Tie patys rodikliai lėmė ir pušų atkritimą. Atsparumą nepalankiems veiksniams čia skatino ne tik praėjusio sezono liepos mėn. kritulių kiekis bet ir visas intensyvaus augimo laikotarpio kritulių kiekis.

Panašiu pušims reikšmingumu kritulių kiekis sąlygojo ir lapuočių medžių defoliacijos ir jų atkritimo intensyvumo kaitą. Tie patys rodikliai kurie reikšmingai sąlygojo spygliuočių medžių būklę ir išlikimą sąlygojo ir beržų tirtus rodiklius, tik jų poveikis buvo atvirkštinis, indikuojantis, kad beržai blogiausiai yra prisitaikę išgyventi stresą pastarojo laikotarpio klimatinėse sąlygose. Gauti rezultatai rodo, kad dideli kiekiai kritulių vegetacijos laikotarpiu neigiamai veikia lapuočių būklę sukeldami jiems šaknų puvinį, ko pasėkoje tokia medžiai būna pažeidžiami vėjavartų. Dėl šios priežastie lapuočių, pagrinde beržų, atkritimą skatino ankstyvo pavasario ir vegetacijos laikotarpio gausūs krituliai, o kiek tai slopino tik vėlyvos žiemos mėnesių kritulių kiekis.

Temperatūrų poveikis tirtiems rodikliams buvo panašus ar kiek silpnesnis. Eglių vidutinės defoliacijos mažėjimą skatino rugsėjo mėnesio ir žiemos aukštesnės temperatūros, o būklę blogino pavasario ir praėjusio sezono vegetacijos vidurio karščio bangos, po kurių susidarydavo palankios sąlygos kenkėjams plisti. Dėl šios priežastis tai buvo pagrindiniai klimatiniai rodikliai paaiškinantys virš 30 % eglių žūties atvejų.



2.61 pav. Tirtų medžių rūšių lajos vidutinės defoliacijos ir medžių atkritimo intensyvumo priklausomybės nuo meteorologinių parametrų už dviejų sezonų laikotarpį Aukštaitijos s KMS. (2 – praėjęs sezonas; 1 – einamasis sezonas)



2.62 pav. Tirtų medžių rūšių negyvos medienos suirimo laipsnis priklausomai nuo medžio žūties laiko Aukštaitijos s KMS.

Skirtingai negu eglėms, pušų lajų vidutinės defoliacijos mažėjimą skatino rugsėjo mėn. kartu su praėjusio sezono rudens ir einamojo sezono pavasario mėn. aukštesnės temperatūros. Nenustatytas nei vieno mėnesio karščio bangų neigiamas poveikis pušų būklei. Medžių atkritimą skatino tik karščio bangos vegetacijos pradžioje.

Karščio bangos liepos mėn. kartu su šiltų pavasariu turėjo neigiamą poveikį lapuočių lajų būklei. Jų atkritimą po tokio poveikio skatino bendra vidutinė metų vidutinė temperatūra, indikuodama, kad šylant klimatui beržams išgyventi stresą pastaruoju laikotarpiu dėl karščio bangų ir gausesnių kritulių pasidaro vis labiau problematiška. Tai nauja grėsmė visiems Lietuvoje augantiems beržams.

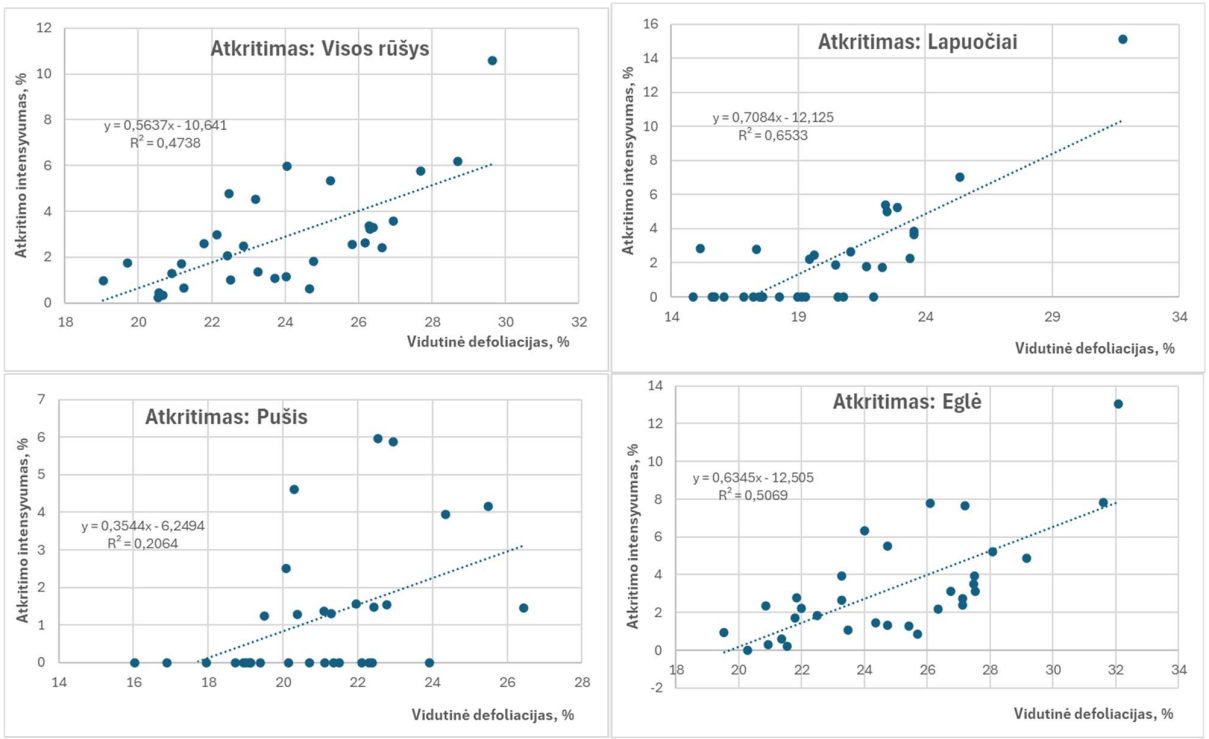
Apibendrinus gautus rezultatus nustatyta, kad klimatiniai veiksniai Aukštaitijos KMS paaiškino iki 65 % tirtų eglių vidutinės defoliacijos kaitos ir apie 50% jų atkritimo intensyvumo; 60 % pušų vidutinės defoliacijos ir 50 % jų atkritimo kaitos ir virš 65 % beržų vidutinės defoliacijos ir 50 % jų atkritimo intensyvumo.

Sausos medienos irimo greičio analizė rodo, Kad Aukštaitijos KMS baseine sausuolių destrukcija prasideda tik po 10 metų pertraukos. Per 16 metų laikotarpį beržų irimo greitis siekia po 0,06 irimo klasės per metus, eglės sausos medienos – iki 0,04, o pušies vos 0,01 irimo klasės per metus. Per 16 – 33 metų laikotarpi medienos irimo greitis reikšmingai didėja ir siekia“ beržų – po 0,18, eglės 0,20 ir pušies 0,19 irimo klasės per metus. Tokiu būdu pradinėje stadijoje po medžio žūties sausos medienos irimo intensyvumas viena klase padidėja daugiau negu per 10 metų, tuo tarpu vėlesniame amžiuje iena irimo klase sausa mediena padidėja per 5-7 metus. Didžiausiais tempais ira lapuočių, tame tarpe beržo mediena, o lėčiausiai – pušies mediena.

Žuvusio medžio didesnis amžius ir didesni parametrai lėtina sausos medienos destrukcijos greičius.

2.7.2. Žemaitijos KMS baseino negyvoji mediena, jos kiekiai ir destrukcijos greitis.

Žemaitijos KMS baseine medžių lajų būklės kaitai reikšmingos įtakos turėjo medžių žūtis. Jų žuvimo intensyvumo palyginamoji analizė parodė, kad medžių žūtis ne visada sutapo su blogėjančia medžių būkle. Bendrieji duomenys rodo, kad tarp šių rodiklių, skirtingai negu Aukštaitijos KMS, egzistuoja reikšmingas ryšis. Įvertinus medžių rūšį, nustatyta, kad lapuočių medžių žūtis turi reikšmingos įtakos jų lajų vidutinės defoliacijos kaitai, kai atkritimui didėjant, didėja ir vidutinė defoliacija. Būtent šis rodiklis reikšmingai paaiškino iki 65 % vidutinės defoliacijos kaitos.



2.63 pav. Tirtų medžių rūšių atkritimo intensyvumo ir vidutinės defoliacijos tarpusavio priklausomybės Žemaitijos KMS.

Pušų atkritimo intensyvumas taip pat lėmė ir vidutinės defoliacijos kaitą, paaiškindamas iki 35 % pastarosios kintamumo. Eglių žūtis paaiškino net iki 63 % eglių vidutinės defoliacijos kintamumo.

Medžių lajos būklės ir jų žūties intensyvumo analizė parodė, kad tiriamuoju laikotarpiu Žemaitijos KMS baseine bendrai medžių lajų būklei mažėjant po -0,07 % per metus, medžių atkritimo intensyvumas didėja po 0,09 % per metus. Tai beveik 2 kartus intensyviau negu Aukštaitijos KMS. Nuo 2018 m. atkritimo intensyvumas padidėjo nuo 1,5 iki 6-7 % per metus.

Lapuočių medžių šie tirti parametrai kito silpniausiai: Vidutinė defoliacija mažėjo vos po -0,06 % per metus, o atkritimo intensyvumas didėjo po 0,04 % per metus.

Spygliuočių medžių rūšių tiriamieji rodikliai ir jų kaita išsiskyrė reikšmingai. Eglių vidutinė defoliacija mažėjo po 0,07 % per metus, kai tuo tarpu jų atkritimas didėjo net po 0,12 % per metus. Skirtingai negu Aukštaitijos KMS, pušų vidutinė defoliacija jau pradėjo didėti po 0,01% per metus, nors atkritimo intensyvumas mažėjo po -0,01 % per metus.

Klimatinių rodiklių ir tirtų parametrų palyginamoji analizė rodo, panašius dėsningumus nustatytus Aukštaitijos KMS baseine augančiuose miškuose. Šiltos žiemos teigiamai sąlygoja medžių lajų būklę, tik karščio bangos vegetacinio laikotarpio viduryje gali turėti neigiamos reikšmės, didindamos medžių lajų defoliaciją, ypač lapuočiams ir eglėms.

2.17 lentelė. Tirtų medžių rūšių vidutinės defoliacijos ir medžių mirtingumo daugialypės regresijos modeliai priklausomai nuo mėnesio kritulių kiekio Žemaitijos KMS 1994-2025 m.

Regression Summary for Dependent Variable: **Defoliacija: Egle**
R= 0,740 R²= 0,547 F(3,22)=8,871 p<0,0005 Std.Error of estimate: 2,26

	Beta	Std.Err.	B	Std.Err.	t(22)	p-level
Intercept			44,254	3,863	11,456	0,000
Kr9-11	-0,248	0,144	-0,010	0,006	-1,725	0,099
K3-5	-0,592	0,146	-0,084	0,021	-4,059	0,001
Kr3-5	-0,468	0,146	-0,065	0,020	-3,205	0,004

Regression Summary for Dependent Variable: **Atkritimas: Egle**
R= 0,676 R²= 0,456 F(4,21)=4,409 p<0,01 Std.Error of estimate: 2,335

	Beta	Std.Err.	B	Std.Err.	t(21)	p-level
Intercept			20,902	4,191	4,987	0,000
Kr9-11	-0,179	0,164	-0,007	0,006	-1,089	0,289
K3-5	-0,495	0,165	-0,065	0,022	-2,991	0,007
Kr3-5	-0,371	0,176	-0,047	0,022	-2,111	0,047
K6-8	-0,246	0,179	-0,012	0,009	-1,373	0,184

Regression Summary for Dependent Variable: **Defoliacija: Pusis**
R= 0,478 R²= 0,228 F(3,22)=2,168 p<0,1205 Std.Error of estimate: 2,225

	Beta	Std.Err.	B	Std.Err.	t(22)	p-level
Intercept			26,766	3,898	6,866	0,000
K3-5	-0,280	0,192	-0,030	0,021	-1,454	0,160
Kr3-5	-0,408	0,204	-0,042	0,021	-1,997	0,058
K6-8	0,288	0,205	0,011	0,008	1,402	0,175

Regression Summary for Dependent Variable: **Atkritimas: Pusis**
R= 0,677 R²= 0,458 F(2,23)=9,73 p<0,0009 Std.Error of estimate: 1,453

	Beta	Std.Err.	B	Std.Err.	t(23)	p-level
Intercept			11,403	2,367	4,817	0,000
K3-5	-0,571	0,156	-0,049	0,013	-3,663	0,001
Kr3-5	-0,479	0,156	-0,040	0,013	-3,074	0,005

Regression Summary for Dependent Variable: **Defol: Lapuociai**
R= 0,650 R²= 0,423 F(3,22)=5,37 p<0,0063 Std.Error of estimate: 2,964

	Beta	Std.Err.	B	Std.Err.	t(22)	p-level
Intercept			25,024	4,178	5,989	0,000
Kr9-11	-0,225	0,162	-0,011	0,008	-1,385	0,180
K3-5	-0,455	0,162	-0,075	0,027	-2,804	0,010
Kr6-8	0,446	0,163	0,027	0,010	2,743	0,012

Regression Summary for Dependent Variable: **Atkrit: Lapuociai**
R= 0,714 R²= 0,510 F(4,21)=5,474 p<0,0035 Std.Error of estimate: 2,529

	Beta	Std.Err.	B	Std.Err.	t(21)	p-level
Intercept			0,889	3,981	0,223	0,825
Kr9-11	-0,287	0,153	-0,012	0,007	-1,876	0,075
K3-5	-0,221	0,159	-0,033	0,024	-1,385	0,181
Kr6-8	0,375	0,154	0,021	0,008	2,425	0,024
Kr12-1	0,419	0,160	0,023	0,009	2,620	0,016

2.18 lentelė. Tirtų medžių rūšių vidutinės defoliacijos ir medžių mirtingumo daugialypės regresijos modeliai priklausomai nuo mėnesio vidutinės temperatūros Žemaitijos KMS 1994-2025 m.

Regression Summary for Dependent Variable: **Defoliacija: Egle**
R= 0,485 R²= 0,235 F(2,23)=3,534 p<0,046 Std.Error of estimate: 2,88

	Beta	Std.Err.	B	Std.Err.	t(23)	p-level
Intercept			29,224	2,637	11,082	0,000
Tm1-4	0,378	0,185	0,671	0,328	2,045	0,052
T9-12	-0,370	0,185	-0,913	0,456	-2,001	0,057

Regression Summary for Dependent Variable: **Atkritimas: Egle**
R= 0,584 R²= 0,341 F(3,22)=3,79 p<0,025 Std.Error of estimate: 2,512

	Beta	Std.Err.	B	Std.Err.	t(22)	p-level
Intercept			-11,972	11,149	-1,074	0,295
Tm9-11	0,181	0,178	0,552	0,541	1,021	0,318
T6-8	0,200	0,199	0,605	0,601	1,007	0,325
Tm1-4	0,390	0,203	0,637	0,331	1,924	0,067

Regression Summary for Dependent Variable: **Defoliacija: Pusis**
R= 0,618 R²= 0,382 F(3,22)=4,543 p<0,0127 Std.Error of estimate: 1,99

	Beta	Std.Err.	B	Std.Err.	t(22)	p-level
Intercept			26,392	5,302	4,977	0,000
T_06	-0,365	0,170	-0,516	0,241	-2,143	0,043
Tm_09	0,272	0,168	-0,411	0,254	1,616	0,120
T9-4	-0,352	0,170	-0,729	0,351	-2,076	0,050

Regression Summary for Dependent Variable: **Atkritimas: Pusis**
R= 0,461 R²= 0,213 F(2,23)=3,11 p<0,0638 Std.Error of estimate: 1,751

	Beta	Std.Err.	B	Std.Err.	t(23)	p-level
Intercept			-7,639	6,263	-1,220	0,235
Tm5-9	0,249	0,186	0,540	0,404	1,338	0,194
Tm1-4	0,413	0,186	0,441	0,198	2,224	0,036

Regression Summary for Dependent Variable: **Defol: Lapuociai**
R= 0,625 R²= 0,391 F(2,23)=7,371 p<0,003 Std.Error of estimate: 2,98

	Beta	Std.Err.	B	Std.Err.	t(23)	p-level
Intercept			27,816	4,230	6,575	0,000
T12-2	-0,334	0,181	-0,637	0,346	-1,841	0,078
T3-5	-0,402	0,181	-1,276	0,575	-2,220	0,037

Regression Summary for Dependent Variable: **Atkrit: Lapuociai**
R= 0,607 R²= 0,369 F(2,23)=6,715 p<0,005 Std.Error of estimate: 2,745

	Beta	Std.Err.	B	Std.Err.	t(23)	p-level
Intercept			-2,882	2,841	-1,014	0,321
T1-4	-0,483	0,166	-0,931	0,319	-2,917	0,008
Tm9-12	0,362	0,166	1,030	0,471	2,186	0,039

2.19 lentelė. Tirtų medžių rūšių vidutinės defoliacijos ir medžių mirtingumo daugialypės regresijos modeliai priklausomai nuo mėnesio vidutinės temperatūros ir kritulių kiekio Žemaitijos KMS 1994-2025 m.

Regression Summary for Dependent Variable: **Defoliacija: Egle**
R= 0,784 R²= 0,615 F(5,20)=6,39 p<0,001 Std.Error of estimate: 2,19

	Beta	Std.Err.	B	Std.Err.	t(20)	p-level
Intercept			44,490	4,017	11,074	0,000
Kr9-11	-0,217	0,140	-0,009	0,006	-1,550	0,137
K3-5	-0,528	0,145	-0,075	0,021	-3,635	0,002
Kr3-5	-0,403	0,146	-0,056	0,020	-2,766	0,012
Tm1-4	0,214	0,146	0,381	0,259	1,471	0,157
T9-12	-0,210	0,145	-0,518	0,358	-1,445	0,164

Regression Summary for Dependent Variable: **Atkritimas: Egle**
R= 0,795 R²= 0,631 F(5,20)=6,85 p<0,0007 Std.Error of estimate: 1,97

	Beta	Std.Err.	B	Std.Err.	t(20)	p-level
Intercept			3,916	8,568	0,457	0,653
K3-5	-0,468	0,141	-0,061	0,019	-3,316	0,003
Kr3-5	-0,300	0,150	-0,038	0,019	-2,006	0,059
K6-8	-0,268	0,151	-0,013	0,007	-1,777	0,091
T6-8	0,265	0,157	0,803	0,475	1,689	0,107
Tm1-4	0,267	0,161	0,437	0,263	1,661	0,112

Regression Summary for Dependent Variable: **Defoliacija: Pusis**
R= 0,753 R²= 0,567 F(6,19)=4,152 p<0,008 Std.Error of estimate: 1,793

	Beta	Std.Err.	B	Std.Err.	t(19)	p-level
Intercept			34,415	8,006	4,298	0,000
K3-5	-0,222	0,163	-0,024	0,018	-1,359	0,190
Kr3-5	-0,391	0,191	-0,041	0,020	-2,051	0,054
K6-8	0,319	0,169	0,013	0,007	1,887	0,075
T_06	-0,428	0,159	-0,606	0,225	-2,694	0,014
Tm_09	0,146	0,186	0,220	0,281	0,785	0,442
T9-4	-0,301	0,155	-0,623	0,321	-1,944	0,067

Regression Summary for Dependent Variable: **Atkritimas: Pusis**
R= 0,735 R²= 0,540 F(4,21)=6,177 p<0,0019 Std.Error of estimate: 1,40

	Beta	Std.Err.	B	Std.Err.	t(21)	p-level
Intercept			5,920	6,114	0,968	0,344
K3-5	-0,511	0,156	-0,044	0,013	-3,283	0,004
Kr3-5	-0,416	0,154	-0,034	0,013	-2,703	0,013
Tm5-9	0,120	0,153	0,260	0,332	0,782	0,443
Tm1-4	0,285	0,153	0,303	0,163	1,864	0,076

Regression Summary for Dependent Variable: **Defol: Lapuociai**
R= 0,847 R²= 0,718 F(5,20)=10,17 p<0,0001 Std.Error of estimate: 2,174

	Beta	Std.Err.	B	Std.Err.	t(20)	p-level
Intercept			32,871	4,361	7,537	0,000
Kr9-11	-0,274	0,120	-0,013	0,006	-2,294	0,033
K3-5	-0,458	0,121	-0,076	0,020	-3,785	0,001
Kr6-8	0,273	0,125	0,017	0,008	2,179	0,041
T12-2	-0,390	0,136	-0,744	0,259	-2,868	0,010
T3-5	-0,283	0,136	-0,896	0,431	-2,078	0,051

Regression Summary for Dependent Variable: **Atkrit: Lapuociai**
R= 0,814 R²= 0,662 F(5,20)=7,851 p<0,0003 Std.Error of estimate: 2,152

	Beta	Std.Err.	B	Std.Err.	t(20)	p-level
Intercept			12,711	3,739	3,400	0,003
Kr9-11	-0,262	0,134	-0,011	0,006	-1,959	0,064
K3-5	-0,323	0,139	-0,048	0,021	-2,324	0,031
K6-8	-0,336	0,142	-0,018	0,008	-2,363	0,028
Kr12-1	0,411	0,149	0,022	0,008	2,765	0,012
T1-4	-0,485	0,139	-0,935	0,268	-3,483	0,002

Apibendrinus gautis rezultatus, analogiškai Aukštaitijos KMS, buvo sukurti medžių būklės ir atkritimo intensyvumo daugialypės regresijos modeliai priklausomai atskirai nuo kritulių ir temperatūros ir galiausiai bendrai nuo jų kompleksiško poveikio. Tokiu būdu yra išaiškinama, kurie meteorologiniai veiksniai: temperatūra ar krituliai yra reikšmingesni medžių būklei ir jų išgyvenamumui, intensyviai besikeičiančio klimato sąlygomis vakariniame Lietuvos regione.

Priklausomų ir nepriklausomų veiksnių koreliacinė analizė parodė, kad egzistuojantys ryšiai yra reikšmingai silpnesni negu Aukštaitijos KMS. Tam, kad maksimaliai reikšmingai įvertinti meteorologinių veiksnių poveikį medžių lajų defoliacijai ir atkritimui, palaipsniui buvo trumpinama duomenų sekos, kol ryšiai pasidarė reikšmingi. Tokiu būdu meteorologinių veiksnių poveikis buvo analizuotas 2000-2025 duomenų pagrindu.

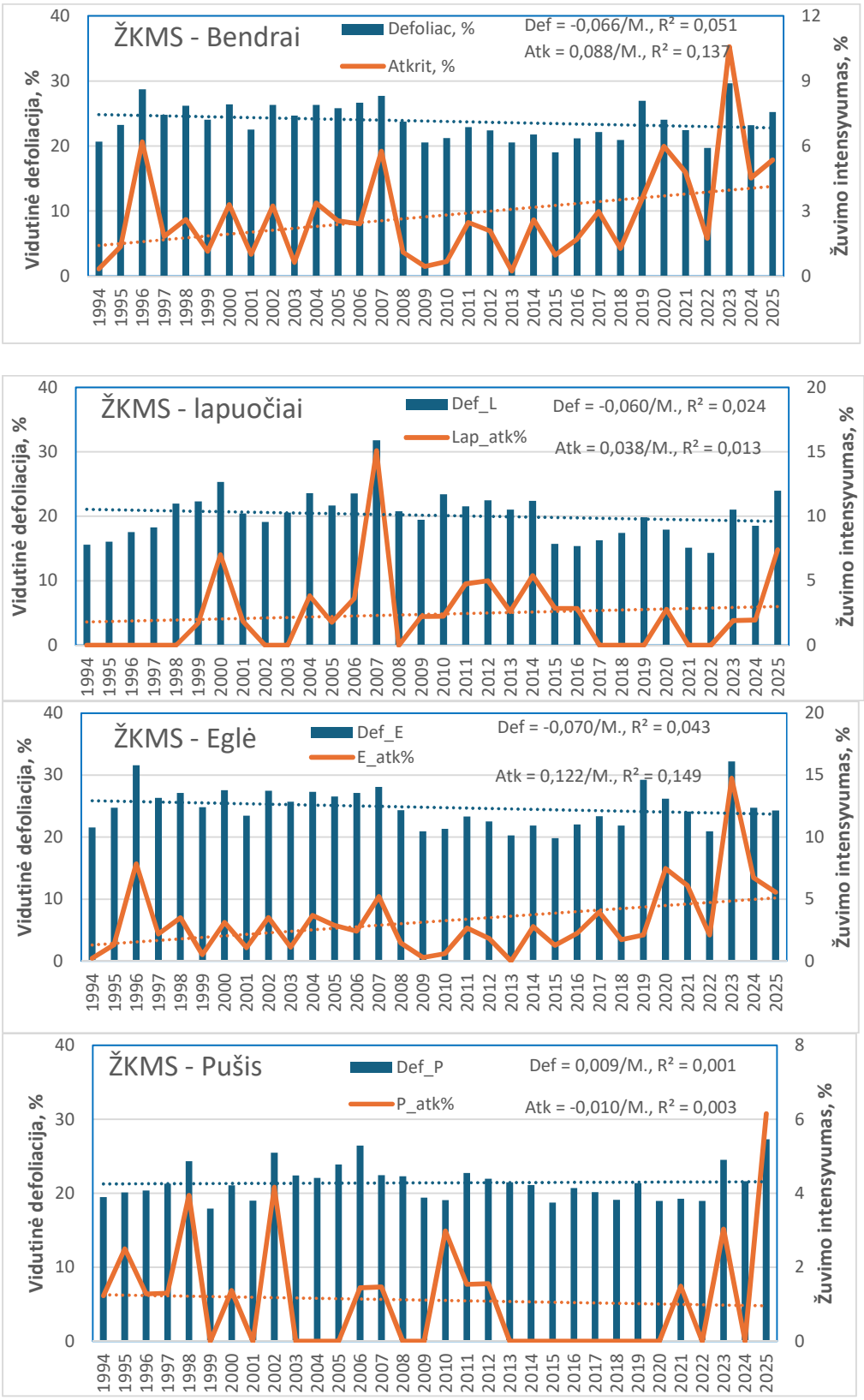
Nustatyta, kad Žemaitijos KMS baseine augančių eglių vidutinę defoliaciją lėmė krituliai praėjusio sezono rudens mėnesių kartu su dviejų sezono kritulių kiekiu pavasario mėnesiais. Nustatytas atvirkštinis ryšys rodo, kad kritulių poveikis šiais mėnesiais teigiamai sąlygojo eglių būklę, iki 55% paaiškindami jos kintamumą ir didindami jų atsparumą nepalankiems veiksniams – kenkėjų pažaidoms.

Eglių atkritimą skatino taip pat paminėtų mėnesių kritulių kiekis ir papildomai praėjusio sezono vegetacijos laikotarpio krituliai. Šie rodikliai paaiškino 45% eglių atkritimo intensyvumo. Krituliams gausėjant, žuvusių eglių skaičius mažėjo.

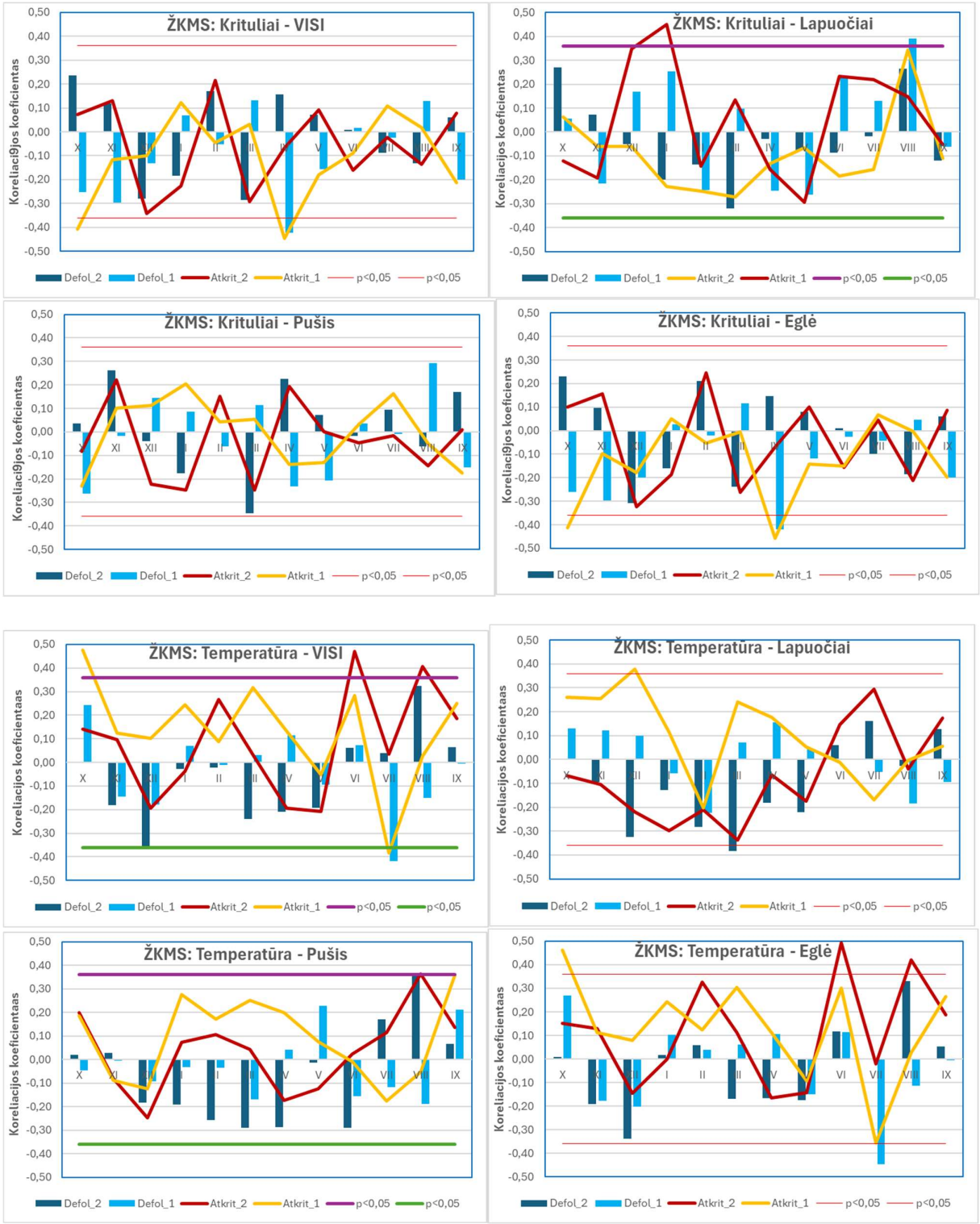
Kritulių poveikis pušų lajų defoliacijai ir atkritimui buvo mažesnis, o defoliacijos kaitai net ir nereikšmingas. Tik dviejų sezonų pavasario mėnesių krituliai mažino tikimybę pušims žūti, paaiškindami iki 45 % jų atkritimo kaitos.

Kritulių kiekio poveikis lapuočių medžių defoliacijos ir atkritimo intensyvumui buvo kiek tai reikšmingesnis negu pušims, tačiau mažiau reikšmingas negu eglėms. Rudens mėnesių ir pavasario krituliai teigiamai sąlygojo lapuočių būklę, tačiau vegetacijos vidurio turėjo neigiamą reikšmę, kuri gali būti aiškinama, kad karšti ir drėgni orai nėra tinkami beržams augti, skatindami beržų atkritimą dėl vėjavartų.

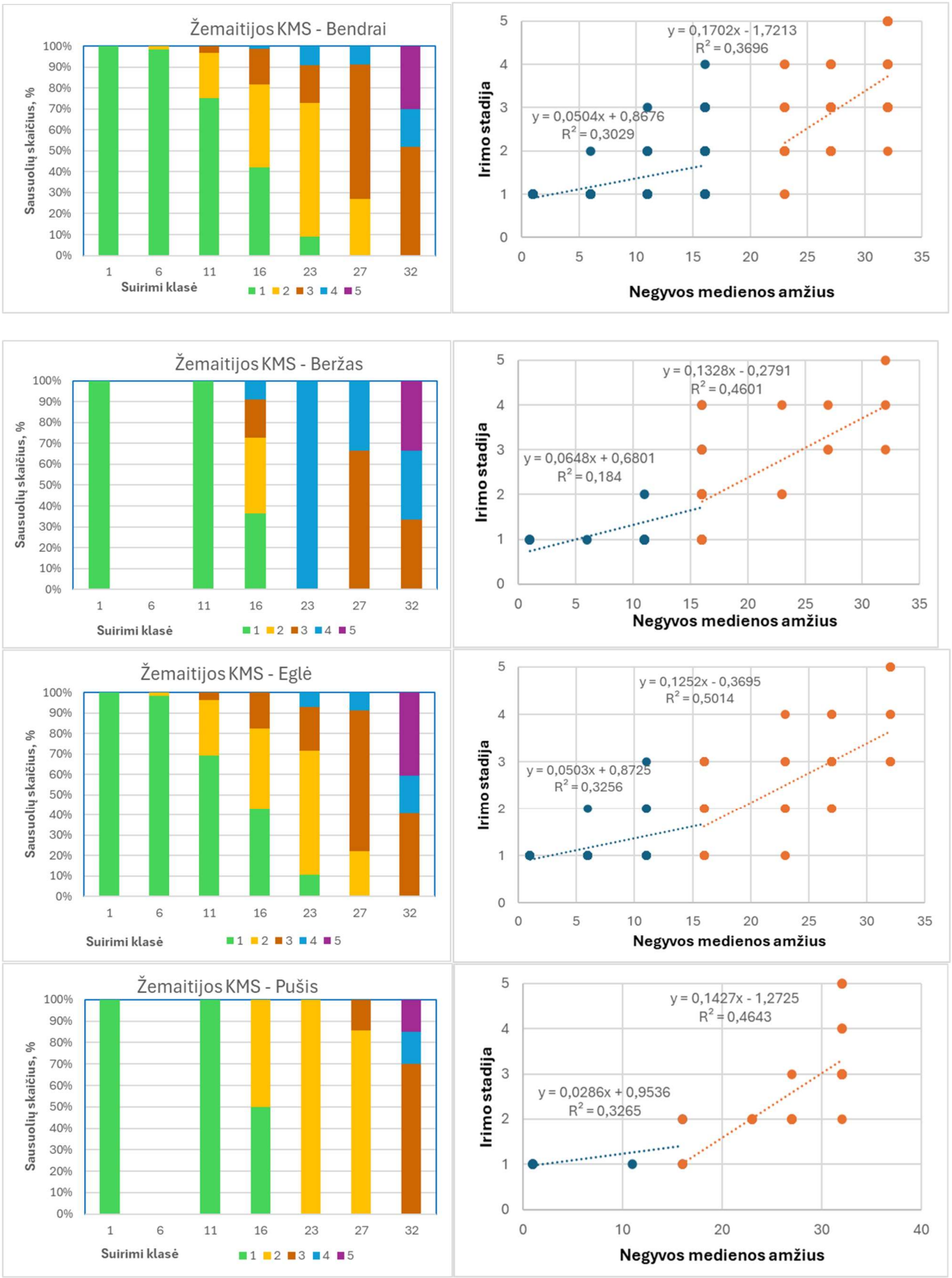
Temperatūrų poveikis tirtiems rodikliams buvo kiek tai silpnesnis. Eglių vidutinės defoliacijos mažėjimą lėmė aukštesnės rudens mėnesių vidutinės temperatūros, o defoliacijos intensyvumą skatino žiemos mėnesių temperatūra. Tai galimai turėjo esminės įtakos pirmiausiai kenkėjų sėkmingam peržiemojimui ir jo gausai po šiltos žiemos, bet ne fiziologiniams procesams vykstantiems tuo laikotarpiu eglės medžiuose. Tokiu būdu temperatūriniai parametrai paaiškino tik 23 % defoliacijos ir 34 % atkritimo intensyvumo kaitos.



2.64 pav. Tirtų medžių rūšių lajos vidutinės defoliacijos ir medžių atkritimo intensyvumas Žemaitijos KMS tiriamuoju laikotarpiu.



2.65 pav. Tirtų medžių rūšių lajos vidutinės defoliacijos ir medžių atkritimo intensyvumo priklausomybės nuo meteorologinių parametrų už dviejų sezonų laikotarpį Žemaitijos KMS. (2 – praėjęs sezonas; 1 – einamasis sezonas)



2.66 pav. Tirtų medžių rūšių negyvos medienos suirimo laipsnis priklausomai nuo medžio žūties laiko Žemaitijos KMS.

Pušų lajų vidutinės defoliacijos mažėjimą skatino rugsėjo mėn. kartu su praėjusio sezono rudens ir birželio mėn. aukštesnės temperatūros. Nenustatytas nei vieno mėnesio karščio bangų neigiamas poveikis pušų būklei. Tuo tarpu pušų atkritimą skatino tik karščio bangos vegetacijos laikotarpiu ir šiltas žiemos laikotarpis, kuris dažnai buvo lydimas gausaus ir šlapio sniego, dėl ko įvykdavo gausios lajų snieglaužos. Po tokių pažeidimų pušys dažnai žudavo.

Tik žilta žiema ir pavasaris turėjo reikšmingos įtakos lapuočių lajų geresnei būklei. Tuo tarpu jų atkritimą skatino šiltas rugsėjis, kas galėjo skatinti beržių šaknų puvinį bei vėkavartas šaltuoju laikotarpiu. Kas patvirtina naują grėsmę visiems Lietuvoje augantiems beržams.

Apibendrinus gautus rezultatus nustatyta, kad klimatiniai veiksniai Žemaitijos KMS paaiškino iki 61 % tirtų eglių vidutinės defoliacijos kaitos ir apie 63% jų atkritimo intensyvumo; 56% pušų vidutinės defoliacijos ir 54 % jų atkritimo kaitos ir virš 71 % beržų vidutinės defoliacijos ir 66 % jų atkritimo intensyvumo.

Žuvusių medžių sausos medienos irimo greičio analizė rodo, kad Žemaitijos KMS baseine sausuolių destrukcija prasideda, kaip ir Aukštaitijos KMS, tik po 10 metų pertraukos. Per 16 metų laikotarpį beržų irimo greitis siekia po 0,06 irimo klasės per metus, eglės sausos medienos – iki 0,05, o pušies vos 0,02 irimo klasės per metus. Per 16 – 31 metų laikotarpi medienos irimo greitis reikšmingai didėja ir visų tirtų rūšių sausos medienos irimo greitis buvo panašus ir siekė po 0,13-0,14 irimo klasės per metus. Tokiu būdu pradinėje stadijoje po medžio žūties sausos medienos irimo intensyvumas viena klase padidėja daugiau negu per 10 metų, tuo tarpu vėlesniame amžiuje iena irimo klase sausa mediena padidėja, panašiai kaip ir Aukštaitijos KMS, per 6-7 metus. Didžiausiais tempais ira lapuočių, tame tarpe beržo mediena, o lėčiausiai – pušies mediena.

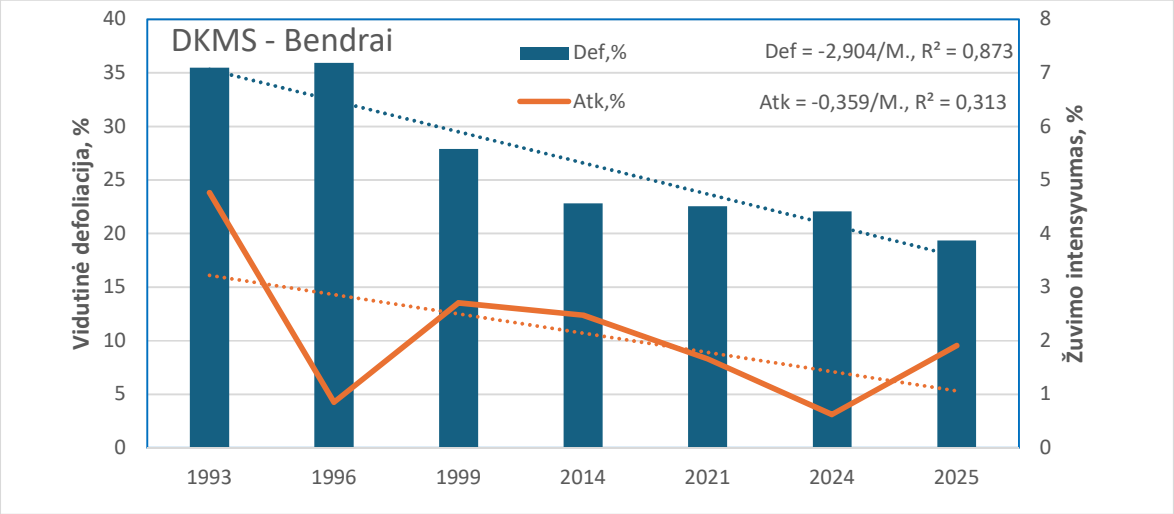
Nustatytas tas pats dėsningumas, kaip ir Aukštaitijos KMS - žuvusio medžio didesnis amžius ir didesni parametrai lėtina sausos medienos destrukcijos greičius.

2.7.3. Dzūkijos KMS baseino negyvoji mediena, jos kiekiai ir destrukcijos greitis.

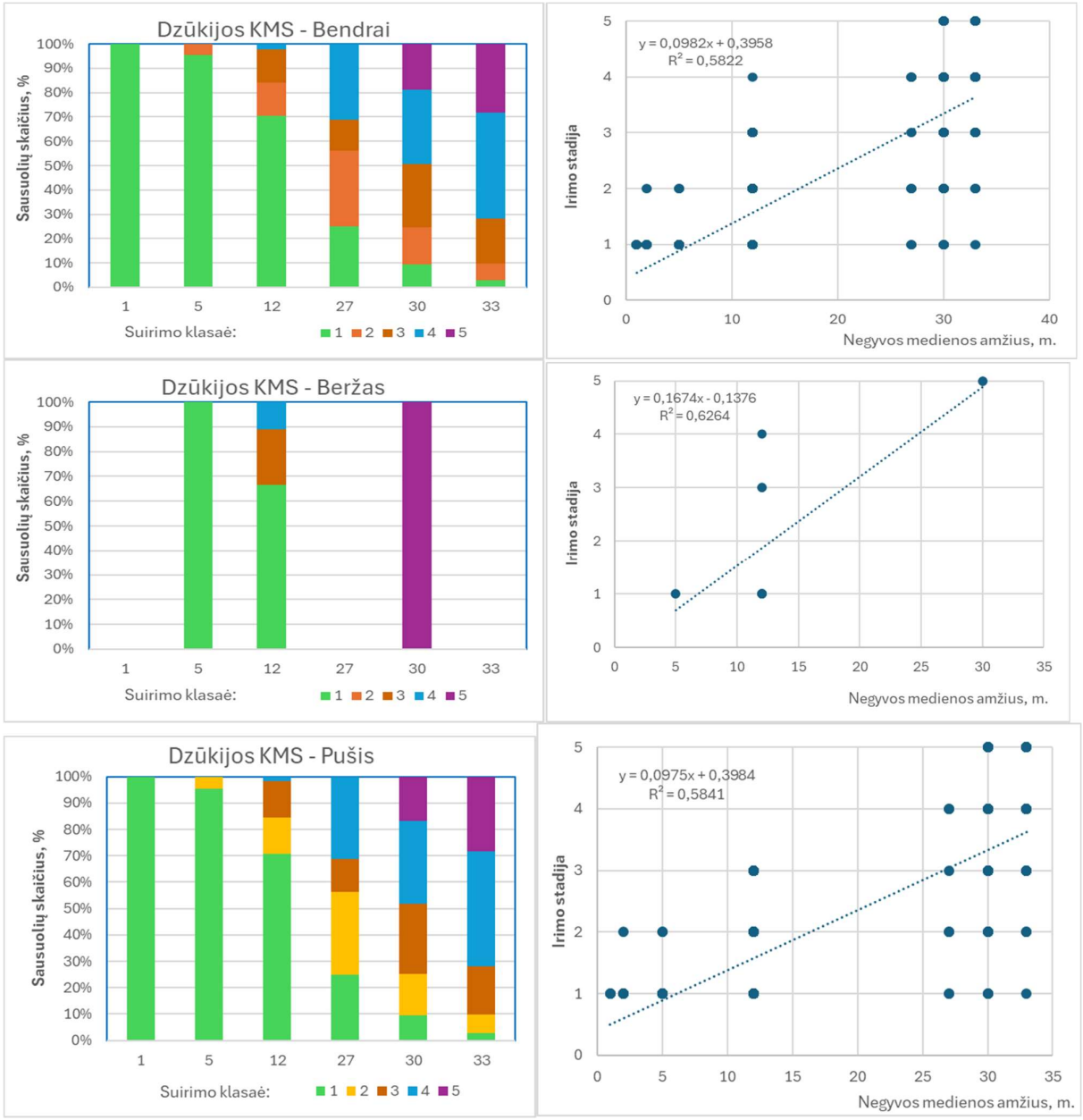
Dzūkijos KMS medžių lajos būklės ir jų žūties intensyvumo analizė parodė, kad tiriamuoju laikotarpiu Dzūkijos KMS baseine bendrai medžių lajų būklei mažėjant net po -2,9 % per metus, medžių atkritimo intensyvumas taip pat mažėja po -0,4 % per metus. Tokiam kaitos dėsningumui didžiausią įtaką turėjo tas faktas, kad Dzūkijos KMS baseine vyraujanti medžių rūšis yra paprastoji pušis, kuri geriausiai yra prisitaikiusi prie dabartinės aplinkos sąlygomis ir jų žūtis yra atsitiktinė ar dėl ypač nepalankių sąlygų, pirmiausiai audrų, vėtrų ar škvalų.

Žuvusių medžių sausos medienos irimo greičio analizė rodo, kad Dzūkijos KMS baseine sausuolių destrukcija prasideda taip pat tik po 10 metų pertraukos. Kadangi tiriamieji darbai ilgą laiko tarpą nebuvo vykdyti, sausos medienos irimo greičiai nustatyti visam 32 m laikotarpiui.

Nustatyta, kad beržų irimo greitis siekė po 0,17 irimo klasės per metus, o pušies 0,1 irimo klasės per metus, ir ženkliai mažesnis negu Aukštaitijos ir Žemaitijos KMS baseine. Pagrindinė priežastis – sausos miško augavietės, pomiškio stoka ir saulėtas dirvos paviršius. Šie veiksniai stabdo sausos medienos destrukcijos greitį.



2.67 pav. Tirtų medžių rūšių lajos vidutinės defoliacijos ir medžių atkritimo intensyvumas Aukštaitijos KMS tiriamuoju laikotarpiu.



2.68 pav. Tirtų medžių rūšių atkritimo intensyvumo ir vidutinės defoliacijos tarpusavio priklausomybės Dzūkijos KMS.

2.7.4. Medžių lajų būklės ir jų žūties sąveikos palyginamoji analizė

Palyginus trijų kompleksinio miškų monitoringo stočių rezultatus nustatyta, kad klimato kaitos poveikis miškų ekosistemoms skyrėsi priklausomai nuo medynų rūšinės sudėties, augaviečių sąlygų ir vyraujančių pažeidimų pobūdžio. Didžiausi pokyčiai nustatyti Žemaitijos KMS, kiek mažesni – Aukštaitijos KMS, o stabiliausia būkle pasižymėjo Dzūkijos KMS.

Žemaitijos KMS išsiskyrė didžiausiu medžių žuvimo intensyvumu ir sparčiausiu medynų struktūros kitimu. Čia medžių atkritimas didėjo beveik dvigubai sparčiau negu Aukštaitijos KMS, o

pagrindine nykstančia rūšimi tapo paprastoji eglė. Šiuos pokyčius lėmė ne tik klimato ekstremalumai, bet ir masiniai žievėgraužio tipografo pažeidimai, kurie ypač sustiprėjo po šiltų žiemų ir sausų vegetacijos pradžios laikotarpių. Dėl to Žemaitijos KMS sukaupta didžiausia negyvos medienos masė ir intensyviausiai vyko bioelementų grįžimas į dirvožemį ir CO_2 į atmosferą.

Aukštaitijos KMS medynų raida buvo nuosaikesnė. Nepaisant reikšmingo eglių ir beržų atkritimo, bendras medynų produktyvumas ilgą laiką išliko stabilus, nes medžių prieaugis kompensavo dalį nuostolių. Vis dėlto paskutiniaisiais metais pradėjo mažėti gyvųjų medžių biomasė, lėtėti tūrio prieaugis ir didėti negyvos medienos kiekis, rodantis, kad medynai pereina į naują vystymosi etapą. Čia taip pat išryškėjo žievėgraužio tipografo ir sausrų poveikis, tačiau jis buvo mažesnis negu Žemaitijos KMS.

Dzūkijos KMS iš esmės skyrėsi nuo kitų dviejų stočių. Vyraujantys pušynai pasižymėjo didžiausiu atsparumu klimato kaitos sąlygoms. Šioje stotyje pušų lajų būklė palaipsniui gerėjo, dėl ko medžių atkritimo intensyvumas nedidėjo, o negyvos medienos kiekis buvo kelis kartus mažesnis negu Aukštaitijos ir ypač Žemaitijos KMS. Čia medžių žūtis daugiausia buvo susijusi su pavieniais ekstremaliais meteorologiniais reiškiniais, o ne su sisteminiu medynų silpnėjimu ar kenkėjų invazijomis.

Visose trijose stotyse nustatyta, kad svarbiausi medžių būklę lemiantys veiksniai buvo kritulių ir temperatūros režimas. Ankstyvos vegetacijos laikotarpio drėgmė didino spygliuočių atsparumą, o šiltos žiemos sudarė palankesnes sąlygas žievėgraužio tipografo populiacijoms išlikti. Vasaros karščio bangos ir sausros silpnino medžių fiziologinę būklę, ypač eglių, o gausūs vegetacijos laikotarpio krituliai neigiamai veikė beržus, didindami šaknų pažeidimų ir vėjavartų riziką.

Lyginant medžių rūšis nustatyta, kad **paprastoji eglė** buvo jautriausia klimato kaitos ir kenkėjų poveikiui, **beržas** – jautriausias šiltoms ir drėgnoms vegetacijos sąlygoms, o **paprastoji pušis** išliko atspariausia rūšis visose trijose stotyse. Šis atsparumas ryškiausiai pasireiškė Dzūkijos KMS, kur pušynai išlaikė didžiausią ekosistemų stabilumą.

Stočių palyginimas parodė ir esminius produktyvumo skirtumus. Aukštaitijos KMS išliko produktyviausia – gyvųjų medžių biomasė viršijo **200 t/ha**, Dzūkijos KMS siekė daugiau kaip **150 t/ha**, o Žemaitijos KMS buvo mažesnė nei **150 t/ha**. Dzūkijos KMS nustatytas mažesnis lapų ploto indeksas (LAI) rodo retesnes pušų lajas ir didesnį šviesos patekimą į medyno vidų, o Aukštaitijos ir Žemaitijos KMS tankesnės eglių lajos bei gausesnis pomiškis sudarė kitokį mikroklimatą. Be to, Žemaitijos KMS intensyviausiai formavosi negyva mediena, todėl su ja į dirvožemį pateko daugiausia bioelementų, tuo tarpu Dzūkijos KMS šis procesas buvo silpniausias dėl gerokai mažesnio pušų atkritimo.

Šiame darbe nustatyta, kad intensyvesnė negyvos medienos destrukcija prasideda tik praėjus maždaug dešimčiai metų po medžio žūties, todėl didėjantis medžių atkritimas pirmiausia didina negyvos medienos atsargas, o ne momentines CO_2 emisijas. Tai rodo, kad negyva mediena Lietuvos hemiborealiniuose miškuose atlieka svarbią ilgalaikio anglies rezervuaro funkciją. Vis dėlto klimato kaitai intensyvėjant ir didėjant medžių mirtingumui, ilgainiui gali didėti ir negyvos medienos destrukcijos tempai bei CO_2 emisijos, ypač po ekstremalių meteorologinių reiškinių ar miško gaisrų (Pan et al., 2011; Anderegg et al., 2020; Lindner et al., 2024).

Pagrindinės palyginamosios išvados

1. Žemaitijos KMS buvo labiausiai pažeista klimato kaitos ir žievėgraužio tipografo – čia nustatytas didžiausias eglių žuvimas, sparčiausias negyvos medienos kaupimasis ir didžiausias bioelementų grįžimas į dirvožemį bei CO_2 emisijos iš negyvos medienos.
2. Aukštaitijos KMS išlaikė didžiausią medynų produktyvumą, tačiau pastaraisiais metais pradėjo ryškėti produktyvumo mažėjimo požymiai – mažėjo gyvoji biomasė, dėl ko didėjo medžių atkritimas ir mažėjo medienos tūrio ar biomasės prieaugis.
3. Dzūkijos KMS išliko stabiliausia stotis – pušynai pasižymėjo didžiausiu atsparumu klimato kaitai, mažiausiu medžių atkritimu ir silpniausiu negyvos medienos kaupimusi.
4. Visose stotyse svarbiausi medynų būklę lemiantys veiksniai buvo temperatūros ir kritulių režimas, tačiau jų poveikis priklausė nuo vyraujančių medžių rūšių ir augaviečių sąlygų.
5. Didžiausią jautrumą klimato kaitai parodė eglė, didžiausią jautrumą šiltoms ir drėgnoms sąlygoms – beržas, o didžiausią atsparumą – paprastoji pušis, ypač Dzūkijos KMS.
6. Trijų Kompleksinio monitoringo stočių palyginimas parodė, kad klimato kaitos poveikis miško ekosistemoms yra regioniškai nevienodas ir pirmiausia priklauso nuo vyraujančios medžių rūšinės sudėties bei augaviečių ekologinių sąlygų. Didžiausias medynų stabilumas nustatytas Dzūkijos KMS vyraujančiuose pušynuose, tuo tarpu didžiausias pažeidžiamumas – Žemaitijos KMS eglynuose, o Aukštaitijos KMS užėmė tarpinę padėtį.
7. Eglių medynai pasirodė esantys jautriausia medžių rūšis klimato kaitos sukeliamiems stresams. Visose stotyse jų būklę labiausiai blogino šiltų žiemų, sausringų vegetacijos pradžios laikotarpių ir žievėgraužio tipografo pažeidimų sąveika, dėl kurios ženkliai didėjo defoliacija, medžių mirtingumas ir negyvos medienos kaupimasis.
8. Pušynai pasižymėjo didžiausiu ekologiniu atsparumu. Ypač Dzūkijos KMS pušynuose nustatytas stabilus biomasės prieaugis, mažas medžių mirtingumas ir nedidelis mort masės kaupimasis rodo, kad pušis sausenėse miško augavietėse išlieka geriausiai prie dabartinių klimato sąlygų prisitaikiusi medžių rūšis.

9. Beržų būklė visose stotyse blogėjo panašiu intensyvumu, nepriklausomai nuo augavietės. Tai rodo, kad ši rūšis tampa viena jautriausių klimato kaitos sukeliamam stresui, ypač dėl karščio bangų, perteklinės dirvožemio drėgmės vegetacijos laikotarpiu bei dažnėjančių vėjavartų.
10. Medynų produktyvumo pokyčiai tarp stočių buvo skirtingi. Aukštaitijos KMS ilgą laiką išlaikė stabilų produktyvumą, tačiau pastaraisiais metais pradėjo ryškėti jo mažėjimo požymiai. Žemaitijos KMS produktyvumą reikšmingai sumažino masinis eglių žuvimas, tuo tarpu Dzūkijos KMS išliko didžiausias ilgalaikis gyvosios biomasės prieaugis.
11. Negyvos medienos kaupimosi intensyvumas atspindėjo ekosistemų pažeidimo mastą. Didžiausias mort masės kaupimasis nustatytas Žemaitijos KMS, mažesnis – Aukštaitijos KMS, o mažiausias – Dzūkijos KMS, todėl bioelementų grįžimas į dirvožemį intensyviausias buvo Žemaitijoje ir mažiausias Dzūkijoje, kaip ir CO_2 kiekio į atmosferą.
12. Meteorologinių veiksnių analizė parodė, kad svarbiausi miškų būklę lemiantys veiksniai yra ne pavieniai klimato elementai, o jų kompleksinis poveikis. Šiltos žiemos, sausra vegetacijos pradžioje, vasaros karščio bangos ir kritulių pasiskirstymo pokyčiai kartu paaiškino didžiąją dalį medžių defoliacijos, prieaugio ir mirtingumo kaitos.

Galimos grėsmės

Didžiausia grėsmė Lietuvos miškams išlieka tolesnis klimato šiltėjimas, kuris sudaro vis palankesnes sąlygas žievėgraužio tipografo populiacijų gausėjimui ir masinių pažeidimų plitimui eglynuose. Kartu didėjantis vasaros sausrų dažnis ir karščio bangų intensyvumas silpnina medžių fiziologinę būklę bei mažina jų atsparumą biotiniams pažeidimams.

Ne mažiau svarbi grėsmė yra besikeičiantis kritulių režimas. Ilgesni sausringi periodai, lydimi intensyvių kritulių, didina medžių vandens režimo svyravimus, skatina šaknų pažeidimus, vėjavartas bei medynų struktūros nestabilumą, kurie ypač neigiamai veikia eglynus ir beržynus.

Gauti rezultatai taip pat rodo naują ekologinę grėsmę beržams. Visose stotyse nustatytas panašus ir didelis jų mirtingumas leidžia teigti, kad beržų atsparumas šiuolaikinėms klimato sąlygoms yra mažesnis, nei manyta anksčiau.

Negyvos medienos kaupimasis savaime nėra neigiamas reiškinys. Priešingai, natūralus jos kiekis yra būtina biologinės įvairovės, dirvožemio formavimosi, maisto medžiagų apytakos ir anglies kaupimo sąlyga. Tačiau, jei dėl klimato kaitos medžių žuvimas viršys negyvos medienos destrukcijos pajėgumą, gali susidaryti didelės sausos medienos sankaupos. Tokiu atveju, ypač sausuose pušynuose, didės degios biomasės kiekis ir miškų gaisrų rizika. Gaisrų metu per trumpą laiką į atmosferą gali būti išmetama didelė dalis per kelis dešimtmečius negyvoje medienoje sukauptos anglies, todėl ilgalaikis anglies kaupimo efektas gali būti prarastas.

Pagrindinės prognozės

Jeigu išliks dabartinės klimato kaitos tendencijos, didžiausi pokyčiai artimiausiais dešimtmečiais prognozuojami eglynuose. Juose ir toliau gali didėti žievėgraužio tipografo pažeidimų mastas, spartėti medžių žūtis, mažėti gyvosios biomasės kiekis ir intensyvėti negyvos medienos kaupimasis.

Pušynai, ypač augantys sausesnėse Dzūkijos augavietėse, tikėtina išliks stabiliausia Lietuvos miškų ekosistemų dalis. Tačiau net ir jų produktyvumas gali pradėti mažėti, jei toliau didės vasaros karščio bangų intensyvumas ir ilgės sausros laikotarpiai.

Tikėtina, kad ilgainiui keisis ir Lietuvos miškų rūšinė sudėtis. Eglių dalis natūraliose ekosistemose gali mažėti, o pušies ekologinė reikšmė didėti. Tuo tarpu beržų konkurencingumas gali nuosekliai silpnėti dėl didėjančio jautrumo klimato ekstremalumams.

Apskritai tyrimų rezultatai rodo, kad ateityje Lietuvos miškų tvarumą vis labiau lems ne vidutiniai klimato rodikliai, bet ekstremalių meteorologinių reiškinių – šiltų žiemų, sausrų, karščio bangų ir intensyvių kritulių – pasikartojimo dažnis bei jų tarpusavio sąveika. Būtent šie veiksniai taps pagrindiniais miško ekosistemų produktyvumo, rūšinės sudėties ir ilgalaikio stabilumo formuotojais.

Rekomendacija: Ilgalaikiai stebėjimai parodė, kad negyvos medienos destrukcija Lietuvos hemiborealiniuose miškuose yra lėtas, dešimtmečius trunkantis procesas, todėl klimato kaitos sukeltas medžių mirtingumo didėjimas gali lemti ilgalaikį negyvos medienos kaupimąsi. Tai reiškia, kad ateityje negyva mediena taps vis svarbesniu tiek anglies kaupimo, tiek CO_2 emisijų reguliavimo komponentu, todėl jos dinamika turėtų būti įtraukta į nacionalinius miškų anglies balanso ir klimato kaitos švelninimo vertinimus.

Atsižvelgiant į gautus rezultatus galima prognozuoti, kad klimato kaitos sąlygomis Lietuvos miškuose didės tiek medžių mirtingumas, tiek negyvos medienos atsargos. Tvariam miškų valdymui bus svarbu išlaikyti pusiausvyrą tarp negyvos medienos kiekio, biologinės įvairovės išsaugojimo, anglies kaupimo ir gaisrų rizikos mažinimo. Todėl negyva mediena turėtų būti vertinama ne kaip atliekos ar vien tik CO_2 emisijų šaltinis, bet kaip svarbi miško ekosistemų anglies rezervuaro dalis, kurios reikšmė klimato kaitos švelninimui priklauso nuo medžių mirtingumo, destrukcijos intensyvumo ir naujai augančių medynų gebėjimo kompensuoti išsiskiriančias anglies emisijas.

2.8 Aplinkos veiksnių kompleksiško poveikio miškų būklei ir produktyvumui vertinimas

Klimato kaitos ir aplinkos užterštumo kompleksiško poveikio miško ekosistemoms tyrimai dėl vis didėjančio žalingo poveikio miškams, po9ūų9ųdxastaruoju laikotarpiu įgauna prioritetinę kryptį (Paoletti et al., 2010, Serengil et al., 2011, Augustaitis et al., 2014). Poveikio dydis priklauso nuo miškų gebėjimo adaptuotis prie besikeičiančios aplinkos sąlygų (Matyssek et al., 2010, Matyssek et al., 2012), kas užtikrina ne tik jų, bet ir visos mūsų planetos tvarų vystymąsi. Tačiau pastarojo laikotarpio globalūs pokyčiai rodo, kad ekstremalūs veiksniai gali reikšmingai pažeisti miškus, ypač jei jie anksčiau jau buvo pažeisti kitų stresorių, tokių kaip aplinkos užterštumas (Paoletti et al., 2007). Jo neigiamą poveikį medžių metabolizmui gali, ir sustiprinti, ir sušvelninti klimato kaita (Percy and Ferretti, 2004, Langner et al., 2005, Zlatev and Moseholm, 2008, Jacob and Winner, 2009, Augustaitis et al., 2010, Augustaitis, 2011).

Spartėjanti klimato kaita veikia visus ekosistemų komponentus ir jų funkcijas, formuoja naujas, Lietuvoje dar neegzistavusias aplinkos sąlygas. Klimato kaita daro įtaką ekosistemų būklei. Klimato kaitos pasauliniai matematiniai modeliai (IPCC, 2014) rodo, kad iki XXI a. pabaigos oro temperatūra Žemėje padidės ne mažiau kaip 2°C, o Lietuvos platumose – 4°C. Vertinant temperatūros kaitą nuo 1986 m., klimato šiltėjimo intensyvumas jau siekia 0,6°C per dešimtmetį. Tai intensyvumas, kuris iš tiesų turėtų būti artimas katastrofiškam lygmeniui. Dėl tokio intensyvaus šiltėjimo, kaip teigia pasaulio mokslininkai, gali padažnėti sausrų, kaitrų ir šalčio bangų epizodai, pakisti vėjo vidutinis greitis ir uraganų dažnumas, sniego dangos storis, žemės įšalo gylis. Tačiau mūsų platumos meteorologiniai duomenys paneigia tokias pesimistines prognozes. Sausrų pavojus per pastaruosius 30 metų nedidėja, metinė kritulių norma pamažu auga, mažėja užterštumo lygis bei priežemio ozono koncentracijos. Taip pat mažėja ir vidutinis vėjo greitis, nors neprognozuojamų uraganų ar štormų daroma žala išlieka. Tokiu būdu nenustatytas nei vienas aplinkos veiksnys, kuriam reikšmingai kintam dabartinėmis sąlygomis, neigiamas temperatūros didėjimo poveikis ekosistemoms būtų stiprinamas. Net toks neigiamas reiškinys, kaip CO_2 koncentracijų ore palaipsnis didėjimas, sąlygoja didesnį miškų produktyvumą ir geresnę būklę. Toqsdėl ypač aktualu nustatyti intensyviai kintančios oro temperatūros sąsajas su kitais aplinkos veiksniais – tarša, priežemio ozonas bei naujai besiformuojančias galimas grėsmes ekosistemoms (agro- vandens ir miškų).

Gerai žinoma, kad aplinkos veiksnių poveikis ir jų rizika miško ekosistemoms tikslingiausiai tirti per medžių augimo intensyvumą (Lindner et al., 2010). Medžio metinės rievės plotis ir jos formavimasis yra laikomas aplinkos veiksnių kaitos monitoriumi (Eckstein 1989; Schweingruber 1996; McLaughlin et al., 2002) ir ekosistemos būklės indikatoriumi (Dobbertin,

2005). Šiuolaikiniai tyrimai rodo, kad jau daugiau kaip 20 metų miškų produktyvumas didėja tiek pasaulyje, tiek ir Lietuvoje (Speaker et al., 1995; Augustaitis et al., 2015). Sumažėjusios sieros emisijos, azoto iškritos ir globalus atšilimas (temperatūros ir CO2 koncentracijų augimas) ir yra pagrindiniai veiksniai sąlygojantys tokią miškų produktyvumo kaitą (Spiecker 1995; Solberg et al. 2009; de Vries, Posh, 2011; Juknys et al., 2014).

Aukštaitijos KMS tyrimų rezultatai parodė, kad ***sieros ir azoto komponentės neigiamai sąlygojo tirtų medžių lajų būklę*** (2.69 pav). Reikšmingiausi ryšiai nustatyti tarp pušies lajų defoliacijos ir rūgštinančių komponenčių koncentracijų ore bei jų srauto su krituliais. Reikšmingiausiu poveikiu jau daugelį metų pasižymi sieros komponenčių poveikis, kuris neigiamai veikia medžių lajų būklę, mažindamas lapijos kiekį ir galutiniame rezultate prieaugį ir bendrą atsparumą kitiems nepalankiems aplinkos veiksniams. Taip pat labai reikšmingas, ir pastaruoju laikotarpiu vis didesnę įtaką medžių lajų būklei, turi amonio koncentracijos ore. Šio elemento srauto su krituliais poveikis taip pat išlieka reikšmingas, sąlygodamas didesnę lajos defoliaciją.

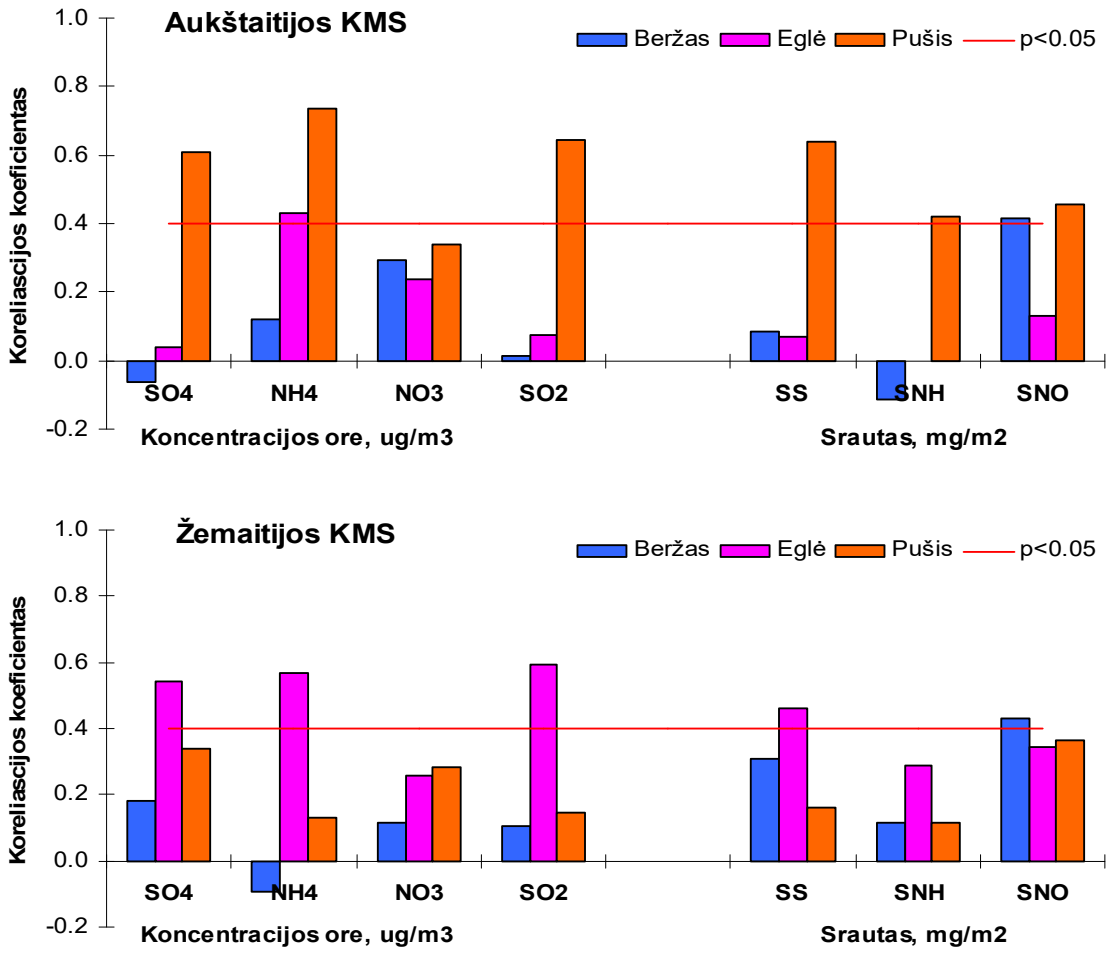
Tirtos rūgštinančios komponentės turi žymiai mažesnį poveikį eglių lajų defoliacijai. Reikšmingiausių poveikiu, kaip ir pušims, išsiskiria amonio koncentracijų ore defoliaciją didinantis poveikis. Kitų komponenčių poveikis eglių defoliacijai nereikšmingas. Tokį poveikio sumažėjimą, lyginant su pušims, gali sąlygoti eglių pažeidimai, dėl kurių reikšmingai padidėja lajų defoliacija, o galutiniame rezultate ir jų mirtingumas. Tai žievėgraužio tipografo žalos rezultatas.

Rūgštinančios komponentės praktiškai neturi reikšmingo poveikio beržų lajų defoliacijos kintamumui. Tai paaiškinama beržų labai blogu prisitaikymu prie pastarojo laikotarpio aplinkos sąlygų, dėl ko jų prieaugis yra vienas iš mažiausių Lietuvoje, o mirtingumas vienas iš didžiausių.

Visų medžių defoliacijos laipsnis didėjo didėjant S ir N taršos komponentėms. Mažiausiai reikšmingi ryšiai nustatyti tarp tirtų taršos komponenčių ir beržų lajų būklės.

Gauti rezultatai leidžia teigti, kad teritorijose, kur kritinės S ir N komponenčių reikšmės viršija ribines, galima tikėtis medžių lajų būklės pablogėjimo ir jų prieaugio sumažėjimo ypač pušynuose ir eglynuose.

Žemaitijos KMS gauti kitokie poveikio rezultatai. Šioje stotyje, kur miškuose vyrauja paprastosios eglės medžiai, rūgštinančios komponentės reikšmingai sąlygoja būtent jų lajų defoliacija. ***SO_4^{-2} SO2 ir NH_4^+ koncentracijos ore – buvo pagrindiniai veiksniai skatinantys eglių lajų išretėjimą Žemaitijos KMS baseine augančiuose miškuose.*** Šių komponenčių srautų su krituliais poveikis taip pat skatinantys defoliaciją, tačiau žymiai mažiau reikšmingas.



2.69 pav. Rūgštinančių komponenčių poveikis medžių lajų defoliacijos kaitai.

Šioje stotyje kaip ir Aukštaitijos KMS rūgštinančios komponentės praktiškai neturi reikšmingo poveikio beržų lajų defoliacijos kintamumui, nors jų poveikis taip pat skatinamasis.

Detalesni tirtų medžių rūšių kamieno skerspločio metinio prieaugio tyrimų rezultatai Aukštaitijos KMS vyraujančiose pakankamai skurdžiose, natūraliai drėkinamose Nb miško augavietėse (I augalijos tyrimų stacionaras) ir turtingesnėse, perteklinai drėkinamose pelkinėse Pc miško augavietėse (III augalijos tyrimų stacionaras) parodė, kad, ***eglių metinis prieaugis tame pačiame mišriame medyne kelis kartus viršija kitų lydinčiųjų medžių rūšių prieaugį natūraliai drėkinamose ir perteklinio drėkinimo miško augavietėse***.

Išskirtinis dėmėsis buvo skirtas vienai iš aktualiausių aplinkosauginių problemų – rūgštinančių komponenčių poveikiui miško ekosistemoms. Tiriant atmosferos aerozolio dalelių sausas iškritas (Aukštaitijos KMS nuo 1993 m., Žemaitijos KMS – 1994 m.) ir šlapios iškritas

(kritulius), jau žinomas eutrofikacijos N junginiais poveikis miško ekosistemų produktyvumui: sieros ir redukuoto azoto (amonio) koncentracijos ore ir jų iškritos reikšmingai sąlygoja prieaugio mažėjimą, kai nitratai dažnai pasižymi tręšiančiosiomis savybėmis, ypač skurdžiose miško augavietėse.

Aukštaitijos KMS duomenų bazės panaudojimas atskleidė ir rūgščiųjų komponenčių ore bei jų iškritų poveikį vyraujančių Lietuvoje medžių rūšių kamienų prieaugiui (4 lentelė). Tai įgalino nustatyti naujas grėsmės miškų produktyvumui sąlygotas aplinkos globalios kaitos.

Nustatyta, kad tik natūraliai drėkinamoje augavietėje spygliuočių medžių rūšių prieaugį sąlygojo rūgščiosios komponentės ore ir jų iškritos. Šių komponenčių poveikis tirtų medžių lajų defoliacijai taip pat buvo reikšmingas – ***koncentracijoms didėjant tiek medžių būklė blogėja, tiek ir metinis prieaugis mažėja.***

Pelkinėje augavietėje šių taršos komponenčių poveikis buvo nereikšmingas. Ozono poveikis buvo nereikšmingas medžiams augti abiejose augavietėse, bet jis išliko panašiame lygmenyje neigiamas visoms tirtoms medžių rūšKMS. Didžiausias neigiamas jo poveikis nustatytas birželio-rugpjūčio mėnesiais.

Remiantis gautais duomenimis būtų galima teigti, kad pušų augimą skatina šiltesnis ramybės ir vegetacijos pradžios laikotarpis bei gausesni krituliai vegetacijos laikotarpiu. Pelkinėje augavietėje pušų augimą skatina aukštesnės rudens ir pavasario mėnesio temperatūros.

Beržų augimo reakcijos į meteorologinių veiksnių poveikį skyrėsi nuo tirtų spygliuočių medžių augimo reakcijų iš esmės. Jei vidutinės mėnesio temperatūros ir kritulių kiekis daugeliu atveju sąlygojo didesnį spygliuočių medžių prieaugį, tai ***aukštesnė temperatūra visu vegetacijos laikotarpiu einamojo ir praėjusio augimo sezonais turėjo neigiamą poveikį plaukuotųjų beržų kamienų prieaugiui pelkinėje augavietėje.*** Tik kritulių kiekis birželio ir liepos mėnesiais skatino beržus augti abiejose tirtuose augavietėse. Šie meteorologiniai veiksniai paaiškino vos 40% beržų prieaugio kintamumo.

Metinė tirtų medžių rūšių kamieno radialiojo prieaugio analizė parodė, kad reikšmingai didėjanti rugsėjo ir liepos mėnesio vidutinė temperatūra reikšmingai sąlygojo spygliuočių medžių rūšių prieaugio didėjimą. Tik karštis ir sausra birželio mėnesį, kai intensyviausiai formuojama metinė rievė, neigiamai sąlygojo eglių prieaugį, o pušų – tik pelkinėse augavietėse.

Nei karpuotasis, nei plaukuotasis beržas dabartiniame bręstančiame ar perbrendusiame amžiuje nebuvo atsparūs karščio ir sausros epizodams. Tik didesni kritulių kiekiai vegetacijos laikotarpiu ar jo pabaigoje sąlygojo intensyvesnį beržų prieaugį ir sausoje, ir pelkinėje augavietėse, o

karštis birželio, rugpjūčio ir ypač rugsėjo mėnesiais slopino beržo metinės rievės formavimosi intensyvumą. ***Būtent dėl kylančios šiais mėnesiais temperatūros ir mažėjančio kritulių kiekio rugpjūčio ir rugsėjo mėnesį, beržų lapų gyvavimo trukmės mažėjimas galėtų būti veiksnys, dėl ko reikšmingai pradeda mažėti ir šių medžių rūšių prieaugis bei prisitaikymo galimybės prie dabarties aplinkos sąlygų, ką patvirtino ir detalūs beržų lapų fotosintezės tyrimo rezultatai.***

Tyrimų rezultatai skirtingose augavietėse (natūraliai drėkinamoje, skurdžioje – Nb ir pertekliniai užmirkusioje, dėrlingoje – Pc) patvirtino didžiausią eglių skersmens prieaugio intensyvumą, lyginant su pušimis ir ypač beržais. Pastarųjų prieaugis tirtuose augavietėse buvo stabilus ar net mažėjo paskutiniuoju 36 metų laikotarpiu (nuo 1980). Dėrlingesnė ir drėgnesnė augavietė neturėjo reikšmingos įtakos prieaugiui visoms tirtoms medžių rūšKMS.

Reikšmingas rugsėjo ir liepos mėnesių vidutinės temperatūros kylimas reikšmingai didino spygliuočių medžių kamieno skersploščio metinį prieaugį. Tik karštis birželio mėn. Slopino eglių prieaugį abiejose miško augavietėse. Didesnis drėgmės rėžimas didino eglių ir pušų jautrumą sausros laikotarpiais.

Nei karpuotasis nei plaukuotasis beržas nebuvo atsparūs sausrai ir karščiui. Didesni kritulių kiekiai vegetacijos laikotarpiu ir ypač jo pabaigoje reikšmingai sąlygojo beržų intensyvesnį augimą abiejose miško augavietėse, o karštis leipos – rugsėjo mėnesį, priešingai slopino beržų prieaugį. Beržų lapų gyvavimo trūkmės mažėjimas buvo vienas iš pagrindinių veiksnių lemiančių beržų prieaugio mažėjimą.

Mišo augavietės didenė drėgmė reikšmingai didino medžių atsparumą aplinką rųgštinančioms komponentėms, ypač sieros junginių.

Nitratų iškritos skatino medžių prieaugį, ypač skurdžioje augavietėje (Nb), kur C/N santykis viršyjo 25 ir daugiau kartų. Pelkinėje derlingoje MA, kur C/N santykis siekė apie 15, teigiamas nitratų poveikis medžiams augti nenustatytas.

Reikšmingas ir neigiamas pažemio ozono poveikis buvo eglėms augti nustatytas abiejose augavietėse, o pušims – tik Nb augavietėje. Ozono neigiamas poveikis beržams augti buvo tik artimas reikšmingam ($p<0,1$). Todėl teigiam, kad paprastoji eglė turėtų būti viena jautriausių ozono neigiamam poveikiui, kiek atsparesnės tokiam poveikiui turėtų būti pušys ir atspariausi – beržai. .

Paprastoji eglė yra viena geriausiai prisitaikiusi prie pastarojo laikotarpio aplinkos pokyčių. Teiginys, kad ši medžių rūšis šiaurės rytinėje Europos dalyje praras savo reikšmingumą yra paneigtas. Adekvačios miškininkavimo priemonės didinančios eglynų atsparumą kenkėjams ir vėjolaužai bei vėjavartai užtikrintų eglynų tvarų vystymąsi ateityje.

IŠVADOS

1. Sieros ir azoto rūgštinančios komponentės reikšmingai blogina miško medžių lajų būklę, tačiau jų poveikio stiprumas priklauso nuo medžių rūšies ir augavietės sąlygų. Didžiausias jautrumas nustatytas paprastosios pušies ir paprastosios eglės medynuose, kuriuose didėjant SO_2, SO_4^{2-} ir NH_4^+ koncentracijoms ore bei jų srautams su krituliais didėjo lajų defoliacija.
2. Aukštaitijos KMS baseine ryškiausias poveikis nustatytas pušims, o Žemaitijos KMS baseine – eglėms, kurias, tikėtina, papildomai silpnino žievėgraužio tipografo pažeidimai. Beržų lajų defoliacijai rūgštinančių komponenčių poveikis buvo silpnas arba statistiškai nereikšmingas, greičiausiai dėl kitų stresinių veiksnių, lemiančių jų prastą gyvybingumą ir didelį mirtingumą.
3. Sieros ir azoto junginių kritinių apkrovų viršijimas didina medžių lajų pažeidimus ir gali mažinti medynų produktyvumą bei atsparumą aplinkos stresui, todėl šių teršalų stebėsena išlieka svarbi miškų būklės vertinimo ir klimato kaitos poveikio prognozavimo priemonė.
4. Skirtingų medžių rūšių augimo reakcija į klimato ir oro taršos kaitą nevienoda ir priklauso nuo augavietės sąlygų. Didžiausiu prieaugio intensyvumu pasižymėjo paprastoji eglė, kurios metinis radialusis prieaugis abiejose tirtose augavietėse reikšmingai viršijo pušų ir ypač beržų prieaugį.
5. Rūgštinančių komponenčių poveikis medžių produktyvumui priklauso nuo dirvožemio savybių. Skurdžioje natūraliai drėkinamoje augavietėje sieros junginių ir amonio koncentracijų didėjimas reikšmingai mažino spygliuočių prieaugį, tuo tarpu derlingesnėje ir drėgnesnėje pelkinėje augavietėje šis poveikis buvo silpnas arba statistiškai nereikšmingas.
6. Priešingai, nitratų iškritos skurdžioje augavietėje veikė kaip papildomas azoto šaltinis ir skatino medžių augimą, tačiau derlingesnėje augavietėje toks poveikis nenustatytas.
7. Pažemio ozonas turėjo neigiamą poveikį visų tirtų rūšių prieaugiui, tačiau jautriausia jam buvo paprastoji eglė.
8. Intensyvios klimato kaitos sąlygomis didžiausiu prisitaikymo potencialu pasižymi paprastoji eglė ir paprastoji pušis, jeigu nepasireiškia ilgalaikiai sausros epizodai ar antriniai pažeidimai (pvz., kenkėjų protrūkiai). Tuo tarpu beržų augimo reakcija rodo mažėjančias prisitaikymo galimybes šylančio klimato sąlygomis.
9. Ateityje, išliekant dabartinėms oro taršos mažėjimo tendencijoms, galima tikėtis geresnės medžių lajų būklės, stabilesnio spygliuočių prieaugio ir didesnio miško ekosistemų atsparumo aplinkos pokyčiams. Tačiau šį teigiamą poveikį gali riboti klimato kaitos sukeltas karščio bangų, sausrų ir biologinių pažeidimų dažnėjimas, todėl būsimas Lietuvos miškų produktyvumas vis labiau priklausys nuo oro taršos mažėjimo ir klimato ekstremalumo pusiausvyros.

Apibendrinus šių rūgštinančių komponenčių koncentracijų ore ir jų iškritų su krituliais trendų rezultatus, galima teigti, kad ateityje tirtų medžių rūšių lajų defoliacija turėtų mažėti ar stabilizuotis labai žemame lygmenyje, kas turėtų skatinti ir medžių prieaugį ir jų bendrą atsparumą nepalankiems aplinkos veiksniams.

Galimos grėsmės ir prognozė

Nors pastaraisiais dešimtmečiais Lietuvoje stebimas reikšmingas sieros junginių koncentracijų ir jų iškritų mažėjimas sudaro prielaidas gerėti medžių lajų būklei bei didėti jų produktyvumui, klimato kaita tampa vis svarbesniu veiksniu, galinčiu sumažinti šio teigiamo proceso poveikį. Didėjantis karščio bangų, vegetacijos laikotarpio sausrų ir ekstremalių meteorologinių reiškinių dažnis gali silpninti medžių fiziologinę būklę, mažinti jų atsparumą ir didinti antrinių pažeidimų riziką.

Didžiausia grėsmė prognozuojama eglynams, kurie, nepaisant didžiausio produktyvumo ir gero prisitaikymo prie šiuolaikinių klimato sąlygų, išlieka jautrūs ilgalaikiam dirvožemio drėgmės trūkumui bei žievėgraužio tipografo protrūkiams. Pasikartojant sausroms ir šiltoms žiemoms gali dažnėti kompleksiniai pažeidimai, lemiantys spartesnį medžių džiūvimą, didesnį negyvos medienos kaupimąsi ir anglies dioksido emisijų didėjimą dėl intensyvesnės medienos destrukcijos.

Paprastoji pušis, dėl didesnio atsparumo vandens trūkumui, tikėtina ir ateityje išliks viena stabiliausių Lietuvos medžių rūšių. Vis dėlto ilgalaikės sausros nederlingose augavietėse gali mažinti jos prieaugį ir didinti jautrumą vabzdžių bei grybinių ligų pažeidimams. Tuo tarpu beržų augimo dinamika rodo, kad ši rūšis tampa viena jautriausių klimato kaitos poveikiui. Aukšta vasaros temperatūra, mažėjantis kritulių kiekis vegetacijos laikotarpiu ir trumpėjanti lapų funkcionavimo trukmė gali lemti tolesnį prieaugio mažėjimą, didesnę defoliaciją ir spartesnį medžių mirtingumą.

Tikėtina, kad toliau mažėjant sieros ir azoto junginių koncentracijoms atmosferoje, rūgštinančių teršalų neigiamas poveikis Lietuvos miškams ir toliau silpnės. Dėl to medžių lajų defoliacija turėtų mažėti arba stabilizuotis žemame lygyje, o spygliuočių produktyvumas išlikti stabilus. Tačiau pagrindiniu miškų būklę ir produktyvumą ribojančiu veiksniu vis labiau taps klimato kaitos nulemti ekstremalūs meteorologiniai reiškiniai ir jų sukeliami antriniai biotiniai pažeidimai.

Todėl ilgalaikėje perspektyvoje Lietuvos miškų būklę lems dviejų priešingų procesų sąveika: mažėjanti atmosferos tarša gerins medžių fiziologinę būklę ir didins jų augimo potencialą, o klimato kaitos stiprėjimas didins sausrų, karščio bangų, kenkėjų protrūkių ir kitų stresinių veiksnių poveikį. Miško ekosistemų atsparumas ateityje priklausys nuo to, kuris iš šių procesų vyraus.

Artimiausiais dešimtmečiais Lietuvos miškuose didžiausią produktyvumą ir stabilumą išlaikys mišrūs, įvairiaamžiai medynai, kuriuose paprastoji eglė ir paprastoji pušis sudarys pagrindines medynų rūšis, o jų rūšinę įvairovę jaunesniame amžiuje papildys klimato kaitai atsparesni lapuočiai. Tokia medynų struktūra didins ekologinį stabilumą, anglies kaupimo potencialą ir bendrą miškų atsparumą klimato kaitos sukeliamiems aplinkos pokyčiams.

Rekomendacijos miškininkystės praktikai

Ilgalaikiai Kompleksinio miškų monitoringo tyrimai parodė, kad pagrindiniu Lietuvos miškų tvarumą lemiančiu veiksniu ateityje taps nebe atmosferos tarša, o klimato kaitos sukeliami ekstremalūs meteorologiniai reiškiniai ir jų sąveika su biologiniais pažeidimais. Todėl miškininkystės prioritetas turėtų būti ne vien medynų produktyvumo didinimas, bet ir jų **atsparumo klimato kaitai stiprinimas**.

Siekiant išlaikyti miškų produktyvumą, anglies kaupimo potencialą ir biologinę įvairovę, būtina pereiti nuo vienarūšių ir vienaamžių medynų formavimo prie **mišrių, įvairiaamžių ir struktūriškai nevienalyčių medynų**, geriau prisitaikančių prie sausrų, karščio bangų, audrų ir kenkėjų protrūkių. Miško atkūrimo ir ugdymo priemonės turėtų būti planuojamos atsižvelgiant ne tik į dabartines, bet ir į prognozuojamas ateities klimato sąlygas bei konkrečių medžių rūšių prisitaikymo galimybes skirtingose augavietėse.

Ypatingas dėmesys turėtų būti skiriamas ankstyvajai rizikos diagnostikai. Ilgalaikė meteorologinių, oro taršos, medžių augimo, lajų būklės ir biologinių pažeidimų stebėsena turi tapti integruota ankstyvojo perspėjimo sistemos dalimi. Tokia sistema leistų iš anksto identifikuoti padidėjusios rizikos laikotarpius, operatyviai taikyti prevencines priemones ir sumažinti klimato kaitos bei kenkėjų protrūkių sukeliamus ekonominius ir ekologinius nuostolius.

Todėl ateities miškininkystė turėtų būti grindžiama ne vien medienos išteklių valdymu, bet ir **ekosistemų atsparumo didinimu**, prisitaikymu prie klimato kaitos ir ilgalaikiu miško ekosistemų funkcionavimo stabilumo išsaugojimu. Tik toks požiūris užtikrins Lietuvos miškų produktyvumą, biologinės įvairovės išsaugojimą ir jų svarbiausios funkcijos – anglies kaupimo bei klimato kaitos švelninimo – išlaikymą ateityje.

Lietuvos Kompleksinio miškų monitoringo daugiau kaip tris dešimtmečius kaupti duomenys rodo, kad tvarios miškininkystės tikslas XXI amžiuje turi būti ne tik siekis didžiausio galimo medienos prieaugio, bet taip pat ir maksimalus miško ekosistemų atsparumas klimato kaitai. Tik atsparūs miškai galės ilgą laiką išlaikyti aukštą produktyvumą, kaupti anglį, išsaugoti biologinę įvairovę ir patikimai atlikti svarbiausias ekologines bei socialines funkcijas, svarbiausia iš kurių – švelninti klimato kaitos intensyvumą ir jos sukeltų grėsmių poveikį.

2.9. Pagrindinių miško būklės tyrimo rezultatų apibendrinimas

Per pradinį 1993-96 metų laikotarpį visų tirtų rūšių vidutinė medžių lajų defoliacija padidėjo 2 kartus visose KM stotyse. Tai bepasikartojančių vienų didžiausių saurė 1992 ir 1994 m. rezultatas, kurį sekė medžių lajų būklės stabilizacijos laikotarpis su nežymiais būklės pagerėjimo ir pablogėjimo etapais. Išskirtinis tapo 2011-2015 m. laikotarpis, kurio metu Aukštaitijos KMS registruojamas reikšmingas tirtų medžių lajos būklės atsikūrimas. Šis laikotarpis sutampa su reikšmingu medžių metinio prieaugio padidėjimo procesu.

2015 m. tirtų medžių lajų defoliacija vertintina, kaip viena iš mažiausių per visą tiriamąjį laikotarpį abiejose KM stočių baseinuose, kai visų medžių lajų vidutinė defoliacija nesiekė 20 %.

Paskutinysis 2015-2025 m. laikotarpis įvardijamas kaip miškų būklės blogėjimo laikotarpis, kuris signalizuoja apie besiformuojančią naują grėsmę Lietuvos miškams. Pagrindinės priežasties sąlygojančios tokią miškų būklės kaitą Aukštaitijos regione reiktų ieškoti pirmiausiai meteorologinių veiksnių kompleksiškame poveikyje, išskiriant sausrų ir karščio bangų poveikį.

Išskirtiniai 2020 m. kuriais medžių lajų vidutinė defoliacija sumažėjo vidutiniškai 3,5 %, nuo 22.9% iki 19.4%. Tokios geros būklės medynai Aukštaitijos KMS buvo tik tyrimų pradžioje. Tai šiltos žiemos, gausių kritulių praėjusio sezono rudens ir žiemos laikotarpiu bei padidėjusio dirvožemio drėgnio kompleksiško poveikio rezultatas

2020-2025 m. laikotarpis pasižymėjo skirtingo reikšmingumo medžių lajų būklės pablogėjimo procesu. Šiuo laikotarpiu reikšmingiausiai blogėjo beržų lajų būklė, kiek mažesniu intensyvumo blogėjo ir pušų būklė. Jų vidutinė defoliacija šiuo laikotarpiu didėjo po 0,26 % per m. Eglės kaitoje reikšmingesnės būklės tendencijos nenustatyta, nors 2022 m. išsiskyrė reikšmingu eglės lajų būklės pablogėjimu dėl intensyvaus žievėgraužio tipografo medžių pažeidimų ir žūties.

Sausra ir karščio bangos neigiamai sąlygoja visų tirtų Aukštaitijos KMS baseine augančių medžių lajų būklę, tačiau jos poveikis paprastosios eglės medžiams buvo mažiausias.

Dzūkijos KM teritorijoje pušynų būklę tyrimų pradžioje sąlygojo pušinio pjūklelio ir verpiko vienuolio daroma žala. Jei 1993 m. tirtų pušų vidutinė defoliacija buvo 29,5% tai 1996 m. ji pakilo iki 36,4%. Didesni neigiami būklės pokyčiai buvo užfiksuoti viršaujančių ir vyraujančių medyne medžių. 1995m. pradėjus naudoti biologinį insekticidą prieš pušini pjūklelį ir neporinį verpiką pušynų būklė pradėjo atsistatyti.

Atnaujinti tyrimai atskleidė naują Dzūkijos miškų (praktiškai pušynų) būklės kaitos etapą, pasižyminti pušų lajų būklės atsikūrimu. 2021-2025 m. visų tirtų medžių rūšių lajų vidutinė defoliacija reikšmingai mažėjo ir 2025 m. net nesiekė 20 proc ribos. Tai geros miškų būklės rezultatas.

Viena iš pagrindinių priežasčių kuri lėmė pušynų būklės atsikūrimą - tai spyglių graužiančių kenkėjų populiacijos kontrolė. Paskutiniaisiais metais šių kenkėjų žala registruojama tik pavienėms pušims augančioms šioje stotyje.

Žemaitijos KM teritorijoje augančių medžių būklė kito analogiškai Aukštaitijos KMS medžių būklei. Per pirmąjį dviejų metų laikotarpį vidutinė visų tirtų medžių defoliacija padidėjo nuo 25% iki 33%. Eglynų būklė per šį laikotarpį pablogėjo intensyviausiai. 1996 m. registruojama viena blogiausių Žemaitijos miškų būklė, kuri ne nedideliais svyravimais tęsėsi iki 2007m. 2007-2009 m. registruojamas reikšmingas medžių lajų būklės atsikūrimas ir po šio laikotarpio iki 2018 m. medžių lajų būklė išliko stabiliame lygyje nesiekdama 25% vidutinės lajos defoliacijos.

Paskutinieji 2018-2025 m. medžių lajų būklės blogėjimo etapas su gana ženkliais lajos defoliacijos sumažėjimo metais: 2022 ir 2024. Tokiems defoliacijos svyravimams įtakos turėjo ir dėl žievėgraužio tipografo žūstančios eglės, kurių būklė po žūties eliminuojama.

Atspariausios nepalankiems veiksniams Žemaitijos KMS baseine buvo paprastosios pušys. Medžių išsivystymo laipsnis neturėjo esminės įtakos šios rūšies medžių vidutinės defoliacijos kaitai.

2020-2025 m. laikotarpis pasižymėjo skirtingo reikšmingumo medžių lajų būklės pablogėjimo procesu, taip kaip ir Aukštaitijos KMS. Šiuo laikotarpiu reikšmingiausiai blogėjo pušų lajų būklė, kurią reikšmingai galėjo sąlygoti intensyvi lajų snieglauža. Vidutinė lajų defoliacija pušų didėjo po 1,6 % per m. Beržų lajų būklė taip pat reikšmingai didėjo po 1,9 % per m., kas patvirtino nustatyta tendenciją Aukštaitijos KMS baseine. Mažiausiu intensyvumu ir mažiausiu reikšmingumu didėjo eglių vidutinė defoliacija, kuri siekė 0,4 % per m. 2023 m. išskirtiniai eglių būklės kaitoje. Kaip ir 2022 Aukštaitijos KMS, Žemaitijos KMS eglynuose buvo registruojamas kenkėjų protrūkis, kurio metu eglės buvo intensyviai pažeistos, o žuvusių medžių skaičius buvo artimas didžiausiam per visą tiriamąjį laikotarpį.

2025 m. tirtų medžių vidutinė defoliacija viršijo net 25 proc ribą, informuodama, kad šio regiono miškai yra jau vidutiniškai pažeisti lyginant su silpnai pažeistais miškais Aukštaitijos KMS.

Išskirtinis miškų (pušų) būklės kaitos požymis: jei tyrimų pradžioje pušų būklė buvo blogiausia pietinėje Lietuvos dalyje, t.y. Dzūkijos regione, tai paskutiniuoju laikotarpiu pušų būklė Dzūkijos KMS yra geriausia lyginant su kitomis stotimis, kuriose pušynų būklė iš esmės nesiskiria.

Per tiriamąjį laikotarpį dėl įvairių priežasčių Aukštaitijos KMS žuvo beveik 30%, Žemaitijos KMS 25 % ir Dzūkijos KMS 56 % šiuose stotyse stebėtų pušų. Žymiai daugiau žuvo paprastųjų eglių. Per 33 m. laikotarpį jų skaičius viršijo 63% ribą Žemaitijos KMS ir Aukštaitijos KMS baseine. Dzūkijos KMS dėl itin mažo stebėtų eglių skaičiaus, jų žuvimo intensyvumas siekė net 75 %.

Pagrindinės tokio intensyvaus eglių žuvimo priežastis - brandžių ir perbrendusių eglių vėjovartų ar snieglaužų lydima eglinio žievėgraužio tipiografo invazija, ypač po sauso ir karšto pavasario.

Didžiausiu atkritimo intensyvumu pasižymėjo beržai. Žemaitijos KMS jų atkritimo intensyvumas per 32 m. laikotarpį pasiekė 55%, o Aukštaitijos KMS viršijo net 70 %. Kadangi beržai neturi tiesioginių kenkėjų iš esmės nulemiančių jų žūti, tai pagrindinėmis priežastimis sąlygojančiomis tokį aukštą beržų mirtingumą reiktų laikyti klimatines sąlygas, ir būtent sausras ir karščio bangas, prie kurių ši medžių rūšis yra prisitaikiusi blogiausiai, bei vėjalaužas ir snieglankas.

Pateikti LAI nustatyti hemisferinio fotoaparatu 2010-2025 m. taip pat įrodo, kad medynų būklė KM stočių baseinų teritorijose gerėja. Palyginus KMS baseine augančių medžių vidutinį LAI indeksą, matyti, kad tankiausia miško danga pasižymi Aukštaitijos KMS, kur LAI siekia 2 m^2/m^2, kiek mažesnis LAI Žemaitijos KMS – 1,9 m^2/m^2 ir mažiausias Dzūkijos KMS LAI – 1,2. ***LAI rezultatai nustatyti hemisferiniu fotoaparatu nerodo esminių medynų pokyčių, dėl intensyvaus miško atžėlimo pažeistuose plotuose. 2010-2025 m. laikotarpiu LAI abiejose stotyse pasidėjo nereikšmingai, vos po 0,008 m^2/m^2.***

Tiriant medžių skersploščių sumos (ΣG) pokytį bei išlikusių gyvų medžių skersploščių sumos prieaugį, nustatyta, kad eglių ir beržų kamienų skersploščių sumos pokytis per 32 m. laikotarpį Aukštaitijos KMS yra neigiamas, t.y. sumažėjęs daugiau negu 2,8 m^2/ha ir 1,2 m^2/ha atitinkamai. Pušų šio rodiklio pokytis yra teigiamas ir viršija 2 m^2/ha.

Išlikusių gyvų medžių skersploščių sumos prieaugis tarp tirtų rūšių yra priešingas. Didžiausių prieaugiu pasižymėjo išlikusios eglės, kurių šis rodiklis sudarė net 6 m^2/ha per tiriamąjį laikotarpį. Kiek silpnesniu prieaugiu pasižymėjo pušys – apie 4 m^2/ha ir silpniausių ar beveik neregistruojamu prieaugiu pasižymėjo beržai – vos 0,5 m^2/ha per visą tiriamąjį laikotarpį. Tokiu būdu bendras likusių gyvų medžių prieaugis Aukštaitijos kMS baseine sudarė 10,5 m^2/ha.

Tokiu būdu Aukštaitijos KMS teritorijos medynų skersploščių suma 1993-2025 m. laikotarpiu praktiškai išlieka stabili. Jei tyrimų pradžioje siekė 33,3 m^2/ha, tai 2015 m. sumažėjo iki 30,7 m^2/ha, tai 2020 m. padidėjo iki 31,62 m^2/ha, o įskaitant ir prieaugį, t.y. medžius, kurių skersmuo pradėjo viršyti 10 cm – 33,5 m^2/ha (2.9 pav.). Paskutiniaisiais 2025 m. skersploščių bendra suma sumažėjo iki 31,5 m^2/ha. Tai brandžių ir perbrendusių medynų vystymosi eigos būdingas bruožas, kai medžių mirtingumas susilygina su atsikūrimu.

Apibendrinus medžių mirtingumo, atsikūrimo ir prieaugio rezultatus matyti, kad per 32 m. laikotarpį natūraliai besivystančios miško ekosistemos produktyvumas praktiškai išliko stabilus, nors net su priaugusiais medžiais palaipsniui mažėja, t.y. per 32 metus sumažėjo 1,2 m^2/ha***. Tai naujas procesas pirmą kartą užregistruotas Aukštaitijos KMS, Ažvinčių sengirėje.***

Iki 2015 m. reikšmingai augo mort masės kiekis Aukštaitijos KMS baseino 1 ha plote. Jei dar tyrimų pradžioje negyvos medienos kiekis tyrimo plotuose siekė vos po 43 t/ha, tai paskutiniaisiais metais jos kiekis jau turėjo sudaryti 118 t/ha, t.y. per 22 m laikotarpį kasmet Aukštaitijos baseine negyvos medienos masė didėjo po 3,4t/ha. Bendras biomasės balansas rodo, kad per 22 metų laikotarpį Aukštaitijos KMS baseino 1 ha bendra biomasė didėjo nuo 261t/ha iki 330 t/ha, arba po 3,1 t/ha per metus, kas sudarytų virš 5 m^3 medienos prieaugio hektare.

Per šį laikotarpį intensyviausiai didėjo pušynų gyvoji biomasė. Padidėjimas sudarė nuo 105t/ha iki 119 t/ha. Stabili biomasė išliko eglynų, kuri svyravo priklausomai nuo metų apie 80 t/ha ir reikšmingai mažėjo lapuočių gyvoji biomasė – sumažėjimas sudarė nuo 21t/ha iki 13t/ha.

2025 m. pasižymėjo naujų medžių indėliu į biomasės kaitą Aukštaitijos KMS ir padidėjusiu atkritimu 2022 m. dėl žievėgraužio pažeidimų. Gyvų medžių masė sumažėjo iki 223 t/ha, o mort masė išaugo nuo 124 t/ha iki 143 t/ha.

2025 m. pagal medžių kamienų suirimo laipsnį mort masė pasiskirstė taip: Mort 1 – 18%, Mort 2 – 9 %, Mort 3 – 14 %, Mort 4 – 18 %, Mort 5 – 33 % ir Mort 6 – 51 %. Apibendrinus gautus rezultatus galima teigti, kad apie 50 % visų per visą stebėjimą žuvusių medžių mediena, pastaruoju laikotarpiu yra susiskaldžiusi jau be jokių likusių požymių. Tai sausros ir ypač intensyvios kenkėjų invazijos rezultato padariniai, kurie pastaruoju laikotarpiu Aukštaitijos miškuose jau nestebimi.

Žemaitijos KMS baseine nustatyta, kad iki 2015 m. laikotarpio 1 ha plote gyvų medžių vidutiniškai sumažėjo nuo 605 iki 372 (38,5% arba 1,8% per metus). Paprastosios pušies ir eglės medžių dinamika rodo (50 pav.), kad pušies iškritimas siekė 22.9% (1,1% per m.). Dėl žievėgraužio tipografo ir nepalankių klimatinių veiksnių (vėjalaužų ir vėjavartų) eglės žuvimo intensyvumas pasiekė 39,2% (1.9% per m.). Beržų iškritimas buvo intensyviausias (kaip ir Aukštaitijos KMS) ir sudarė 48,7% arba 2,3 % per metus.

Iki 2020 m. laikotarpį Žemaitijos KMS tirtų medžių skaičius sumažėjo nuo 584 iki 325 vnt/ha ir tai sudarė beveik 45 % visų stebėtų medžių. Intensyviausiai sumažėjo eglių, kiek mažiau beržų ir mažiausiai pušų.

Per paskutinįjį 2021-2025 m. laikotarpį stebimų medžių skaičius sumažėjo nuo 379 iki 305 vnt./ha. ir tai sudarė beveik 20 % visų stebėtų medžių. Intensyviausiai sumažėjo eglių, ypač 2023 m., kiek mažiau beržų ir mažiausiai pušų.

Per 31 m. laikotarpį Žemaitijos KMS eglių kamienų skersploščių suma sumažėjo nuo 23,5 iki 13 m^2/ha arba apie 0,34 m^2/ha per metus. Pušų kamienų skersploščių sumos pokytis buvo teigiamas ir siekė apie 0,6 m^2/ha, o beržų praktiškai išliko nepakitęs.

Intensyviausiu prieaugiu, kaip ir Aukštaitijos KMS, pasižymėjo išlikusios eglės. Šios rūšies ***medžių vidutinis skersploščių sumos prieaugis per tiriamąjį laikotarpį sudarė net apie 7 m^2/ha. Pušų skersploščių sumos prieaugis sudarė apie 1,2 m^2/ha. Beržų prieaugis buvo mažiausias ir sudarė tik apie 0,6 m^2/ha arba 0,03 m^2/ha per m. Tai sumoje sudaro 8,2 m^2/ha, kas rodo, kad eglių metinis prieaugis ir toliau didėja.***

Įvertinus nudžiūvimą, Žemaitijos KMS teritorijoje augančių medynų skersploščių suma per tiriamąjį 31 m. laikotarpį vidutiniškai pakito nuo 29,4 m^2/ha iki 20,1 m^2/ha, t.y. sumažėjo 9,3 m^2/ha arba 32 %, o išlikusių gyvų medžių skersploščių prieaugis sudarė 8,8 (nuo 18,3 iki 27,1 m^2/ha) arba 32,6 % (1,55 % per metus).

Didžiausią tūrio prieaugį, eliminavus nudžiūvimą, demonstravo per visą tiriamąjį laikotarpį išlikusios gyvos eglės. ***Per 31 m. laikotarpį tik išlikusių gyvų eglių tūris padidėjo po 2,4 m^3/ha per metus. Kiek mažesniu tūrio prieaugiu pasižymėjo pušys, po 0,8 m^3/ha per metus. Beržų tūrio prieaugis po 0,3 m^3/ha per metus. Tokiu būdu Žemaitijos KMS baseino miškų išlikusių gyvų medžių tūrio prieaugis sudarė po 3,5 m^3/ha per metus.***

Apskaičiavus augančių medžių stiebų, šakų spyglių biomasę, nustatyta, kad Žemaitijos KMS 1 ha baseino plote augančių medynų biomasė nuo 1993 iki 1999 metų dėl medžių iškritimo sumažėjo vidutiniškai nuo 196t iki 185t/ha, t.y. apie 10 t/ha arba 5% biomasės. Per antrąjį tyrimų laikotarpį, t.y. nuo 1999 iki 2003 m. biomasė nežymiai dar padidėjo iki 187t/ha, tačiau jau per kitą laikotarpį vėl sumažėjo iki 179 t/ha. Paskutiniuoju 2010-2015 m. laikotarpiu medžių iškritimo intensyvumas buvo vienas iš mažesnių, dėl ko užregistruotas bedros gyvosios biomasės padidėjimas iki 189 t/ha.

Išskirtiniai 2020 m. rezultatai. Per 5 m. laikotarpį gyvų medžių biomasė sumažėjo nuo 190 iki 169 t/ha, t.y 21 t/ha arba daugiau nei 10 %. Toks intensyvus sumažėjimas buvo sąlygotas žievėgraužio tipografo pažeidimų, dėl ko paskutiniuoju laikotarpiu net 36 t/ha padidėjo negyvos medienos kiekis, pagrinde eglių medienos biomase. Toks gyvosios biomasės svyravimas yra žievėgraužio tipografo ir nepalankių klimatinių veiksnių poveikio rezultatas.

Dar intensyvesniu masės sumažėjimu pasižymėjo paskutinysis 2021-2025 m. laikotarpis. Tik per šį laikotarpį medynų tūris sumažėjo 32 m2/ha arba dar beveik 20%. Tai vėl gi įvyko dėl intensyvių kenkėjų pažžeidimų 2023 m.

Paskirsčius medieną pagal jos suirimo laipsnį nustatyta, kad 2020 m. švieži sausuoliai sudarė Mort 1 36,5 t/ha, Mort 2 – 12,6 t/ha, Mort 3 29,1 t/ha, Mort 4 11,5 t/ha, Mort 5 28,1 t/ha ir visiškai, be likusių žymių suirę Mort 6 12,5 t/ha.

2025 m. švieži sausuoliai sudarė Mort 1 45,3 t/ha, Mort 2 – 37 t/ha, Mort 3 12,6 t/ha, Mort 4 29,1 t/ha, Mort 5 11,5 t/ha ir visiškai, be likusių žymių suirę Mort 6 40,6 t/ha.

Tokiu būdu eglių atsparumas nepalankiems aplinkos veiksniams buvo aukščiausias Žemaitijos KMS, pušų – Aukštaitijos KMS, o beržų žuvimo intensyvumas, kuris siekė beveik 50% visų tirtų beržų buvo vienodas abiejose stotyse. Tai gali būt pateikiamas kaip įrodymas, kad beržų atsparumas intensyviai besikeičiančioms aplinkos sąlygomis yra, skirtingai negu manytą, pakankamai ribotas.

Dzūkijos KMS baseine 1 ha baseino plote augančių medynų biomasė per tiriamąjį laikotarpį padidėjo nuo 121 t iki 176 t/ha, t.y. 55 t/ha arba 31,2%, kas sudarytų po 1,8 t/ha arba 1 % per metus atitinkamai. Per tą patį laikotarpį mort masė išaugo nuo 5 t/ha iki 30 t/ha, kas sudarytų apie 0,8 t/ha per m. Tai ženkliai mažesnis kiekis mort masės lyginant su Aukštaitijos ir ypač Žemaitijos KMS.

Pagal medžių kamienų suirimo laipsnį mort masė pasiskirstė taip: Mort 1 –5,1 arba 5,8%, Mort 2 8,3 arba 9.4%, Mort 3 – 18,0 arba 20,6%, Mort 4 26,3 arba 30.0%, Mort 5 30,0 arba– 34,2%.

Apibendrinus gautus rezultatus galima teigti, kad apie 30 % visų per visą stebėjimą žuvusių medžių mediena, pastaruoju laikotarpiu yra susiskaldžiusi jau be jokių likusių požymių. Tai sausros ir ypač intensyvios kenkėjų invazijos rezultato padariniai, kurie šiandieną Dz8kijos miškuose jau nepastebimi.

Aukštaitijos KMS baseine augančių miškų biomasė 1 ha viršija 200 t/ha, kai tuo tarpu Žemaitijos KMS nesiekia 150 t/ha, o Dzūkijos KMS viršija 150 t/ha ribą. Nustatytas mažesnis LAI Dzūkijos KMS rodo, kad pušų lajos yra labiau ažūrinės, jų lajų ilgiai o ir lajos tūriai yra mažesni nei eglių, dėl ko praeinančios šviesos srautas pro lajas yra didesnis. Taip pat šio srauto nemažina ir pomiškis, kurio buvo gausu Aukštaitijos ir Žemaitijos KMS baseinuose.

Palyginus bioelementų kiekius mort masėje formavimosi intensyvumą tarp stočių nustatyta, kad Žemaitijos KMS mort masė formuojasi intensyviau, bei su ja į dirvožemį patenka daugiau bioelementų negu Aukštaitijos KMS baseine ir ypač Dzūkijos KMS, kur pušų atkritimas kelis kart mažesnis negu kitose KM stotyse..

Pagal pažeidimo laipsnį, intensyviausiai pažeidžiamos buvo paprastosios eglės, kurios sudarė virš 80% visų pažeistų medžių ir apie 15% pušys. Apibendrinus 16 metų pažeidimų tyrimo rezultatus Aukštaitijos KMS nustatyta, kad paskutiniuoju laikotarpiu mažėja pažeidimų priekelminėje, šaknų srityje (sumažėjo vėjavartų) ir kamieno srityje, tačiau vėl pradėjo didėti pažeidimai lajoje. Žievėgraužio tipografo pažeidimų intensyvumas Aukštaitijos KMS baseine nors dėl pasikartojančių sausrų padidėjo, bet išlieka panašiame lygmenyje kaip ir ankstesniais metais.

16 metų pažeidimų tyrimo rezultatai Žemaitijos KMS parodė, kad dėl pasikartojančių sausrų žievėgraužis tipografas dažniausiai pažeidžia visą eglės kamieną, ko pasėkoje tokie medžiai žūna. Šio

kenkėjo pažeidimų skaičius viršija 50 % visų registruotų miške pažeidimų ir 12,2% visų stebėtų eglių. Tai besiformuojanti nauja grėsmė brandiems ir perbrendusiems eglynams Vakarų Lietuvos miškams.

2020 M. ĮVARDINTA GRĖSMĖ DĖL DRĖGMĖS TRŪKUMO vakariniame Lietuvos regione pasitvirtina. Medžių lajų būklė tapo blogesnė nei Aukštaitijos KMS, o medžių pažeidimo intensyvumas didesnis.

Beržų pažeidimo intensyvumas tiriamosiose stotyse reikšmingai nesiskiria. Tyrimo pradžioje daugiau pažeidimų buvo registruojama Žemaitijos KMS2012-2018 m. laikotarpiu Aukštaitijos KMS ir paskutiniuoju laikotarpiu: 2022-2024 Žemaitijos KMS, o 2025 dėl užtvinimo Aukštaitijos KMS.

Žuvusių medžių skaičiaus dinamika rodo, kad per tiriamąjį laikotarpį, eliminavus išskirtinius 2010-2011 metus, kasmet vidutiniškai iškrenta apie 1,6-1,7% medžių. 2016-2017 m. I stacionare žuvo atitinkamai 4 ir 2 medžiai, II -jame žuvo 5 ir 0 medžių bei III-jame 1 ir 0 medžių. 2018 m. žuvo po du medžius I ir III stacionaruose, o 1 – II stacionare. Tai vidutinis medžių atkritimo intensyvumas, kuris stebimas stacionaruose nuo pat tyrimų pradžios, t.y. 1993 m.

Paskutiniuoju 2021-2025 m. laikotarpiu stebimas žuvusių medžių augimas visuose trijuose stacionaruose. Ypač daug žuvusių medžių buvo registruojama 2025 m. I ir II stacionare, o III stacionare didžiausias žuvusių medžių skaičius užregistruotas 2023 m.,

Medžių lajų defoliacijos duomenys rodo, kad visų medžių vidutinė defoliacija iki 2004 m. laipsniškai mažėjo. Po nedidelio padidėjimo, defoliacijos mažėjimas dar tęsėsi iki 2015 m. 2016-2025 m. laikotarpių miškų būklė tiriamuose objektuose turėjo tendenciją blogėti. Išimti tik sudaro 2020 m., ***meteorologinės sąlygos, kai po besikartojančių sausrų 2018-2019 m. buvo ypač palankios medžių būklei ir jų augimui. Visuose tyrimų stacionaruose augančių medžių lajų būklė gerėjo kaip ir visame upelio baseine.***

Paskutiniuoju laikotarpiu 2021-2025 m., visų stacionarų medžių lajų būklė pradėjo blogėti, jų vidutinė defoliacija padidėjo apie 2-3 %.

Geriausios ir pakankamai stabilios būklės išlieka pušys. Tik 2010-2013 m. laikotarpiu pušų lajų vidutinė defoliacija buvo padidėjusi iki 18-19 % ribose. Paskutiniuoju laikotarpiu, iki 2020 m. klimatiniai veiksniai taip pat pradėjo sąlygoti pušų būklės atsikūrimą, ir tik 2021-2025 m. laikotarpiu pušų lajų būklė reikšmingai pablogėjo. Jų vidutinė defoliacija išaugo net 5 %.

Žemaitijos stacionare bendras medžių iškritimas per 25 m. laikotarpį siekia 37,6% ar 1,5% per metus. Nustatyta, kad žuvusios eglės yra įvairaus dydžio, nuo smulkių, atsilikusių augime iki stambių, dominuojančių ir viršaujančių medyne. Pagrindinė šių medžių žūties priežastis - entokenkėjai ir vejalaužos, o smulkesnių medžių – natūralus užstelbimas.

Didžiausias žuvusių eglių dėl žievėgraužio tipografo pažeidimų skaičius nustatytas 2023 m. 2021-2025 m. laikotarpiu eglių defoliacija didėjo dėl pažeidimų, kenkėjų židiniui užgesus, 2025 m. eglių vidutinė defoliacija beveik susilygino su 2020 m. vidutine jos reikšme.

Dzūkijos KMS stacionare didesnis medžių iškritimas buvo registruojamas tyrimų pradžioje, kai Dzūkijos pušynai buvo masiškai pažeisti spyglius graužiančių kenkėjų. Per tiriamąjį laikotarpį registruojamas tik vos 0,5 % intensyvumo pušų džiūvimas, kuris pasireiškė vos per keletą metų. Dėl šios priežasties medžių žūtis ir vidutinė defoliacija šiame stacionare neturėjo jokio tarpusavio ryšio.

Vyraujančių ir atsilikusių augime medžių vidutinės defoliacijos kitimo pobūdis tiriamuoju laikotarpiu buvo analogiškas. Tik didesnių medžių vidutinė defoliacija buvo mažesnė, o žemesnių, atsilikusių augime – didesnė.

Vidutinės defoliacijos kaitos rezultatai parodė pakankamai reikšmingą vidutinės defoliacijos mažėjimo trendą, kuris vidutiniškai siekė po 0,3-0,4 % per metus. Tai geriausias miškų būklės kaitos rodiklis tarp visų tirtų objektų.

2021-2025 m. nustatyta pušų lajos didėjimo tendencija, kuri buvo nustatyta Aukštaitijos KMS stacionaruose, Dzūkijos KMS nepasitvirtino.

Aukštaitijos KMS I stacionare gyvų medžių tūris per 32 m. laikotarpį padidėjo nuo 388 m^3/ha iki (468 m^3/ha -2020 m.) , kas sudaro 80,5 m^3/ha arba 3,1 m^3/ha per metus. Per tą patį laikotarpį žuvusių medžių tūris didėjo iki 110 m^3/ha, t.y. 4 m^3/ha per metus. Didžiausiu prieaugiu pasižymėjo eglės 59 %, kiek mažesniu pušys 21 %, o beržų tūris sumažėjo 45 %.

II stacionare gyvų medžių tūris padidėjo nuo 632 m^3/ha iki 784 m^3/ha , t.y. 151 m^3/ha arba 5,8 m^3/ha per metus. Per tą patį laikotarpį žuvusių medžių tūris didėjo iki 119 m^3/ha, t.y. 4.6 m^3/ha per metus. Didžiausiu prieaugiu pasižymėjo drebulės, kurių prieaugis per tiriamąjį laikotarpį sudarė daugiau negu 110 %, pušų prieaugis siekė 23 %, o eglių tik 13 %. Beržų prieaugis šiame stacionare buvo vienas iš didžiausių ir siekė 38 %.

III stacionare gyvų medžių tūris dėl intensyvių vėjavartų sumažėjo nuo 410 m^3/ha iki 312 m^3/ha , t.y. 98 m^3/ha. Per tą patį laikotarpį žuvusių medžių tūris didėjo iki 245 m^3/ha, t.y. 9,4 m^3/ha per metus. Labiausiai nukentėjo drebulės. Šios medžių rūšies stacionare neliko. 30 % sumažėjo eglių tūris ir 20 % pušų.

Tirtų medžių rūšių kamieno skersmens ir aukščio analizė parodė, kad per tiriamąjį laikotarpį intensyviausiai visuose stacionaruose į skersmenį ir aukštį augo eglės, kiek mažesniu augimo intensyvumu pasižymėjo beržai ir žemiausiu, ypač į aukštį pušys.

Žemaitijos KMS tirtų medžių stiebų tūrio analizė parodė, kad augalijos tyrimų stacionare gyvų eglių tūris per 27 m. laikotarpį padidėjo nuo 407 iki 622 m^3/ha, kas sudaro 215,5 m^3/ha arba 8,3 m^3/ha per metus, o žuvusių medžių tūris didėjo iki 67 m^3/ha, t.y 2,6 m^3/ha per metus.

2021-2025 m. laikotarpiu gyvų medžių tūris reikšmingai sumažėjo beveik 100 m3/ha

Medžių skersmens ir aukščio analizė parodė, kad per tiriamąjį laikotarpį intensyviau padidėjo eglių skersmuo, beveik 9,1 cm, arba 0,35 cm kasmet. Tai sudaro 38 % eglės vidutinio skersmens nustatyto 1994 m. Eglių vidutinis aukštis padidėjo beveik 7 m, 33 % nuo buvusio 1994 m. ir atitinkamai 0,27 m kasmet. Tai pagrinde ir lėmė tokį didelį prieaugio padidėjimą šiame stacionare.

Dzūkijos KMS augalijos tyrimų stacionare gyvų pušų tūris per 32 m. laikotarpį padidėjo nuo 257 m^3/ha iki 456 m^3/ha, kas sudaro beveik 200 m^3/ha arba 6,2 m^3/ha per metus. Per tą patį laikotarpį žuvusių medžių tūris didėjo iki 0 iki 18 m^3/ha, t.y 0,5 m^3/ha per metus.

Skirtingų rūšių produktyvumo analizė parodė, kad Aukštaitijos KMS stacionaruose pati produktyviausia medžio rūšis yra drebulė, kurios produktyvumo buvo 0,44m3/m2. Kiek mažesniu produktyvumu pasižymėjo eglės. Produktyviausios jos buvo I stacionare, kiek mažesnio produktyvumo II ir mažiausio produktyvumo III stacionare. Atitinkamai produktyvumo rodiklis kito nuo 0,35 iki 0,23 m3/m2. Žemaitijos eglių produktyvumas buvo 0,29 m3/m2, ir savo reikšme buvo tarp II ir III stacionaro produktyvumo lygmens. Pušų produktyvumas Aukštaitijoje iš esmės nesiskyrė ir sudarė 0,17 m3/m2. Dzūkijos KMS stacionare jis buvo kiek tai mažesnis – 0,13 m3/m2. Beržų produktyvumas buvo žemiausias ir siekė 0,15 m3/m2. Šie produktyvumo lygiai gerai charakterizavo šių rūšių bendrą produktyvumą Lietuvos miškuose.

Didesniu produktyvumu tirti medžiai pasižymėjo 2015 m. laikotarpiu, kas leidžia spręsti, kad tokį šio parametro kaitą turėjo apspręsti aplinkos sąlygų ir greičiausiai meteorologinių veiksnių: drėgmės ir temperatūros santykio teigiamas poveikis medžių lajų būklei, kuri šiais metais buvo viena geriausių per visą tiriamąjį laikotarpį.

Medžių būklės ir jų atkritimo sąveikos analizė parodė, kad Aukštaitijos KMS baseine bendrai medžių lajų būklei mažėjant po -0,11 % per metus, medžių atkritimo intensyvumas didėja po 0,04 % per metus. Nuo 2020 m. atkritimo intensyvumas padidėjo nuo 1 iki 5 % per metus.

Lapuočių medžių šie tirti parametrai kito silpniausiai: Vidutinė defoliacija mažėjo vos po -0,05 % per metus, o atkritimo intensyvumas didėjo po 0,07 % per metus. Tokį atkritimo intensyvumą lėmė paskutiniaisiais metais 2023-2024 m. reikšmingai padidėjęs žuvusių lapuočių, pirmoje eilėje beržų, skaičius.

Spygliuočių medžių rūšių tiriamieji rodikliai ir jų kaita išsiskyrė reikšmingai. Eglių vidutinė defoliacija mažėjo po 0,08 % per metus, kai tuo tarpu jų atkritimas didėjo net po 0,08 %

per metus. Pušų lajų vidutinė defoliacija mažėjo intensyviausiai – po -0,12 % per metus o atkritimo intensyvumas mažėjo po -0,05 % per metus. Tai geriausiai prisitaikiusios prie mūsų aplinkos sąlygų medžių rūšies parametrai.

Lapuočių medžių žūtis turi reikšmingos įtakos jų lajų vidutinės defoliacijos kaitai, kai atkritimui didėjant, didėja ir vidutinė defoliacija. Būtent šis rodiklis reikšmingai paaiškino iki 33 % vidutinės defoliacijos kaitos. Tokiu pat patikimumu eglių atkritimo intensyvumas paaiškino jų vidutinės defoliacijos kaitą. Pušų atkritimo intensyvumas kiek tai silpniau lėmė defoliacijos kintamumą, paaiškindamas iki 24 % pastarosios kaitos.

Šiltos žiemos teigiamai sąlygoja medžių lajų būklę, tik karščio bangos vegetacinio laikotarpio viduryje gali turėti neigiamos reikšmės, didindamos medžių lajų defoliaciją, ypč lapuočiams ir eglėms. Klimato atšilimas labiausiai teigiamai paveikė pušų lajų būklę.Daugeliu atveju krituliai mažino ir medžių atkritimą, išskyrus tik lapuočių medžių rūšis, pirmiausiai beržą. Labai drėgnas vegetacijos laikotarpis didino beržų atkritimą, kurį dažniausiai sąlygojo vėjavartos.

Aukštaitijos KMS baseine augančių eglių vidutinę defoliaciją lėmė krituliai liepos mėnesį praėjusio sezono kartu su einamojo sezono krituliais žiemos ir pavasario laikotarpio, kurių gausumas mažino defoliaciją. Pasitvirtino jau senai nustatytas dėsningumas, kad praėjusio sezono rudens mėnesių kritulių kiekis blogina medžių būklę, indikuodami, kad tuo laikotarpiu medžių būklę teigiamai sąlygoja šiltas ir sausas ruduo. Šie meteorologiniai veiksniai paaiškino iki 60 % eglių vidutinės defoliacijos kaitos.

Eglių atkritimą skatino taip pat kritulių kiekis praėjusio sezono rudens mėnesių, o atsparumą žievėgraužiui tipografui didino praėjusio sezono vegetacijos laikotarpio ir ankstyvo pavasario kritulių kiekis. Būtent dėl ankstyviausios eglių vegetacijos, šio laikotarpio drėgmė sąlygoja eglių didelį atsparumą pažeidimams. Šie veiksniai paaiškino iki 45 % eglių atkritimo intensyvumo.

Kritulių poveikis pušų lajų defoliacijai ir atkritimui buvo kiek tai mažesnis. Praėjusio sezono kritulių kiekis liepos mėn. kartu su ankstyvo pavasario mėnesių kritulių kiekiu teigiamai sąlygojo lajų būklę, tuo tarpu rugsėjo mėn. kritulių kiekis blogino pušų lajų būklę, panašiai kaip ir eglių. Tie patys rodikliai lėmė ir pušų atkritimą. Atsparumą nepalankiems veiksniams čia skatino ne tik praėjusio sezono liepos mėn. kritulių kiekis bet ir visas intensyvaus augimo laikotarpio kritulių kiekis.

Panašiu pušims reikšmingumu kritulių kiekis sąlygojo ir lapuočių medžių defoliacijos ir jų atkritimo intensyvumo kaitą. Tie patys rodikliai kurie reikšmingai sąlygojo spygliuočių medžių būklę ir išlikimą sąlygojo ir beržų tirtus rodiklius, tik jų poveikis buvo atvirkštinis, indikuojantis,

kad beržai blogiausiai yra prisitaikę išgyventi stresą pastarojo laikotarpio klimatinėse sąlygose. Gauti rezultatai rodo, kad ***dideli kiekiai kritulių vegetacijos laikotarpiu neigiamai veikia lapuočių būklę sukeldami jiems šaknų puvinį, ko pasėkoje tokia medžiai būna pažeidžiami vėjavartų. Dėl šios priežastie lapuočių, pagrinde baržų, atkritimą skatino ankstyvo pavasario ir vegetacijos laikotarpio gausūs krituliai, o kiek tai slopino tik vėlyvos žiemos mėnesių kritulių kiekis.***

Temperatūrų poveikis tirtiems rodikliams buvo panašus ar kiek silpnesnis. Eglių vidutinės defoliacijos mažėjimą skatino rugsėjo mėnesio ir žiemos aukštesnės temperatūros, o būklę blogino pavasario ir praėjusio sezono vegetacijos vidurio karščio bangos, po kurių susidarydavo palankios sąlygos kenkėjams plisti. Dėl šios priežastis tai buvo pagrindiniai klimatiniai rodikliai paaiškinantys virš 30 % eglių žūties atvejų.

Skirtingai negu eglės gauti rezultatai, pušų lajų vidutinės defoliacijos mažėjimą skatino rugsėjo mėn. kartu su praėjusio sezono rudens ir einamojo sezono pavasario mėn. aukštesnės temperatūros. Nenustatytas nei vieno mėnesio karščio bangų neigiamas poveikis pušų būklei. Medžių atkritimą skatino tik karščio bangos vegetacijos pradžioje.

Karščio bangos liepos mėn. kartu su šiltų pavasariu turėjo neigiamą poveikį lapuočių lajų būklei. Jų atkritimą po tokio poveikio skatino bendra vidutinė metų vidutinė temperatūra, indikuodama, kad šylant klimatui beržams išgyventi stresą pastaruoju laikotarpiu dėl karščio bangų ir gausesnių kritulių pasidaro vis labiau problematiška. Tai nauja grėsmė visiems Lietuvoje augantiems beržams.

Apibendrinus gautus rezultatus nustatyta, kad klimatiniai veiksniai Aukštaitijos KMS paaiškino iki 65 % tirtų eglių vidutinės defoliacijos kaitos ir apie 50% jų atkritimo intensyvumo; 60 % pušų vidutinės defoliacijos ir 50 % jų atkritimo kaitos ir virš 65 % beržų vidutinės defoliacijos ir 50 % jų atkritimo intensyvumo.

Sausos medienos irimo greičio analizė rodo, Kad Aukštaitijos KMS baseine sausuolių destrukcija prasideda tik po 10 metų pertraukos. Per 16 metų laikotarpį beržų irimo greitis siekia po 0,06 irimo klasės per metus, eglės sausos medienos – iki 0,04, o pušies vos 0,01 irimo klasės per metus. Per 16 – 33 metų laikotarpi medienos irimo greitis reikšmingai didėja ir siekia“ beržų – po 0,18, eglės 0,20 ir pušies 0,19 irimo klasės per metus. Tokiu būdu pradinėje stadijoje po medžio žūties sausos medienos irimo intensyvumas viena klase padidėja daugiau negu per 10 metų, tuo tarpu vėlesniame amžiuje iena irimo klase sausa mediena padidėja per 5-7 metus. Didžiausiais tempais ira lapuočių, tame tarpe beržo mediena, o lėčiausiai – pušies mediena. Žuvusio medžio didesnis amžius ir didesni parametrai lėtina sausos medienos destrukcijos greičius.

Žemaitijos KMS baseine medžių lajų būklės kaitai reikšmingos įtakos turėjo medžių žūtis. Būtent šis rodiklis reikšmingai paaiškino iki 65 % vidutinės defoliacijos kaitos. Pušų atkritimo intensyvumas taip pat lėmė ir vidutinės defoliacijos kaitą, paaiškindamas iki 35 % pastarosios kintamumo. Eglių žūtis paaiškino net iki 63 % eglių vidutinės defoliacijos kintamumo.

Medžių lajos būklės ir jų žūties intensyvumo analizė parodė, kad tiriamuoju laikotarpiu Žemaitijos KMS baseine bendrai medžių lajų būklei mažėjant po -0,07 % per metus, medžių atkritimo intensyvumas didėja po 0,09 % per metus. Tai beveik 2 kartus intensyviau negu Aukštaitijos KMS. Nuo 2018 m. atkritimo intensyvumas padidėjo nuo 1,5 iki 6-7 % per metus.

Lapuočių medžių šie tirti parametrai kito silpniausiai: Vidutinė defoliacija mažėjo vos po -0,06 % per metus, o atkritimo intensyvumas didėjo po 0,04 % per metus.

Spygliuočių medžių rūšių tiriamieji rodikliai ir jų kaita išsiskyrė reikšmingai. Eglių vidutinė defoliacija mažėjo po 0,07 % per metus, kai tuo tarpu jų atkritimas didėjo net po 0,12 % per metus. Skirtingai negu Aukštaitijos KMS, pušų vidutinė defoliacija jau pradėjo didėti po 0,01% per metus, nors atkritimo intensyvumas mažėjo po -0,01 % per metus.

Klimatinių rodiklių ir tirtų parametrų palyginamoji analizė rodo, kad šiltos žiemos teigiamai sąlygoja medžių lajų būklę, tik karščio bangos vegetacinio laikotarpio viduryje gali turėti neigiamos reikšmės, didindamos medžių lajų defoliaciją, ypač lapuočiams ir eglėms.

Nustatyta, kad Žemaitijos KMS baseine augančių eglių vidutinę defoliaciją lėmė krituliai praėjusio sezono rudens mėnesių kartu su dviejų sezono kritulių kiekiu pavasario mėnesiais. Nustatytas atvirkštinis ryšys rodo, kad kritulių poveikis šiais mėnesiais teigiamai sąlygojo eglių būklę, iki 55% paaiškindami jos kintamumą ir didindami jų atsparumą – kenkėjams.

Eglių atkritimą sąlygojo taip pat paminėtų mėnesių kritulių kiekis ir papildomai praėjusio sezono vegetacijos laikotarpio krituliai. Šie rodikliai paaiškino 45% eglių atkritimo intensyvumo. Krituliams gausėjant, žuvusių eglių skaičius mažėjo.

Kritulių poveikis pušų lajų defoliacijai ir atkritimui buvo mažesnis, o defoliacijos kaitai net ir nereikšmingas. Tik dviejų sezonų pavasario mėnesių krituliai mažino tikimybę pušims žūti, paaiškindami iki 45 % jų atkritimo kaitos.

Kritulių kiekio poveikis lapuočių medžių defoliacijos ir atkritimo intensyvumui buvo kiek tai reikšmingesnis negu pušims, tačiau mažiau reikšmingas negu eglėms. Rudens mėnesių ir pavasario krituliai teigiamai sąlygojo lapuočių būklę, tačiau vegetacijos vidurio turėjo neigiamą reikšmę, kuri gali būti aiškinama, kad karšti ir drėgni orai nėra tinkami beržams augti, skatindami beržų atkritimą dėl vejavartų.

Temperatūrų poveikis tirtiems rodikliams buvo kiek tai silpnesnis. Eglių vidutinės defoliacijos mažėjimą lėmė aukštesnės rudens mėnesių vidutinės temperatūros, o defoliacijos intensyvumą skatino žiemos mėnesių temperatūra. Tai galimai turėjo esminės įtakos pirmiausiai kenkėjų sėkmingam peržiemojimui ir jo gausai po šiltos žiemos, bet ne fiziologiniams procesams vykstantiems tuo laikotarpiu eglės medžiuose. Tokiu būdu temperatūriniai parametrai paaiškino tik 23 % defoliacijos ir 34 % atkritimo intensyvumo kaitos.

Pušų lajų vidutinės defoliacijos mažėjimą skatino rugsėjo mėn. kartu su praėjusio sezono rudens ir birželio mėn. aukštesnės temperatūros. Nenustatytas nei vieno mėnesio karščio bangų neigiamas poveikis pušų būklei. Tuo tarpu pušų atkritimą skatino tik karščio bangos vegetacijos laikotarpiu ir šiltas žiemos laikotarpis, kuris dažnai buvo lydimas gausaus ir šlapio sniego, dėl ko įvykdavo gausios lajų snieglaužos. Po tokių pažeidimų pušys dažnai žudavo.

Tik žilta žiema ir pavasaris turėjo reikšmingos įtakos lapuočių lajų geresnei būklei. Tuo tarpu jų atkritimą skatino šiltas rugsėjis, kas galėjo skatinti beržų šaknų puvinį bei vėkavartas šaltuoju laikotarpiu. Kas patvirtina naują grėsmę visiems Lietuvoje augantiems beržams.

Apibendrinus gautus rezultatus nustatyta, kad klimatiniai veiksniai Žemaitijos KMS paaiškino iki 61 % tirtų eglių vidutinės defoliacijos kaitos ir apie 63% jų atkritimo intensyvumo; 56% pušų vidutinės defoliacijos ir 54 % jų atkritimo kaitos ir virš 71 % beržų vidutinės defoliacijos ir 66 % jų atkritimo intensyvumo.

Žuvusių medžių sausos medienos irimo greičio analizė rodo, kad Žemaitijos KMS baseine sausuolių destrukcija prasideda, kaip ir Aukštaitijos KMS, tik po 10 metų pertraukos. Per 16 metų laikotarpį beržų irimo greitis siekia po 0,06 irimo klasės per metus, eglės sausos medienos – iki 0,05, o pušies vos 0,02 irimo klasės per metus. Per 16 – 31 metų laikotarpi medienos irimo greitis reikšmingai didėja ir visų tirtų rūšių sausos medienos irimo greitis buvo panašus ir siekė po 0,13-0,14 irimo klasės per metus. Tokiu būdu pradinėje stadijoje po medžio žūties sausos medienos irimo intensyvumas viena klase padidėja daugiau negu per 10 metų, tuo tarpu vėlesniame amžiuje iena irimo klase sausa mediena padidėja, panašiai kaip ir Aukštaitijos KMS, per 6-7 metus. Didžiausiais tempais ira lapuočių, tame tarpe beržo mediena, o lėčiausiai – pušies mediena.

Nustatytas tas pats dėsningumas, kaip ir Aukštaitijos KMS - žuvusio medžio didesnis amžius ir didesni parametrai lėtina sausos medienos destrukcijos greičius.

Dzūkijos KMS medžių lajos būklės ir jų žūties intensyvumo analizė parodė, kad tiriamuoju laikotarpiu Dzūkijos KMS baseine bendrai medžių lajų būklei mažėjant net po -2,9 % per metus, medžių atkritimo intensyvumas taip pat mažėja po -0,4 % per metus. Tokiam kaitos dėsningumui didžiausią įtaką turėjo tas faktas, kad Dzūkijos KMS baseine vyraujanti medžių rūšis yra paprastoji

pušis, kuri geriausiai yra prisitaikiusi prie dabartinės aplinkos sąlygomis ir jų žūtis yra atsitiktinė ar dėl ypač nepalankių sąlygų, pirmiausiai audrų, vėtrų ar škvalų.

Žuvusių medžių sausos medienos irimo greičio analizė rodo, kad Dzūkijos KMS baseine sausuolių destrukcija prasideda taip pat tik po 10 metų pertraukos. Kadangi tiriamieji darbai ilgą laiko tarpą nebuvo vykdyti, sausos medienos irimo greičiai nustatyti visam 32 m laikotarpiui.

Nustatyta, kad beržų irimo greitis siekė po 0,17 irimo klasės per metus, o pušies 0,1 irimo klasės per metus, ir ženkliai mažesnis negu Aukštaitijos ir Žemaitijos KMS baseine. Pagrindinė priežastis – sausos miško augavietės, pomiškio stoka ir saulėtas dirvos paviršius. Šie veiksniai stabdo sausos medienos destrukcijos greitį.

Aukštaitijos KMS visų medžių defoliacijos laipsnis didėjo didėjant S ir N taršos komponentėms. Mažiausiai reikšmingi ryšiai nustatyti tarp tirtų taršos komponenčių ir beržų lajų būklės. Natūraliai drėkinamoje augavietėje spygliuočių medžių rūšių prieaugį taip pat sąlygojo rūgščiosios komponentės ore ir jų iškritos. Koncentracijoms didėjant tiek medžių būklė blogėja, tiek ir metinis prieaugis mažėja. SO_4^{-2} SO2 ir NH_4^+ koncentracijos ore – buvo pagrindiniai veiksniai skatinantys eglių lajų išretėjimą Žemaitijos KMS baseine augančiuose miškuose.

Mišo augavietės didenė drėgmė reikšmingai didino medžių atsparumą aplinką rųgštinančioms komponentėms, ypač sieros junginių.

Nitratų iškritos skatino medžių prieaugį, ypač skurdžioje augavietėje (Nb), kur C/N santykis viršyjo 25 ir daugiau kartų. Pelkinėje derlingoje MA, kur C/N santykis siekė apie 15, teigiamas nitratų poveikis medžiams augti nenustatytas.

Reikšmingas ir neigiamas pažemio ozono poveikis buvo eglėms augti nustatytas abiejose augavietėse, o pušims – tik Nb augavietėje. Ozono neigiamas poveikis beržams augti buvo tik artimas reikšmingam ($p<0,1$). Todėl teigiam, kad paprastoji eglė turėtų būti viena jautriausių ozono neigiamam poveikiui, kiek atsparesnės tokiam poveikiui turėtų būti pušys ir atspariausi – beržai. .

Paprastoji eglė yra viena geriausiai prisitaikiusi prie pastarojo laikotarpio aplinkos pokyčių. Teiginys, kad ši medžių rūšis šiaurės rytinėje Europos dalyje praras savo reikšmingumą yra paneigtas. Adekvačios miškininkavimo priemonės didinančios eglynų atsparumą kenkėjams ir vėjolaužai bei vėjavartai užtikrintų eglynų tvarų vystymąsi ateityje.

Rūgštinančių komponenčių koncentracijų ore ir jų iškritų su krituliais trendų rezultatus, galima teigti, kad ateityje tirtų medžių rūšių lajų defoliacija turėtų mažėti ar stabilizuotis labai žemame lygmenyje, kas turėtų skatinti ir medžių prieaugį, ir didinti jų bendrą atsparumą nepalankiems aplinkos veiksniams.

IŠVADOS

1993–2025 m. Lietuvos integruoto miškų monitoringo programos metu atlikti ilgalaikiai tyrimai parodė, kad miškų būklę, produktyvumą ir ekosistemų funkcionavimą lemia kompleksinis atmosferos taršos, meteorologinių sąlygų, medynų struktūros, augaviečių savybių ir biotinių pažeidimų poveikis. Šių veiksnių reikšmė skirtingoms medžių rūšims, miško ekosistemoms, skirtingose upelių baseinuose buvo nevienoda, kas rodo ypač sudėtingas miškų reakcijas į kintančias aplinkos sąlygas.

Miškų būklės vertinimas parodė, kad medžių lajų defoliacijos pokyčiai pasižymėjo ciklišku – būklės blogėjimo laikotarpiai kartojosi maždaug kas 8–10 metų. Šie periodai buvo susiję su nepalankiomis klimato sąlygomis, vabzdžių kenkėjų protrūkiais ir ekstremaliais meteorologiniais reiškiniais. Nors visose Integruoto monitoringo stotyse nustatyta ilgalaikė lajų būklės gerėjimo tendencija, jos intensyvumas ir stabilumas skyrėsi tarp regionų. Didžiausias ilgalaikis būklės pagerėjimas nustatytas Aukštaitijoje, tuo tarpu pastaraisiais metais ryškiausias būklės blogėjimas stebėtas Žemaitijoje, kur pasikartojančios sausros, vėjo ir sniego pažeidimai bei intensyvūs žievėgraužio tipografo (*Ips typographus*) protrūkiai reikšmingai paveikė paprastosios eglės medynus. Dzūkijos miškų būklę daugiausia lėmė periodiniai spyglius graužiančių vabzdžių pažeidimai pušynuose tyrimų pradžioje, po kurių sekė laipsniškas medynų atsikūrimas.

Skirtingos medžių rūšys į aplinkos pokyčius reagavo nevienodai. Paprastoji pušis išlaikė stabiliausią lajų būklę ir mažiausią mirtingumą per visą stebėjimo laikotarpį, todėl pasižymėjo didžiausiu bendru atsparumu aplinkos stresui. Paprastoji eglė pasižymėjo didžiausiu produktyvumu ir radialiuoju prieaugiu, tačiau kartu buvo jautriausia sausroms, žievėgraužio tipografo pažeidimams ir kitiems antriniams stresoriams. Beržas pasižymėjo santykinai silpna reakcija į atmosferos taršą, tačiau jo gyvybingumas mažėjo, prieaugis silpnėjo, o didelis mirtingumas rodo didėjantį jautrumą klimato sukeliamam stresui.

Tyrimai patvirtino, kad atmosferos taršos reikšmė kaip tiesioginio miškų būklę lemiančio veiksnio pastaraisiais dešimtmečiais sumažėjo dėl reikšmingo sieros ir azoto junginių iškritų mažėjimo. Vis dėlto rūgštinančios komponentės ir toliau turėjo įtakos medžių lajų būklei bei augimui, ypač spygliuočių medynuose augančiuose skurdžiose augavietėse. Sieros junginiai ir amonio iškritos mažino paprastosios pušies ir paprastosios eglės radialųjį prieaugį, tuo tarpu nitratų iškritos skurdžiose dirvose iš dalies kompensavo azoto trūkumą ir skatino medžių augimą. Pažemio ozonas neigiamai veikė visų tirtų medžių rūšių radialųjį prieaugį. Jo kaitos reikšmingiausias ryšys nustatytas su eglių kamienų prieaugio kaita.

Miškų produktyvumas tirtose KM stotyse priklausė nuo medžių rūšies ir augavietės sąlygų. Didžiausiu prieaugiu pasižymėjo drebulė ir paprastoji eglė, mažesniais augimo rodikliais – paprastoji pušis, o mažiausiais beržas. Produktyviausi medynai išlaikė didėjančią gyvosios biomasės sankaupą, tačiau šį procesą dažnai lydėjo didėjantis medžių mirtingumas ir negyvos medienos kaupimasis. Todėl miškų produktyvumo pokyčiai atspindėjo ne tik medžių augimo intensyvumą, bet ir sudėtingą pusiausvyrą tarp biomasės kaupimo, medžių žuvimo ir organinės medžiagos skaidymo procesų.

Regioniniai ekosistemų funkcionavimo skirtumai buvo ryškūs. Aukštaitijos KMS išsiskyrė didžiausia gyvosios biomasės sankaupa ir bendru miškų produktyvumu, tačiau pastaraisiais metais mažėjanti biomasė ir didėjantis medžių atkritimas rodo pirmuosius ekosistemos atsparumo silpnėjimo požymius. Žemaitijos KMS nustatytas didžiausias medžių mirtingumas, sparčiausias negyvos medienos kaupimasis ir intensyviausias bioelementų grįžimas į dirvožemį bei CO_2 į atmosferą, o tai atspindi stiprų žievėgraužio tipografo protrūkių ir klimato ekstremumų poveikį. Tuo tarpu Dzūkijos KMS išliko stabiliausias regionas, pasižymintis mažu medžių mirtingumu, nedideliu negyvos medienos kaupimusi ir santykinai stabiliais pušies medynais.

Negyvos medienos dinamikos tyrimai parodė reikšmingus skirtumus tarp monitoringo stočių. Didžiausias negyvos medienos formavimosi intensyvumas nustatytas Žemaitijoje, o mažiausias – Dzūkijoje, kas atspindi skirtingą medžių žuvimo intensyvumą ir aplinkos trikdžių mastą. Negyvos medienos kaupimasis ir jos irimo procesai reikšmingai veikė maisto medžiagų apytaką bei anglies srautus, todėl negyva mediena yra svarbi neatsiejama miško ekosistemų funkcionavimo dalis.

Meteorologinės sąlygos buvo vienas svarbiausių miškų dinamiką lemiančių veiksnių. Medžių augimas, lajų būklė ir mirtingumas priklausė ne nuo pavienių klimato rodiklių, bet nuo sezoninių temperatūros ir kritulių režimų sąveikos. Didžiausi ryšiai nustatyti su žiemos ir ankstyvojo vegetacijos laikotarpio sąlygomis. Sudaryti daugialypės regresijos modeliai paaiškino didelę dalį lajų defoliacijos, radialiojo prieaugio ir žievėgraužio tipografo pažeidimų kaitos, patvirtindami integruotų meteorologinių rodiklių didelę prognostinę reikšmę.

Žievėgraužio tipografo tyrimai patvirtino, kad šio kenkėjo protrūkius lemia palankių klimato sąlygų ir medynų struktūros sąveika. Didžiausi pažeidimai nustatyti brandžiuose, grynuose, didelio našumo eglynuose, augančiuose derlingose augavietėse. Šiltos žiemos, sumažėję krituliai ankstyvuoju vegetacijos laikotarpiu ir aukštesnė pavasario bei vasaros temperatūra reikšmingai didino protrūkių intensyvumą, tuo tarpu jaunesni ir mišrūs medynai pasižymėjo didesniu atsparumu.

Lapijos indekso (LAI) tyrimai papildė tradicinius miškų būklės vertinimo metodus. LAI, apskaičiuotas pagal fotosintetiškai aktyvios spinduliuotės matavimus, glaudžiai siejosi su lajų būkle ir buvo patikimas medynų gyvybingumo indikatorius. Tuo tarpu hemisferinės fotografijos metodu

nustatytas LAI labiau priklausė nuo pomiškio ir bendros augalijos dangos struktūros, todėl geriau apibūdino visos augalijos dangos būklę nei vyraujančio medyno būklę. Kompleksinis LAI, lajų defoliacijos, medžių mirtingumo ir produktyvumo rodiklių taikymas suteikė išsamų ilgalaikės ekosistemų dinamikos vertinimą.

Apibendrinant galima teigti, kad Lietuvos miškų ekosistemos išlieka produktyvios, tačiau jų atsparumas reikšmingai skiriasi priklausomai nuo medžių rūšies, miško tipo ir geografinio regiono. Miškų būklę, produktyvumą ir ekosistemų funkcionavimą lemia sudėtinga atmosferos iškritų, klimato svyravimų, medynų struktūros, augaviečių sąlygų ir biologinių pažeidimų sąveika. Integruotas šių rodiklių vertinimas sudaro patikimą pagrindą ilgalaikiams miškų ekosistemų pokyčiams nustatyti ir jų reakcijai į aplinkos kaitą vertinti.

Pagrindinės miško ekosistemų būklės grėsmės

Ilgalaikių tyrimų rezultatai rodo, kad pagrindinės grėsmės Lietuvos miškų ekosistemoms vis labiau siejamos su klimato kaitos poveikiu ir jos sąveika su biologiniais bei aplinkos veiksniais. Nors sieros ir azoto junginių iškritų mažėjimas atmosferoje reikšmingai sumažino tiesioginį oro taršos poveikį miškų būklei, teigiamą gerėjančios oro kokybės poveikį palaipsniui stabdo dažnėjantys ir intensyvėjantys klimato ekstremumai. Ypač pažeidžiami yra beržynai ir sausose augavietėse augantys eglynai medynai.

Didžiausią grėsmę miškų stabilumui kelia ilgalaikės vasaros sausros, karščio bangos, besikeičiantis kritulių režimas, stiprios audros, vėjavartos ir intensyvūs šlapio sniego reiškiniai. Šie veiksniai mažina medžių gyvybingumą, trikdo fiziologinius procesus ir didina lajų defoliaciją, o jų poveikis dažnai išlieka dar keletą metų po pirminio streso poveikio. Pasikartojantys klimato ekstremumai sukelia kumuliacinį poveikį – palaipsniui silpnina miškų atsparumą ir mažina medžių gebėjimą atsistatyti po nepalankių aplinkos sąlygų.

Dėl klimato streso susilpnėję medžiai tampa daug jautresni antriniams biologiniams pažeidimams. Didžiausia nustatyta biologinė grėsmė yra žievėgraužis tipografas (*Ips typographus*), kurio protrūkiai glaudžiai susiję su šiltomis žiemomis, sausromis vegetacijos laikotarpiu ir brandžių, grynų paprastosios eglės medynų viravimu, ypač Žemaitijos KMS. Palankių klimato sąlygų ir grynų, perbrendusių medynų struktūros sąveika reikšmingai didina medžių mirtingumą ir spartina miškų būklės blogėjimą, ypač Vakarų Lietuvos regione.

Tyrimai taip pat parodė, kad miškų jautrumas aplinkos stresui priklauso nuo medžių rūšies ir augavietės sąlygų. Paprastoji eglė, nepaisant didelio produktyvumo, dabartinėmis klimato

sąlygomis yra viena jautriausių spygliuočių rūšių dėl didelio jautrumo sausroms ir žievėgraužio tipografo pažeidimams. Beržų būklės blogėjimas ir didėjantis mirtingumas visose monitoringo teritorijose rodo ribotą šios rūšies tolerancijią ilgalaikiam šilumos ir drėgmės stresui. Paprastoji pušis pasižymėjo didžiausiu atsparumu, tačiau ilgai trunkančios sausros taip pat gali mažinti jos prieaugį ir didinti jautrumą antriniams kenkėjams bei ligų sukėlėjams, ypač skurdesnėse augavietėse.

Nauja grėsmė miško ekosistemų stabilumui yra susijusi su gyvos ir negyvos medienos santykiu bei nuo jo priklausančio bendro ekosistemos produktyvumo ir biomasės kaitos intensyvumo. Nors gyvosios biomasės kiekis daugumoje tirtų medynų išliko didelis, didėjantis medžių mirtingumas ir spartėjantis negyvos medienos kaupimasis rodo palaipsniui mažėjantį ekosistemų stabilumą. Per didelis negyvos medienos kaupimasis gali keisti maisto medžiagų apytaką ir anglies ciklą, o ilgalaikių sausrų sąlygomis didinti degios biomasės kiekį ir miškų gaisrų riziką bei tuo pačiu CO_2 emisijas.

Tyrimų rezultatai taip pat rodo, kad ateityje miškų ekosistemų pažeidžiamumą lems ne pavieniai klimato ar biologiniai stresoriai, bet jų tarpusavio sąveika. Miškų reakciją formuoja bendras klimato svyravimų, atmosferos sąlygų, medynų struktūros, augaviečių savybių ir biologinių pažeidimų poveikis. Todėl ypač jautrūs išliks brandūs, vienarūšiai ir struktūriškai supaprastinti medynai, kuriuose vienu metu gali veikti keli nepalankūs veiksniai.

Apibendrinant galima teigti, kad remiantis gautai rezultatais kompleksiško monitoringo stočių baseinuose, pagrindinės grėsmės Lietuvos miškams palaipsniui keičiasi – nuo tiesioginio atmosferos taršos poveikio pereinama prie klimato kaitos nulemtų trikdžių dominavimo. Didėjantis klimato nepastovumas, kartu su stiprėjančiais biologiniais pažeidimais ir besikeičiančiais ekosistemų procesais, ateityje taps svarbiausiu veiksniu, lemiančiu miškų būklę, produktyvumą, anglies apykaitą, tuo pačiu ir ilgalaikį miško ekosistemų stabilumą.

Galimos Lietuvos miškų ekosistemų raidos prognozės kintančiomis aplinkos sąlygomis

Ilgalaikiai Lietuvos integruoto miškų monitoringo duomenys (1993–2025 m.) rodo, kad ateities miškų raidą vis labiau lems klimato kaitos, ekstremalių meteorologinių reiškinių, atmosferos taršos pokyčių ir biotinių pažeidimų sąveika. Nors prognozuojamas tolesnis sieros ir azoto junginių iškritų mažėjimas sudarys sąlygas gerėti medžių fiziologinei būklei ir silpnėti rūgštinančių junginių neigiamam poveikiui, klimato kaitos sukeliami stresoriai ateityje greičiausiai taps pagrindiniais veiksniais, lemiančiais miškų būklę, produktyvumą ir stabilumą.

Tikėtina, kad miškų būklės dinamika ir toliau išliks kintanti ir iš dalies ciklinė, tačiau nepalankių laikotarpių dažnis, trukmė ir intensyvumas gali didėti. Ateityje miškų būklės blogėjimą

greičiausiai lems ne pavieniai stresiniai įvykiai, o pasikartojančių sausrų, karščio bangų, audrų, šlapio sniego epizodų ir po jų kylančių kenkėjų protrūkių kompleksinis poveikis. Tokia veiksnių sąveika gali mažinti medžių gyvybingumą, didinti lajų defoliaciją, spartinti medžių mirtingumą ir silpninti miško ekosistemų gebėjimą atsikurti po pažeidimų.

Didžiausi pokyčiai prognozuojami paprastosios eglės medynuose. Nepaisant jų didelio produktyvumo ir svarbaus vaidmens kaupiant biomasę, eglynai išliks viena jautriausių Lietuvos miškų ekosistemų dalių. Šiltesnės žiemos, ankstesnė vegetacijos pradžia ir dažnėjančios sausros vegetacijos laikotarpiu sudarys vis palankesnes sąlygas žievėgraužio tipografo (*Ips typographus*) populiacijų gausėjimui. Dėl to brandžiuose, struktūriškai vienarūšiuose eglynuose, ypač augančiuose didelio našumo augavietėse, gali didėti medžių mirtingumas, mažėti gyvosios biomasės kiekis ir spartėti negyvos medienos kaupimasis. Ilgalaikėje perspektyvoje tai gali mažinti miškų anglies kaupimo potencialą ir didinti anglies nuostolius dėl intensyvesnių organinės medžiagos irimo procesų, kas savo ruožtu prisidėtų prie CO2 koncentracijos ore didėjimo ir klimato kaitos spartinimo.

Paprastosios pušies medynai ateityje tikėtina išliks vieni stabiliausių Lietuvos miškuose, ypač natūraliai sausose augavietėse. Didelis atsparumas vandens trūkumui rodo didelį šios rūšies prisitaikymo potencialą. Tačiau dažnėjančios ir ilgėjančios vasaros sausros, intensyvesnės karščio bangos bei kritulių režimo pokyčiai gali palaipsniui mažinti pušų prieaugį, didinti fiziologinį stresą ir jautrumą antriniams kenkėjams bei ligoms, ypač skurdesnėse sausros paveikiamose augavietėse.

Beržynams ateityje prognozuojamas didėjantis klimato kaitos poveikis. Stebėtas augimo reakcijos silpnėjimas ir santykinai didelis mirtingumas rodo mažesnį šios rūšies prisitaikymo potencialą šylančio klimato sąlygomis. Dažnėjančios karščio bangos, dirvožemio drėgmės režimo pokyčiai ir pasikartojančios sausros gali dar labiau mažinti beržų gyvybingumą, produktyvumą ir keisti jų konkurencines galimybes miško ekosistemose, ypač šios rūšies vyresniuose medynuose.

Tikėtina, kad regioniniai miškų reakcijos į klimato kaitą skirtumai išliks ir ateityje. Žemaitijos integruoto monitoringo stoties miškai greičiausiai išliks pažeidžiamiausi dėl eglynų jautrumo sausroms ir žievėgraužio tipografo pažeidimams. Aukštaitijos miškai dėl savo struktūros ir rūšinės sudėties gali išlaikyti santykinai didesnį stabilumą, tačiau didėjantis medžių atkritimas ir negyvos medienos kaupimasis rodo palaipsniui mažėjantį ekosistemų atsparumą. Dzūkijos miškai, kuriuose vyrauja paprastoji pušis, tikėtina, išliks atspariausi, tačiau ilgalaikės sausros ir didėjantis vandens trūkumas gali palaipsniui stiprinti stresą ir šiose ekosistemose, kurį lydėtų spyglius gražiančių kenkėjų populiacijų protrūkiai.

Ateityje miškų produktyvumas greičiausiai taps labiau kintantis. Vidutinio klimato sąlygų pokyčiai kartu su mažėjančia atmosferos tarša kai kuriuose medynuose gali sudaryti prielaidas

išlaikyti stabilų arba net didesnį augimą, tačiau ekstremalūs meteorologiniai reiškiniai gali lemti periodinius produktyvumo nuostolius. Todėl būsimą miškų produktyvumą lems ne tik vidutinės klimato sąlygos, bet pirmiausia ekstremalių reiškinių dažnis, intensyvumas ir ekosistemų gebėjimas atsikurti po jų poveikio.

Ateityje vis didesnę reikšmę miškų būklės vertinimui įgis negyvos medienos dinamika. Dėl klimato streso ir kenkėjų protrūkių didėjantis medžių mirtingumas tikėtina skatins negyvos medienos kaupimąsi, kuris turės įtakos anglies apytakai, maisto medžiagų ciklui, biologinei įvairovei ir gaisrų rizikai, ypač saugomose teritorijose, kur ūkinė veikla yra ribojama. Negyvos medienos susidarymo ir jos irimo pusiausvyra taps svarbiu miško ekosistemų stabilumo ir anglies balanso rodikliu.

Ateityje Lietuvos miškai patirs laipsniškus struktūrinius ir funkcinius pokyčius. Sausroms atsparesnių medžių rūšių, ypač paprastosios pušies, ekologinė reikšmė gali didėti, tuo tarpu paprastosios eglės ir beržo vaidmuo kai kuriuose regionuose gali mažėti dėl didėjančio klimatinio streso. Didesniu atsparumu pasižymės mišrūs, įvairiaamžiai ir didesnės biologinės įvairovės medynai, kurie gebės išlaikyti stabilesnį produktyvumą besikeičiančio klimato sąlygomis.

Taigi ilgalaikę Lietuvos miškų raidą lems dviejų priešingų procesų pusiausvyra: miškų būklės gerėjimas dėl mažėjančios atmosferos taršos ir didėjantis klimato kaitos bei su ja susijusių trikdžių poveikis. Miškų gebėjimas išlaikyti produktyvumą, kaupti anglį ir teikti ekosistemines paslaugas ateityje vis labiau priklausys nuo jų prisitaikymo potencialo ir atsparumo ekstremalioms aplinkos sąlygoms, o ne vien nuo dabartinio produktyvumo lygio.

Rekomendacijos miškų valdymo praktikai:

Ilgalaikiai Lietuvos integruoto miškų monitoringo darbai rodo, kad pagrindiniu veiksniu, lemiančiu Lietuvos miškų tvarumą ateityje, taps nebe atmosferos tarša, o vis didėjantis klimato kaitos sukeltų ekstremalių reiškinių poveikis ir jų sąveika su biotiniais pažeidimais. Todėl pagrindinis šiuolaikinės miškininkystės tikslas turėtų būti orientuotas ne vien į maksimalų medienos produkcijos didinimą, bet į miško ekosistemų prisitaikymo gebėjimų, atsparumo ir ilgalaikio stabilumo stiprinimą.

Siekiant išlaikyti miškų produktyvumą, anglies kaupimo potencialą ir biologinę įvairovę besikeičiančio klimato sąlygomis, būtina skatinti mišrių rūšių, įvairiaamžių ir struktūriškai įvairių medynų formavimą. Tokie medynai paprastai yra atsparesni sausroms, karščio bangoms, audroms ir kenkėjų protrūkiams nei supaprastintos, vienarūšės ir vienaamžės medynų struktūros. Todėl miškų atkūrimo ir ugdymo priemonės turėtų būti planuojamos atsižvelgiant ne tik į dabartines augaviečių

sąlygas, bet ir į prognozuojamus ateities klimato scenarijus bei ilgalaikį atskirų medžių rūšių prisitaikymo potencialą.

Ypatingas dėmesys turėtų būti skiriamas paprastosios eglės medynų pažeidžiamumo mažinimui, nes tyrimai parodė, kad ši rūšis jautriausiai reaguoja į kompleksinį sausros streso, šiltėjančių žiemų, ekstremalių meteorologinių reiškinių ir žievėgraužio tipografo (*Ips typographus*) poveikį. Didžiausios rizikos teritorijose, ypač brandžiuose grynuose eglynuose, svarbiomis prisitaikymo priemonėmis turėtų tapti rūšinės įvairovės didinimas, per didelio medynų struktūrinio vienodumo mažinimas ir mišrių medynų su didesne sausroms atsparių rūšių dalimi formavimas. Tokios priemonės padėtų sumažinti didelio masto pažeidimų tikimybę, kartu išlaikant miškų produktyvumą ir ekologines funkcijas.

Paprastųjų pušų medynai, kurie dabartinėmis klimato sąlygomis pasižymėjo didžiausiu stabilumu, turėtų būti tvarkomi atsižvelgiant į jų didelę ekologinę reikšmę ir aukštą prisitaikymo potencialą. Tačiau net ir pušynai gali tapti jautresni ilgalaikių sausrų sąlygomis. Todėl siekiant išlaikyti jų atsparumą būtina reguliuoti optimalų medynų tankumą, saugoti dirvožemio drėgmės režimą ir vengti pernelyg intensyvaus natūraliai susiformavusių, prie vietos sąlygų prisitaikiusių medynų struktūros keitimo.

Negyvos medienos išsaugojimas ir jos kiekio valdymas turėtų tapti neatsiejama klimato kaitai švelninimo miškininkystės dalimi. Ilgalaikiai stebėjimai rodo, kad dėl klimato streso ir didėjančio medžių mirtingumo ateityje negyvos medienos kiekis gali didėti. Negyva mediena neturėtų būti vertinama tik kaip anglies emisijų šaltinis ar miškų tvarkymo problema – ji yra taip pat svarbi miško ekosistemų funkcionavimo dalis, prisidedanti prie biologinės įvairovės išsaugojimo, maisto medžiagų apytakos, dirvožemio formavimosi ir anglies kaupimo. Tačiau jos dinamika turi būti vertinama atsižvelgiant ir į gaisrų riziką, ypač regionuose, kuriuose gali susidaryti didelės sausos medienos sankaupos, kas prisidėtų prie CO_2 emisijų didinimo bei klimato kaitos tolesnio skatinimo.

Ankstyvas miškų būklės blogėjimo nustatymas ir prevencinių priemonių taikymas turėtų tapti viena svarbiausių ateities miškininkystės krypčių. Lietuvos KMS tinklo ilgalaikė patirtis parodė, kad būtina kompleksiškai vertinti medžių lajų būklę, augimo dinamiką, medžių mirtingumą, negyvos medienos formavimąsi, meteorologines sąlygas, atmosferos iškritas ir biologinius pažeidimus. Tokia integruota stebėsena sudaro mokslinį pagrindą ankstyvojo perspėjimo sistemoms kurti, atsirandančioms rizikoms nustatyti ir savalaikėms miškų valdymo priemonėms taikyti.

Atmosferos teršalų stebėsena taip pat turėtų išlikti svarbia miškų būklės vertinimo dalimi. Nors sieros ir azoto junginių iškritos pastaraisiais dešimtmečiais reikšmingai sumažėjo ir jų poveikis ateityje turėtų silpnėti, jų sąveika su klimato kaitos sukeliamais stresiniais veiksniais gali ir toliau

daryti įtaką miškų gyvybingumui, ypač skurdžiose augavietėse. Todėl būtina tęsti ilgalaikius oro kokybės, dirvožemio būklės ir miškų reakcijos stebėjimus, siekiant įvertinti bendrą įvairių aplinkos veiksnių poveikį.

Ateities miškų valdymas turėtų būti grindžiamas artimos gamtai miškininkystės principais, leidžiančiais koreguoti taikomas priemones pagal besikeičiančias klimato sąlygas ir ekosistemų reakciją. Tam būtina pereiti prie kompleksinio miškų valdymo, kuriame būtų derinami produktyvumo, biologinės įvairovės išsaugojimo, anglies kaupimo ir ekosistemų stabilumo tikslai.

Daugiau kaip tris dešimtmečius Lietuvos integruoto miškų monitoringo tinkle sukaupti duomenys rodo, kad XXI amžiaus tvarios miškininkystės tikslas turi būti ne tik didžiausio galimo miškų augimo užtikrinimas, bet ir jų atsparumo klimato kaitai didinimas. Tik pakankamą prisitaikymo potencialą turintys miškai ateityje galės išlaikyti aukštą produktyvumą, išsaugoti biologinę įvairovę, kaupti anglį ir toliau atlikti svarbiausias ekologines bei socialines funkcijas besikeičiančiomis aplinkos sąlygomis.

.

III KITŲ MIŠKO EKOSISTEMŲ KOMPONENTŲ RŪŠIŲ ĮVAIROVĖS IR GAUSUMO KAITA KMS BASEINŲ TERITORIJOSE

3.1. Žaliųjų oro dumblių gausa

Epifitiniai žalieji dumbliai, ypač *Pleurococcus vulgaris* (dažnai sinonimizuojamas su *Apatococcus lobatus*) ir *Protococcus viridis*, jau kelis dešimtmečius laikomi jautriais atmosferinės eutrofikacijos bioindikatoriais. Jų gausumas ir kolonijų išsivystymas glaudžiai susiję su ore esančių azoto junginių, pirmiausia amoniako (NH_3), amonio (NH_4^+) ir azoto oksidų (NO_x), koncentracijomis bei jų iškritomis su krituliais (Bråkenhielm, 1990; Cape et al., 2009; Sutton et al., 2011).

Šių dumblių kolonijos dažniausiai vystosi ant spyglių, lapų ir medžių žievės paviršiaus, kur tiesiogiai naudoja atmosferoje nusėdančias maisto medžiagas. Didėjant reaktyviojo azoto kiekiui atmosferoje, spartėja ląstelių dalijimasis, storėja biofilmo sluoksnis ir didėja paviršiaus padengimas dumbliais. Dėl šios priežasties epifitinių dumblių gausumas laikomas vienu iš ankstyviausių ilgalaikės atmosferinės eutrofikacijos požymių.

Ypač jautriai į azoto apkrovas reaguoja eglių spygliai. Padidėjus azoto junginių iškritoms, ant jų formuojasi tankesnės ir storesnės dumblių kolonijos, kurios ilgainiui gali pakeisti spyglių paviršiaus savybes, sumažinti šviesos patekimą į epidermį, keisti mikroklimatą ir sudaryti palankesnes sąlygas kitų epifitinių mikroorganizmų vystymuisi. Nors patys dumbliai tiesiogiai nepažeidžia medžių audinių, jų gausėjimas laikomas patikimu padidėjusios azoto apkrovos indikatoriumi.

Pastarųjų dviejų dešimtmečių tyrimai rodo, kad epifitinių dumblių paplitimą lemia ne vien azoto iškritos. Reikšmingą įtaką turi ir oro drėgmė, kritulių kiekis, temperatūra, medyno tankumas, šviesos režimas bei medžių rūšis (Pinho et al., 2011; Giordani et al., 2014). Vis dėlto azoto depozicija išlieka vienu svarbiausių veiksnių, paaiškinančių šių organizmų gausumo skirtumus regioniniu mastu.

Mažėjant sieros dioksido emisijoms Europoje ir gerėjant oro kokybei, azoto junginių depozicija tapo svarbiausiu atmosferinės taršos komponentu, darančiu įtaką epifitinių organizmų bendrijoms (Sutton et al., 2011; Bobbink et al., 2010). Dėl šios priežasties epifitiniai dumbliai vis dažniau naudojami kartu su kerpėmis, samanomis ir spyglių cheminės sudėties analize integruotose oro kokybės monitoringo sistemose.

Naujausi tyrimai taip pat pabrėžia, kad klimato kaita gali keisti šių bioindikatorių reakciją. Šiltesnės žiemos, ilgesnis vegetacijos laikotarpis ir didesnė oro drėgmė gali skatinti

epifitinių dumblių augimą net ir mažėjant bendram azoto iškritų kiekiui, todėl interpretuojant bioindikacinius duomenis būtina kartu vertinti meteorologines sąlygas bei atmosferinės depozicijos rodiklius.

Apskritai galima teigti, kad *Pleurococcus vulgaris* (*Apatococcus lobatus*) ir *Protococcus viridis* išlieka patikimais ilgalaikės atmosferinės azoto taršos bioindikatoriais. Jų kolonijų gausumas ir išsivystymo intensyvumas gerai atspindi atmosferinės eutrofikacijos lygį ir gali būti sėkmingai taikomi kartu su kitais biologiniais bei cheminiais indikatoriais vertinant oro kokybės pokyčius ir jų poveikį miško ekosistemoms.

1993 m. Aukštaitijos ir Dzūkijos KMS, o 1994 Žemaitijos KMS uždaruose upelių baseinuose buvo įkurtos žaliųjų oro dumblių gausumo tyrimo stotys. 2018 m. žaliųjų oro dumblių gausumo tyrimai pakartoti aštuonioliktą kartą.

Darbo tikslas: tirti Plevelo genties dumblių gausumą ant eglių spyglių, tiesiogiai ir betarpiškai reaguojantį į oro užterštumą azoto junginiais.

Palyginus 1993 metų žaliojo oro dumblio paplitimo bei spyglių padengimo intensyvumo tarp atskirų KM stočių tyrimo rezultatus buvo nustatyta, kad labiausiai azoto junginiais turėjo būt užterštas Dzūkijos KMS teritorija. Aukštaitijoje ir Žemaitijoje užterštumas šiais junginiais buvo kiek mažesnis ir beveik nesiskyrė tarpusavyje.

1998 m. pakartojus žaliadumblių gausos tyrimus nustatyta, kad didžiausių gausumu žaliadumbliai pasižymi Aukštaitijos KMS teritorijoje, kas liudytų apie šios teritorijos didžiausią užterštumą azoto junginiais. Kiek mažesniu gausumu pasižymėjo žaliadumbliai Dzūkijos KMS teritorijoje ir mažiausiu gausumu - Žemaitijos KMS teritorijoje.

2005 m. tyrimų rezultatai rodo oro baseino mažiausią užterštumą azoto junginiais pagal žaliųjų oro dumblių gausą ant stebimų eglių spyglių. Nuo šio laikotarpio iki pastarųjų 2012 m. žaliųjų oro dumblių gausa indukuoja gan stabilų ir neženklų oro užterštumą azoto junginiais.

2005-2009 m. žaliųjų oro dumblių gausa Žemaitijos KMS dumblių tyrimo stotyje beveik du kartus viršijo dumblių gausą Aukštaitijos KMS. Parametrai indukuojantys padengimo intensyvumą Žemaitijos KM stotyje reikšmingai viršijo Aukštaitijos KMS dumblių tyrimo stotyje gautus parametrus. Tokiu būdu būtų galima teigti, kad žaliųjų oro dumblių gausos kaita indukuoja tą patį dėsningumą, kaip ir kiti rodikliai (medžių defoliacija, epifitinių kerpių gausa ir rūšinė įvairovė) – Žemaitijos KMS baseino foninis užterštumas didesnis negu Aukštaitijos KMS baseino, ką patvirtina ir oro bei kritulių tyrimo rezultatai.

2010-15 m. tyrimų rezultatai rodo, kad KMS baseinuose turėtų mažėti tarša azoto junginiais. Palyginus gautus rezultatus tarp stočių, aukštesnėmis azoto koncentracijomis ore turėtų pasižymėti Žemaitijos KMS. 2015 m. dumblių gausa šioje stotyje vėl padidėjo reikšmingai, lyginant su 2014 m. Aukštaitijos KMS 2015 m. padengimas dumblių mažėjo.

3.1 lentelė. Žaliųjų oro dumblių stebėjimo rezultatai KM stotyse

Eil. Nr.	D1,3 mm	H dm	Spyglių amžius 1,6 m aukštyje	Vid. defol. %	Apaug. dumbl. intensyvumas, balais	Apaug. dumbl. jauniaus. ūglio amžius	Ūglių amžius, m.	
							su 50% spygl	su 5% spygl
…..*	DBH	HEIG	ANF	DEF	COAT	YALG	MED	MAX
Aukštaitijos žaliųjų oro dumblių tyrimų stotis								
1993	132	100	10	5	1,0	2,9	6,7	9,7
1998	114	100	10	5	1,8	2,7	6,0	8,6
2001	129	110	10	5	1,7	2,5	6,0	8,5
2004	134	110	9	10	1,5	3	6,5	9,0
2005	140	115	8,5	15	1,0	2,6	6,1	8,0
2006	120	85	6,3	15	1,3	2,7	5,2	6,0
2007	124	90	6,5	15	1,8	2,0	5,3	6,0
2008	132	95	6,5	10	1,2	2,6	5,5	6,0
2009	139	100	6,0	10	1,1	2,4	5,1	5,5
2010	145	105	7,0	9,0	1,1	1,8	5,1	6.0
2011	148	125	7,4	7,5	1,0	2.4	5,8	6.5
2012	155	130	6,6	5,5	1,2	2,3	5,2	6,6
2013	157	135	6,1	6,3	1,0	2,1	4,5	6,1
2014	160	137	6,4	6,0	1,0	2,9	5,5	6,4
2015	165	140	7.5	5,0	1.1	2.5	4.4	7.1
2016	168	145	7,0	5,0	1,2	2,62	5,6	7,0
2017	170	150	7,1	5,0	1,1	2,75	5,8	6,8
2018	173	154	7,4	5,0	1,2	2,25	5,4	7,4
2019	175	159	7,8	7,2	1,2	2,8	5,4	7,8
2020	169	161	7.8	5,0	1,3	2,2	5,1	7,8
2025	169	161	8,0	5,0	1,1	3,4	5,6	7,6
Dzūkijos žaliųjų oro dumblių tyrimų stotis								
1993	95	86	8	11	2,1	3,1	5,0	8,0
1998	135	86	8	11	1,3	3,8	7,9	11,1
2025			8	10	2,0	2,0	6,3	7,8
Žemaitijos žaliųjų oro dumblių tyrimo stotis								
1994	65	55	9	8	1,0	3,0	5,3	9,0
1998	78	55	9	8	1,2	3,2	4,3	6,4
2001	127	85	10	5	1,5	2,5	5,1	8,1
2004	222	150	8,7	14,3	1,6	2,0	5,8	7,8
2005	222	150	8,4	15,7	2,0	2,0	5,2	7,4
2006	227	150	8,7	16,0	2,6	1,3	4,8	7,5
2007	230	160	8,5	12,5	2,3	1,5	5,8	7,4
2008	233	165	8,0	9,2	2,5	1,3	5,0	8,0
2009	238	170	7,7	8,3	2,3	1,8	5,5	7,5
2010	242	175	9,0	8,7	1,9	1,0	6,2	8,0
2011	245	180	8,7	12,5	2,0	1,8	6,2	7,7
2012	245	185	8,0	9,2	1,6	1,1	5,2	7,8
2013	249	187	8,3	7,5	1,28	1,7	6,1	8,0
2014	251	188	8,1	10,0	1,25	1,4	5,4	7,9
2015	255	190	7.2	8.5	1.71	1.8	5.8	7.0
2016	260	195	7,3	10,0	1,28	2,5	5,4	7,0
2017	265	200	6,6	8,0	1,29	2,7	5,3	6,5
2018	267	200	6,5	7,5	1,85	2,0	5,0	6,0
2019	270	220	7,2	8,0	2,0	2,1	5,4	7,1
2020	280	240	7,0	5.5	1,75	1,625	5,0	7,0
2025			7,0	6,5	1,3	2,4	5,1	6,5

Pastaba: * - parametrų sutrumpinimas pagal Manual of Integrated Monitoring, 1993

2016-2017 m. Aukštaitijos KMS stebimų eglių spyglių padengimas žaliaisiais oro dumbliais iš esmės nepakito. Kaip ir ankstesniais metais vyrauja labai silpnas padengimo intensyvumas. Žaliadumbiais padengiami vis senesni spygliai, o stebimų eglių būklė taip pat išlieka labai gera. Pagal šiuos rodiklius Aukštaitijos KMS oro baseino užterštumas azoto junginiais turėtų išlikti panašiame lygmenyje ar kiek tai mažėti, ką indikuotų paskutiniųjų 2017 m. duomenys. 2018 m. žaliųjų oro dumblių gausa ant eglių spyglių nežymiai padidėjo ir pasiekė 2012 m. ir 2016 m. lygį. Tai galėjo sąlygoti ir krituliai, nuo kurių kiekio tiesiogiai priklauso ir padengimo intensyvumas, t.y. gausūs krituliai fiziškai nuplauna žaliuosius dumblius nuo spyglių paviršiaus. Tačiau ***pasikartojančios sausros neturėjo esminės įtakos žaliųjų oro dumblių gausos padidėjimui paskutiniaisiais 2019 m. Pasitvirtino teiginys, kad šiltėjantis klimatas, dėl organinių junginių skaldimosi intensyvumo skatinimo, mažina aplinkos užterštumą N junginiais. Jauniausio eglės ūglio amžius Aukštaitijos KMS 2019 m. padidėjo vidutiniškai iki 2,8 m., kas rodo mažėjantį oro baseino užterštumą šiais junginiais.***

Gauti tyrimų rezultatai Žemaitijos KMS rodo, kad stabilų oro užterštumas azoto junginiais foną. Pagrindinis rodiklis indikuojantis tokią kaitą jauniausio ūglio amžius, kurio spygliai pradedami apaugti žaliaisiais oro dumbliais. 2017 m. tokio ūglio vidutinis amžius turėjo tendenciją didėti. Tai mažiau teršiamo N junginiais oro baseino būklė.

2018 m. Žemaitijos KMS gauti analogiški rezultatai, kaip ir Aukštaitijos KMS baseine – žaliųjų oro dumblių gausa ant eglių spyglių padidėjo, o šioje stotyje ir pakankamai reikšmingai. Panašus gausumas buvo registruojamas 2015 m. Tai dar kartą parodo, kad sausra didina spyglių padengimą žaliaisiais dumbliais. 2019 m. žaliųjų oro dumblių gausa Žemaitijos kMS didėjo, ir priešingai negu Aukštaitijos KMS, indikavo didėjanti oro baseino užterštumą N junginiais.

2020 metais registruoti du priešingi procesai žaliųjų oro dublių gausos rezultatuose. Aukštaitijos KMS nustatytas nor sir neženklus šių dumbių gausos padidėjimas, koks buvo registruojamas dar 2006 – 2007 m. Žemaitijos KMS žaliųjų oro dublių gausos tyrimo stotyje nustatyta, kad šių dumblių gausa ant eglių spyglių sumažėjo. Didesni kritulių kiekiai galėjo turėti reikšmingos įtakos tokiam gausumo sumažėjimui, kadangi vienos didžiausių gausumo reikšmių buvo registruojama 2018 – 2019 m., kai Lietuvoje buvo registruojamos sausros, o 2017 m., pasižyminčiais ypatingai gausiais krituliais, žaliųjų oro dublių gausa buvo viena iš mažiausių per visą tiriamąjį laikotarpį.

2025 m. tyrimų rezultatai rodo, kad tirtų eglių spyglių amžius pastaraisiais metais pasiekė 8 m metų ribą, kuri buvo registruojama tik tyrimų pradžioje. Tirtų medžių vidutinė defoliacija siekė vos 5 %. Vieni didžiausi ūglių spygliuotumo parametrai taip pat indikuoja labai gerą tirtų eglių būklę.

Prie tokių sąlygų ir eglės reakcijų į aplinkos kaitą nustatyta, kad žaliųjų oro dumblių gausa 2025 m buvo arti savo minimalių reikšmių, o jauniausio ūglio amžius, ant kurio spyglių buvo registruojami žaliadumblių pradinės kolonijos viršijo 3 m. Tai didžiausia reikšmė per visą tiriamąjį laikotarpį, kas rodo, kas Aukštaitijos oro baseino užterštumas azoto junginiais taip pat turėtų būti mažiausias per visą tiriamąjį laikotarpį. Cheminių analizių rezultatai rodo, kad amonio jonų ir nitratų koncentracijos ore yra sumažėjusi, dėl ko bendro azoto koncentracija per paskutiniuosius 5rius metus yra sumažėjusi 10 %. Tokiu būdų žzliųjų oro dumblių gausos kaitos rezultatai gerai patvirtina oro cheminių rezultatų kaitą (1.5 skyrius).

Žemaitijos KMS tirtų eglių parametrai buvo taip pat vieni iš geresnių, o žaliųjų oro dubmblių gausa kiek tai didesnė negu Aukštaitijos KMS, bet mažesnė negu per paskutiniuosius 2018-2020 metus. Oro cheminių tyrimų rezultatai parodė, kad 2021-2025 m. amonio jonų ir nitratų koncentracijos buvo žemesnės negu 2015-2020 m. laikotarpiu, o bendro azoti koncentracijos paskutiniaisiais metais buvo mažesnės, bent tik iki 10% buvusio lygio. Išskirtiniai tik 2025 m. amonio koncentracijų ore rezultatai, kurie Žemaitijos KMS baseine ženkliai viršija paskutiniųjų 5rių metų vidurkį ir siekia 1 $\mu gN/m^3$.

Dzūkijos KMS tirtų eglių parametrai buvo prasčiausi lyginant su kitais dviejų stočių parametrais. Žaliųjų oro dumblių kolonijų gausa šiose stotyje taip pat buvo didžiausios, o ūglio amžius, kurio spygliai buvo padengti pirminėmis dumblių kolonijomis buvo mažiausias. Oro cheminių tyrimo rezultatų stoka neleido patvirtinti šios bioindikacinio parametro išvados.

Palyginus bendro azoto koncentracija tarp stočių, nustatyta, ***kad 2021-2025 m. vakarinis Lietuvos regionas yra intensyviau teršiamas šiuo junginio negu šiaurė rytinis regionas, informuodamas, kad pagrindinis taršos šaltinis yra tolimosios oro pernašos. Atnaujinus tyrimus Dzūkijos KMS, kitų metų ataskaitoje bus galimybė įvertinti tolimųjų oro teršalų pernašų poveikį žaliųjų oro dublių gausai visos Lietuvos mastu.***

Apibendrinus ilgalaikių epifitinių žaliųjų dumblių (*Pleurococcus vulgaris* (= *Apatococcus lobatus*) ir *Protococcus viridis*) tyrimo rezultatus nustatyta, kad jų gausa ant eglių spyglių yra jautrus atmosferos užterštumo azoto junginiais bioindikatorius ir gerai atspindi ilgalaikius oro kokybės pokyčius. Tyrimų pradžioje (1993–1998 m.) tarp integruoto monitoringo stočių nustatyti ryškūs regioniniai skirtumai, rodantys nevienodą azoto junginių apkrovą skirtinguose Lietuvos regionuose. Vėlesniu laikotarpiu dumblių gausos dinamika tapo stabilesnė ir daugeliu atvejų atitiko atmosferos cheminių tyrimų rezultatus.

Nuo 2005 m. visose tirtose stotyse stebėta bendra žaliųjų dumblių gausos mažėjimo arba stabilizacijos tendencija, rodanti mažėjančią oro taršą azoto junginiais. Tačiau atskirais metais registruoti trumpalaikiai dumblių gausos padidėjimai buvo susiję ne tik su atmosferos azoto koncentracijomis, bet ir su meteorologinėmis sąlygomis, ypač sausrų ir kritulių režimu. Sausros skatino didesnį spyglių padengimą dumbliais, o gausūs krituliai mažino jų gausą dėl kolonijų nuplovimo nuo spyglių paviršiaus.

2025 m. tyrimų rezultatai rodo, kad Aukštaitijos ir Žemaitijos integruoto monitoringo stotyse užfiksuota viena geriausių eglių fiziologinės būklės per visą stebėjimų laikotarpį būsena. Maža žaliųjų dumblių gausa, didelis spyglių išsilaikymo amžius ir labai maža medžių defoliacija sutapo su sumažėjusiomis amonio ir nitratų koncentracijomis atmosferoje bei maždaug 10 % sumažėjusia bendrojo azoto koncentracija ore. Tai patvirtina, kad epifitinių dumblių gausa patikimai atspindi ilgalaikius atmosferos azoto depozicijos pokyčius.

Dzūkijos integruoto monitoringo stotyje 2025 m. nustatyta didžiausia žaliųjų dumblių kolonijų gausa ir prasčiausi eglių būklės rodikliai, tačiau dėl cheminių oro tyrimų duomenų stokos šių bioindikacinių rezultatų tiesiogiai patvirtinti nebuvo galima. Vis dėlto regioniniai skirtumai leidžia manyti, kad atmosferos azoto apkrovos Lietuvoje išlieka nevienodos ir reikšmingą jų dalį lemia tolimosios oro teršalų pernašos, kurios pirmosios pasiekia pietvakarinę Lietuvos dalį.

Pagrindinės išvados

1. Ilgalaikiai 1993–2025 m. tyrimai patvirtino, kad epifitinių žaliųjų dumblių (*Pleurococcus vulgaris* (= *Apatococcus lobatus*) ir *Protococcus viridis*) gausa ant eglių spyglių yra patikimas atmosferos užterštumo azoto junginiais bioindikatorius.
2. Nuo 2005 m. visose integruoto monitoringo stotyse nustatyta bendra žaliųjų dumblių gausos mažėjimo arba stabilizacijos tendencija, rodanti ilgalaikį atmosferos azoto taršos mažėjimą.
3. Žaliųjų dumblių gausai reikšmingą įtaką darė ne tik azoto junginių koncentracijos atmosferoje, bet ir meteorologinės sąlygos. Sausros didino spyglių padengimą dumbliais, o gausūs krituliai mažino jų gausą, nuplaudami kolonijas nuo spyglių paviršiaus.
4. Bioindikaciniai rezultatai gerai sutapo su oro cheminių tyrimų duomenimis. Mažėjant amonio, nitratų ir bendrojo azoto koncentracijoms atmosferoje, mažėjo ir žaliųjų dumblių gausa bei ilgėjo spyglių amžius iki pirmųjų kolonijų susidarymo.
5. 2025 m. Aukštaitijos integruoto monitoringo stotyje nustatyta mažiausia žaliųjų dumblių gausa per visą stebėjimų laikotarpį, rodanti mažiausią atmosferos užterštumą azoto junginiais nuo tyrimų pradžios.

6. Žemaitijos integruoto monitoringo stotyje žaliųjų dumblių gausa išliko didesnė negu Aukštaitijoje, tačiau gerokai mažesnė nei 2018–2020 m., o tai atitinka pastaraisiais metais sumažėjusias azoto junginių koncentracijas ore.
7. Dzūkijos integruoto monitoringo stotyje nustatyta didžiausia žaliųjų dumblių gausa leidžia manyti apie didesnę atmosferos azoto apkrovą, tačiau šiai išvadai patvirtinti būtini nuoseklūs oro cheminės sudėties stebėjimai.
8. Tyrimai patvirtino, kad epifitinių žaliųjų dumblių stebėsena yra vertingas ilgalaikio integruoto miškų monitoringo komponentas, papildantis atmosferos cheminių matavimų rezultatus ir leidžiantis vertinti regioninius atmosferos azoto depozicijos pokyčius bei skirtingą tolimųjų oro teršalų pernašų poveikį Lietuvos miškų ekosistemoms.

2025 m. pietvakarinis ir vakarinis Lietuvos regionas yra intensyviau teršiamas šiuo junginio negu šiaurė rytinis regionas, informuodamas, kad pagrindinis taršos šaltinis yra tolimosios oro pernašos.

3.2. Epifitinių kerpių rūšinė įvairovė ir gausumas

Kamieno epifitai, o ypač kerpės, jautriau nei ant žemės paviršiaus augantys augalai, reaguoja į oro taršą. Kerpes žudančiai veikia sieros dvideginis SO_2, fluoro vandenilis HF, etilenas ir ozonas O_3 (James, 1973; De Wit, 1983). Laboratoriniais ir lauko bandymais patvirtinta, kad epifitinių kerpių bendrijos, kaip biomonitoriai, yra puikus daugelio teršalų stebėjimo objektas (Skye, 1979; Burton, 1986). Pagal epifitinių kerpių rūšinę įvairovę, jų gniužulų dydį ir būklę, atskirų jautrių ar tolerantiškų užterštumui kerpių rūšių buvimą, atsiradimą ar išnykimą ir pagal jų bendrijų sugebėjimą užimti didesnį plotą, sprendžiama apie oro užterštumo laipsnį ir aplinkoje vykstančius pokyčius. Silpnai išsivystę, pažeisti, bespalviai ar pajuodavę, maži ar žuvę epifitinių kerpių gniužulai dažniausiai parodo aplinkos užterštumą.

Epifitinės kerpės yra vieni jautriausių ir informatyviausių ilgalaikės oro kokybės bei miško ekosistemų būklės bioindikatorių. Kadangi jos neturi šaknų sistemos ir apsauginių audinių, vandenį bei mineralines medžiagas absorbuoja tiesiogiai iš atmosferos, todėl jų rūšinė sudėtis, gausumas ir fiziologinė būklė greitai reaguoja į atmosferos cheminės sudėties pokyčius (Brunialti & Frati, 2023). Dėl šių savybių epifitinės kerpės plačiai naudojamos vertinant sieros ir azoto junginių, pažemio ozono, sunkiųjų metalų bei kitų antropogeninės kilmės teršalų poveikį ekosistemoms (Paoli et al., 2023).

Per pastaruosius dešimtmečius, mažėjant sieros junginių emisijoms Europoje, pagrindiniu veiksniu, lemiančiu epifitinių kerpių bendrijų transformaciją, tapo reaktyviųjų azoto junginių (NH_3, NOx) depozicija. Tyrimai rodo, kad didėjanti azoto apkrova mažina oligotrofinių, rūgščią žievės terpę mėgstančių kerpių paplitimą, o skatina nitrofilinių rūšių plitimą (Manninen et al., 2023). Todėl acidofilinių ir nitrofilinių rūšių santykio pokyčiai šiuo metu laikomi vienu jautriausių ilgalaikio atmosferinio azoto poveikio rodiklių.

Tačiau šiuolaikinėse miško ekosistemose epifitinių kerpių bendrijų pokyčius lemia ne vien oro tarša, bet ir klimato kaita. Didėjanti temperatūra, kritulių režimo pokyčiai, dažnesnės sausros ir oro drėgmės sumažėjimas keičia kerpių hidratacijos laiką, fotosintezės aktyvumą ir konkurencinius santykius ant medžių kamienų. Dėl šios priežasties kerpių rūšinė įvairovė vis dažniau naudojama kaip integruotas atmosferos taršos ir klimato kaitos poveikio indikatorius (Brunialti & Frati, 2023).

Ilgalaikiai tyrimai parodė, kad kerpių bendrijų atsistatymas po oro kokybės pagerėjimo vyksta gana lėtai. Net ir ženkliai sumažėjus sieros junginių koncentracijoms, ankstesnė rūšinė sudėtis dažnai neatsikuria dėl išlikusios azoto apkrovos, pakitusios medžių žievės cheminės sudėties ir klimato sąlygų (Weldon & Grandin, 2021). Tai rodo, kad epifitinės kerpės integruoja ilgalaikį aplinkos poveikį ir atspindi ne tik esamą, bet ir istorinę ekosistemos apkrovą.

ICP Forests ilgalaikio monitoringo sistemoje epifitinių kerpių tyrimai yra svarbi integruoto miško būklės vertinimo dalis. Standartizuotas rūšinės sudėties, dažnumo ir gausumo nustatymas leidžia vertinti regioninius skirtumus bei ilgalaikius pokyčius, susiejant juos su atmosferos depozicija, meteorologinėmis sąlygomis, medžių lajų būkle ir medynų produktyvumu (ICP Forests, 2020).

Apibendrinant galima teigti, kad epifitinių kerpių rūšinė įvairovė ir gausumas yra kompleksinis miško ekosistemų aplinkos kokybės indikatorius. Jų bendrijų pokyčiai leidžia anksti identifikuoti atmosferos taršos, azoto eutrofikacijos ir klimato kaitos poveikį dar prieš aiškius medžių būklės ar produktyvumo pokyčius. Todėl ilgalaikis epifitinių kerpių monitoringas yra svarbi ankstyvojo perspėjimo priemonė vertinant borealinių ir hemiborealinių miškų stabilumą globalios kaitos sąlygomis.

Analizuojant epifitinių makro-kerpių rūšinę įvairovę ir gausumą, Lietuvoje augančios kerpės sugrupuotos pagal jautrumą teršalams. Atliekant surinktų duomenų analizę buvo atsižvelgiama į epifitinių kerpių jautrumą teršalams, pagal 10 balų Europos miškų kerpių skalę (Lichens as …, 1993):

1. Jautriausios užterštumui poleofobiškos kerpės - kerpių jautrumas - 5-7 balai:

* pilkoji laumagaurė *(Bryoria implexa (Hoffm.) Brodo & D. Hawksw.)*, tamsioji laumagaurė *(Bryoria fuscescens (Gyeln.) Brodo & D. Hawksw.)* ir kt.. - 6 balai;
* kedenės *(Usnea Wigg. em Ach. spp.)*, žalsvasis kežas *(Melanelia olivacea (L.) Essl.)* - 6 balai;
* sodinė briedragė *(Evernia prunastri (L.) Ach.)*, vamzdiškasis plynkežis *(Hypogymnia tubulosa (Schaer.) Havaas.)* - 5 balai;
* dulkėtoji ramalina *(Ramalina pollinaria (Westr.) Ach.)*, uosinė ramalina *(Ramalina fraxinea (L.) Ach.)*, miltuotoji ramalina *(Ramalina farinacea (L.) Ach.)* - 5 balai;

2. Vidutinės poleotolerancijos kerpės - kerpių jautrumas - 3-4 balai:

* sėleninė briedragė *(Pseudevernia furfuracea (L.) Zopf.)*, melsvoji kerpena *(Platismatia glauca (L.) W.L. Culb. & C.F. Culb.)*, žalsvoji kerpena *(Tuckermannopsis chlorophylla (Willd.) Hale (Cetraria chlorophylla (Willd. in Humb.) Vain.))*, pušinė kerpena *(Vulpicida pinastri (Scop.) J.-E. Mattsson & M.J. Lai.)* - 4 balai;
* vagotasis kežas *(Parmelia sulcata Taylor.)* - 3 balai;

3. Pakenčiančios užterštumą poleotolerantiškos kerpės - kerpių jautrumas - 1-2 balai:

* putlusis plynkežis *(Hypogymnia physodes (L.) Nyl.)*, neapibrėžtoji kežuotė *(Parmeliopsis ambigua (Wulfen.) Nyl.)* - 2 balai;
* sieninė geltonkerpė *(Xanthoria parietina (L.) Th. Fr.)*, daugiavaisė geltonkerpė *(Xanthoria polycarpa (Hoffm.) Th. Fr. ex Rieber)* - 1 balas.

Pirmieji kerpių tyrimai Aukštaitijos KMS atlikti 1993 m., o Žemaitijos KMS 1994 m. Kerpių tyrimo stotyje (KTS) medžių kerpėtumas įvertintas 60, 90, 120 ir 150 cm aukštyje nuo žemės paviršiaus ant medžių kamienų linijiniu metodu (Bräkenhelm, 1990) ir nustatyta jų rūšinė įvairovė. Krūmiškosioms kerpėms (kedenėms, sėleninei briedragei) išmatuotas maksimalaus plaušo ilgis. Pakartotinai tyrimai šiose stotyse atlikti 1996, 1999, 2002 ir 2005 m.

Aukštaitijos KMS KTS kerpės tirtos 140 metų. amžiaus pušyne. Čia rastos ir apmatuotos 4 epifitinių makrokerpių rūšys: putlusis plynkežis *(Hypogymnia physodes (L.) Nyl.),* sėleninė briedragė *(Pseudevernia furfuracea (L.) Zopf.),* neapibrėžtoji kežuotė *(Parmeliopsis ambigua (Wulfen) Nyl.)* ir šiurės genties kerpės *(Cladonia spp. (Hill.) Vain.)*. Žemaitijos KMS kerpės tirtos mišriame eglės-pušies medyne, kurį sudaro brandi eglių, brandi pušų ir kelios jaunesnių eglių kartos. Šiame tankiame, sudėtiniame medyne užregistruotos ir apmatuotos 3 kerpių rūšys: putlusis plynkežis *(Hypogymnia physodes (L.) Nyl.)*, melsvoji kerpena *(Platismatia glauca (L.) W.L. Culb. & C.F. Culb.)* ir šiurės genties kerpės *(Cladonia spp. (Hill.) Vain.)*.

Visose kerpių tyrimo ploteliuose ant pušų kamienų registruojama pakankamai poleotolerantiška SO_2 lapiškoji kerpė - putlusis plynkežis. Melsvoji kerpena jautriausia iš Aukštaitijoje ir Žemaitijoje nuolatos stebimų kerpių rūšių. Šių kerpių jautrumas - 4 balai.

Darbo rezultatai

1996 m. atlikta antroji epifitinių kerpių apskaita. Kai kurie šios apskaitos duomenys pateikiami 16 paveiksle. Aukštaitijos KMS užregistruotos 4 epifitinių makrokerpių rūšys: putlusis plynkežis, neapibrėžtoji kežuotė, šiurė ir sėleninė briedragė. Bendras Aukštaitijos KMS pušų kerpėtumas - 2,52 %. Putliuoju plynkežiu padengta tik 1,34 % pušų kamienų žievės (1993 metais buvo 1,78 %).

Žemaitijos KMS ant pušų ir eglių kamienų užregistruotos 3 epifitinių makrokerpių rūšys (po 3 ant pušų ir eglių medžių) - putlusis plynkežis, šiurė, melsvoji kerpena. Bendras Žemaitijos KMS pušų kerpėtumas - 7,68 %, eglių - 23,52 %. Putliuoju plynkežiu padengta tik 4,72 % pušų kamienų žievės (1994 metais buvo 4,79 %) ir 20,37 % eglių kamienų žievės (1994 metais buvo 20,92 %).

Taigi lyginant su pirma lichenometrine apskaita, absoliutūs padengimo kerpėmis skaičiai liko beveik nepakitę.

Trečios epifitinių kerpių gausumo apskaitos rezultatai rodė, kad labiausiai pušies kamienų kerpėtumas, kaip bendras taip ir putliuoju plynkežiu, padidėjo Žemaitijos KM stotyje, kiek mažiau Aukštaitijos ir mažiausiai Dzūkijos KM stotyje. 1999 m. naujų kerpių rūšių ant tirtų medžių nerasta.

2020 m. Aukštaitijos ir Žemaitijos KMS buvo atlikta 19-ta epifitinių kerpių rūšinės įvairovės, gausumo bei būklės apskaita kerpių tyrimo stotyje, bei pakartoti detalūs epifitinių kerpių rūšių įvairovės ir gausumo tyrimai visame baseine, įvertinat per 5 m laikotarpį užregistruotus pokyčius.

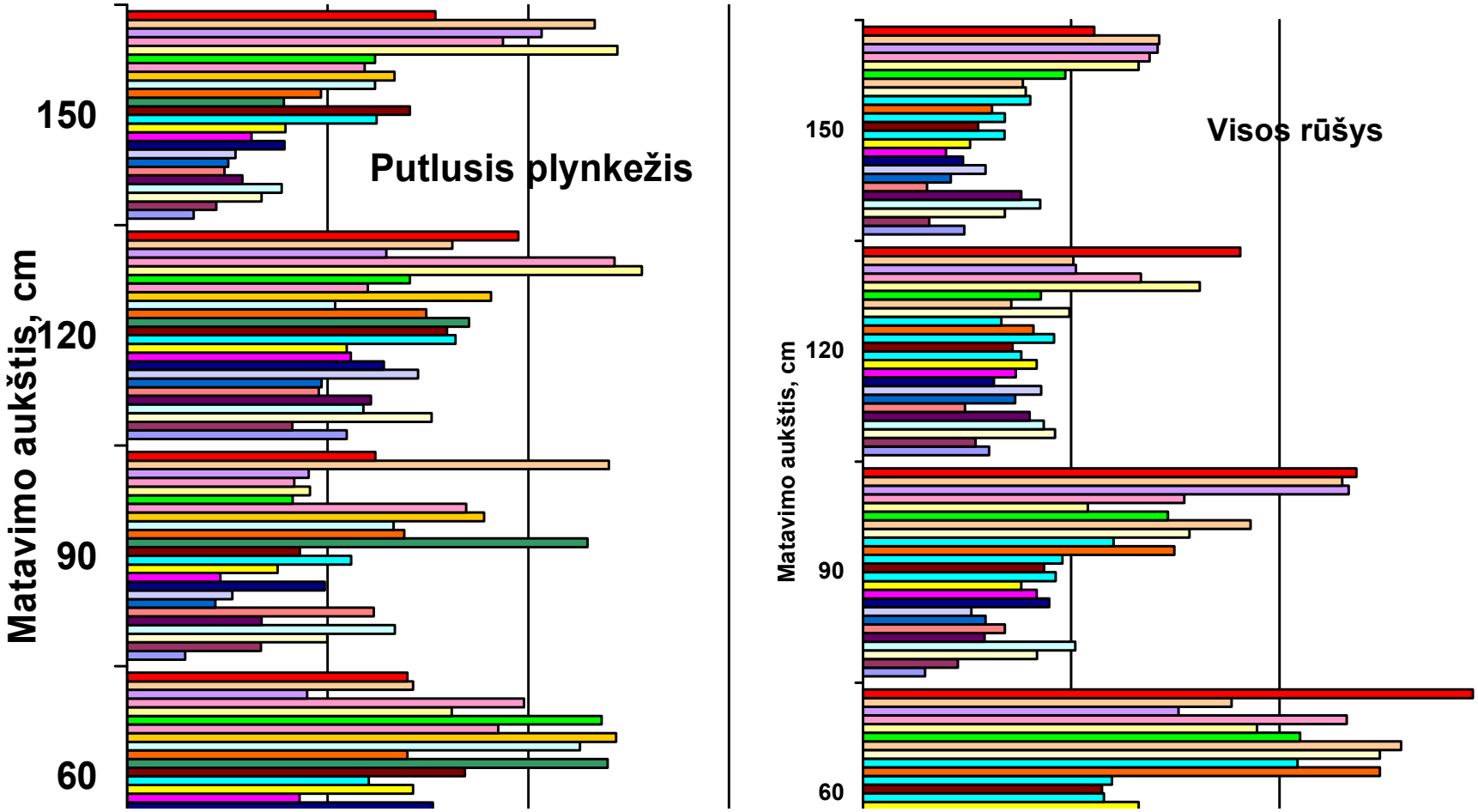
2025 m. atlikta 20-ta epifitinių kerpių rūšinės įvairovės, gausumo bei būklės apskaita kerpių tyrimo stotyje, bei trečią kartą pakartoti detalūs epifitinių kerpių rūšių įvairovės ir gausumo tyrimai visame baseine, įvertinat per 5 ir 10 m. laikotarpį užregistruotus pokyčius.

3.2.1. Epifitinių kerpių rūšinė įvairovė ir gausumas Aukštaitijos KMS kerpių tyrimo stotyje

2025 m. Aukštaitijos KMS kerpių tyrimo stotyje gauti epifitinių kerpių gausumo tyrimo rezultatai pateikti 3.1 paveiksle.

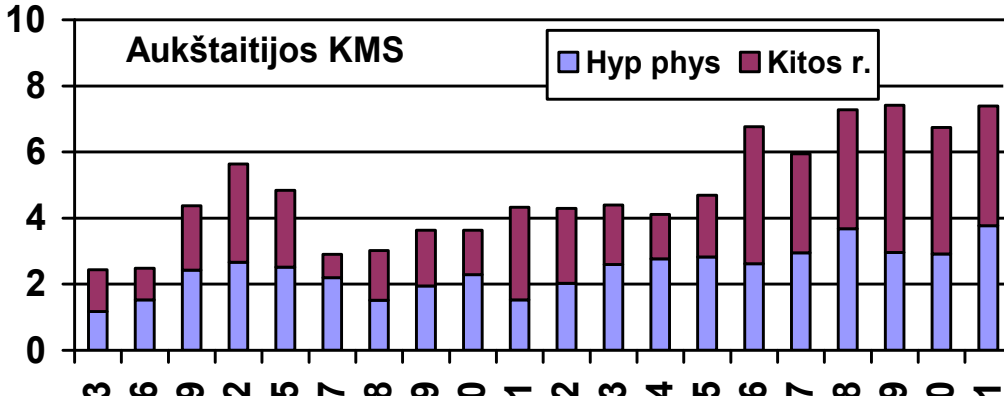
Iš pateiktų duomenų matyti, kad epifitinių kerpių bendras pušų kamienų padengimo intensyvumas jau daugelį metų praktiškai išlieka stabilus. ***2016-2019 m. padengimo procentas medžio kamieno apatiniuose lygmenyse išlieka stabilus, su tendencija didėti dėl Cladonia genties ir Parmeliopsis ambigua kerpių gausumo didėjimo.*** Aukštesniuose lygiuose, t.y. 120 ir 150 cm aukštyje stebėtų medžių kerpėtumas per visą stebėjimo laikotarpį iš esmės nesikeičia. 2016 m. kerpių padengimo intensyvumo ypač padidėjo apatiniuose stiebo lygmenyse, kur iki šiol išlieka viename iš didžiausių lygių per visą tiriamąjį laikotarpį. Nuo 2007 m. Aukščiausiame lygmenyje, t.y. 150 cm aukštyje registruojamas palaipsnis kamienų kerpėtumo didėjimas, kas indikuotų vis mažiau teršiamą aplinką sieros junginiais. 2018 m. išsiskyrė iš likusiųjų padidėjusiu tirtų medžių kamienų kerpėtumo laipsniu. Aukštaitijos KMS kerpėtumo intensyvumas 2018 m. išliko vienas didžiausių visuose matavimo aukščiuose ir tokį rezultatą sąlygojo kamienų padengimas putliuoju plynkėžiu. ***2019 m. pasikartojusi sausra neturėjo reikšmingos įtakos bendram kamienų kerpėtumo intensyvumo pokyčiui, nors padengimas putliuoju plynkežiu demonstravo tendenciją mažėti.***

2020 m. registruojamas neženklus epifitinių kerpių gausumo sumažėjimas. Įdomu pažymėti, kad toks sumažėjimas buvo registruotas ir išskirtinai drėgnais ir lietingais 2017 metais. Tokie rezultatai įgalina daryti išvada, kad gausūs krituliai gali sąlygoti gausumo sumažėjimą, ypač per pušies žiauberio plokštelių atsilupimą nuo kamieno ir nukritimą kartu su ant jų esančiomis kerpėmis.



3.1 pav. Pušies kamienų kerpėtumo (%) kaita Aukštaitijos KMS teritorijoje 1993-2025 m.

Tokiu būdu epifitinių kerpių kaitą mūsų manymu galėjo sąlygoti papildomai ir klimatinės sąlygos, kai po pakankamai sauso 2015 m. sezono sekė labai drėgni 2017 m., o po 2018-2019 m. sausrų drėgni 2020 m. Tačiau didžiausią įtaką kerpėtumo didėjimui galėjo turėti pagrindinis epifitinių kerpių gausumą reguliuojantis veiksnys, tai oro tarša azoto ir sieros junginiais, kuri pastaruoju laikotarpiu palaipsniui vis dar mažėja. Taip pat reikšmingą įtaką kerpėtumo didėjimui taip pat turėjo ir *Cladonia* genties kerpių gausa, kuri jau daugelį metų didėja.



3.2 pav. Pušies kamienų kerpėtumo (%) kaita Aukštaitijos KMS teritorijoje 1993-2025 m.

Putlusis plynkežis – vyraujanti epifitinės kerpė KMS baseinų miškuose

Antros pagal gausuma *Cladonia* genties kerpės, kurių gausa jau daugelį metų didėja

Epifitinių kerpių gausos tyrimų rezultatai 2025 m. rodo, kad Aukštaitijos KMS kerpių tyrimo stotyje, tirtų medžių kamienų kerpėtumas padidėjo ar išliko maksimaliame lygmenyje registruotą per visą tiriamąjį laikotarpį. Ypač kerpėtumas padidėjo 60 cm ir 1,2 m aukštyje. Vyraujančios kerpės: putliojo plynkėžio gausos rezultatai rodo kiek tai priešingą tendenciją. Šios kerpės gausa sumažėjo paminėtuose aukščiuose. Tokį rezultatą sąlygojo rūšių kaita. Putlųjį plynkėžį šiame aukštyje pradeda keisto Kladonios genties kerpės, kurių gausa priklauso ir nuo apšvietimo sumažėjimo, dėl gerėjančios medžių būklės, ir dėl gausėjančių kritulių, kurie didina oro santykinę drėgmę. Tokią kerpių kaitą gerai iliustruoja gauti rezultatai, pateikti 3.2 pav. Pateikti duomenys rodo, kad ***pastaraisiais metais tirtų medžių kerpįtumas pasiekė savo maksimalią reikšme per visą tiriamąjį laikotarpį, oro užterštumas sieros junginiais – mažiausią reikšmę.***

Apibendrinus paskutiniųjų metų tyrimo rezultatus, nustatyta, kad tokią epifitinių kerpių reakciją į aplinkos pasikeitimus pirmiausiai turėtų indikuoti vis mažesnis oro užterštumas N ir ypač S junginiais. ***Tokią epifitinių kerpių kaitą mūsų manymu galėjo sąlygoti papildomai ir klimatinės sąlygos, kai po pakankamai sauso 2015 m. sezono sekė labai drėgni 2017 m., o po 2018-2019 m. sausrų drėgni 2020 m.***

Nustatyta, kad 2015 m. nitratų srautas Aukštaitijos KMS sumažėjo nuo 2 kg/ha 2010 m. iki 1,5 kg/ha, o amonio – nuo 3 kg/ha iki 2 kg/ha. 2020 m. šis srautas iekė jau tik 1,3, o paskutiniuoju laikotarpiu dar labaiu mažėja ir 2025 m. sumažėjo jau iki 1,1 kgN/ha. Amonio srautas per tą patį laikotarpį ktio taip: iki 2015 m. mažėjo nuo 2,7-2,8 kg/ha iki 2,5 kg/ha, 2020 m. siekė 2,2 kg/ha ir paskutiniuoju laikotarpiu vėl padidėjo iki 2 kg/ha ribos, ką patvirtino ir oro chemijos tyrimų rezultatai.

Tokiu būdu apskaičiavus bendrą srautą buvo nustatyta, kad 2020 m. azoto srautui sumažėjus nuo 5 kg/ha iki 3,5 kg/ha epifitinių kerpių gausumas reikšmingai padidėjo. Tai būtų galima teigti, kad kritinis srautas lemiantis epifitinių kerpių reikšmingus pokyčius nitratams būtų apie 1,5 kg/ha, o amonio jonams – apie 2 kg/ha. Bendrai tai sudarytų apie 3-4 kg/ha. Paskutiniojo 2021-2025 m. laikotarpio rezultatai parodė, kad atskirų komponenčių srautas sudaro 1,4+2,2 kg/ha atitinkamai, arba 3,6 kgN/ha bendrai. Šiandieną kritinis N srautas yra 5 kg/ha. Gauti duomenys rodo, kad ši reikšmė jautriose miško ekosistemose turėtų būti mažesnė, t.y. iki 3 kg/ha., ką patvirtina pastarųjų metų tyrimai Skandinavijos šalyse. Viršijantys 3kg/ha srautas iš dalies patvirtina ankstesnę išvada. 2025 m. Aukštaitijos KMS nors ir registruotas vienas didžiausių epifitinių kerpių padengimo lygis, bet jautrių kerpių taršai padengimo lygis mažėjo. Šią kaitą patvirtina ir sulfatų srauti kaita Aukštaitijos KMS baseine.

Nustatyta, kad 2005-2010 m. sulfatų srautas Aukštaitijos KMS siekė apie 2,3-2,6 kgS/ha, 2015 m. jis sumažėjo iki maždaug 1,7, o 2018-2022 m. laikotarpiu net iki 1,5. ***Paskutiniųjų dviejų metų laikotarpiu (2024-2025) registruojamas ženklus sulfatų srauto padidėjimas Aukštaitijos KMS baseine, kuris pradėjo viršyti 2 kg/ha riba ir paskutiniaisiais metais siekia net 2,3 kg/ha. Panaši S komponenčių srautas buvo registruojamas 15 metų, t.y. 2005-2010 m. Tai nauja grėsmė sąlygiškai natūralioms miško ekosistemoms, kuri jau pradiniame etape pasireiškė puliojo plynkežio padengimo mažėjimų, bei kitų kerpių, ne tokių jautrų taršai, padengimo didėjimu.***

Apibendrinant galima teigti, kad Aukštaitijos KMS epifitinių kerpių bendrijų kaita atspindi kompleksinį miško ekosistemos atsaką į mažėjančią ilgalaikę atmosferos taršą ir besikeičiančias klimato sąlygas. Bendras kerpėtumo didėjimas rodo aplinkos kokybės gerėjimą, tačiau rūšinės sudėties pokyčiai ir pastarųjų metų sieros srauto didėjimas gali būti ankstyvas signalas apie naujus veiksnius, galinčius keisti sąlygiškai natūralių pušynų stabilumą.

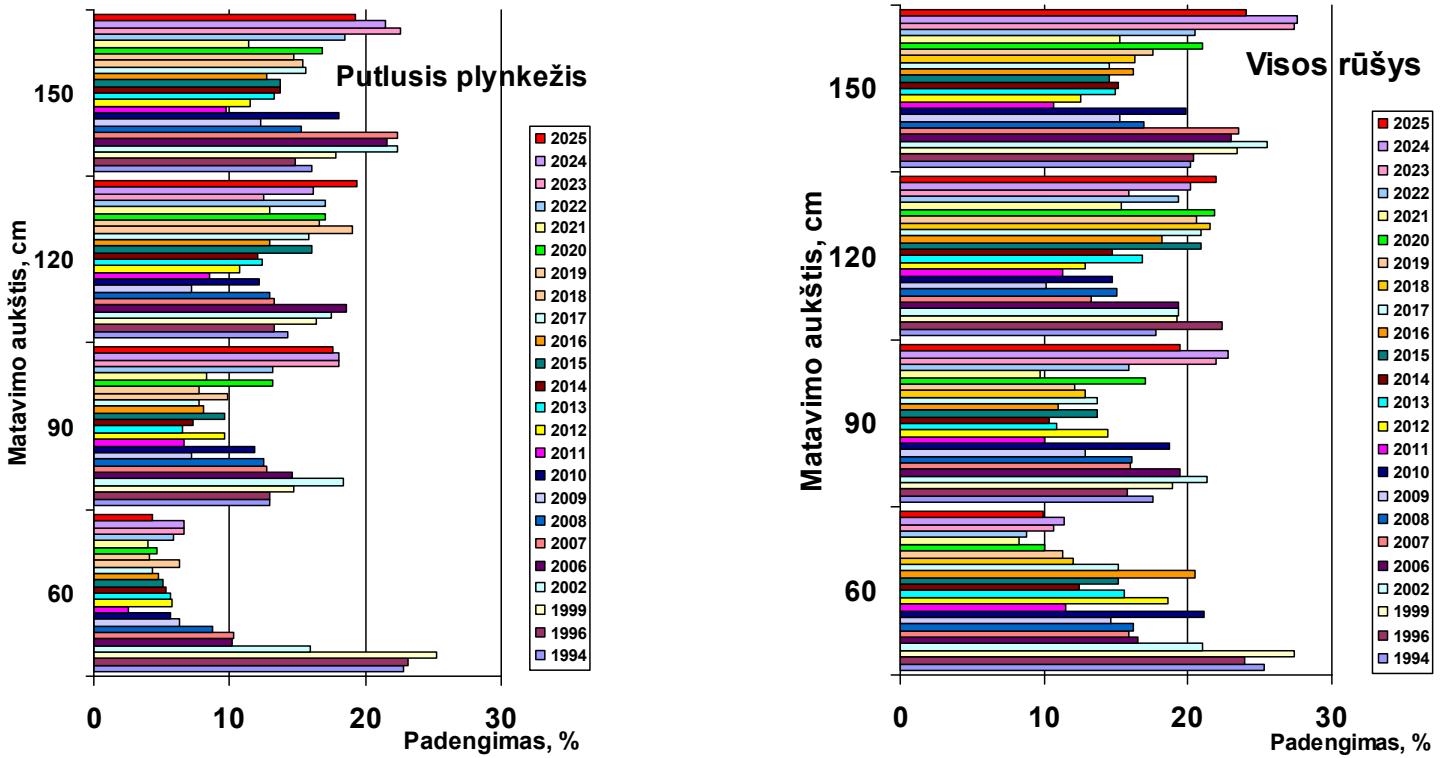
3.2.2. Epifitinių kerpių rūšinė įvairovė ir gausumas Žemaitijos KMS kerpių tyrimo stotyje

Žemaitijos KMS kerpių tyrimo stotyje gauti epifitinių kerpių gausumo apskaitos rezultatai pateikti 18 paveiksle. Iš pateiktų duomenų matyti, kad epifitinių kerpių gausumas ant atrinktų stebimų medžių per paskutinįjį laikotarpį turi tendenciją mažėti. Intensyviausiai šis procesas pasireiškė iki 2011 m. apatinėje stebo dalyje – 60 cm aukštyje. 2012-2013 m. padengimas epifitinėmis kerpėmis šiame aukštyje pradėjo didėti. Manome, kad pagrindinė priežastis buvo intensyvus medžių apledėjimas, kai daugelio medžių šakos lūžo nuo gausaus sniego ir ledo. Dideli nuokritų kiekiai už šį laikotarpį laidžia teigti, kad epifitinės kerpės daugelyje atveju buvo mechaniškai nubrauktos nuo tiriamų kamienų. 2014 m. lyginant su praėjusiaisiais metais tirtų medžių bendras padengimo epifitinėmis kerpėmis intensyvumas nepakito ar net turėjo mažėjimo tendenciją.

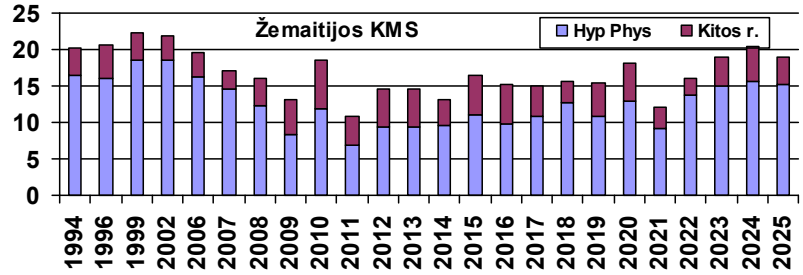
2018 m. bendras stebimų medžių kamienų kerpėtumas praktiškai išliko tame pačiame lygmenyje. Padengimo putliuoju plynkėžiu rezultatai rodo, kad šios kerpės dažnumas ant Žemaitijos KMS baseine augančių spygliuočių medžių rūšių kamienų iki 2011 m. turėjo tendenciją mažėti ypač apatiniuose matavimo lygmenyse. 120 ir 150 cm aukščių lygmenyse kerpėtumo sumažėjimas nebuvo toks ryškus.

2019 m. pasikartojančios sausros, atrodo, kad galėjo sąlygoti stebėtų medžių kerpėtumo mažėjimą Žemaitijos KMS, ypač aukštesniuose matavimų lygmenyse, t.y. 120 ir 150 cm aukščiuose. Bendro kerpėtumo duomenis indikuoja priešingą rezultatą – pasikartojančios sausros teigiamai sąlygojo padengimo intensyvumą aukštesniuose lygmenyse, ypač padengima Cladonia genties kerpėmis, o žemutiniuose lygmenyse sausros neigiamas poveikis akivaizdus. 60 cm aukštyje mažėja visų kerpių padengimo intensyvumas.

Kaip ir Aukštaitijos KMS, Žemaitijos KMS baseine epifitinių kerpių padengimo intensyvumas 2015-2019 m. laikotarpiu yra kiek tai padidėjęs lyginant su 2009-2014 m. laikotarpiu, bet praktiškai stabilus, kas indikuotų ir mažai kintantį oro baseino užterštumo sieros junginiais lygmenį ir skirtingas epifitinių kerpių reakcijas į sausras. Išsiskiria tik didėjanti putliojo plynkėžiu gausa (iki 2020 m.) indikuojanti mažėjančią aplinkos taršą azoto ir sieros junginiais. ***2020 m. epifitinių kerpių gausumas Žemaitijos KMS padidėjo, tiek putliuoju plynkėžiu, tiek ir kitų registruotų kerpių. Pagal matavimo aukštį matyti, kad kiek tai mažėja gausumas žemiausiame 60 cm lygmenyje, o didėja aukštesniuose lygmenyse ir ypač 150 cm aukštyje.***



3.3 pav. Medžių kamienų kerpėtumas (%) Žemaitijos KMS teritorijoje 1994-2025 m.



3.4 pav. Medžių kamienų kerpėtumas (%) Žemaitijos KMS teritorijoje 1994-2025 m.

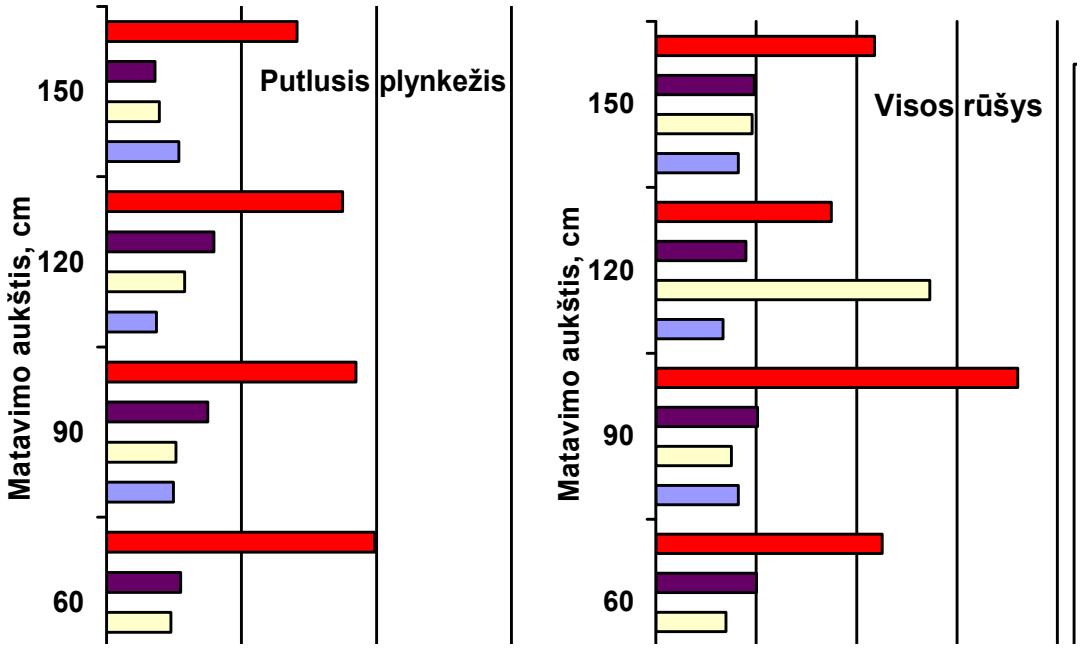
Epifitinių kerpių gausos tyrimų rezultatai 2025 m. rodo, kad Žemaitijos KMS kerpių tyrimo stotyje, tirtų medžių kamienų kerpėtumas iš esmės nepakito ir liko 2020 m. lygmenyje.

Vyraujančios kerpės: putliojo plynkėžio gausos rezultatai rodo panašią tendenciją, kas indikuotų kad per pastarųjų 2021-2025 m. laikotarpį iš esmės nepakito ir oro užterštumas N ir S komponentėmis, bei iš esmės nepakito ir jų srautai į miško paklotę**. *Oro chemijos rezultatai rodo, kad per šį laikotarpį S srautas padidėjo nuo 1,5 iki 2 kg S/ha, Amonio praktišai išliko stabilus, o nitratų skirtingai negu Aukštaitijos KMS padidėjo nuo 2 iki 2,5 kg/ha, Kas bendroje sumoje sudarytų bendro azoto nuo 4 iki 4,5 kgN/ha, kas rodytų, kad N srautas jau pradeda artėti prie savo kritinis reikšmės miško ekosistemoms.*** Ar tokia koncentracija galėjo reikšmingai sąlygoti epifitinių kerpių rūšių įvairovę ir gausą buvo atsakyta kitame skyriuje, kuriame pateikti detalūs visame baseine augančių kerpių tyrimo rezultatai.

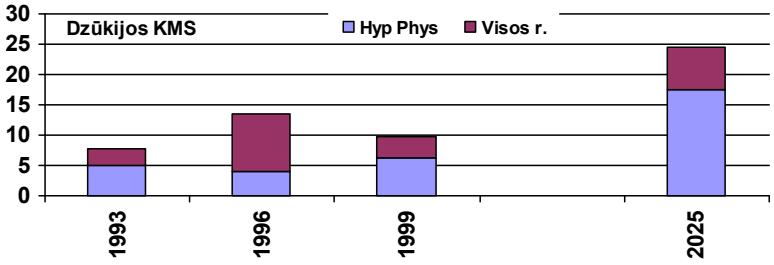
Apibendrinant galima teigti, kad Žemaitijos KMS epifitinių kerpių bendrijų būklė rodo ilgalaikį aplinkos kokybės pagerėjimą po ankstesnio taršos sumažėjimo, tačiau pastaruoju laikotarpiu sistema pereina į stabilizacijos etapą. Didėjantys sieros ir nitratinio azoto srautai bei dažnėjantys klimato ekstremumai gali tapti pagrindiniais veiksniais, ribojančiais tolesnį kerpių įvairovės ir jautrių rūšių gausėjimą.

3.2.3. Epifitinių kerpių rūšinė įvairovė ir gausumas Dzūkijos KMS kerpių tyrimo stotyje

Lichenologiniams baseinų miškuose tyrimams buvo naudojamos tik makrokerpės – tiek lapiškosios tiek ir krūmiškosios. Kerpių nomenklatūrai naudotas J. Motiejūnaitės leidinys (2002). Buvo tirtos visos epifitinių ir epiksilinių makrokerpių rūšys, augančios ant įvairių substratų – tiek ant žalių medžių, tiek ant negyvos medienos. Rūšių kiekybiniam įvertinimui buvo naudojami 2 rodikliai: rūšinė įvairovė (skirtingų rūšių skaičius barelyje) ir gausa (substratų, ant kurių augo rūšys, skaičius barelyje). Tyrimai vykdyti 2020 m. liepos-rugpjūčio mėn.



3.5 pav. Pušies kamienų kerpėtumo (%) kaita Dzūkijos KMS teritorijoje 1993-2025 m.



3.6 pav. Medžių kamienų kerpėtumas (%) dzūkijos KMS teritorijoje 1994-2025 m.

2025 m. pakartoti epifitinių kerpių tyrimai Dzūkijos KMS kerpių tyrimo stotyje parodė reikšmingai padidėjusį kerpėtumą tiek vyraujančių pultliuoju plykėžiu, tirk ir bendrą visų rūšių suminį kerpėtumą. Trūkstant duomenų apir oro tarša ir rūgštinančių komponenčių srautus, šioje ataskaitoje dar nėra pateikiama šių gautų rezultatų bioindikacinė vertė.

Atsižvelgiant į kitose KMS nustatytus dėsningumus, tikėtina, kad Dzūkijos KMS kerpių gausėjimą galėjo lemti keli kartu veikiantys veiksniai: ilgalaikis atmosferos sieros junginių mažėjimas regione, santykinai mažesnė antropogeninė apkrova bei klimato sąlygų pokyčiai, ypač didesnė oro drėgmė palankiais laikotarpiais. Be to, Dzūkijos pušynams būdingos

oligotrofinės augavietės ir mažesnis medynų tankumas sudaro palankias apšvietimo sąlygas daugeliui epifitinių kerpių rūšių.

Tačiau, skirtingai nei Aukštaitijos ir Žemaitijos KMS, šiuo metu Dzūkijos KMS kerpių pokyčių bioindikacinis vertinimas yra ribotas dėl nepakankamų duomenų apie atmosferos cheminės sudėties pokyčius ir rūgštinančių bei eutrofikuojančių junginių srautus į miško ekosistemą. Todėl nustatyto kerpėtumo didėjimo negalima vienareikšmiškai susieti tik su oro taršos mažėjimu.

Apibendrinant galima teigti, kad 2025 m. Dzūkijos KMS nustatytas epifitinių kerpių gausumo didėjimas yra teigiamas miško ekosistemos būklės indikatorius, rodantis gerėjančias sąlygas jautrioms epifitinėms rūšims. Ateityje, integravus atmosferos depozicijos, klimato ir medynų būklės duomenis, šie tyrimai leis tiksliau įvertinti pagrindinius veiksnius, lemiančius kerpių bendrijų kaitą pietryčių Lietuvos pušynų ekosistemose.

Epifitinių kerpių būklės ir kaitos palyginimas Aukštaitijos, Žemaitijos ir Dzūkijos KMS parodė, kad pifitinių kerpių rūšinė sudėtis ir gausumas jautriai atspindi tiek atmosferinės taršos pokyčius, tiek ir kintančias klimato sąlygas. Nepaisant regioninių skirtumų, visose tirtose KMS pastaraisiais metais nustatyta bendra epifitinių kerpių būklės gerėjimo tendencija, tačiau šio proceso intensyvumas ir jį lemiantys veiksniai skiriasi.

Ryškiausi teigiami pokyčiai nustatyti Aukštaitijos KMS, kur epifitinių kerpių padengimas 2025 m. pasiekė didžiausias reikšmes per visą stebėjimų laikotarpį. Kerpėtumo didėjimas pasireiškė visuose kamieno lygmenyse, ypač 60–120 cm aukštyje. Ši tendencija sutapo su ilgalaikiu sieros ir azoto junginių srautų mažėjimu, todėl galima teigti, kad Aukštaitijos KMS kerpių bendrijos aktyviausiai reagavo į oro kokybės gerėjimą. Ypač svarbus veiksnys buvo mineralinio azoto srauto sumažėjimas iki maždaug 3–4 kg N ha^{-1} per metus, kas galėjo sudaryti sąlygas jautresnių epifitinių rūšių atsistatymui.

Žemaitijos KMS epifitinių kerpių pokyčiai buvo mažiau išreikšti. Po ankstesnio gausumo sumažėjimo 2015–2020 m. laikotarpiu nustatytas dalinis kerpėtumo atsistatymas, tačiau 2021–2025 m. laikotarpiu jų gausumas iš esmės stabilizavosi. Skirtingai nei Aukštaitijoje, Žemaitijoje pastaraisiais metais registruotas nitratinio azoto ir sieros srautų didėjimas. Bendras mineralinio azoto srautas pasiekė apie 4–4,5 kg N ha^{-1} per metus, todėl galima manyti, kad ši ekosistema artėja prie ribinės apkrovos, kuri gali riboti tolesnį jautrių epifitinių kerpių plitimą.

Dzūkijos KMS, nepaisant trumpesnės tyrimų sekos, 2025 m. nustatytas aiškus epifitinių kerpių gausumo didėjimas. Padidėjo tiek bendras kerpėtumas, tiek putliojo plynkėžio (*Hypogymnia physodes*) padengimas. Tai rodo palankias sąlygas epifitinių kerpių vystymuisi oligotrofinėse pietryčių Lietuvos pušynų ekosistemose. Tikėtina, kad šią kaitą galėjo skatinti

mažesnė regioninė atmosferinė apkrova, geresnės apšvietimo sąlygos ir klimatiniai veiksniai, tačiau dėl ribotų depozicijos duomenų priežastiniai ryšiai dar turi būti patikslinti.

Visų KMS rezultatai taip pat parodė, kad klimato veiksniai tampa vis svarbesniu epifitinių kerpių bendrijų reguliatoriumi. Drėgnesni laikotarpiai po sausrų gali skatinti kerpių gausėjimą dėl ilgesnio fiziologinio aktyvumo periodo, tačiau ekstremalūs reiškiniai (sausros, stiprus kritulių poveikis, apledėjimas, žievės plokštelių atsiskyrimas) gali sukelti trumpalaikius kerpių dangos sumažėjimus.

Svarbus pastarųjų metų rezultatas yra nustatyta rūšinės sudėties kaita. Kai kuriose stotyse, ypač Aukštaitijos KMS, bendras kerpėtumas didėja, tačiau jautrių rūšių, tokių kaip putlusis plynkėžis (*Hypogymnia physodes*), dalis pradeda mažėti, o santykinai gausėja *Cladonia* genties rūšys. Tai rodo, kad bendras kerpių padengimo didėjimas ne visada reiškia vienareikšmį ekosistemos atsistatymą – rūšinė sudėtis gali jautriau atspindėti naujus aplinkos pokyčius.

Pagrindinės išvados

1. Per ilgalaikį stebėjimų laikotarpį visose KMS nustatytas epifitinių kerpių būklės pagerėjimas, rodantis bendrą atmosferos kokybės gerėjimą dėl sumažėjusios sieros ir azoto junginių apkrovos.
2. Didžiausias teigiamas atsakas nustatytas Aukštaitijos KMS, kur kerpių padengimas 2025 m. pasiekė maksimalų lygį per visą tyrimų laikotarpį.
3. Žemaitijos KMS epifitinių kerpių bendrijos perėjo į stabilizacijos fazę, o didėjantys azoto (iki 4–4,5 kg N ha^{-1}) ir sieros srautai gali riboti tolesnį jautrių rūšių atsistatymą.
4. Dzūkijos KMS kerpių gausėjimas patvirtina gerėjančias sąlygas oligotrofinėse pušynų ekosistemose, tačiau galutinė bioindikacinė interpretacija reikalauja papildomų atmosferinės depozicijos duomenų.
5. Tyrimų rezultatai leidžia manyti, kad jautriose Lietuvos hemiborealinėse miško ekosistemose azoto kritinė apkrova epifitinėms kerpėms gali būti mažesnė nei šiuo metu taikoma 5 kg N ha^{-1} riba ir artimesnė 3–4 kg N ha^{-1} per metus.
6. Ateityje pagrindine grėsme epifitinių kerpių bendrijoms gali tapti ne vien tradicinė oro tarša, bet ir kompleksinis azoto depozicijos, sieros srautų atsinaujinimo bei klimato ekstremumų poveikis.

Apibendrinus epifitinių kerpių tyrimų rezultatus galima teigti, kad ilgalaikis atmosferos taršos sieros ir azoto junginiais mažėjimas sudarė palankias sąlygas kerpių bendrijų atsiskūrimui ir gausumo didėjimui, tačiau pastaraisiais metais ryškėjanti rūšinės sudėties kaita, didėjantys rūgštinančių junginių srautai kai kuriuose regionuose bei klimato ekstremumų poveikis gali tapti naujais veiksniais, ribojančiais jautriausių epifitinių rūšių išlikimą hemiborealiniuose miškuose.

3.2.4. Makrokerpių įvairovė ir gausa KM stočių baseinų miško ekosistemose 2015-2025 m.

Lichenologiniams tyrimams buvo naudojamos tik makrokerpės – tiek lapiškosios tiek ir krūmiškosios. Kerpių nomenklatūrai naudotas J. Motiejūnaitės leidinys (2002), pakoreguojant atnaujintus rūšių pavadinimus pagal Index Fungorum duomenų bazę (https://www.indexfungorum.org/). Buvo tirtos visos epifitinių, epigeidinių ir epiksilinių makrokerpių rūšys, augančios ant įvairių substratų – tiek ant žalių medžių, tiek ant negyvos m, tiek ant žemės augančios. Rūšių kiekybiniam įvertinimui buvo naudojami 2 rodikliai: rūšinė įvairovė (skirtingų rūšių skaičius barelyje) ir gausa (substratų, ant kurių augo rūšys, skaičius barelyje). Epigeidinių kerpių atveju nustatant gausą, buvo įvertinamas padengimo plotas. Tyrimai vykdyti 2025 m. liepos-rugsėjo mėn. Tyrimus atliko VDU dt. Žydrūnas Preikša.

Kerpės tirtos 3 tyrimo vietose – Aukštaitijos nacionaliniame parke esančioje Ažvinčių sengirės rezervatinėje zonoje (49 bareliuose), Žemaitijos nacionaliniame parke esančioje Plokštinės rezervatinėje zonoje (35 bareliuose) ir Dzūkijos nacionaliniame parke (52 bareliuose). Skritulinių barelių dydis – 0,125 ha. Bareliai buvo išvaikščiojami pilnai. Lauko tyrimų metu nenustatytų kerpių pavyzdžiai buvo paimti rūšies identifikavimui laboratorinėmis sąlygomis panaudojant optinius didinimo prietaisus ir cheminius reagentus. Kerpių gausa įvertinta kiekvienam bareliui atskirai, naudojant sekančią gausumo skalę: 1 – pavieniai rūšies fiksavimo atvejai (1-2 subtrato vienetai), 2 – rūšis barelyje sutikta auganti ant 3-6 substrato vienetų; 3 – rūšis augo ant 7-10 substrato vienetų ir 4 – rūšis barelyje augo gausiai (virš 10 substrato vienetų). Epigeidinėms rūšims naudojama sekanti gausos įvertinimo skalė: 1 – pavieniai rūšies fiksavimo atvejai, 2 – rūšis barelyje sutikta augant iki 5% barelio ploto; 3 – rūšis barelyje sutikta augant iki 6-25% barelio ploto ir 4 – rūšis barelyje sutikta augant daugiau nei 25% barelio ploto.

Rūšies dažnumui teritorijoje nustatyti buvo naudojamas aptikimo dažnio rodiklis, parodantis kiek procentų barelių rūšis buvo aptikta. Rūšių sąsajoms su įvairiais rodikliais buvo naudojama RDA (Redundancys Analysis) analizė.

Aukštaitijos KMS baseino lichenologiniai tyrimai.

Tyrimų metu 2025 m. viso buvo nustatytos 35 makrokerpių rūšys. Ažvinčių sengirės rezervate nustatytos 23 makrokerpių rūšys (1 lentelė), o Plokštinės rezervate – 22 (2 lentelė), Dzūkijos nacionaliniame parke – 27 rūšys (3 lentelė). Ažvinčių teritorijoje buvo rastos 5 unikalios rūšys, kurios nebuvo aptiktos kitur: *Bryoria fuscescens*, *Cladonia norwegica*, *Peltigera rufescens, Usnea filipendula, Usnea subfloridana*. Plokštinėje rastos 3 unikalios rūšys: *Parmelia saxatilis, Peltigera neckeri* ir *Physcia tenella.* Dzūkijoje rastos net 9 unikalios rūšys: *Cladonia*

arbuscula, Cladonia polydactyla, Cladonia pyxidata, Cladonia rangiferina, Cladonia subulata, Imshaugia aleurites, Melanohalea *exasperata,* Melanelixia *fuliginosa* ir *Xantoria parietina.* Saugomų rūšių, įtrauktų į Lietuvos raudonąją knygą nei vienoje teritorijoje nebuvo užfiksuota. Iš retų, sengirių specializuotų rūšių, užfiksuota vienintelė norveginė šiurė *Cladonia norvegica*, negausiai auganti Aukštaitijos teritorijose.

3.2 lentelė. Kerpių rūšinė įvairovė ir gausa Aukštaitijos KMS

Rūšis	Akronimas	Aptikimo dažnis, %			Vidutinė gausa, balais		
		2015	2020	2025	2015	2020	2025
Bryoria capillaris	Bry cap	48	75	76	0,80	1,51	1,59
Bryoria fuscescens	Bry fus	2	8	2	0,05	0,08	0,02
Cetraria sepincola	Cet sep	5			0,05		
Cladonia cenotea	Cla cen	14	6		0,21	0,06	
Cladonia chlorophaea s.l.	Cla chl	43	20		0,48	0,2	
Cladonia coniocraea	Cla con	80	71	51	1,39	1,12	0,59
Cladonia cornuta	Cla cor	68	75	80	1,27	1,12	1,37
Cladonia digitata	Cla dig	59	37	14	1,21	0,47	0,14
Cladonia fimbriata	Cla fim		43	43		0,49	0,45
Cladonia macilenta	Cla mac		2	6		0,02	0,06
Cladonia norvegica	Cla nor	7	2	4	0,07	0,02	0,04
Cladonia ochrochlora	Cla och	5	2	4	0,07	0,02	0,04
Evernia prunastri	Eve pru	25	16	12	0,25	0,16	0,12
Hypogymnia physodes	Hyp phy	100	100	100	4,00	3,75	3,92
Hypogymnia tubulosa	Hyp tub	98	78	18	1,82	1,69	0,18
KMShaugia aleurites	KMS ale	7			0,07		
Melanohalea exasperatula	Mel exa	11	4	2	0,11	0,04	0,04
Melanelixia fuliginosa	Mel ful	5	10		0,05	0,1	
Melanelia olivacea	Mel oli	7			0,09		
Parmelia sulcata	Par sul	82	84	80	1,30	1,26	0,96
Parmeliopsis ambigua	Par amb	68	67	69	1,11	0,86	0,82
Peltigera rufescens	Pel ruf	2	2	4	0,02	0,02	0,04
Physcia tenella	Phy ten	5	6		0,05	0,06	
Physconia enteroxantha	Phy ent		2			0,02	
Platismatia glauca	Pla gla	98	100	100	3,59	3,65	3,31
Pseudevernia furfuracea	Pse fur	98	96	98	2,41	1,96	2,39
Ramalina farinacea	Ram far			2			0,02
Tuckermanopsis chlorophylla	Tuc chl	25			0,25		
Usnea filipendula	Usn fil	25	31	10	0,27	0,49	0,20
Usena hirta	Usn hir	9	29	12	0,09	0,31	0,29
Usnea subfloridana	Usn sub	39	14	11	0,50	0,14	0,29
Vulpicida pinastri	Vul pin	14	31	6	0,23	0,45	0,16
Xantoria parietina	Xan par	16			0,18		

Lyginant Ažvinčių sengirėje 2025 m. rezultatus su 2015 ir 2020 m. vykdytais tyrimais, matyti, kad 10 rūšių 2025 m. jau nebeaptiktos, tačiau 1 rūšis rasta nauja (1 lentelė). Tarp didžiausių pasikeitimų galima paminėti *Cladonia cenotea, Melanelixia fuliginosa, Physcia tenella* neaptikimą 2025 m., nors 2015 ir 2020 m. jos buvo rastos ne viename barelyje nors ir labai negausiai (0,06-0,21 balo gausa). *Cladonia chlorophaea* s.l. neradimas 2025 m. gali būti paaiškinamas identifikavimo netikslumais ankstesniais metais, nes rūšies kompleksas yra gana

sudėtingas identifikuoti iki rūšies. Kiti rūšinės sudėties pasikeitimai yra labiau suprantami, nes neaptiktos ar naujai aptiktos rūšys buvo sutinkamos labai retai su labai nedideliu gausumu, todėl visada yra tikimybė jų neužfiksuoti per pakankamai trumpą laiką tiriant konkretų barelį.

Lyginant rūšių aptikimo dažnumo pokyčius, labiausiai išsiskiria *Usnea* visų rūšių, *Hypogymnia tubulosa* ir *Vulpicida pinastri* sumažėjimas. Tuo tarpu ryškaus pagausėjimo nenustatyta jokios rūšies. Kitų rūšių tarpe aptinkamumo bareliuose didesnių pokyčių nepastebėta.

3.3 lentelė. Kerpių rūšinė įvairovė ir gausa Plokštinės rezervate

Rūšis	**Akronimas**	**Aptikimo dažnis, %**		**Vidutinė gausa, balais**	
		2015	**2020**	**2015**	**2020**
Bryoria capillaris	Bry cap	18	40	0,21	0,46
Bryoria fuscescens	Bry fus	12		0,18	
Cladonia cenotea	Cla cen		3		0,03
Cladonia chlorophaea s.l.	Cla chl	55	26	0,79	0,46
Cladonia coniocraea	Cla con	79	86	1,46	1,97
Cladonia cornuta	Cla cor	97	74	2,52	1,37
Cladonia digitata	Cla dig	52	49	1,15	1,06
Cladonia fimbriata	Cla fim	3	46	0,06	0,66
Cladonia macilenta	Cla mac	6	6	0,12	0,06
Cladonia norvegica	Cla nor	3	3	0,03	0,03
Cladonia ochrochlora	Cla och	15	3	0,21	0,06
Cladonia subulata	Cla sub	6		0,06	
Evernia prunastri	Eve pru	3	20	0,03	0,2
Hypogymnia physodes	Hyp phy	100	97	4,00	3,86
Hypogymnia tubulosa	Hyp tub	48	63	0,64	1,09
KMShaugia aleurites	KMS ale	3		0,03	
Melanohalea exasperatula	Mel exa	12	26	0,15	0,26
Melanelixia fuliginosa	Mel ful	3	3	0,03	0,03
Parmelia saxatilis	Par sax	21	49	0,24	0,54
Parmelia sulcata	Par sul	21	37	0,27	0,57
Parmeliopsis ambigua	Par amb	45	46	0,88	0,66
Peltigera membranacea	Pel mem		3		0,03
Peltigera neckeri	Pel nec	3	3	0,03	0,09
Physcia tenella	Phy ten		20		0,2
Platismatia glauca	Pla gla	100	97	4,00	3,66
Pseudevernia furfuracea	Pse fur	55	74	0,82	1,26
Ramalina farinacea	Ram far	6	9	0,06	0,09
Tuckermanopsis chlorophylla	Tuc chl	3	9	0,03	0,09
Usnea subfloridana	Usn sub	3		0,03	
Vulpicida pinastri	Vul pin	18	3	0,18	0,03

Žemaitijos KMS baseino lichenologiniai tyrimai.

Lyginant Plokštinės rezervato 2025 m. rezultatus su 2015, 2020 m. vykdytais tyrimais, matyti, kad 3 rūšys 2025 m. jau nebeaptiktos (2 lentelė). *Cladonia chlorophaea* s.l. neradimas 2025 m. gali būti paaiškinamas identifikavimo netikslumais ankstesniais metais, nes rūšies kompleksas yra gana sudėtingas identifikuoti iki rūšies. Kitų rūšių pokyčiai yra paaiškinami dėl labai nedidelio aptikimo dažnio ir galimo „pražiūrėjimo“. Norint tiksliau įvertinti rūšinės sudėties pokyčius ilgesniam laikotarpyje, reikia dar bent 2 pakartojimų kas 5 metai.

Vertinant atskirų rūšių aptikimo dažnį, didžiausia pasikeitimai užfiksuoti *Parmelia sulcata* (nuo 21 iki 77 proc. padidėjimas). Didelis *Cladonia fimbriata* pasikeitimas galimas dėl klaidingo įvertinimo (identifikavimo) 2015 metais.

Vertinant kerpių vidutinę gausą barelyje, didžiausi pokyčiai yra *Parmelia sulcata* (padidėjimas nuo 0,27 iki 1,43 balo) beu *Pseudevernia furfuracea* (nuo 0,82 iki 1,66 balo). Kitų rūšių tarpe galima pastebėti pasikeitimus iki kelių kartų, tačiau jų pati gausa yra labai nedidelė.

2 lentelė. Kerpių rūšinė įvairovė ir gausa Žemaitijos KMS

Rūšis	Akronimas	Aptikimo dažnis, %			Vidutinė gausa, balais		
		2015	2020	2025	2015	2020	2025
Bryoria capillaris	Bry cap	18	40	29	0,21	0,46	0,43
Bryoria fuscescens	Bry fus	12			0,18		
Cladonia cenotea	Cla cen		3	3		0,03	0,03
Cladonia chlorophaea s.l.	Cla chl	55	26		0,79	0,46	
Cladonia coniocraea	Cla con	79	86	80	1,46	1,97	1,23
Cladonia cornuta	Cla cor	97	74	89	2,52	1,37	1,74
Cladonia digitata	Cla dig	52	49	31	1,15	1,06	0,37
Cladonia fimbriata	Cla fim	3	46	77	0,06	0,66	0,97
Cladonia macilenta	Cla mac	6	6	11	0,12	0,06	0,11
Cladonia norvegica	Cla nor	3	3		0,03	0,03	
Cladonia ochrochlora	Cla och	15	3	9	0,21	0,06	0,09
Cladonia subulata	Cla sub	6			0,06		
Evernia prunastri	Eve pru	3	20	11	0,03	0,2	0,11
Hypogymnia physodes	Hyp phy	100	97	100	4,00	3,86	3,89
Hypogymnia tubulosa	Hyp tub	48	63	31	0,64	1,09	0,63
KMShaugia aleurites	KMS ale	3			0,03		
Melanohalea exasperatula	Mel exa	12	26	6	0,15	0,26	0,06
Melanelixia fuliginosa	Mel ful	3	3		0,03	0,03	
Parmelia saxatilis	Par sax	21	49	26	0,24	0,54	0,26
Parmelia sulcata	Par sul	21	37	77	0,27	0,57	1,43
Parmeliopsis ambigua	Par amb	45	46	40	0,88	0,66	0,77
Peltigera membranacea	Pel mem		3			0,03	
Peltigera neckeri	Pel nec	3	3	3	0,03	0,09	0,06
Physcia adscendens	Phy ads			3			0,03
Physcia tenella	Phy ten		20	6		0,2	0,06
Platismatia glauca	Pla gla	100	97	97	4,00	3,66	3,77
Pseudevernia furfuracea	Pse fur	55	74	77	0,82	1,26	1,66
Ramalina farinacea	Ram far	6	9	9	0,06	0,09	0,09
Tuckermanopsis chlorophylla	Tuc chl	3	9		0,03	0,09	
Usnea subfloridana	Usn sub	3			0,03		
Vulpicida pinastri	Vul pin	18	3	9	0,18	0,03	0,09

Lyginant Žemaitijos KMS 2020 m. rezultatus su 2015 m. vykdytais tyrimais, matyti, kad 4 rūšys 2020 m. jau nebeaptiktos, tačiau rastos 2 naujos rūšys (3.3 lentelė). Didžiausias pasikeitimas yra *Physcia tenella* tarpe, nes naujai aptikta rūšis rasta įsikūrusi net penktadalyje barelių. Kitų rūšių pokyčiai yra paaiškinami dėl labai nedidelio aptikimo dažnio ir galimo „pražiūrėjimo“. Norint tiksliau įvertinti rūšinės sudėties pokyčius ilgesniam laikotarpyje, reikia dar bent 2 pakartojimų kas 5 metai.

Lyginant rūšių aptikimo dažnumo pokyčius, labiausiai išsiskiria *Usnea* visų rūšių, *Hypogymnia tubulosa* ir *Vulpicida pinastri* sumažėjimas. Tuo tarpu ryškaus pagausėjimo nenustatyta jokios rūšies. Kitų rūšių tarpe aptinkamumo bareliuose didesnių pokyčių nepastebėta.

3 lentelė. Kerpių rūšinė įvairovė ir gausa Dzūkijos nacionaliniame parke 2025 m.

Rūšis	Akronimas	Aptikimo dažnis, proc.	Vidutinė gausa, balais
Cladonia arbuscula	Cla arb	15	0,29
Cladonia cenotea	Cla cen	6	0,06
Cladonia coniocrea	Cla con	58	0,81
Cladonia cornuta	Cla cor	40	0,54
Cladonia digitata	Cla dig	42	0,56
Cladonia fimbriata	Cla fim	58	0,79
Cladonia macilenta	Cla mac	12	0,12
Cladonia ochrochlora	Cla och	25	0,29
Cladonia polydactyla	Cla pol	6	0,06
Cladonia pyxidata	Cla pyx	4	0,04
Cladonia rangiferina	Cla ran	60	1,29
Cladonia subulata	Cla sub	4	0,04
Evernia prunastri	Eve pru	15	0,17
Hypogymnia physodes	Hyp phy	100	3,96
Hypogymnia tubulosa	Hyp tub	13	0,15
Imshaugia aleurites	Ims ale	58	1,17
Melanohalea exasperata	Mel exa	2	0,02
Melanelixia fuliginosa	Mel ful	6	0,06
Parmelia sulcata	Par sul	42	0,52
Parmeliopsis ambigua	Par amb	65	1,33
Physcia adscendens	Phy ads	6	0,06
Platismatia glauca	Pla gla	13	0,15
Pseudevernia furfuracea	Pse fur	73	1,31
Ramalina farinacea	Ram far	2	0,02
Usnea hirta	Usn hir	13	0,17
Vulpicida pinastri	Vul pin	2	0,02
Xantoria parietina	Xan par	2	0,02

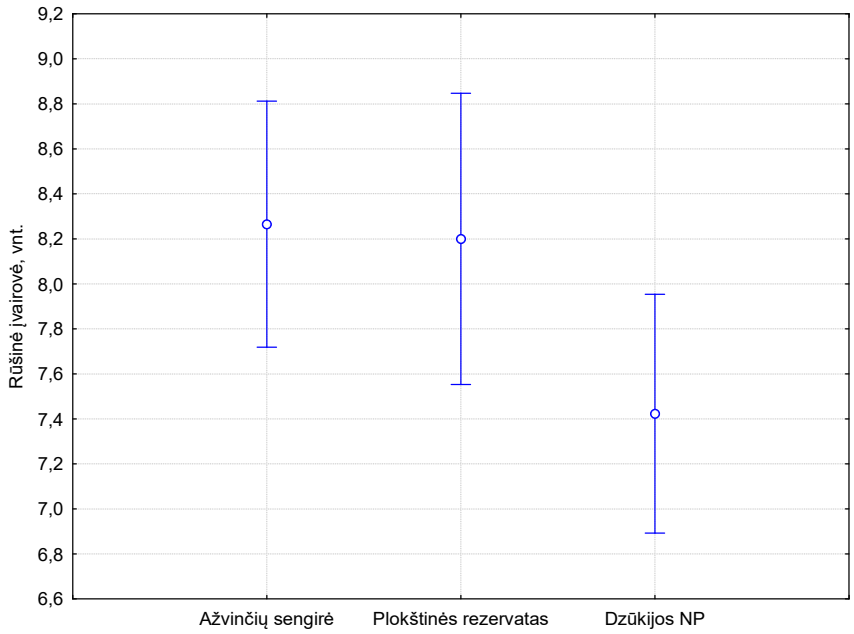
Dzūkijos KMS baseino lichenologiniai tyrimai.

Dzūkijos nacionaliniame parke kerpės 2025 m. buvo tirtos pirmą kartą.

Tyrimais nustatyta, kad 2025 m. Ažvinčių sengirės rezervate makrokerpių rūšinė įvairovė (bendras rūšių skaičius barelyje) beveik susilygino (tik 1 rūšies skirtumas) su Plokštinės rezervato, tuo tarpu 2015 m. šis skirtumas buvo 25 % (1 pav., 4, 5 lentelės). Tokius pokyčius

nulėmė rūšių gausos sumažėjimas Ažvinčių sengirėje. Šenono įvairovės indeksas (rūšinė įvairovė įvertinant gausą ir rūšių pasiskirstymo tolygumą) 2015 m. Ažvinčių sengirėje buvo 14 % didesnis nei Plokštinės rezervate, o 2025 m. jau buvo vienodi (po 1,9 balo). Dzūkijos nacionaliniame parke rūšinė įvairovė ir Šenono įvairovės indeksas tyrimo barelio lygmenyje buvo mažiausi, tačiau bendras rūšių skaičius buvo didžiausias, nes aptiktos net 27 rūšys (1 pav., 6 lentelė). Viename Dzūkijos barelyje buvo aptiktos vos dvi rūšys.

Vis dėlto, tiek Ažvinčių sengirės tiek ir Plokštinės miško pirmykščiu laikyti negalima, nes sengirių specializuotų (kertinių) rūšių makrokerpių tarpe rasta vos viena - *Cladonia norvegica*. Dzūkijos nacionalinio parko miškai dar yra jauni, sengirės struktūra dar tik pradeda formuotis, o dalyje plotų yra ūkininkaujama netgi kertant plynus kirtimus. Visose teritorijose dominuoja įprastos generalistinės rūšys. Dzūkijos nacionalinio parko teritorijos rūšių gausą galima paaiškinti dėl gana retų medynų ir negausaus žolinės dangos padengimo, kas sudaro geresnes konkurencines sąlygas įsikurti ir išlikti epigeidinėms kerpėms. Rūšinės įvairovės gausa nedidelė dėl stokos negyvos medienos ir nedidelio kiekio medžių rūšių barelyje. Viena iš problemų, kodėl neaptinkamos spygliuočių miškams būdingos specializuotos sengirių rūšys, tokios kaip *Ramalina thrausta* arba *Evernia divaricata*, gali būti didelė sengirių fragmentacija, kas iššaukia migracijos kelių nutrūkimą ir rūšių plitimo galimybių suvaržymą dėl per didelio atstumo iki artimiausių radimviečių.



3.7 pav. Kerpių rūšinės įvairovės palyginimas tirtose teritorijose 2025 m. (F=2,86, p=0,06)

4 lentelė. Ažvinčių sengirės rezervato barelių palyginimas

Barelio Nr.	S*			H**		
	2015	2020	2025	2015	2020	2025
1	9	14	8	2,0	2,4	1,7
2	11	10	7	2,2	2,1	1,8
3	6	7	7	1,7	1,7	1,8
4	11	11	10	2,2	2,2	2,1
5		13	10		2,4	2,2
6	12	13	10	2,4	2,5	2,2
7	11	13	10	2,3	2,4	2,2
8	10	12	10	2,2	2,3	2,1
9	14	11	7	2,5	2,2	1,8
10	10	8	7	2,1	1,9	1,8
11		8	7		1,8	1,7
12	7	10	8	1,8	2,2	1,9
13	13	10	8	2,4	2,2	2,0
14	11	12	7	2,2	2,3	1,8
15	7	12	9	1,8	2,3	2,0
16	10	11	7	2,2	2,3	1,8
17	10	12	8	2,2	2,3	1,9
18	12	11	8	2,3	2,2	1,9
19	9	9	7	2,0	2,0	1,7
20		9	12		2,0	2,3
21	9	10	7	2,1	2,2	1,8
22	11	7	8	2,2	1,8	1,9
23	8	8	9	2,0	2,0	2,0
24	7	10	5	1,8	2,2	1,5
25	14	8	11	2,5	1,9	2,2
26	13	10	10	2,5	2,1	2,1
27	12	13	10	2,3	2,4	2,2
28	12	10	7	2,4	2,1	1,8
29		10	9		2,2	2,0
30	7	7	6	1,7	1,9	1,8
31	13	7	7	2,4	1,9	1,7
32	11		8	2,2		1,9
33	16	14	9	2,6	2,4	2,0
34	10	8	10	2,2	2,0	2,1
35		12	11		2,3	2,3
36	8	9	8	2,0	2,0	1,9
37	12	8	10	2,3	2,0	2,1
38	10	3		2,2	0,9	
39	8	6	6	2,0	1,7	1,7
40	13	11	9	2,4	2,2	2,0
41	11	8	10	2,2	1,9	2,2
42	13	12	9	2,4	2,4	2,0
43		12	7		2,3	1,8
44	10	10	9	2,2	2,1	2,0
45	10	11	7	2,2	2,2	1,8
46	12	14	6	2,3	2,5	1,6
47	12	11	9	2,4	2,3	2,0
48	10	8	6	2,2	1,9	1,7
49	13	11	10	2,5	2,2	2,1
50	9	7	5	2,1	1,8	1,5
51		13			2,4	
52		11			2,2	
Vidurkis	10,6	10,1	8,3	2,2	2,1	1,9

*S – rūšinė įvairovė (species richness)

**H – Šenono įvairovės indeksas (Shannon‘s diversity index)

Rezultatų palyginimas

Vertinant rūšinės sudėties pasikeitimus atskiruose Ažvinčių sengirės bareliuose per 10 metų, didžiausi pokyčiai užfiksuoti 9, 13, 14, 28, 31, 33, 46 bareliuose. Ypač kardinalūs pokyčiai įvyko 46 barelyje, kai rūšinė įvairovė nuo 14 nukrito iki 6. Visur pastebimi neigiami pokyčiai. Tuo tarpu teigiami pokyčiai rūšinės įvairovės didėjime stebimi tik 20 ir 23 bareliuose.

5 lentelė. Plokštinės rezervato barelių palyginimas

Barelio Nr.	S*			H**		
	2015	2020	2025	2015	2020	2025
2	6	8	7	1,7	1,9	1,8
3	8	7	9	1,9	1,7	2,0
4	11	11	9	2,2	2,2	2,0
5	9	8	7	2,1	1,9	1,8
6	6	7	6	1,7	1,8	1,7
7	7	9	7	1,8	2,0	1,8
8	10	12	9	2,2	2,3	2,1
9	8	10	9	1,9	2,1	2,0
10		3	4		1,3	1,3
11	5	8	9	1,6	1,8	2,0
12	6	10	10	1,7	2,1	2,1
13	5	9	6	1,6	2,1	1,7
14	6	8	7	1,6	2,0	1,7
15	9	13	9	2,0	2,4	2,0
16	6	12	10	1,7	2,3	2,1
17	6	11	9	1,7	2,2	2,0
18	6	10	9	1,7	2,1	2,0
19	5	6	7	1,7	1,7	1,8
20	9	8	7	2,0	2,0	1,7
21	8	11	7	1,9	2,3	1,7
22		12	7		2,4	1,8
23	10	8	10	2,1	1,9	2,1
24	8	7	6	1,9	1,8	1,6
25	9	10	8	2,0	2,1	1,9
26	9	7	10	2,1	1,8	2,1
27	7	7	7	1,8	1,8	1,7
28	7	9	10	1,9	2,1	2,1
29	7	9	10	1,8	2,0	2,1
30	11	11	12	2,2	2,2	2,3
31	11	10	9	2,3	2,1	2,0
32	8	10	8	1,9	2,1	1,9
34	10	7	8	2,1	1,7	1,9
35	7	4	7	1,8	1,4	1,8
36	11	9	9	2,2	2,1	2,1
37	10	11	9	2,2	2,3	2,1
Vidurkis	8,0	8,9	8,2	1,9	2,1	1,9

*S – rūšinė įvairovė (species richness)

**H – Šenono įvairovės indeksas (Shannon‘s diversity index)

Vertinant rūšinės sudėties pasikeitimus atskiruose Plokštinės rezervato bareliuose per 10 metų, didžiausi pokyčiai užfiksuoti 22 barelyje, kuriame pastebėtas 5 rūšių sumažėjimas. Tuo tarpu net 6 bareliuose stebimas gausos padidėjimas. Ypač kardinalių pokyčių 10 metų laikotarpyje nenustatyta.

6 lentelė. Dzūkijos nacionalinio parko barelių palyginimas 2025 m.

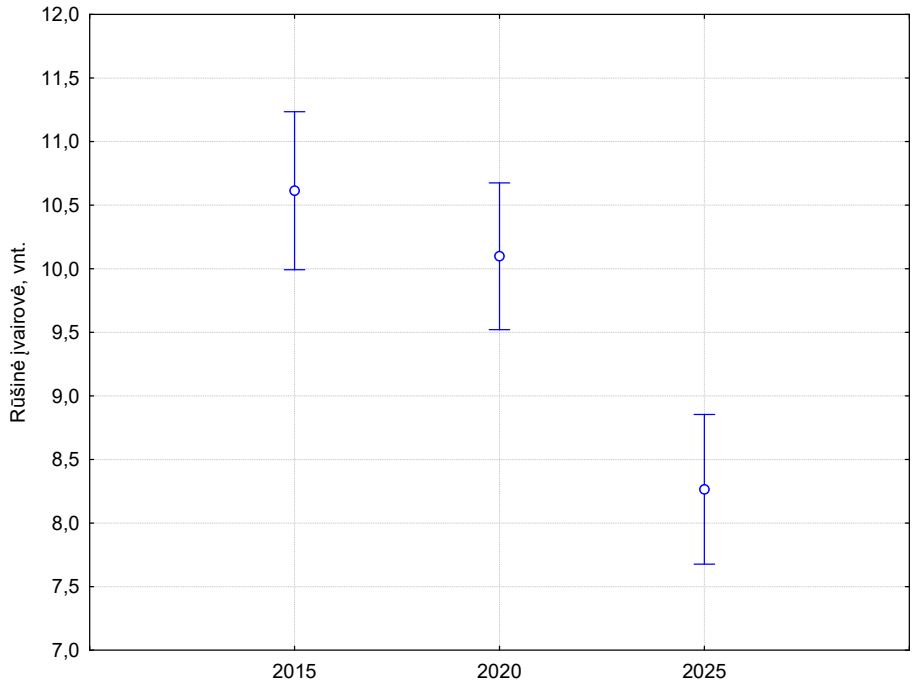
Barelio Nr.	S*	H**
2	9	2,0
3	5	1,4
4	5	1,4
5	4	1,2
6	5	1,4
7	10	2,2
8	7	1,7
9	6	1,6
10	2	1,6
11	5	1,4
12	7	1,8
13	5	1,4
14	8	1,9
15	4	1,2
16	6	1,7
17	6	1,6
18	7	1,7
20	9	2,0
21	6	1,6
22	11	2,3
23	11	2,3
24	9	2,0
25	6	1,6
26	6	1,7
27	8	1,9
27	8	1,9
28	13	2,4
29	5	1,5
30	5	1,4
31	8	1,9
32	9	2,0
33	10	2,1
34	5	1,5
35	8	1,9
37	9	2,1
38	3	0,9
39	10	2,1
40	9	2,0
41	8	2,0
42	8	1,9
45	7	1,8
46	6	1,6
47	9	2,1
48	11	2,2
50	10	2,2
51	10	2,1
52	6	1,6
54	10	2,2
55	5	1,5
56	9	2,1
57	8	2,0
58	10	2,1
Vidurkis		1,8

*S – rūšinė įvairovė (species richness)

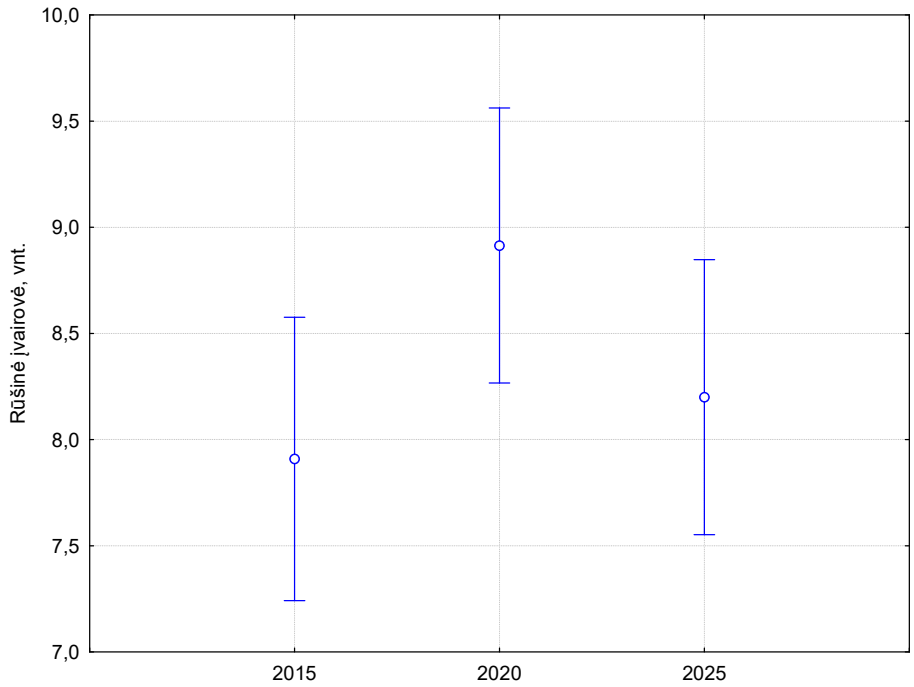
**H – Šenono įvairovės indeksas (Shannon‘s diversity index)

Ažvinčių sengirėje rūšinė įvairovė vidutiniškai barelyje stipriai sumažėjo per paskutinius 5 metus (2 pav.), tuo tarpu Plokštinės rezervate tendencijos neaiškios - fliuktuacijos stadijoje (3 pav.). Be abejonės, didžiausias klausimas iškyla dėl kerpių rūšinės įvairovės mažėjimo Ažvinčių sengirėje.

Ažvinčių sengirėje tyrimų metu buvo užregistruotos 3 daugmaž nitrofilinės kerpių rūšys - *Evernia prunastri, Physcia tenella* ir *Xantoria parietina*. *Evernia prunastri* būklė stipriai pablogėjusi, o abi kitos rūšys jau nebeaptiktos 2025 m. tyrimų metu, nors buvo sutinkamos ankstesniais metais. To pasekme gali būti oro užterštumo azoto junginiais sumažėjimas. Kitų kerpių rūšių sumažėjimas gali būti siejamas su struktūriniais medynų pokyčiais, pvz. iškrentant daliai gyvų medžių (tinkamo substrato epifitinėms rūšims netekimas), atsikuriant tankiam eglės pomiškiui ir iš esmės keičiantis apšvietimo sąlygoms virtėliams, suvešint tankiai aukštažolei augalijai (pvz. didžialapiam šakiui *Pteridium aquilinum*) ar gausiai užaugant virtėliams briofitais. Tokiems pokyčiams įvertinti reikia detalios duomenų analizės tiek atskiroms rūšims, rūšių pokyčiams konkrečiuose bareliuose, tiek ir įvertinant atskirų veiksnių poveikį.

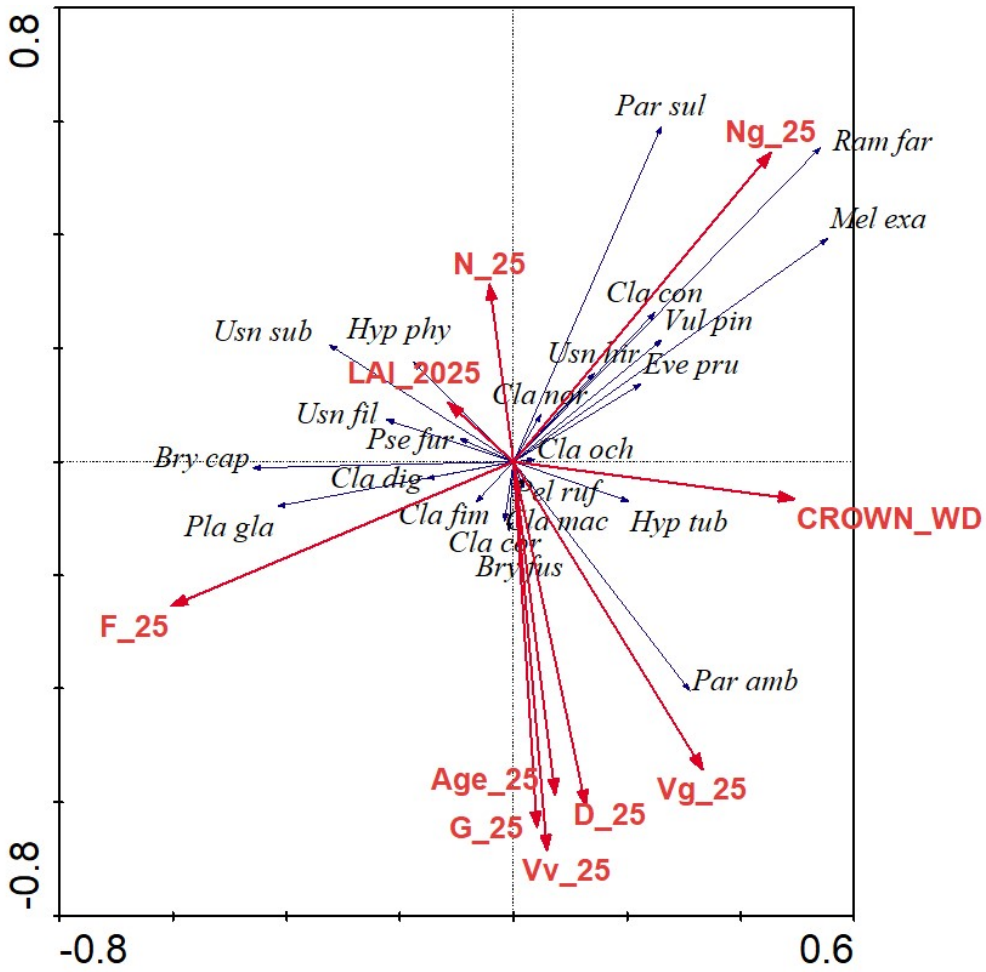


3.8 pav. Kerpių rūšinės įvairovės dinamikos palyginimas Ažvinčių sengirės rezervate (F=16,69, p=0,00)



3.9 pav. Kerpių rūšinės įvairovės dinamikos palyginimas Plokštinės rezervate (F=2.45, p=0,09)

Atlikus Ažvinčių sengirėje aptiktų kerpių rūšių sąsajų su įvairiais rodikliais analizę, matyti, kad absoliuti dauguma rodiklių neturėjo esminės įtakos kerpių rūšims (4 pav.). Medyno amžius (Age_25), medžių diametras (D_25), medyno tūris (Vg_25 ir Vv_25), medžių skerspločių suma (G_25) labiau teigiamai veikė *Parmeliopsis ambigua* rūšies aptikimą ir gausą, o lapijos indeksas (LAI_2025) ir bendras medžių skaičius (N_25) turėjo labiau neigiamos įtakos. Gyvų medžių skaičius (Ng_25) turėjo teigiamos įtakos *Parmelia sulcata, Ramalina farinacea* ir *Melanohalea exasperatula* rūšims, tuo tarpu defoliacija (F_25) turėjo neigiamos įtakos šioms rūšims. Darant išvadas apie atskirus rodiklius, reikia turėti galvoje, kad čia buvo tiriami daugiausiai tik seni mišrūs su egle pušynai. Rodiklių įtaka kerpėms gali iš esmės keistis kitokios rūšinės sudėties ir amžiaus medynuose.



3.10 pav. Ažvinčių sengirės kerpių rūšių koreliacija su įvairiais rodikliais (rūšių akronimai pateikti 1 lentelėje)

Išvados

1. Ažvinčių sengirėje stebėtas ryškus kerpių rūšinės įvairovės sumažėjimas: nuo 10,6 2015 m. iki 8,3 2025 m. Priežastingumui nustatyti reikalinga detali analizė tiek atskiroms rūšims, rūšių pokyčiams konkrečiuose bareliuose, tiek ir įvertinant atskirų veiksnių poveikį.

2. Plokštinės rezervate kerpių rūšinės įvairovės tendencijos yra fliuktuacijos stadijoje. Natūralių miškų struktūra dar besiformuojanti, tad ateityje galimi įvairūs rūšiniai pakitimai.

3. Dzūkijos nacionalinio parko teritorijoje nustatyta didžiausia rūšinė įvairovė su 9 unikaliomis rūšimis.

4. Aptikta tik viena sengirių indikatorinė rūšis - *Cladonia norvegica* -, negausiai auganti Ažvinčių sengirės teritorijoje.

Pušinė vulpicidė *Vulpicida pinastri* Ažvinčių sengirėje stipriai gausėja, tuo tarpu Plokštinės rezervate stebimas mažėjimas

Vagotasis kežas *Parmelia sulcata*, putlusis plynkežis *Hypogymnia physodes* ir žalsvoji kerpena *Tuckermanopsis chlorophylla* (aptikta tik Plokštinės rezervate) sugyvena taikiai

Akmeninis kežas *Parmelia saxatilis* aptiktas tik Plokštinės rezervate, kur jo gausa didėja

Šviesioji laumagaurė *Bryoria capillaris* Ažvinčių sengirėje jaučiasi puikiai, stebimas gausos didėjimas – švarau oro indikatorius

Barzdotoji kedenė *Usnea filipendula* aptikta tik Ažvinčių sengirės bareliuose - – švarau oro indikatorius

Vamzdiškasis plynkežis *Hypogymnia tubulosa* Plokštinės rezervate – gausėjanti rūšis

Nekerio meškapėdė *Peltigera neckeri* rasta tik viename barelyje Plokštinės rezervate

Didžiuliai kuokšai *Usnea filipendula* kerpės, kokių tyrimų pradžioje nebuvo sutinkama KMS baseinų miškuosen rodo išsivaliusią nuo teršalų aplinką	Gauruotoji kedenė *Usnea hirta* – tipiška sausų pušynų rūšis, aptikta tik Dzūkijos nacionalinio parko teritorijoje

Miškinė šiurė *Cladonia arbuscula* – dar viena epigeidinė rūšis, reikalaujanti retų medynų ir daugiau šviesos į dirvos paviršių. Aptikta tik Dzūkijos nacionalinio parko teritorijoje	Blyškioji imšaugija *Imshaugia aleurites* aptikta gausiai daugiau nei pusėje barelių, bet tik Dzūkijos nacionalinio parko teritorijoje	Elninė šiurė *Cladonia rangiferina* augo gausiai and žemės, bet tik ten kur medynai retoki ir daug šviesos patenka į dirvos paviršių. Sutankėjusiuose medynuose išnyksta. Aptikta tik Dzūkijos nacionalinio parko teritorijoje

IŠVADOS

Apibendrinus epifitinių ir epiksilinių kerpių tyrimų rezultatus trijose KMS galima teigti, kad mažėjanti ilgalaikė atmosferos tarša sudarė palankias sąlygas bendram kerpių gausumo didėjimui, tačiau rūšinės įvairovės pokyčiai atskleidė sudėtingesnį miško ekosistemų atsaką: Ažvinčių sengirėje nustatytas reikšmingas rūšių skaičiaus sumažėjimas, Plokštinės rezervate vyksta natūralių besiformuojančių miškų bendrijoms būdingos fliuktuacijos, o Dzūkijos nacionalinio parko miškai išsiskiria didžiausia rūšine įvairove ir unikalių rūšių gausa; tai rodo, kad dabartiniu laikotarpiu kerpių bendrijų raidą vis labiau lemia ne tik oro kokybės gerėjimas, bet ir medyno struktūra, substratų įvairovė, mikroklimatinės sąlygos bei klimato kaitos veiksniai.

Ažvinčių sengirėje stebėtas ryškus kerpių rūšinės įvairovės sumažėjimas: nuo 10,6 2015 m. iki 8,3 2025 m. Priežastingumui nustatyti reikalinga detali analizė tiek atskiroms rūšims, rūšių pokyčiams konkrečiuose bareliuose, tiek ir įvertinant atskirų veiksnių poveikį.

Plokštinės rezervate kerpių rūšinės įvairovės tendencijos yra fliuktuacijos stadijoje. Natūralių miškų struktūra dar besiformuojanti, tad ateityje galimi įvairūs rūšiniai pakitimai.

Dzūkijos nacionalinio parko teritorijoje nustatyta didžiausia rūšinė įvairovė su 9 unikaliomis rūšimis.

Aptikta tik viena sengirių indikatorinė rūšis - *Cladonia norvegica* -, negausiai auganti Ažvinčių sengirės teritorijoje.

3.3. Dirvožemio pedobiontų rūšinė įvairovė ir gausumas

Aukštaitijos, Žemaitijos ir Dzūkijos KMS baseinš dirvožemio stacionare pedobiontų rūšių įvairovę ir gausa tyrė ilgametė programos vykdytoja Gamtos tyrimų centro dr. A.Petrauskienė.

Įvadas

Dirvožemis yra pagrindinė visų sausumos ekosistemų dalis, atliekanti unikalų funkcinį vaidmenį visiems sausumos organizmams. Dirvožemio gebėjimas atlikti savo funkcijas labai priklauso nuo jo struktūros. Pažeidus dirvožemio struktūrą, pažeidžiamos ir kitos aplinkos terpės bei ekosistemos (Eidukevičienė, Vasiliauskienė, 2001). Dirvožemyje gyvenantys organizmai – pedobiontai – yra svarbi dirvožemio biologinės įvairovės dalis, nes jie dalyvauja organinių medžiagų skaidymo, maisto medžiagų ciklų ir dirvožemio struktūros formavimo procesuose. Šių organizmų gausumas ir rūšinė įvairovė yra svarbūs rodikliai vertinant dirvožemio būklę ir ekosistemų funkcionavimą. Dirvožemis yra vienas didžiausių biologinės įvairovės buveinių Žemėje – jame gali būti apie 59 % visų planetos rūšių (Anthony et al., 2023). Toks didelis biologinės įvairovės kiekis lemia sudėtingus organizmų tarpusavio ryšius ir daro dirvožemio biotą itin svarbia ekosistemų stabilumo bei funkcionavimo dalimi.

Biologinio monitoringo tikslas – stebėti biotos pokyčius ir, remiantis bioindikaciniais rodikliais, nustatyti biologinių procesų, vykstančių sausumos ekosistemose, kryptingumą.

Pastaruoju metu vykstant klimato pokyčiams, didėjant antropogeniniam krūviui sausumos ekosistemos, kurių pagrindas yra dirvožemis, turi būti nuolat stebimos naudojant jautriausius žinomus rodiklius. Be fizinių ir cheminių metodų, svarbus ir biologinis dirvožemių diagnostikos metodas, kurio esmę sudaro biotestų ir bioindikatorių kompleksas. Bioindikacinis metodas pagrįstas testinių organizmų reakcija į atitinkamus klimato kaitos ir antropogeninius veiksnius.

Dirvožemio organizmai laikomi jautriais aplinkos pokyčių indikatoriais, nes jų bendrijų struktūra ir gausumas greitai reaguoja į dirvožemio degradaciją, taršą ar klimato sąlygų kaitą. Dirvožemio biologinė įvairovė ir joje gyvenančių organizmų funkcijos gali būti naudojamos kaip patikimi ekosistemų būklės bei antropogeninio poveikio vertinimo rodikliai, nes dirvožemio biologinė įvairovė jautriai reaguoja į aplinkos pokyčius ir gali būti veiksmingas ekosistemos būklės indikatorius (Bardgett & van der Putten, 2023).

Pedobiontai viena tinkamiausių bioindikacinių organizmų grupių dirvožemio diagnostikai. Dirvožemis yra jų gyvenamoji terpė, todėl jo fiziniai ar cheminiai pakitimai tiesiogiai atsispindi mikroorganizmų ir zoocenozių gausume, rūšinėje sudėtyje ir viso komplekso struktūroje (Pankhurst,

1997; Parisi et al., 2005). Jų kompleksų struktūra, individų ir rūšių gausa, įvairovė, bei dominuojantys komponentai atspindi dirvožemio tipą, ekosistemos charakterį ir antropogeninį poveikį.

Dirvožemio bestuburių bendrijų sudėtis yra jautrus dirvožemio būklės ir žmogaus veiklos poveikio indikatorius, nes šie organizmai greitai reaguoja į dirvožemio struktūros, drėgmės bei organinės medžiagos pokyčius. Dirvožemio fauna atlieka svarbų vaidmenį palaikant ekosistemų funkcijas, todėl jos įvairovė ir gausumas vis dažniau naudojami vertinant dirvožemio kokybę ir ekosistemų stabilumą (Briones, 2022).

Didžiausia pedobiontų įvairovė būdinga sąlyginai natūralių ekosistemų dirvožemiams. Šių dirvožemių genetinis fondas gali būti naudojamas vertinant dirvožemių biologinių procesų pažeidimo laipsnį. Natūraliuose dirvožemiuose susiformuoja sudėtingos dirvožemio organizmų bendrijos, kurios užtikrina svarbiausius ekosistemų procesus, tokius kaip organinės medžiagos skaidymas, maisto medžiagų ciklai ir augalų produktyvumas. Dirvožemio biologinė įvairovė yra vienas pagrindinių ekosistemų funkcionavimo veiksnių, nes ji lemia maisto medžiagų apytaką, organinės medžiagos skaidymą ir klimato reguliavimo procesus (Eisenhauer et al., 2026).

Vieni patogiausių ir jautriausių bioindikatorių dirvožemio ekologinės būklei įvertinti pedobiontų tarpe yra dirvožemio mikroartropodai. Mikroartropodai – tai sąlyginis terminas, apimantis daugybę dirvožemio gyvūnų grupių, kurių dydis svyruoja nuo 0,2 iki 2,0 mm. Tai dirvožemio erkės (*Oribatida*, *Gamasina, Acaridae* ir kt.) ir kolembolos (*Collembola*). Mikroartropodų bendrijų struktūra ir rūšių įvairovė labai jautriai reaguoja į dirvožemio fizinių, cheminių ir biologinių savybių pokyčius ir todėl gali būti naudojama kaip patikimas bioindikatorius dirvožemio ekologinei būklei vertinti (Rodríguez-Pajares et al., 2025).

Oribatidinės ir gamazinės erkės, bei kolembolos yra svarbiausi dirvožemių organinių liekanų mineralizatoriai ir humifikatoriai. Tarp jų savo gausumu, o ypač rūšine įvairove, ryškiai išsiskiria oribatidinės erkės. Jos turi didelę reikšmę dirvožemio formavimosi procesuose (Pankhurst, 1997). Oribatidinės erkės aktyviai reguliuoja mikroorganizmų populiacijas bei skatina maistinių medžiagų ciklą**,** taip dar labiau prisidėdamos prie dirvožemio struktūros ir funkcijų palaikymo (Bosch-Serra et al., 2024). Natūralios, mažai antropogeninės veiklos paveiktos ekosistemos paprastai pasižymi didesne dirvožemio biologine įvairove nei intensyviai naudojamos ar pertvarkytos teritorijos, o tai prisideda prie stabilesnio ekosistemų funkcionavimo ir didesnio jų funkcijų išsaugojimo potencialo (Nascimento et al., 2025).

Metodika

Dirvožemio ėminiai imti Aukštaitijos, Žemaitijos ir Dzūkijos Integruoto monitoringo stotyse (toliau – KMS) 2025 m. rugsėjo-spalio mėn. stacionarinėse tyrimo aikštelėse (Manual for integrated monitoring, 1977; Augustaitis ir kt., 2006).

Aukštaitijos KMS tyrimų aikštelė yra Ažvinčių sengirės Versminio upelio baseine. Dirvožemiai – karbonatingieji smėlžemiai, dominuoja Peucedano-Pinetum tipo pušynai, žolinėje dangoje dominuoja *Vaccinium myrtillus, Calamagrostis arundinacea,* samanos *Hylocomium splendens, Pleurozium schreberi*. Perbrendęs brukninis pušynas su nedidele eglių priemaiša. Daugiametė vidutinė oro temperatūra Rytų Lietuvoje pagal 1991–2020 m. klimato normą siekia apie 6,6–7,4 °C, vidutinis metinis kritulių kiekis – apie 695 mm (Lietuvos hidrometeorologijos tarnyba, 2021).

Žemaitijos nacionalinio parko stacionarinių tyrimų aikštelė yra Plokštynės rezervate, Uošnos upės dešiniojo intako Juodupio baseine. Dirvožemiai – pajaurėję smėlžemiai. Dominuoja eglynai Linnaeo-Piceetum (Augustaitis ir kt., 2006; Rašomavičius, 2006). Žolinėje dangoje vyrauja *Vaccinium myrtillus*. Bręstantis eglynas. 2025 metais Lietuvoje vidutinė metinė oro temperatūra buvo apie 8,4 °C – šalies mastu aukštesnė už daugiametę normą, o vidutinis metinis kritulių kiekis siekė apie 675 mm. Šios reikšmės atspindi šiltesnes ir šiek tiek sausesnes nei įprasta sąlygas Vakarų Lietuvos regione (Lietuvos hidrometeorologijos tarnyba, 2026).

Dzūkijos nacionalinio parko monitoringo stotis yra Dubininkų kaime, Skroblaus rezervato Duburių upelio baseine. Vyrauja paprastieji smėlžemiai, pereinantys į pajaurėjusius smėlžemius. Reljefas – sudėtingų formų kontinentinės kopos. Vyrauja vienaardžiai, sąlygiškai vienaamžiai paprastųjų pušų medynai (kerpšiliniai miškai) (Augustaitis ir kt., 2006; Rašomavičius, 2006). Bręstantis brukninis pušynas, ištisinė samanų danga, kur vyrauja *Pleurozium schreberi, Dicranum polysetum*. Pietryčių Lietuvos (Dzūkijos) regionui būdinga klimato norma (1991–2020 m.) rodo, kad vidutinė metinė oro temperatūra siekia apie apie 7,1 °C, o metinis kritulių kiekis yra apie apie 687 mm (Lietuvos hidrometeorologijos tarnyba, 2021–2023).

Aukštaitijos (Ažvinčių sengiria LT01), Dzūkijos (Dubininkai LT02) ir Žemaitijos (Plokščiai LT03) KMS baseinuose vyrauja vieno tipo jauriniai šilainiai silpnai pajaurėję smėlio dirvožemiai su skirtinga dirvodarine uoliena, kuri nulemia skirtingus cheminių medžiagų kiekius dirvožemyje (Gulbinas, Baužienė, 1996).

Dirvožemio ėminiai imti *cenometru* (5 x 5 x 5 cm) iš viršutinio 0–5 cm dirvožemio sluoksnio po 5 pakartojimus kiekvienoje tiriamojoje aikštelėje. Mikroartropodai iš dirvožemio buvo išvaromi modifikuotu šviesiniu Berlese-Tullgreno ekstraktoriumi, pagal standartinę metodiką (Bruckner, 2024).

Tirti Aukštaitijos, Žemaitijos ir Dzūkijos KM stočių dirvožemio mikroartropodų kompleksai: oribatidinės, gamazidinės, akaridinės, kitos erkės ir kolembolos. Iki rūšių apibūdintos oribatidinės erkės.

Duomenų analizei naudoti šie ekologiniai rodikliai: gausumas (*n)* – (tūkst. ind./m^2), rūšių skaičius (*S*). Rūšių dominavimas nustatytas pagal H. Engelmaną (Engelmann, 1978): eudominantinės rūšys pavyzdyje sudaro 40–100%; dominuojančios rūšys – 12,5–39,9 %; subdominuojančios rūšys – 4,0–12,4 %; retos rūšys – 1,3–3,9 %; labai retos rūšys – mažiau nei 1,3 %. Kompleksų struktūra išreikšta procentais.

Siekiant įvertinti oribatidinių erkių bendrijų įvairovę, dominavimą ir tolygumą tirtose teritorijose naudojami bendrijos įvairovės rodikliai: Shannon–Wiener indeksas (H') – matuoja bendrijos įvairovę, atsižvelgiant į rūšių skaičių ir jų gausumą; Pielou vienodumo indeksas (J') – nurodo, kaip vienodai individai pasiskirstę tarp rūšių (reikšmė nuo 0 iki 1: nuo stiprus dominavimas iki visiškai vienodao pasiskirstymo); Simpson dominavimo indeksas (D) – rodo bendrijos dominavimo laipsnį; didesnė reikšmė reiškia stipresnį vienos ar kelių rūšių dominavimą.

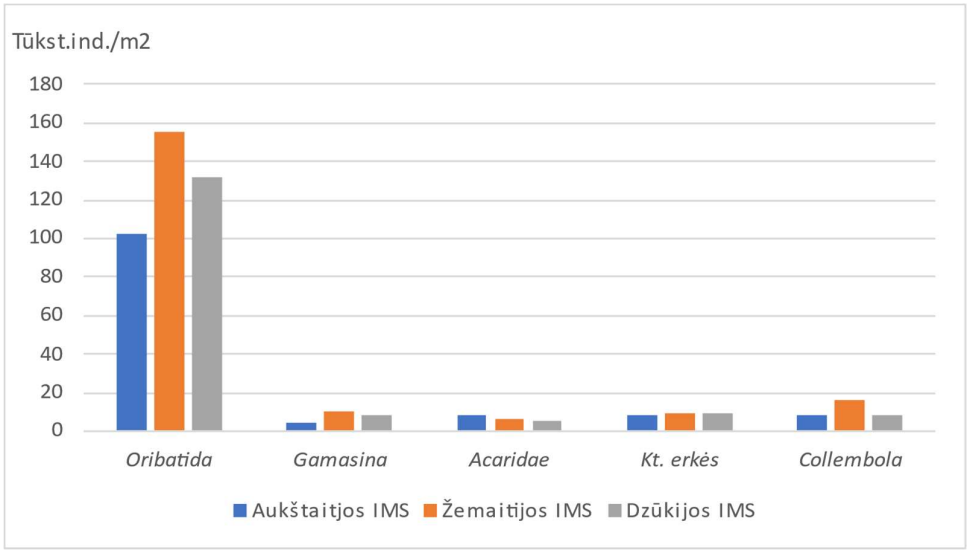
Šiame darbe 2025 metų duomenys papildo ankstesnių daugiamečių tyrimų duomenis. Mikroartropodų tyrimai Lietuvos nacionalinių parkų monitoringo aikštelėse buvo vykdomi kasmet nuo 1993 m. (Aukštaitijos KMS ir Dzūkijos KMS) ir nuo 1995 m. (Žemaitijos KMS) iki 2006 m. Vėliau tyrimai AKMS ir ŽKMS buvo atnaujinti 2020 m., o visose trijose stotyse – 2025 m.

3.3.1. Mikroartropodų kompleksų struktūra Aukštaitijos KM stotyje

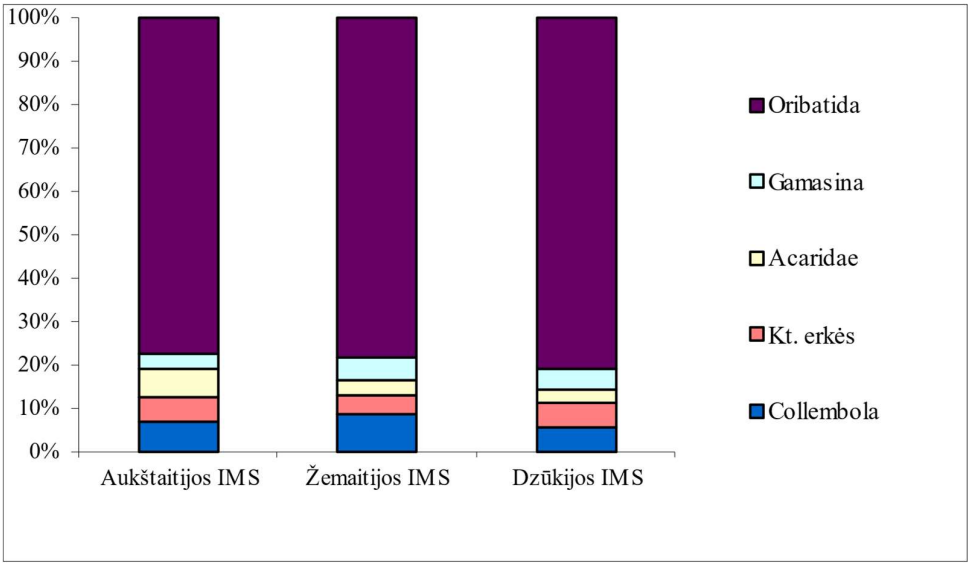
Aukštaitijos integruoto monitoringo stoties dirvožemyje 2025 m. duomenimis mikroartropodų gausumas buvo vidutiniškai 131,2 tūkst. ind./m^2. Dominuojanti grupė – oribatidinės erkės, kurios sudaro vidutiniškai 78 % visų mikroartropodų (3.1.1 lentelė). Jų vidutinis gausumas yra 102,0 tūkst. ind./m^2 (3.11 pav.). Gamazidinių erkių vidutinis gausumas – 4,3 tūkst. ind./m^2, jos sudaro 3,3 % visų mikroartropodų. Akaridinių erkių aptikta vidutiniškai 8,3 tūkst. ind./m^2, jos sudaro 6,3 % visų mikroartropodų. Kitos erkės sudaro 6,0 % visų mikroartropodų (vidutiniškai 7,9 tūkst. ind./m^2). Kolembolų vidutinis gausumas – 8,7 tūkst. ind./m^2. Jos sudaro 6,6 % visų mikroartropodų (3.12 pav.).

3.1.1 lentelė. Mikroartropodų gausumas (Tūkst.ind./m^2) ir rūšių skaičius Aukštaitijos, Žemaitijos ir Dzūkijos KM stočių dirvožemiuose 2025 m.

Grupė	Aukštaitijos KMS			Žemaitijos KMS			Dzūkijos KMS		
	Tūkst.ind./m^2	%	R.sk.	Tūkst.ind./m^2	%	R.sk.	Tūkst.ind./m^2	%	R.sk.
Oribatida	102	77,7	29	154,9	78,4	32	132	80,9	22
Gamasina	4,3	3,28		10,1	5,11		8,1	4,96	
Acaridae	8,3	6,33		6,8	3,44		5,1	3,13	
Kt. erkės	7,9	6,02		9,3	4,71		9,4	5,76	
Collembola	8,7	6,63		16,5	8,35		8,6	5,27	
Σ	131,2	100		197,6	100		163,2	100,02	



3.11 pav. Mikroartropodų gausumas Aukštaitijos, Žemaitijos ir Dzūkijos KMS dirvožemiuose 2025 m.



3.12 pav. Mikroartropodų komplekso struktūra Aukštaitijos, Žemaitijos ir Dzūkijos KMS dirvožemiuose 2025 m.

2025 m. iš viso identifikuotos 29 oribatidinių erkių rūšys. Oribatidų cenozės branduolį sudaro smulkios *Oppiidae, Suctobelbidae* ir *Brachychthoniidae* šeimų atstovės. *Oppiela nova* sudaro 30,6 %, *Brachychthonius sp*. erkės – 23,7 %, *Suctobelbella sp.* – 10,1 %. (3.1.2 lentelė).

Aukštaitijos KM stoties dirvožemio oribatidinių erkių bendrijos įvairovės rodikliai (3.1.3 lentelė) rodo santykinai nedidelę rūšinę įvairovę ir ryškų bendrijos netolygumą. Shannon–Wiener indekso reikšmė (H' = 0,96) leidžia vertinti bendriją kaip mažos įvairovės, tai gali būti būdinga mažiau palankioms arba labiau selektyvioms aplinkos sąlygoms. Simpsono dominavimo indeksas (D = 0,18) rodo, kad bendrijoje egzistuoja dominuojančios rūšys, tačiau dominavimas nėra itin stiprus, o individai pasiskirstę tarp kelių pagrindinių rūšių. Pielou tolygumo indeksas (J' = 0,28) atskleidžia mažą bendrijos tolygumą, t. y. rūšių gausumas pasiskirstęs labai netolygiai, ir didžioji dalis individų priklauso nedideliam rūšių skaičiui. Tokia indeksų kombinacija apibūdina nevienalytę bendrijos struktūrą**,** kuriai būdingas ribotas rūšių skaičius ir aiškiai išreikštas atskirų rūšių dominavimas.

3.1.2 lentelė. Oribatidinių erkių rūšinė įvairovė Aukštaitijos, Žemaitijos ir Dzūkijos KMS 2025 m.

Eil.	Rūšių pavadinimai	**Aukštaitijos KMS**		**Žemaitijos KMS**		**Dzūkijos KMS**	
Nr.	Oribatida	tūkst./m^2	**%**	tūkst./m^2	**%**	tūkst./m^2	**%**
1	*Adoristes poppei* (Oudemans, 1906)	0,2	0,23			0,4	0,38
2	*Adoristes sp.*			0,2	0,17		
3	*Atropacarus striculus* (C. L. Koch, 1835)					0,2	0,19
4	*Autogneta sp.*			1,2	1,05		
5	*Brachychthonius spp.*	14,9	16,9	36,6	32	21,5	20,5
6	*Camisia spinifer* (C. L. Koch, 1839)			0,1	0,09		
7	*Carabodes forsslundi* Sellnick, 1953			0,1	0,09		
8	*Carabodes sp.*	0,1	0,11	0,1	0,09	0,5	0,48
9	*Ceratozetella minima* (Sellnick, 1929)	1,2	1,36				
10	*Ceratozetes sp.*					0,3	0,29
11	*Chamobates cuspidatus* (Michael, 1884)	0,2	0,23			0,4	0,38
12	*Dameobelba minutissima* (Sellnick, 1929)			0,6	0,52		
13	*Eremaeus oblongus* (C. L. Koch, 1836)	0,1	0,11				
14	*Eupelops sp.*	0,2	0,23				
15	*Galumna sp.*	0,2	0,23	1	0,87	0,1	0,1
16	*Heminothrus longisetosus* Willmann, 1925	0,1	0,11			0,2	0,19
17	*Heminothrus sp.*			1,9	1,66		
18	*Hypochthonius rufulus* Koch, 1835	0,2	0,23	3,9	3,41		
19	*Hypochthoniella minutissima* (Berlese, 1903)			7,7	6,73		
20	*Lauroppia fallax* (Paoli, 1908)	0,6	0,68	1,1	0,96		
21	*Liacarus coracinus* (C. L. Koch, 1841)					0,1	0,1
22	*Liebstadia similis* (Michael, 1888)			0,6	0,52		
23	*Malaconothrus sp.*	1,5	1,7	4,8	4,2		
24	*Metabelba sp.*	1	1,13			0,5	0,48
25	*Microppia minus* (Paoli, 1908)	0,7	0,79	1	0,87	0,4	0,38
26	*Multioppia glabra* (Mihelčič, 1955)			0,4	0,35		
27	*Nanhermannia sp.*	1,5	1,7	2,5	2,19		
28	*Nothrus silvestris* Nicolet, 1855	8,6	9,73	5,2	4,55	4,6	4,39
29	*Nothrus sp.*			4,9	4,28		
30	*Oppiella nova* (Oudemans, 1902)	30,8	34,8	20,9	18,3	43,8	41,8
31	*Oppia sp.*	8,4	9,5				
32	*Oribatula tibialis* (Nicolet, 1855)	1,1	1,24	1,6	1,4	0,4	0,38
33	*Oribotritia loricata* Rathke, 1799			0,1	0,09	1,5	1,43
34	*Parachipteria punctata* (Nicolet, 1855)			0,1	0,09		
35	*Parachipteria sp.*	0,3	0,34				
36	*Phthiracarus globosus* (C. L. Koch, 1841)	1,4	1,58				
37	*Phthiracarus sp.*			0,6	0,52	0,3	0,29
38	*Platynothrus peltifer* (C. L. Koch, 1839)	0,1	0,11	1,3	1,14		
39	*Quadroppia quadricarinata* (Michael, 1885)	2,1	2,38	3,9	3,41	4,5	4,29
40	*Scheloribates latipes* (C. L. Koch, 1844)			0,6	0,52		
41	*Scheloribates laevigatus* (C. L. Koch, 1836)			0,2	0,17		
42	*Scheloribates sp.*	0,7	0,79			1	0,95
43	*Steganacarus carinatus* (C. L. Koch, 1841)	0,1	0,11	0,3	0,26		
44	*Steganacarus sp.*	0,2	0,23				
45	*Suctobelba sp.*	6,2	7,01	3,5	3,06	8	7,63
46	*Suctobelbella sp.*	5,4	6,11	5,8	5,07	14,9	14,2
47	*Tectocepheus velatus* (Michael, 1880)	0,3	0,34	1,6	1,4	1,1	1,05
48	*Trhypochthonius tectorum* (Berlese, 1896)					0,2	0,19

Suaugėliai	88,4	100	114,4	100	104,9	100
Nimfos ir lervos	13,6		40,5		27,1	
Viso:	**102**		**154,9**		**132**	

3.1.3 lentelė. Oribatidinių erkių bendrijos biologinės įvairovės rodikliai Aukštaitijos, Žemaitijos ir Dzūkijos KM stočių dirvožemiuose 2025 m.

Teritorija	Shannon-Wiener indeksas (H')	Pielou tolygumo indeksas (J')	Simpson dominavimo indeksas (D)
Aukštaitijos KMS	0,96	0,28	0,18
Žemaitijos KMS	2,45	0,71	0,15
Dzūkijos KMS	1,81	0,58	0,25

3.3.2. Mikroartropodų kompleksų struktūra Žemaitijos KM stotyje

Žemaitijos integruoto monitoringo stoties miško dirvožemis pasižymi didesniu mikroartropodų gausumu. Čia jų gausumas vidutiniškai 197,6 tūkst. ind./m^2 (3.1.1 pav.). Dominuojanti grupė yra oribatidinės erkės, kurios sudaro vidutiniškai 78,0 % visų mikroartropodų (3.1.1 lentelė). Jų vidutinis gausumas yra 154,9 tūkst. ind./m^2. Gamazidinių erkių vidutinis gausumas – 10,1 tūkst. ind./m^2, jos sudaro 5,1 % visų mikroartropodų. Akaridinių erkių aptikta vidutiniškai 6,8 tūkst. ind./m^2, jos sudaro 3,4 % visų mikroartropodų. Kitų erkių vidutinis gausumas 9,3 tūkst. ind./m^2, jos sudaro 4,7 % visų mikroartropodų. Kolembolų vidutinis gausumas – 16,5 tūkst. ind./m^2. Kolembolos sudaro 8,4 % visų mikroartropodų (3.1.2 pav.).

2025 m. iš viso identifikuotos 32 oribatidinių erkių rūšys. Šių erkių cenozės branduolį, kaip ir kitų miškų smėlžemio dirvožemiuose, sudaro smulkios dirvožeminės rūšys – *Brachychthonius* spp. (32,0%), *Oppiella nova* (18,3%), *Hypochthoniella minutissima* (6,73%) ir *Suctobelbel*a *sp.* (5,07%).

Žemaitijos KM stoties dirvožemio oribatidinių erkių bendrijos įvairovės rodikliai (3.1.3 lentelė) rodo santykinai vidutinę rūšinę įvairovę ir palyginti tolygų rūšių pasiskirstymą. Shannon–Wiener indekso reikšmė (H' = 2,45) leidžia vertinti bendriją kaip vidutinės įvairovės, tai gali būti būdinga palankiai aplinkai, kurioje sąlygos leidžia egzistuoti kelioms reikšmingoms rūšKMS. Simpsono dominavimo indeksas (D = 0,15) rodo, kad bendrijoje dominuojančių rūšių yra nedaug, o individai gana tolygiai pasiskirstę tarp kelių pagrindinių rūšių. Pielou tolygumo indeksas (J' = 0,71) atskleidžia pakankamai aukštą bendrijos tolygumą, kas reiškia, kad rūšių gausumas yra gana vienodai pasiskirstęs, o bendrijoje nėra ryškių monopolinių rūšių. ***Tokia indeksų kombinacija apibūdina*** *subalansuotą ir stabilią mikroartropodų bendriją****, kuriai būdingas*** *pakankamas rūšių turtingumas ir vidutinis individų pasiskirstymas tarp rūšių****, tai gali rodyti palankias ekologines sąlygas ir tinkamą mitybos bei buveinių įvairovę šioje teritorijoje.***

3.3.3. Mikroartropodų kompleksų struktūra Dzūkijos KM stotyje

Dzūkijos integruoto monitoringo stoties miško dirvožemyje nustatytas mažesnis mikroartropodų gausumas, palyginti su Aukštaitijos ir Žemaitijos KM stotyse tirtais dirvožemiais. Čia jų gausumas siekia vidutiniškai 163,2 tūkst. ind./m^2 (3.1.1 pav.). Mažesnis mikroartropodų gausumas gali būti susijęs su Dzūkijos regionui būdingais smėlingais, mažo humusingumo dirvožemiais.

Dominuojanti grupė yra oribatidinės erkės, kurios sudaro vidutiniškai 81,0 % visų mikroartropodų (3.1.1 lentelė). Jų vidutinis gausumas yra 132,0 tūkst. ind./m^2. Gamazidinių erkių vidutinis gausumas – 8,1 tūkst. ind./m^2, jos sudaro 5,0 % visų mikroartropodų. Akaridinių erkių aptikta vidutiniškai 5,1 tūkst. ind./m^2, jos sudaro 3,1 % visų mikroartropodų. Kitų erkių vidutinis gausumas – 9,4 tūkst. ind./m^2, jos sudaro 5,8 % visų mikroartropodų. Kolembolų vidutinis gausumas – 8,6 tūkst. ind./m^2. Kolembolos sudaro 5,3 % visų mikroartropodų (3.1.2 pav.).

2025 m. iš viso identifikuotos 22 oribatidinių erkių rūšys. Šių erkių cenozės branduolį sudaro smulkios dirvožeminės rūšys – *Oppiella nova* (41,75 %), *Brachychthonius* spp. (20,50 %), *Suctobelbell*a *sp.* (14,20 %), *Suctobelb*a *sp.* (7,63 %) (3.1.2 lentelė).

Dzūkijos KM stotyje tiriamos dirvožemio oribatidinių erkių bendrijos biologinės įvairovės rodikliai (3.1.3 lentelė) rodo vidutinę rūšių įvairovę ir santykinai netolygų individų pasiskirstymą. Shannon–Wiener įvairovės indekso reikšmė (H' = 1,81) rodo ***vidutinį rūšinės įvairovės lygį****, būdingą natūralioms, tačiau ne itin turtingoms rūšimis dirvožemio ekosistemoms.* Simpsono dominavimo indeksas (D = 0,25) rodo, kad bendrijoje yra aiškiai dominuojančių rūšių, o tai reiškia, kad ***didelė dalis individų priklauso nedideliam rūšių skaičiui***. Pielou tolygumo indeksas (J' = 0,58) patvirtina, kad bendrija yra vidutiniškai tolygi, tačiau rūšių gausumas pasiskirstęs netolygiai – kai kurios rūšys yra žymiai gausesnės už kitas. Tokie indeksų deriniai rodo, kad tiriama ***mikroartropodų bendrija yra*** *struktūriškai diferencijuota****, su ryškia dominavimo struktūra (dominuoja oribatidinės erkės).***

3.3.4. Mikroartropodų bendrijų palyginamoji analizė KMS

Aukštaitijos, Žemaitijos ir Dzūkijos integruoto monitoringo stočių dirvožemiuose nustatyti mikroartropodų kompleksai pasižymi skirtingais gausumo, struktūros ir biologinės įvairovės rodikliais, kurie atspindi skirtingas ekologines sąlygas tiriamose teritorijose.

Didžiausias mikroartropodų gausumas nustatytas Žemaitijos KM stotyje (197,6 tūkst. ind./m^2), kiek mažesnis – Dzūkijoje (163,2 tūkst. ind./m^2), o mažiausias – Aukštaitijoje (131,2 tūkst.

ind./m²) (3.1.1 pav.). Tokie skirtumai gali būti susiję su dirvožemio savybėmis: Žemaitijos dirvožemiai yra palankesni dėl didesnio drėgnumo ir organinės medžiagos kiekio, o Dzūkijoje vyrauja smėlingi, mažo humusingumo dirvožemiai, kurie riboja mikroartropodų gausumą.

Visose trijose stotyse aiškiai dominuoja oribatidinės erkės, sudarančios 78,0–81,0 % visų mikroartropodų. Didžiausia jų dalis nustatyta Dzūkijoje (81,0 %), kiek mažesnė – Žemaitijoje (78,0 %) ir Aukštaitijoje (78 %) (3.1.2 pav.) Tai rodo, kad oribatidinės erkės yra stabilus ir pagrindinis dirvožemio mikroartropodų bendrijų komponentas, nepriklausomai nuo regioninių sąlygų.

Kitų mikroartropodų grupių (gamazidinių, akaridinių erkių ir kolembolų) dalis tarp stočių skiriasi. Žemaitijoje nustatyti didžiausi kolembolų ir gamazidinių erkių gausumai, kas gali rodyti palankesnes mitybines sąlygas ir intensyvesnius organinės medžiagos skaidymo procesus. Dzūkijoje šių grupių gausumas yra mažesnis, kas atitinka mažesnio produktyvumo ir skurdesnių dirvožemių charakteristikas.

Oribatidinių erkių rūšinė įvairovė taip pat skiriasi tarp stočių. Didžiausias rūšių skaičius nustatytas Žemaitijoje (32 rūšys), vidutinis – Aukštaitijoje (29 rūšys), o mažiausias – Dzūkijoje (22 rūšys) (3.1.1 lentelė). Visose stotyse bendrijų branduolį sudaro panašios smulkios dirvožeminės rūšys, tokios kaip *Oppiella nova*, *Brachychthonius* spp. ir *Suctobelbella* spp., tačiau jų dominavimo laipsnis skiriasi. Visose tirtose teritorijose dominavo *Oppiella nova*, kuri Dzūkijoje pasiekė eudominantinės rūšies lygį (41,75 %), tuo tarpu Aukštaitijoje ir Žemaitijoje išliko dominuojanti. *Brachychthoniidae* atstovai buvo stabiliai dominuojantys visose teritorijose. Didžiausia subdominantinių rūšių įvairovė nustatyta Žemaitijoje (3.1.4 lentelė).

Biologinės įvairovės indeksai patvirtina šiuos skirtumus. Žemaitijos stotyje nustatytas didžiausias Shannon–Wiener indeksas (H' = 2,45) ir aukštas Pielou tolygumo indeksas (J' = 0,71), rodantys subalansuotą ir tolygią bendriją (3.1.3 lentelė). Dzūkijoje įvairovė yra vidutinė (H' = 1,81), tačiau būdingas didesnis dominavimas (D = 0,25) ir mažesnis tolygumas (J' = 0,58). Aukštaitijoje nustatyta mažiausia įvairovė (H' = 0,96) ir labai mažas tolygumas (J' = 0,28), rodantys stipriai dominuojančią, mažiau įvairią bendriją (3.1.3 lentelė).

Apibendrinant galima teigti, kad mikroartropodų bendrijų struktūra aiškiai atspindi dirvožemio ekologines sąlygas: nuo turtingesnių ir stabilesnių bendrijų Žemaitijoje iki labiau supaprastintų ir dominuojamų bendrijų Dzūkijoje ir ypač Aukštaitijoje.

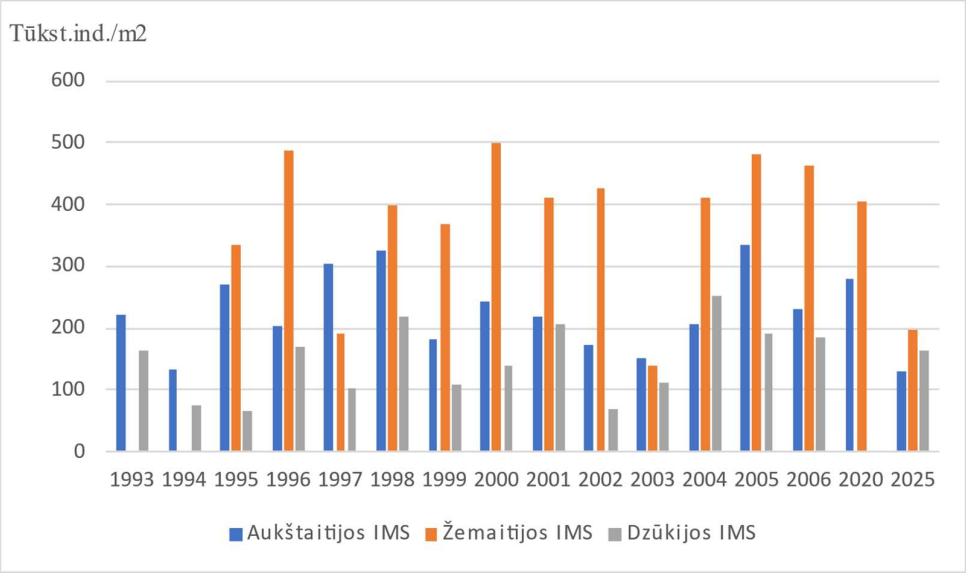
3.1.4 lentelė. Oribatidinių erkių rūšių dominavimas pagal Engelmano (1978) klasifikaciją Aukštaitijos, Žemaitijos ir Dzūkijos KM stočių dirvožemiuose 2025 m.

	Aukštaitijos KMS		Žemaitijos KMS		Dzūkijos KMS	
	Rūšis	**%**	**Rūšis**	**%**	**Rūšis**	**%**
Eudominantinės rūšys pavyzdyje sudaro 40–100%					Oppiella nova	41,75
Dominuojančios rūšys – 12,5–39,9 %	*Oppiella nova*	34,84	*Brachychthonius spp.*	31,99	*Brachychthonius spp.*	20,5
	Brachychthonius spp.	16,86	*Oppiella nova*	18,27	*Suctobelbella sp.*	14,2
Subdominuojančios rūšys – 4,0–12,4 %	*Nothrus silvestris*	9,73	*Hypochthoniella minutissima*	6,73	*Suctobelba sp.*	7,63
	Oppia sp.	9,5	*Suctobelba sp.*	5,07	*Nothrus silvestris*	4,39
	Suctobelba sp.	7,01	*Nothrus silvestris*	4,55	*Quadroppia quadricarinata*	4,29
	Suctobelbella sp.	6,11	*Nothrus sp.*	4,28		
			Malaconothrus sp.	4,2		
Retos rūšys – 1,3–3,9 %;	*Quadroppia quadricarinata*	2,38	*Hypochthonius rufulus*	3,41	*Oribotritia loricata*	1,43
	Malaconothrus sp.	1,7	*Nanhermannia sp.*	2,19		
	Nanhermannia sp.	1,7	*Heminothrus sp.*	1,66		
	Phthiracarus globosus	1,58	*Oribatula tibialis*	1,4		
	Ceratozetella minima	1,36	*Tectocepheus velatus*	1,4		
Labai retos rūšys – mažiau nei 1,3 %.	Viso 18 rūšių	7,23	Viso 20 rūšių	14,85	Viso 15 rūšių	5,81

.

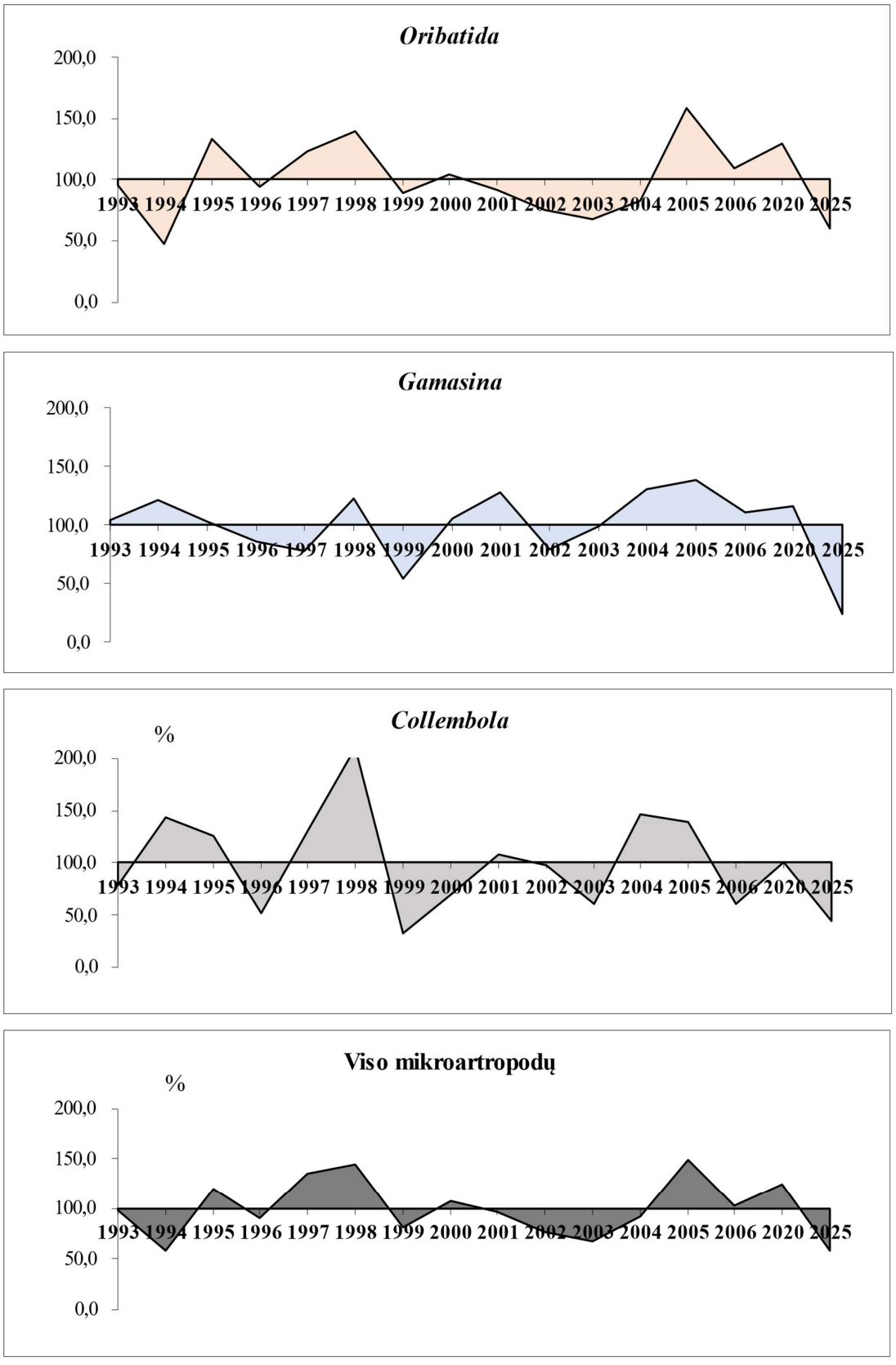
3.3.5. Mikroartropodų bendrijų struktūros pokyčiai KMS remiantis ankstesnių tyrimų duomenimis

Išanalizavus ilgamečius 1993–2006 m., 2020 m. (tik Aukštaitijos KMS ir Žemaitijos KMS) ir 2025 m. tyrimų duomenis galime teigti, kad bendras mikroartropodų vidurkis buvo didžiausias ŽKMS (372,8 tūkst.ind./m²), vidutinis AKMS (225,5 tūkst.ind./m²) ir žemiausias Dzūkijos KMS (148,5 tūkst.ind./m²). ***2025 m. duomenys rodo sumažėjimą AKMS (131,2 tūkst.ind./m²) ir ŽKMS (197,6 tūkst.ind./m²), o DKMS vidurkis padidėjo (163,2 tūkst.ind./m²) lyginant su ilgamečiu vidurkiu*** (3.13 pav.). Tokie skirtumai gali atspindėti dirvožemio struktūros ir mikroklimato skirtumus nacionaliniuose parkuose. Sumažėjimas 2025 m. AKMS ir ŽKMS gali būti laikinas, susijęs su metiniais svyravimais, nors visgi ilgalaikiai duomenys rodo stabilų ŽKMS pranašumą gausumo požiūriu. DKMS duomenų padidėjimas gali rodyti lokaliai gerėjančias ekologines sąlygas ar mikroartropodų bendrijos struktūros pokyčius. Tai gali būti susijęs su metiniais mikroklimato svyravimais ir trumpalaikiais dirvožemio sąlygų pokyčiais**,** o ne tik su ilgalaikėmis ekologinėmis tendencijomis.

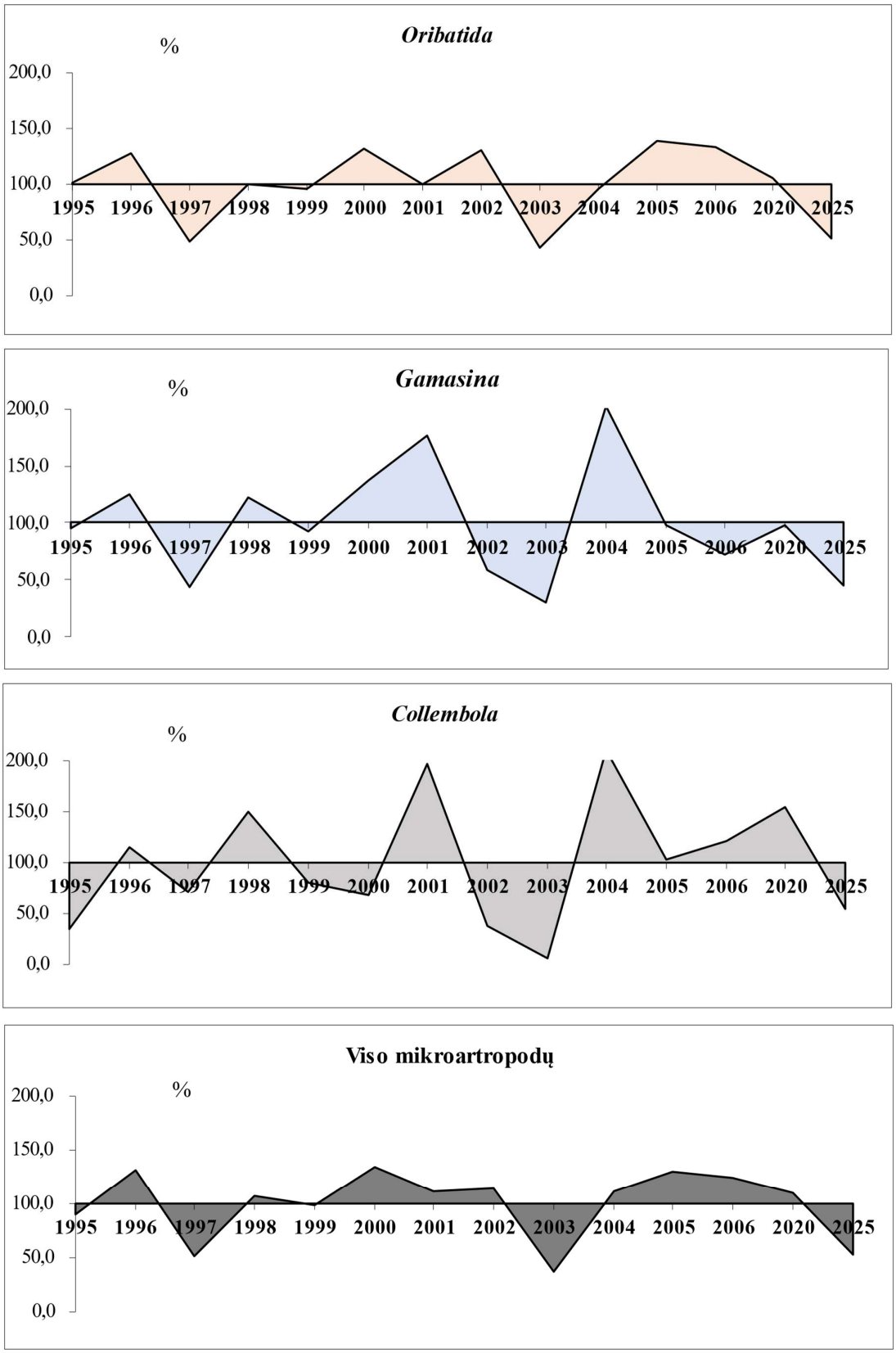


3.13 pav. Bendras mikroartropodų gausumas (Tūkst.ind./m^2) Aukštaitijos, Žemaitijos ir Dzūkijos KMS dirvožemiuose 1993-2025 metais

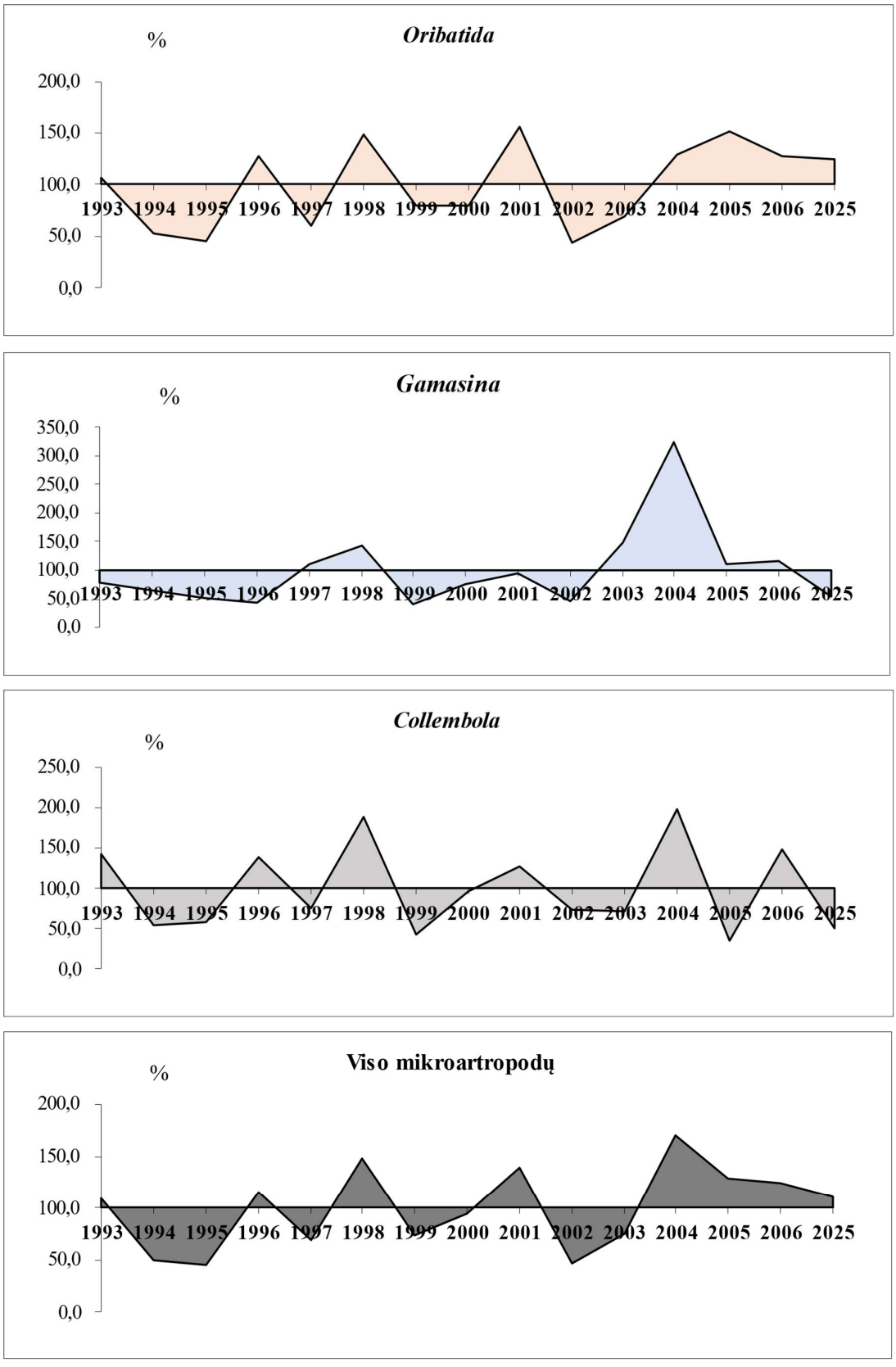
Apskaičiavus bendrą mikroartropodų vidutinį gausumą per visus tyrimo metus (taip pat ir atskiroms mikroartropodų grupėms) ir jį prilyginus 100%, matome atskirų grupių gausumo svyravimus per visą tyrimo laikotarpį. Aukštaitijos KMS visų mikroartropodų didžiausias teigiamas nuokrypis nuo vidurkio buvo 1997, 1998 ir 2005 m., o neigiamas – 2003 ir 2025 m. (3.14 pav.). Ryškūs skirtumai nuo vidurkio išryškėjo kolembolų gausume 1997, 1998 ir 2004 ir 2005 metais.



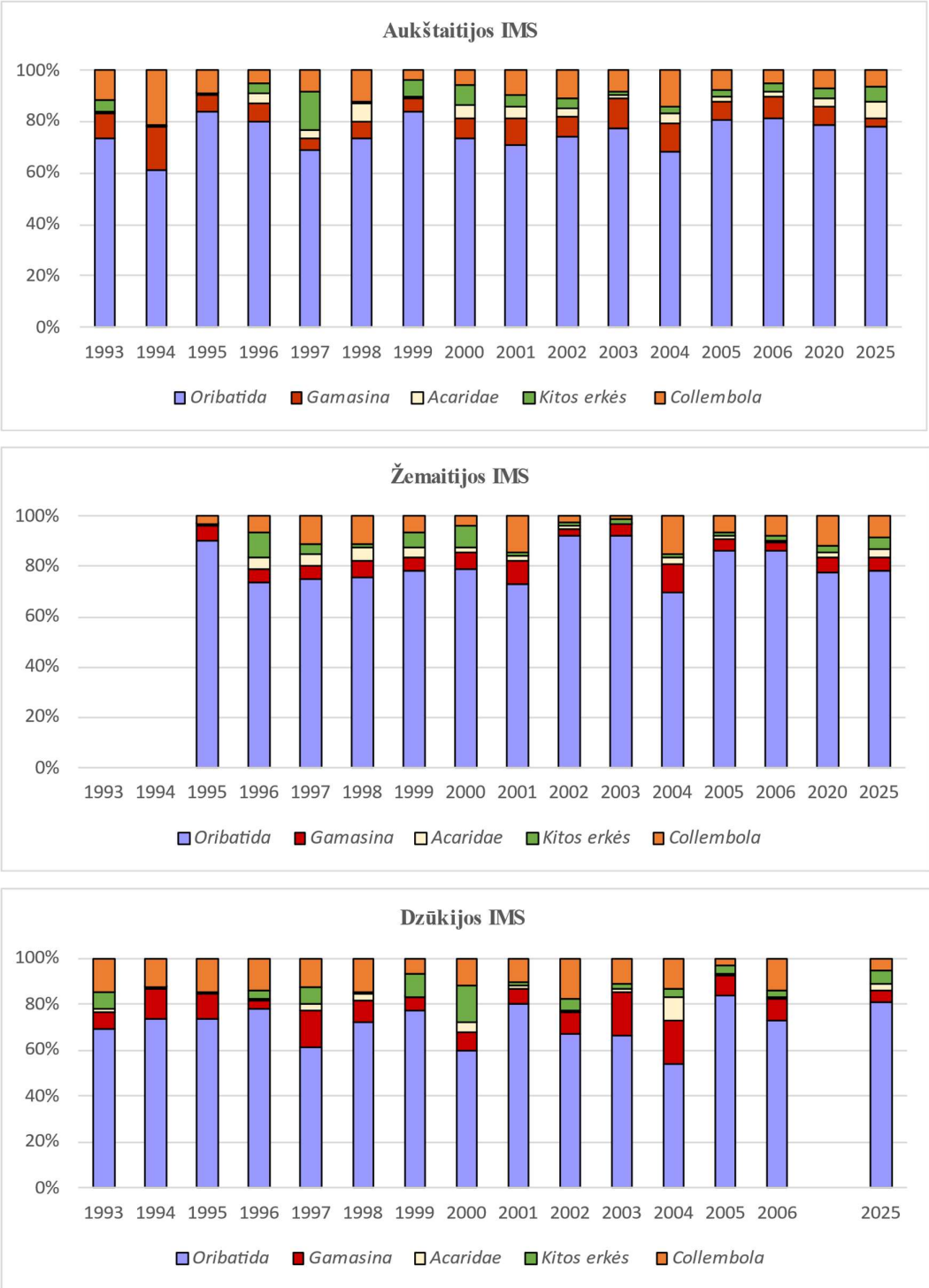
3.14 pav. Mikroartropodų gausumo procentinis nuokrypis nuo 16 metų bendro vidurkio Aukštaitijos KMS dirvožemyje



3.15 pav. Mikroartropodų gausumo procentinis nuokrypis nuo 14 metų bendro vidurkio Žemaitijos KMS dirvožemyje



3.16 pav. Mikroartropodų gausumo procentinis nuokrypis nuo 15 metų bendro vidurkio Dzūkijos KMS dirvožemyje



3.17 pav. Mikroartropodų komplekso struktūra (%) Aukštaitijos, Žemaitijos ir Dzūkijos KMS dirvožemiuose 1993 - 2025 metais.

Stebint mikroartropodų gausumo dinamiką Žemaitijos KMS dirvožemyje, imant 14 tyrimo metų, procentinis nuokrypis nuo bendro vidurkio yra nežymus (3.15 pav.). Neigiamas nuokrypis pastebimas tik 1997 m., 2003 m. ir 2025 m. Tokia pati tentencija atsispindi ir oribatidinių erkių dinamikoje. Nuokrypiai nuo vidurkio žymiai ryškesni stebint gamazidinių

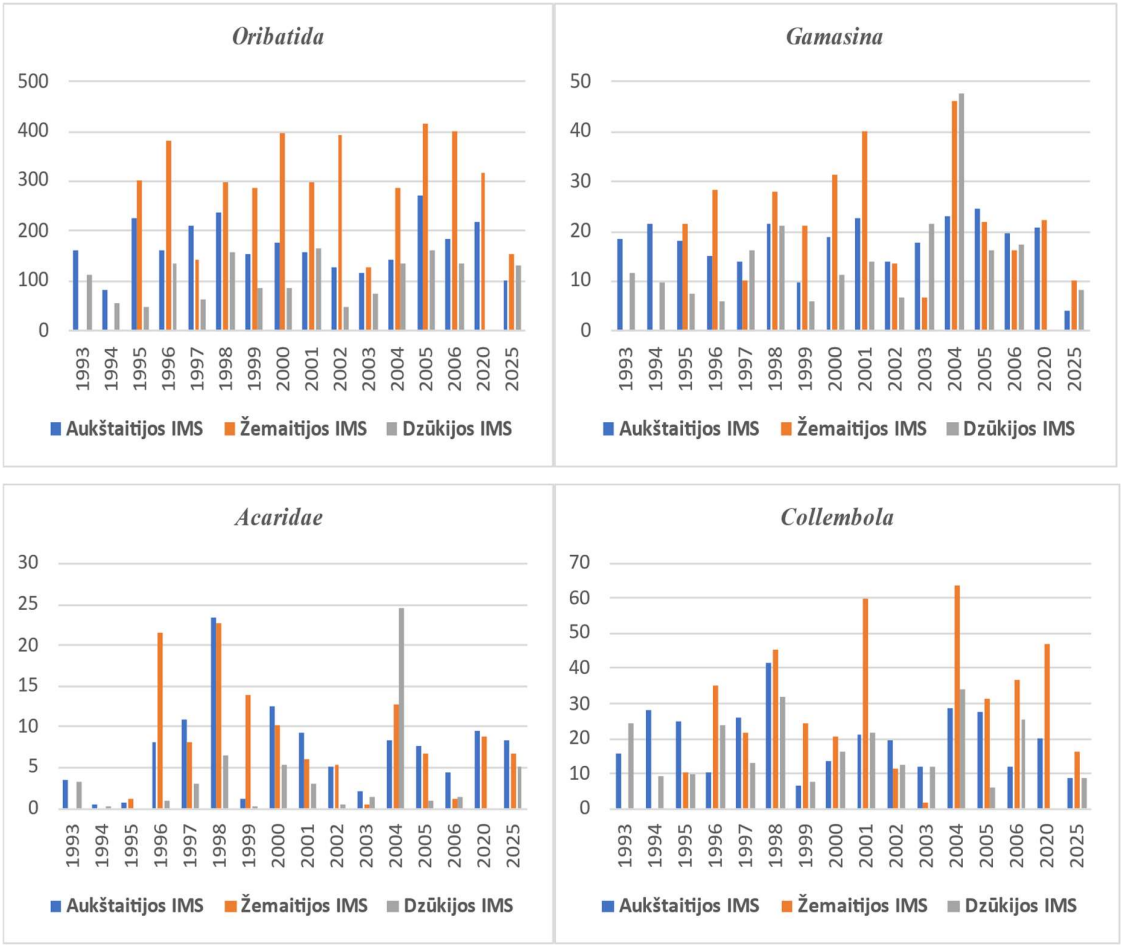
erkių ir kolembolų dinamiką. Žinoma, kad pedobiontų gausumą ir rūšių skaičių tiesiogiai sąlygoja metinis kritulių kiekis ir vidutinė oro temperatūra vegetacijos laikotarpiu. Jautriausiai į dirvožemio drėgmės ir temperatūrų svyravimus reaguoja gamazidinės erkės, ypač jų gausumas, ir kolembolos.

Dzūkijos nacionalinio parko dirvožemyje mikroartropodų gausumo dinamika per visą tyrimo laikotarpį pasižymi gana ryškiais svyravimais. Didžiausi teigiami nuokrypiai nuo bendro vidurkio nustatyti apie 1998 m. ir ypač 2004–2006 m. laikotarpiu, kai bendras mikroartropodų gausumas viršijo vidutinį lygį (3.16 pav.). Ryškiausi neigiami nuokrypiai fiksuoti apie 1994–1995 m. bei 2003 m., kai gausumas buvo gerokai mažesnis už vidurkį. Analizuojant atskiras grupes, matyti, kad oribatidinių erkių gausumo svyravimai yra santykinai nežymūs, tačiau išsiskiria padidėjimas apie 1998 m. ir 2005–2006 m., o sumažėjimas – apie 2003 m. Gamazidinių erkių dinamika pasižymi didžiausiais svyravimais: itin ryškus pikas stebimas apie 2004 m., kai gausumas kelis kartus viršija vidurkį, o ankstesniais laikotarpiais vyrauja žemesnės reikšmės.

Kolembolų gausumo kaita taip pat pastebima – išryškėja padidėjimai apie 1998 m., 2004 m. ir 2006 m., o reikšmingi sumažėjimai fiksuojami apie 1994–1995 m., 1999 m. ir 2005 m. Lyginant su kitomis grupėmis, kolembolos rodo gana staigius ir kontrastingus pokyčius (3.5.4 pav.).

Daugiamečių tyrimų, atliktų sąlyginai natūraliose ekosistemose kompleksinio monitoringo stotyse, rezultatai rodo, kad dirvožemių mikroartropodų kompleksai skiriasi gausumu, rūšine įvairove ir struktūra (Aplinkos monitoringo ataskaita, 2006). Tiek Aukštaitijos, tiek Žemaitijos ir Dzūkijos KM stočių dirvožemiuose mikroartropodų tarpe dominuoja oribatidinės erkės (3.17 pav.). Todėl šiuos dirvožemius galime apibūdinti kaip mikroartropodinius-oribatidinius. Mikroartropodų struktūra paskutiniaisiais tyrimų metais neišsiskyrė iš bendro ilgamečių tyrimų vidurkio.

Žemaitijos KM stoties dirvožemis išsiskiria ne tik oribatidinių erkių rūšine įvairove, bet ir jų gausumu. Ilgamečių tyrimų rezultatai rodo, kad oribatidinių erkių gausumas vidutiniškai buvo 300,2 tūkst. ind./m^2. 2025 m. jų aptikta 154,9 tūkst. ind./m^2. Aukštaitijos KM stotyje vidutinis oribatidinių erkių gausumas ilgamečių dinaminių tyrimų duomenimis buvo 170,6 tūkst. ind./m^2. 2025 metais - 102,9 tūkst. ind./m^2 (3.18 pav.).



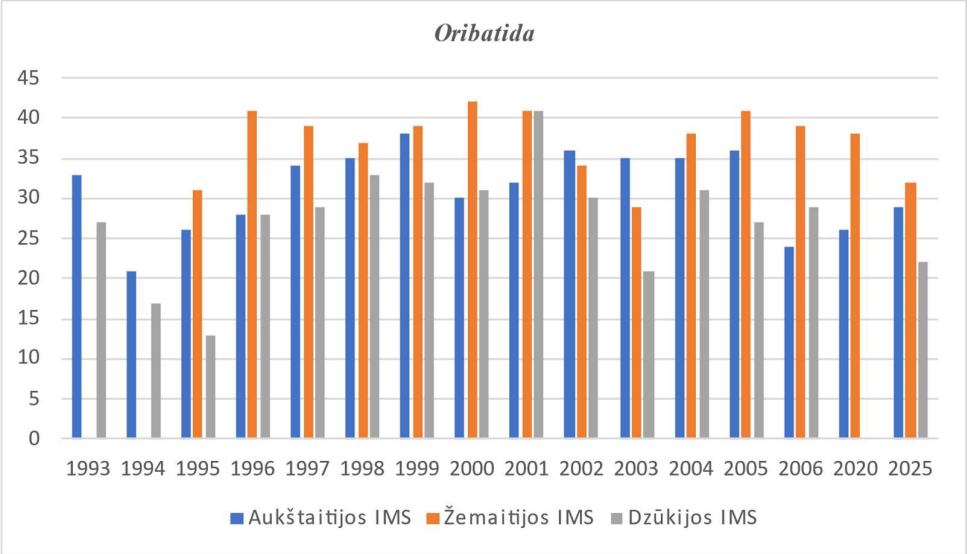
3.18 pav. Atskirų mikroartropodų grupių gausumas (Tūkst.ind./m^2) Aukštaitijos ir Žemaitijos KMS dirvožemiuose

2025 m. gamazidinių erkių gausumas visuose regionuose buvo mažesnis už daugiametį vidurkį. Aukštaitijos KMS nustatytas ryškiausias sumažėjimas – gausumas siekė 4,3 tūkst. ind./m², t. y. apie 4 kartus mažiau nei ilgametis vidurkis (17,7 tūkst. ind./m²). Žemaitijos KMS šis rodiklis (10,1 tūkst. ind./m²) buvo daugiau nei 2 kartus mažesnis už daugiametį vidurkį (22,7 tūkst. ind./m²). Dzūkijos KMS taip pat fiksuotas sumažėjimas – 2025 m. gausumas (8,1 tūkst. ind./m²) buvo apie 1,7 karto mažesnis nei daugiametis vidurkis (14,1 tūkst. ind./m²) (3.18 pav.). Šie rezultatai rodo, kad 2025 m. sąlygos visuose tirtuose regionuose buvo nepalankios gamazidinių erkių gausumui, tačiau didžiausias neigiamas poveikis pasireiškė Aukštaitijoje.

2025 m. akaridinių erkių gausumo pokyčiai tarp regionų buvo nevienodi. Aukštaitijos KMS nustatytas nedidelis padidėjimas – 2025 m. gausumas siekė 8,3 tūkst. ind./m² ir šiek tiek viršijo daugiametį vidurkį (7,3 tūkst. ind./m²). Priešinga tendencija fiksuota Žemaitijos KMS, kur 2025 m. gausumas (6,8 tūkst. ind./m²) buvo mažesnis už daugiametį vidurkį (9,0 tūkst. ind./m²). Dzūkijos KMS taip pat stebėtas padidėjimas – 2025 m. gausumas (5,1 tūkst. ind./m²) viršijo daugiametį vidurkį (3,7 tūkst. ind./m²) (3.18 pav.).

Remiantis oribatidinių erkių rūšių skaičiaus duomenimis (1993–2006 m., 2020 m. ir 2025 m.), galima papildomai įvertinti šios grupės rūšinės įvairovės dinamiką skirtinguose KMS dirvožemiuose (3.19 pav.). Aukštaitijos KMS oribatidinių erkių rūšių skaičius per visą tyrimo laikotarpį svyravo santykinai nedideliame intervale (21–38 rūšys). Didžiausia rūšinė įvairovė nustatyta 1999 m. (38 rūšys), o mažesnės reikšmės fiksuotos 1994 m. (21 rūšis) ir 2006 m. (24 rūšys). 2025 m. registruotos 29 rūšys rodo nedidelį sumažėjimą lyginant su ilgamečiu maksimumu, tačiau bendrame kontekste ši reikšmė išlieka artima daugiametei vidutinei, todėl galima teigti, kad rūšinė įvairovė iš esmės išliko stabili, nepaisant gausumo sumažėjimo.

Žemaitijos KMS pasižymi didžiausiu oribatidinių erkių rūšių skaičiumi tarp tirtų KMS dirvožemių (3.19 pav.). Tyrimų laikotarpiu čia nustatyta 29–42 rūšys, o didžiausia įvairovė fiksuota 2000 m. (42 rūšys). Net ir mažesnių reikšmių metais (pvz., 2003 m. – 29 rūšys) rūšių skaičius išliko aukštas. 2025 m. nustatytos 32 rūšys rodo tam tikrą sumažėjimą, lyginant su ankstesniais piko metais, tačiau bendra tendencija patvirtina, kad Žemaitijos KMS išlieka turtingiausia rūšimis. Tai atitinka ir anksčiau nustatytą didesnį šios teritorijos mikroartropodų gausumą.



3.19 pav. Oribatidinių erkių rūšių skaičius Aukštaitijos, Žemaitijos ir Dzūkijos KM stočių dirvožemiuose 1993-2025 m.

Dzūkijos KMS oribatidinių erkių rūšių skaičiaus dinamika pasižymi didesniais svyravimais (13–41 rūšis) (3.19 pav.). Mažiausia rūšinė įvairovė nustatyta 1995 m. (13 rūšių), o didžiausia – 2001 m. (41 rūšis). Po šio piko stebimas tam tikras sumažėjimas, ypač 2003 m. (21 rūšis), tačiau vėlesniais metais rūšių skaičius iš dalies atsistato. 2025 m. registruotos 22 rūšys rodo sumažėjimą, palyginti su ilgamečiu maksimumu, tačiau yra artimos laikotarpio su mažesne įvairove reikšmėms. Tai leidžia manyti, kad Dzūkijos KMS rūšinė įvairovė yra jautresnė aplinkos svyravimams.

3.3.5 Pedobiontų kaitą sąlygojantys veiksniai

Miško ekosistemų stabilumas priklauso nuo biodestruktorių komplekso. Oribatidinės (*Oribatida*) ir gamazidinės (*Gamasina*) erkės bei kolembolos (*Collembola*) yra svarbūs dirvožemio organinių liekanų skaidytojai, aktyviai dalyvaujantys organinės medžiagos mineralizacijos, humifikacijos ir maisto medžiagų ciklų procesuose (Zhang et al., 2021). Mikroartropodai yra esminiai dirvožemio maisto tinklo komponentai, kurie prisideda prie skaidymo procesų tiek tiesiogiai, maitindamiesi organinėmis liekanomis, tiek netiesiogiai, reguliuodami mikroorganizmų bendrijas (Delcourt et al., 2026).

Didžiausia pedobiontų įvairovė yra sąlygiškai natūralių ekosistemų dirvožemiuose. Ekosistemų stabilumas didėja priklausomai nuo jų sudėtingumo ir biologinės įvairovės, nes dirvožemio biotos įvairovė ir tarpusavio sąveikų tinklas yra esminiai veiksniai, lemiantys ekosistemų funkcijų stabilumą ir atsparumą aplinkos pokyčiams (Wang et al., 2025).

Klimatiniai veiksniai, ypač dirvožemio drėgmė ir temperatūra, daro didelę įtaką mikroartropodų bendrijų dinamikai: mikroklimato pokyčiai per sezoną ar tarp metų gali reikšmingai paveikti mikroartropodų gausumą ir bendrijos struktūrą, o tokie svyravimai dažnai yra didesni už vietinių biologinių veiksnių įtaką, ypač miško ekosistemose (Chen et al., 2024).

Dirvožemio cheminės ir fizikinės savybės, tokios kaip pH, drėgmė ir organinės medžiagos kiekis, turi reikšmingą poveikį oribatidinių erkių skaitlingumui ir rūšinei įvairovei – pavyzdžiui, didelė organinės medžiagos koncentracija dažnai siejama su didesne rūšių įvairove ir gausumu, o nepalankios dirvožemio sąlygos ar antropogeninė tarša gali reikšmingai mažinti bendrijos dydį ir įvairovę (Feketeová et al., 2021). Didelis oribatidinių erkių dominavimas rodo stabilias ir mažai trikdomas dirvožemio sąlygas (Wissuwa et al., 2013).

Aplinkos kaita (ypač klimato šiltėjimas, kritulių režimo pokyčiai ir antropogeniniai trikdžiai) daro reikšmingą poveikį dirvožemio mikroartropodų bendrijoms net ir sąlygiškai natūraliose miškų ekosistemose. Tyrimai rodo, kad pagrindiniai veiksniai, lemiantys mikroartropodų (ypač erkių ir kolembolų) gausumą ir rūšinę sudėtį, yra dirvožemio drėgmė ir temperatūra – jų pokyčiai tiesiogiai veikia organizmų vystymąsi, reprodukciją ir išgyvenamumą (Xu, 2012). Sausrų metu mažėja tiek kolembolų, tiek erkių gausumas ir įvairovė, o tai ypač ryšku miško paklotės sluoksnyje, kuris yra pagrindinė jų buveinė. Temperatūros didėjimas gali lemti skirtingas reakcijas skirtingoms taksonominėms grupėms – pavyzdžiui, kai kurių oribatidinių erkių gausumas gali didėti, o kitų grupių (pvz., gamazidinių erkių ar kolembolų) – mažėti (Meehan, 2020). Pastarųjų metų klimato tendencijos, ypač didėjantys temperatūros vidurkiai ir netolygus kritulių pasiskirstymas (sausros ir intensyvūs lietūs), gali turėti reikšmingą poveikį dirvožemio mikroartropodų bendrijoms. Tyrimai rodo, kad klimato kaitos

veiksniai, ypač dirvožemio drėgmės pokyčiai, turi didesnį poveikį mikroartropodų bendrijų struktūrai nei vien temperatūros pokyčiai, nes sausros ir drėgmės pokyčiai keičia mikroartropodų gausą, rūšių sudėtį ir dinamines savybes dirvožemyje. Kritulių sukeliami dirvožemio drėgmės svyravimai veikia kolembolų ir kitų mikroartropodų populiacijas ir biologinę įvairovę, nes jų gausa ir rūšių įvairovė dažniausiai yra tiesiogiai susijusios su dirvožemio drėgmės kiekiu ir temperatūra (Kardol et al., 2011).

Spygliuočių miškų ekosistemose mikroklimato sąlygos (storas paklotės sluoksnis, didelis organinės medžiagos kiekis) iš dalies amortizuoja aplinkos svyravimus, tačiau ilgalaikiai klimato pokyčiai keičia bendrijų struktūrą ir rūšinę sudėtį (Kamczyc et al., 2022).

Tirtų KM stočių dirvožemiuose – tiek Aukštaitijos, tiek Žemaitijos ir Dzūkijos regionuose nustatyta, kad mikroartropodų bendrijose ryškiai dominuoja oribatidinės erkės. Ši grupė sudaro didžiausią dalį visų dirvožemio erkių ir pasižymi stabiliai aukštu gausumu skirtingose buveinėse, todėl laikoma viena svarbiausių dirvožemio mikrofaunos komponentų. Toks dominavimas rodo jų gerą prisitaikymą prie įvairių aplinkos sąlygų ir svarbų vaidmenį dirvožemio ekosistemų funkcionavime.

Nustatyta, kad stabiliose ekosistemose oribatidinių erkių sukcesija vyksta labai lėtai, o jų bendrijos pasižymi dideliu struktūriniu stabilumu. Tai siejama su jų gyvenimo strategija – lėtu vystymusi, mažu reprodukcijos greičiu ir santykinai pastovia mitybine niša. Naujausi tyrimai rodo, kad oribatidinių erkių trofinė struktūra išlieka stabili net esant ilgalaikiams aplinkos pokyčiams, o tai rodo ribotą gebėjimą greitai keisti mitybos šaltinius (Gan et al., 2014).

Sudėtingas vystymosi ciklas leidžia šiai grupei naudoti įvairius maisto šaltinius skirtinguose ontogenezės etapuose – nuo grybų hifų iki augalinių liekanų ar mikroorganizmų, taip užtikrinant efektyvų resursų panaudojimą tame pačiame substrate. Be to, oribatidinės erkės yra svarbios skaidytojų grandies dalyviai, nes jos tiesiogiai dalyvauja organinės medžiagos skaidyme ir netiesiogiai reguliuoja mikroorganizmų bendrijas (Magilton et al., 2019).

Ilgalaikė šios grupės evoliucinė raida ir funkcinis konservatyvumas lėmė didelę trofinę įvairovę, apimančią įvairius mitybos lygius – nuo detritofagų iki plėšrūnų, kas dar labiau prisideda prie dirvožemio maisto tinklo stabilumo (Schaefer, Caruso 2019).

Kolembolos tai mikroartropodų grupė jautriausiai reaguojanti net į mikroekologinius pakitimus ekosistemose dirvožemio lygyje. Tiriant kolembolų gausumą skirtingo amžiaus pušynų dirvožemiuose nustatyta, kad drėgmės fliuktacijos dirvožemyje koreliuoja su kolembolų gausumu (Jucevica, Melecis, 2002, 2006). Tirtuose dirvožemiuose kolembolų gausumas pasižymėjo dideliu kintamumu ir tarpmetiniais svyravimais. Skirtingai nei oribatidinių erkių, šių mikroartropodų skaitlingumas atskirose tyrimo vietose ir laikotarpiais galėjo smarkiai didėti arba mažėti, atspindėdamas aplinkos sąlygų nepastovumą. Toks

kintamumas rodo, kad kolembolos yra jautresnės dirvožemio mikroklimato ir resursų pokyčiams bei greičiau į juos reaguoja. Kolembolos pasižymi dideliu mobilumu ir greita reakcija į aplinkos pokyčius, todėl jų gausumas ir pasiskirstymas glaudžiai susijęs su resursų prieinamumu bei mikroaplinkos sąlygomis – sumažėjus maisto ištekliams, jos gali migruoti į palankesnes buveines (Potapov et al., 2020). Pastarieji metai Lietuvoje buvo šiltesni už daugiametį vidurkį: 2024 m. tapo šilčiausiais per stebėjimų istoriją. 2025 m. vidutinė metinė temperatūra siekė apie 8,4 °C ir buvo 1 °C aukštesnė už daugiametį vidurkį, o metinis kritulių kiekis buvo apie 675 mm, tai rodo šiltesnes ir šiek tiek sausesnes nei įprastai klimatines sąlygas (Lietuvos hidrometeorologijos tarnyba, 2024–2026).

Sengirių dirvožemiuose vykstantys biologiniai procesai mažai pažeisti antropogeninių bei klimatinių veiksnių. Atskiros mikroartropodų grupės yra patikimi bioindikatoriai, atspindintys atskirų metų aplinkos užterštumo ir klimatinių sąlygų poveikį dirvožemio biologiniams procesams. Miško ekosistemose, kur vyrauja pastovios sąlygos ir gausus organinių liekanų kiekis, mikroartropodų bendrijos išlieka stabilios ir atsparios vidutinio lygio aplinkos svyravimams, o jų struktūra gali būti naudojama kaip patikimas dirvožemio būklės indikatorius (Arroyo, Iturrondobeitia, 2006).

Daugelio gyvūnų reprodukcijos būdas koreliuoja su ekologiniais faktoriais. Esant ribotam resursų kiekiui ekosistemoje dominuoja lytiškai besidauginančios rūšys, o partenogenetinės rūšys dominuoja stabiliose ekosistemose, nes joms nereikia adaptuotis prie besikeičiančių aplinkos sąlygų (Domes et al., 2007). Kadangi miškai yra stabilios ekosistemos, partenogenetinių gyvūnų (erkių, kolembolų, enchitrėjų, nematodų) procentinis santykis miškuose yra didesnis nei kitose ekosistemose (Niklasson et al., 2000). Stabiliose, mažai trikdomose buveinėse partenogenezė yra dažnesnė, nes tokios sąlygos palankios ilgalaikiam populiacijų išsilaikymui be būtinybės greitai prisitaikyti prie kintančios aplinkos. Pavyzdžiui, nustatyta, kad dirvožemio bestuburių, ypač kolembolų, partenogenetinės rūšys gali sudaryti iki 78 % individų miško dirvožemiuose, o tai rodo jų dominavimą stabiliose ekosistemose (Chernova, 2010).

Tai atsispindi ir išanalizavus mikroartropodų kompleksų rūšinę struktūrą Aukštaitijos ir Žemaitijos KM stočių dirvožemiuose – komplekso branduolį juose sudaro smulkios dirvožeminės oribatidų rūšys, tai daugiausia partenogenetiškai besidauginančios rūšys iš Oppiidae ir Suctobelbidae šeimų. Vyrauja Oppiella nova, Suctobelbella sp. Oppiella nova viena plastiškiausių ekologiniu atžvilgiu oribatidinių erkių rūšių, labiausiai mėgstanti spygliuočių mišką, kur jų vidutiniškai aptinkama 41,4 tūkst. ind. m^2. 2025 m. Aukštaitijos, Žemaitijos ir Dzūkijos KM stočių dirvožemiuose šių erkių buvo aptikta atitinkamai vidutiniškai 30,8, 20,9 ir 43,8 tūkst. ind./m^2.

Apibendrinant galima teigti, kad mikroartropodų bendrijų struktūra tirtuose miško dirvožemiuose atspindi ekosistemų stabilumą ir aplinkos sąlygų įtaką. Oribatidinės erkės pasižymi dideliu stabilumu ir dominuoja pastoviose sąlygose, kolembolos ir kitos jautresnės grupės greičiau reaguoja į aplinkos svyravimus. Dėl šių savybių mikroartropodų bendrijos, ypač jų struktūra ir dominavimo pobūdis, gali būti laikomos patikimu dirvožemio būklės ir ekosistemų pokyčių bioindikatoriumi.

3.3.6. ***Dirvožemio mikroartropodų bendrijų ilgalaikės kaitos KMS baseinuose apibendrinimas***

Ilgalaikiai 1993–2025 m. dirvožemio mikroartropodų tyrimai Aukštaitijos, Žemaitijos ir Dzūkijos KMS parodė, kad šių organizmų gausumas, rūšinė įvairovė ir bendrijų struktūra yra glaudžiai susiję su regioninėmis dirvožemio savybėmis, miško paklotės formavimosi procesais ir mikroklimato sąlygomis. Per visą tyrimų laikotarpį didžiausias bendras mikroartropodų gausumas nustatytas Žemaitijos KMS (372,8 tūkst. ind. m^{-2}), mažesnis Aukštaitijos KMS (225,5 tūkst. ind. m^{-2}) ir mažiausias Dzūkijos KMS (148,5 tūkst. ind. m^{-2}). Šis gradientas atspindi skirtingą dirvožemio produktyvumą, organinės medžiagos kiekį bei drėgmės režimą.

2025 m. tyrimų rezultatai parodė mikroartropodų gausumo mažėjimą Aukštaitijos ir Žemaitijos KMS, kur bendras gausumas sumažėjo atitinkamai iki 131,2 ir 197,6 tūkst. ind. m^{-2}. Tuo tarpu Dzūkijos KMS nustatytas padidėjimas iki 163,2 tūkst. ind. m^{-2}, viršijantis ilgalaikį vidurkį. Tai rodo, kad oligotrofinės Dzūkijos pušynų ekosistemos, nepaisant mažesnio bendro biologinio produktyvumo, paskutiniu laikotarpiu galėjo sudaryti palankesnes sąlygas dirvožemio bestuburių bendrijoms.

Visose KMS mikroartropodų bendrijos išliko oribatidinio tipo – jose dominavo oribatidinės erkės, kurios sudaro stabiliausią dirvožemio mezofaunos komponentą. Šios grupės dinamika pasižymėjo santykinai nedideliais svyravimais, o tai rodo ilgalaikį dirvožemio biologinės struktūros stabilumą. 2025 m. oribatidinių erkių gausumas sumažėjo Aukštaitijos KMS (102,9 tūkst. ind. m^{-2}, palyginti su 170,6 tūkst. ind. m^{-2} vidurkiu) ir Žemaitijos KMS (154,9 tūkst. ind. m^{-2}, palyginti su 300,2 tūkst. ind. m^{-2} vidurkiu), tačiau rūšinės įvairovės rodikliai išliko gana stabilūs.

Oribatidinių erkių rūšinės įvairovės analizė patvirtino skirtingą KMS ekosistemų stabilumą. Aukštaitijos KMS rūšių skaičius per visą laikotarpį svyravo 21–38 rūšių intervale, o 2025 m. nustatytos 29 rūšys rodo, kad, nepaisant gausumo sumažėjimo, bendrijos struktūra iš esmės išliko stabili. Žemaitijos KMS pasižymėjo didžiausia rūšine įvairove (29–42 rūšys), o

2025 m. registruotos 32 rūšys patvirtina, kad ši teritorija išlieka turtingiausia dirvožemio biologinės įvairovės požiūriu. Dzūkijos KMS pasižymėjo didžiausiais rūšių skaičiaus svyravimais (13–41 rūšis), o 2025 m. nustatytos 22 rūšys rodo didesnį šios oligotrofinės sistemos jautrumą aplinkos pokyčiams.

Didžiausią jautrumą aplinkos sąlygų kaitai parodė gamazidinės erkės ir kolembolos. Šių grupių gausumo svyravimai buvo gerokai didesni nei oribatidinių erkių, patvirtinant jų jautrumą dirvožemio temperatūros ir drėgmės režimo pokyčiams. 2025 m. gamazidinių erkių sumažėjimas nustatytas visose KMS: stipriausiai Aukštaitijoje (apie 4 kartus mažiau už daugiametį vidurkį), Žemaitijoje (daugiau kaip 2 kartus mažiau) ir Dzūkijoje (apie 1,7 karto mažiau). Tai leidžia manyti, kad paskutiniųjų metų hidroterminės sąlygos buvo mažiau palankios aktyviems dirvožemio plėšriesiems organizmams.

Kolembolų dinamika taip pat pasižymėjo staigiais ir kontrastingais pokyčiais. Didžiausi teigiami nukrypimai nuo vidurkio buvo registruoti 1997–1998 m. bei 2004–2006 m., kai tikėtina susidarė optimalus temperatūros ir dirvožemio drėgmės santykis. Neigiami nukrypiai, ypač 2003 m. ir kai kuriose KMS 2025 m., sutapo su laikotarpiais, kai klimatiniai ekstremumai galėjo riboti mikroorganizmų aktyvumą ir organinės medžiagos skaidymo procesus.

Akaridinės erkės parodė kitokį atsaką: 2025 m. jų gausumas padidėjo Aukštaitijos ir Dzūkijos KMS, tačiau sumažėjo Žemaitijoje. Tai gali rodyti skirtingą organinės medžiagos skaidymo stadiją ir mikrobiologinių procesų intensyvumą atskirose ekosistemose.

Gauti rezultatai gerai dera su kitais KMS ilgalaikio monitoringo rodikliais. Didėjanti oro ir dirvožemio temperatūra, sumažėjęs dirvožemio įšalas, dažnesni drėgmės ekstremumai bei besikeičianti medynų struktūra veikia ne tik medžių fiziologinę būklę ir epifitinių kerpių bendrijas, bet ir dirvožemio biologinius procesus. Medžių lajų būklės gerėjimas ir organinės medžiagos kaupimasis gali skatinti dirvožemio biotos vystymąsi, tačiau klimato ekstremumai gali mažinti jautriausių funkcinių grupių gausumą.

Apibendrinant galima teigti, kad KMS dirvožemio mikroartropodų bendrijos išlaiko pagrindinę struktūrą ir rūšinį stabilumą, tačiau 2025 m. nustatyti gausumo pokyčiai, ypač gamazidinių erkių ir kolembolų grupėse, rodo didėjantį dirvožemio ekosistemų jautrumą klimato kaitos sąlygomis. Oribatidinės erkės išlieka ilgalaikio dirvožemio stabilumo indikatoriais, o greitai reaguojančios grupės gali būti naudojamos ankstyvam hidroterminių pokyčių poveikiui nustatyti.

IŠVADOS

1. Visose tirtose integruoto monitoringo stotyse dominavo oribatidinės erkės, sudariusios 78–81 % visų mikroartropodų bendrijų, todėl tirtus dirvožemius galima apibūdinti kaip mikroartropodinius–oribatidinius.
2. Didžiausias mikroartropodų gausumas ir oribatidinių erkių rūšinė įvairovė nustatyta Žemaitijos IMS dirvožemyje (197,6 tūkst. ind./m²; 32 rūšys), o mažiausi rodikliai – Aukštaitijos IMS dirvožemyje.
3. Žemaitijos IMS mikroartropodų bendrijos pasižymėjo didžiausia biologine įvairove ir tolygiausia rūšių struktūra (H' = 2,45; J' = 0,71), tuo tarpu Aukštaitijos IMS nustatytas ryškus kelių rūšių dominavimas ir mažiausias bendrijos tolygumas.
4. Dzūkijos IMS dirvožemio mikroartropodų bendrijų struktūra buvo jautresnė aplinkos svyravimams, o tai galėtų būti siejama su smėlingais, mažo humusingumo dirvožemiais ir mažesniu organinės medžiagos kiekiu.
5. Ilgamečių tyrimų duomenys parodė, kad mikroartropodų gausumui ir rūšinei įvairovei didžiausią įtaką daro dirvožemio drėgmės ir temperatūros svyravimai, o 2025 m. daugelyje stočių nustatytas bendro gausumo sumažėjimas gali būti siejamas su šiltesnėmis ir sausesnėmis klimatinėmis sąlygomis.
6. Kolembolos ir gamazidinės erkės pasižymėjo didžiausiu tarpmetiniu gausumo kintamumu, todėl gali būti laikomos jautriausiais dirvožemio ekologinės būklės bioindikatoriais.
7. Mikroartropodų bendrijų struktūra, rūšinė sudėtis ir dominavimo pobūdis yra tinkami rodikliai vertinant miško dirvožemių ekologinę būklę bei klimato kaitos poveikį natūralioms ekosistemoms.

Tyrimo rezultatai patvirtina, kad pedobiontų bendrijų struktūra, rūšinė sudėtis ir dominavimo pobūdis yra patikimi dirvožemio ekologinės būklės indikatoriai. Mikroartropodų kompleksų analizė leidžia efektyviai vertinti tiek natūralių miško ekosistemų stabilumą, tiek klimato kaitos ir kitų aplinkos veiksnių poveikį dirvožemio biologiniams procesams. Ilgalaikis tokių tyrimų tęstinumas yra svarbus siekiant prognozuoti dirvožemio ekosistemų pokyčius bei užtikrinti miško ekosistemų biologinės įvairovės išsaugojimą ateityje.

Galimos grėsmės dirvožemio biotos stabilumui klimato kaitos sąlygomis

Ilgalaikiai KMS tyrimai rodo, kad dirvožemio mikroartropodų bendrijos kol kas išlaiko santykinai stabilią struktūrą, tačiau pastaraisiais metais registruojami gausumo ir atskirų funkcinių grupių pokyčiai gali būti ankstyvas signalas apie didėjantį dirvožemio ekosistemų jautrumą aplinkos kaitai.

Viena svarbiausių ateities grėsmių yra didėjantis klimato ekstremalumas. Oro ir dirvožemio temperatūros kilimas, trumpėjantis dirvožemio įšalo laikotarpis, dažnėjančios sausros ir staigūs drėgmės svyravimai gali keisti mikroartropodų gyvenimo sąlygas. Ypač jautrios šiems pokyčiams yra gamazidinės erkės ir kolembolos, kurių gausumo svyravimai KMS tyrimuose buvo didžiausi. 2025 m. visose KMS nustatytas gamazidinių erkių gausumo sumažėjimas gali rodyti, kad ši funkcinė grupė viena pirmųjų reaguoja į besikeičiantį hidroterminį režimą.

Antroji galima grėsmė yra dirvožemio maisto tinklo struktūros pokyčiai. Oribatidinės erkės, kurios dominuoja visų KMS dirvožemiuose, išliko gana stabilios ir palaiko mikroartropodinį-oribatidinį bendrijų tipą. Tačiau ilgalaikis jautresnių grupių mažėjimas gali keisti plėšrūnų, skaidytojų ir mikroorganizmų sąveikas, dėl ko gali pakisti organinės medžiagos skaidymo greitis, maisto medžiagų apytaka ir anglies kaupimo procesai miško paklotėje.

Trečioji grėsmė susijusi su galimu medynų struktūros ir nuokritų kokybės pasikeitimu. Klimato kaitos sąlygomis didėjantis eglių pažeidžiamumas, kenkėjų poveikis ir medžių rūšinės sudėties kaita gali pakeisti paklotės cheminę sudėtį bei mikrobuveinių įvairovę. Tai gali turėti ilgalaikį poveikį toms dirvožemio organizmų grupėms, kurios priklauso nuo stabilaus organinės medžiagos tiekimo.

Regioniniu požiūriu didžiausias dėmesys turėtų būti skiriamas skirtingoms rizikoms. Žemaitijos KMS, nors išlieka turtingiausia mikroartropodų rūšimis ir gausumu, dėl didesnio drėgmės režimo priklausomumo gali būti jautri staigiems klimato pokyčiams. Aukštaitijos KMS 2025 m. nustatytas ryškiausias gamazidinių erkių sumažėjimas gali būti ankstyvas signalas apie dirvožemio maisto grandinių pokyčius. Dzūkijos KMS, nepaisant pastarojo mikroartropodų gausumo padidėjimo, dėl nederlingų smėlinių dirvožemių ir mažesnio vandens kaupimo potencialo gali būti jautriausia ilgalaikėms sausroms.

Apibendrinant galima teigti, kad pagrindinė ateities grėsmė KMS dirvožemio biotai yra ne tiesioginis rūšinės įvairovės mažėjimas, o galimas funkcinių ryšių persitvarkymas: jautrių mikroartropodų grupių mažėjimas, organinės medžiagos skaidymo procesų pokyčiai ir dirvožemio biologinio aktyvumo destabilizacija dėl klimato ekstremumų dažnėjimo.

Dirvožemio biotos kaitos prognozės klimato kaitos sąlygomis

Remiantis ilgalaikiais KMS tyrimų rezultatais galima prognozuoti, kad artimiausiais dešimtmečiais dirvožemio mikroartropodų bendrijos tikėtina išlaikys pagrindinę struktūrą, kurioje dominuos oribatidinės erkės. Šios grupės santykinis stabilumas, nustatytas visose KMS, leidžia manyti, kad miško dirvožemio biologinė struktūra pasižymi pakankamai dideliu atsparumu trumpalaikiams aplinkos svyravimams.

Tačiau prognozuojamas tolesnis klimato šiltėjimas ir hidroterminio režimo nestabilumas gali lemti ryškesnius funkcinius pokyčius. Pirmiausia tikėtini didesni jautriausių mikroartropodų grupių – gamazidinių erkių ir kolembolų – gausumo svyravimai. Kadangi šios grupės greitai reaguoja į dirvožemio drėgmės ir temperatūros pokyčius, jų dinamika ateityje gali tapti vienu ankstyviausių klimato kaitos poveikio dirvožemio ekosistemoms indikatorių.

Didėjanti temperatūra ir ilgėjantis vegetacijos laikotarpis gali turėti dvejopą poveikį. Esant pakankamai drėgmės, galima tikėtis intensyvesnio mikrobiologinio aktyvumo, greitesnio organinės medžiagos skaidymo ir didesnio kai kurių mikroartropodų grupių aktyvumo. Tačiau dažnėjančios vasaros sausros gali sukelti priešingą efektą – mažinti dirvožemio biologinį aktyvumą, lėtinti paklotės skaidymą ir didinti metinius mikroartropodų gausumo svyravimus.

Regioniniu požiūriu tikėtinos skirtingos rekcijos tirtose KMS. Žemaitijos KMS dėl didesnio dirvožemio derlingumo, organinės medžiagos kiekio ir drėgmės išteklių turėtų išlikti produktyviausia ir rūšimis turtingiausia dirvožemio sistema, tačiau ji gali būti jautri hidrologinio režimo pokyčiams. Aukštaitijos KMS tikėtinas vidutinio stiprumo atsakas, priklausantis nuo paklotės formavimosi ir medynų rūšinės kaitos. Dzūkijos KMS, nepaisant 2025 m. nustatyto mikroartropodų gausumo padidėjimo, ilgalaikėje perspektyvoje gali būti labiau pažeidžiama dėl smėlinių dirvožemių mažo vandens sulaikymo ir jautrumo sausroms.

Galimi ir kokybiniai dirvožemio bendrijų pokyčiai: mažiau judrios, ilgaamžės ir stabilias sąlygas mėgstančios rūšys gali palaipsniui užleisti dalį ekologinių nišų greičiau besidauginančioms, aplinkos svyravimams atsparesnėms rūšims. Tokia kaita nebūtinai sumažintų bendrą rūšių skaičių, tačiau pakeistų dirvožemio maistinių medžiagų struktūrą ir ekosistemines funkcijas.

KMS dirvožemio biotos ateitį labiausiai lems klimato kaitos ir drėgmės režimo pokyčių intensyvumas. Esant vidutiniam klimato šiltėjimui ir pakankamam drėgmės kiekiui, galimas dirvožemio biologinio aktyvumo didėjimas, tačiau dažnėjant sausroms ir ekstremaliems reiškiniams mažės mikroartropodų bendrijų stabilumas bei rizika prarasti dalį jautriausių funkcinių grupių.

Iki šiol klimato šiltėjimas daugeliu atvejų dar skatino ekosistemų aktyvumą (geresnės lajos, daugiau kerpių, didesnis produktyvumas), tačiau sistema artėja prie ribos, kai pagrindiniu ribojančiu veiksniu tampa ne temperatūra, o vandens režimo stabilumas.

Literatūra

Aplinkos monitoringo ataskaita. (2006). *Dirvožemio faunos ir mikrobiologinio aktyvumo sąlygiškai natūralių ekosistemų dirvožemiuose įvertinimas (Aukštaitijos, Žemaitijos ir Dzūkijos nacionaliniai parkai)*. Vilnius: Ekologijos institutas. 58 p.

Anthony, M. A., Bender, S. F., & van der Heijden, M. G. A. (2023). *Enumerating soil biodiversity*. Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS). https://doi.org/10.1073/pnas.2304663120

Arroyo, J., & Iturrondobeitia, J. C. (2006). *Differences in the diversity of oribatid mite communities in forests and agrosystems lands*. European Journal of Soil Biology, 42(4), 259–269. https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2006.01.002

Augustaitis A., Arbačiauskas K., Baužienė I. ir kt. (2006). Sąlygiškai natūralių ekosistemų kompleksiškas monitoringas. (10-mečiui). Vilnius: 111 p.

Augustaitis A., Baužienė I., Gulbinas Z. ir kt. (2006). II Kompleksiško ekosistemų monitoringo stotys ir jų charakteristika. Sąlygiškai natūralių ekosistemų kompleksiškas monitoringas. Vilnius: 17–24.

Bardgett, R. D., & van der Putten, W. H. (2023). *Belowground biodiversity and ecosystem functioning*. Nature Reviews Earth & Environment. https://doi.org/10.1038/s43017-023-00420-2

Bosch-Serra, À. D., Orobitg, J., Badia-Cardet, M., Veenstra, J. L., & Perramon, B. (2024). *Oribatid mites in a humid Mediterranean environment under different soil uses and fertilization management*. Diversity, 16(9), 533. https://www.mdpi.com/1424-2818/16/9/533

Briones, M. J. I. (2022). *The serendipitous value of soil fauna in ecosystem functioning: the unexplored contribution of soil animals to soil health*. European Journal of Soil Biology, 110, 103393. https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2022.103393

Bruckner, A. (2024). *Methods for the extraction of microarthropods from soil: A bibliography and guide to the literature.* Soil Organisms, 96(3), 195–207. https://doi.org/10.25674/432

Chen Y., Wang M., Xue Pan, Liang Ch., Xie Z., Scheu S., Maraun M., Chen J. (2024). *Season affects soil oribatid mite communities more than tree diversity in subtropical forests.* Geoderma. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2024.116826

Chernova, N. M., Potapov, M. B., Savenkova, Y. Y., & Bokova, A. I. (2010). *Ecological significance of parthenogenesis in Collembola*. Entomological Review, 90(1), 23–38. https://doi.org/10.1134/S0013873810010033

Delcourt, N., Duarte-Martínez, H., & Cortet, J. (2026). *Soil microarthropods (Collembola and Acari, Oribatida) responses to trace metals contamination: A case study in a Mediterranean former mining site*. Pedobiologia, 115, 151132. https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2026.151132

Domes K., Scheu S., Maraun M. (2007). *Resources and sex: Soil re–colonization by sexual and parthenogenetic oribatid mites.* Pedobiologia. 51: 1–11.

dos Santos Nascimento, G., Souza, J. S., & Nizamani, S. M. (2025). *Soil biodiversity drives ecosystem multifunctionality across natural and anthropogenically altered landscapes*. Journal of Soil Ecology and Functions. https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2025.151079

Eidukevičienė M., Vasiliauskienė V. (sud.) 2001. *Lietuvos dirvožemiai*. Vilnius: Spauda. 1243 p.

Eisenhauer, N., Sünnemann, M., Pollierer, M. M., Sun, X., Bardgett, R. D., Bartkowski, B., Delgado-Baquerizo, M., Dirilgen, T., Guerra, C. A., Mathieu, J., Niklaus, P. A., Romero, F., Ristok, C., Seeber, J., Steinwandter, M., Stewart, J., van der Heijden, M. G. A., van der Putten, W. H., & Potapov, A. M. (2026). *Soil biodiversity effects on ecosystems*. Nature Reviews Biodiversity. https://doi.org/10.1038/s44358-025-00123-z

Engelmann H. D. (1978). *Zur dominanzklassifizierung von baden arthropoden*. Pedobiologia, 18 (5/6): 378–380.

Feketeová, Z., Mangová, B., & Čierniková, M. (2021). *The soil chemical properties influencing the Oribatid mite (Acari; Oribatida) abundance and diversity in coal ash basin vicinage*. Applied Sciences, 11(8), 3537. https://doi.org/10.3390/app11083537

Gan, H., Zak, D. R., & Hunter, M. D. (2014). *Trophic stability of soil oribatid mites in the face of environmental change*. Soil Biology and Biochemistry, 68, 71–77. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.09.019

Gulbinas Z., Baužienė I. (1996). Dirvožemių, dirvožemio ir gruntinio vandens cheminė sudėtis kompleksinėse foninio monitoringo stotyse. Aplinkos monitoringas, 1993–1995. Vilnius, p. 8–14.

Jucevica E., Melecis V. (2002). *Long-term dynamics of Collembola in a pine forest ecosystem.* Pedobiologia. 46: 365–372.

Jucevica E., Melecis V. (2006). *Global warming affects Collembola community: a long term study*. Pedobiologia. 50: 177–184.

Lietuvos hidrometeorologijos tarnyba. (2021). Klimato normos 1991–2020 m. – https://www.meteo.lt/klimatas/lietuvos-klimatas/skn/

Lietuvos hidrometeorologijos tarnyba: Klimatas, vanduo ir stichiniai reiškiniai Lietuvoje 2025 metais. https://www.meteo.lt/2026-01-07-klimatas-vanduo-ir-stichiniai-reiskiniai-lietuvoje-2025-metais/

Lietuvos hidrometeorologijos tarnyba. (2023). *Klimato duomenys Lietuvoje 1991–2020 m. SKN ir meteorologinės stebėsenos rezultatai 2021–2023 m.* https://www.meteo.lt/klimatas/lietuvos-klimatas/klimato-duomenys/

Kamczyc, J., Dyderski, M. K., Horodecki, P., & Jagodziński, A. M. (2022). *Temperature and precipitation affect seasonal changes in mite communities (Acari: Mesostigmata) in decomposing litter of broadleaved and coniferous temperate tree species*. Annals of Forest Science, 79, 12. https://doi.org/10.1186/s13595-022-01129-9

Kardol, P., Reynolds, W. N., Norby, R. J., & Classen, A. T. (2011). *Climate change effects on soil microarthropod abundance and community structure.* Applied Soil Ecology, *47*(1), 37–44. https://doi:10.1016/j.apsoil.2010.11.001

Magilton M, Maraun M, Emmerson M, Caruso T. (2019). *Oribatid mites reveal that competition for resources and trophic structure combine to regulate the assembly of diverse soil animal communities.* Ecol Evol. 2019;9:8320–8330. https://doi.org/10.1002/ece3.5409

Manual for integrated monitoring, 1997. Helsinki: 192 p.

Meehan, M. L., Barreto, C., Turnbull, M. S., Bradley, R. L., Bellenger, J.-P., Darnajoux, R., & Lindo, Z. (2020). *Response of soil fauna to simulated global change factors depends on ambient climate conditions*. Pedobiologia, 83, 150672. https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2020.150672

Niklasson M., Petersen H., Parker E. D. 2000. *Environmental stress and reproductive mode in Mesaphorura macrochaeta* (Tullberhiinae, Collembola). Pedobiologia. 44: 476–488.

Pankhurst C. E. 1997. Biodiversity of soil organisms as an indicator of soil health. *Biological Indicators of Soil Health.* CAB Int., New York: 297–324.

Potapov, A. M. et al. (2020). Functional traits and ecosystem roles of Collembola. Soil Biology and Biochemistry. 149, 107830. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.107830

Parisi V., Menta C., Gardi C., Jacomini C., Mozzanica E. 2005. *Microarthropod communities as a tool to assess soil quality and biodiversity: a new approach in Italy*. Agriculture, Ecosystems and Environment. 105: 323–333.

Rašomavičius V., 2006. 4.1.2. Augmenijos rūšinės įvairovės ir gausumo monitoringas. Sąlygiškai natūralių ekosistemų kompleksiškas monitoringas. Vilnius: 73–76.

Rodríguez-Pajares, C., Jordán Muñoz-Adalia, E., & Fernández-Fernández, M. (2025). *Microarthropods communities as indicators of soil quality in a Mediterranean periurban forest using the QBS-ar index*. Forest Systems. https://doi.org/10.5424/fs/2025341-20906

Schaefer, I., & Caruso, T. (2019). *Oribatid mites show that soil food web complexity and close aboveground-belowground linkages emerged in the early Paleozoic*. Communications Biology, 2, 387. https://doi.org/10.1038/s42003-019-0628-7

Wang, W., Bi, S., Li, F. et al. (2025). *Soil organic matter composition affects ecosystem multifunctionality by mediating the composition of microbial communities in long-term restored meadows*. Environmental Microbiome. https://doi.org/10.1186/s40793-025-00678-6

Wissuwa, Janet; Salamon, Jörg-Alfred; Frank, Thomas. (2013). *Oribatida (Acari) in grassy arable fallows are more affected by soil properties than habitat age and plant species. European Journal of Soil Biology, 59, 8–14. https://*doi:10.1016/j.ejsobi.2013.08.002

3.4. Upelio makrobentoso rūšinė įvairovė ir gausumas

Tyrimams atliktas bendradarbiaujant su *Gamtos tyrimų centro dr. Giedre Višinskiene ir dr. Kęstučiu Arbačiausku.*

Makrobentosas (bentoso makrobestuburiai) yra labai jautrūs šiluminių pokyčių rodikliai, ypač mažuose upeliuose ir upeliuose, kur dėl ribotos šiluminės inercijos greitai svyruoja temperatūra. Didėjanti vandens temperatūra tiesiogiai veikia makrobentoso bendruomenes, nes keičia medžiagų apykaitos greitį, gyvavimo ciklo laiką ir rūšių sąveiką.

Kylant temperatūrai paprastai paspartėja augimas ir vystymasis, bet taip pat padidėja medžiagų apykaitos poreikis, o tai gali sukelti energetinį disbalansą esant ribotam maisto prieinamumui arba sumažėjusiai deguonies koncentracijai (Woodward ir kt., 2010; Durance ir Ormerod, 2007), kas ypač pasidaro aktualu mažuose upeliuose su ribotu debitu. Šaltai stenoterminiai taksonai, tokie kaip Ephemeroptera, Plecoptera ir Trichoptera (EPT grupės), yra ypač pažeidžiami ir dažnai nyksta atšilus, todėl sumažėja taksonominis turtingumas ir funkcinė įvairovė (Woodward ir kt., 2010).

Šiluminis stresas taip pat gali sukelti rūšių įvairovės sudėties pokyčius termofiliškesnių ir trikdžiams atsparesnių taksonų (pvz., Chironomidae ir Oligochaeta) link, o tai lemia biotinį homogenizavimą. Šiuos pokyčius dažnai sustiprina mažo srauto sąlygos, kurios sustiprina buveinių susiskaidymą ir sumažina ištirpusio deguonies prieinamumą. Be to, pakitusi fenologija (pvz., ankstesnis atsiradimas) gali sutrikdyti trofinę sinchroniją tarp makrobentoso ir aukštesnio trofinio lygio, pavyzdžiui, žuvų.

Mažuose upeliuose net trumpalaikiai temperatūros šuoliai gali žymiai sumažinti TO_2 lygį ir taip paveikti jautrius vandens taksonus, kadangi mažai ištirpusio deguonies sąlygos daro didelę įtaką makrobentoso bendruomenės struktūrai, sumažindamos deguoniui jautrių taksonų skaičių, tokių kaip Ephemeroptera, Plecoptera ir Trichoptera (EPT), gausą. Priešingai, labiau tolerantiškos grupės, tokios kaip Chironomidae ir Oligochaeta, linkusios dominuoti hipoksinėmis sąlygomis, dėl to sumažėja biologinė įvairovė ir supaprastėja bendruomenės funkcinės galimybės (Woodward ir kt., 2010).

Apskritai, didėjant vandens temperatūrai mažuose upeliuose supaprastėja makrobentoso bendruomenių struktūra, prarandami jautrūs taksonai ir pasikeičia ekosistemos funkcionavimas, ypač esant sinergetiniams klimato veiksniams, tokiems kaip sausra ir sumažėjęs debitas.

Upelių dugno gyvūnų bendrijos įvairovė ir gausumas priklauso nuo upelio geomorfologinių, limnologinių ir hidrocheminių ypatybių, o taip pat nuo klimatinių veiksnių ir vandens užterštumo.

Tyrimų tikslas – stebėti upelių makrozoobentoso taksoninę sudėtį, gausumą bei įvairovę, galimiems upelių ekologinės būklės ilgalaikiams pokyčiams, dėl globalios aplinkos kaitos (klimato atšilimo ir antropogeninės taršos pokyčių) nustatyti.

Darbo tikslas: Atlikti dugno makrobestuburių tyrimus Aukštaitijos, Dzūkijos ir Žemaitijos integruoto monitoringo stočių teritorijų upeliuose nustatant makrobestuburių rodiklius sietinus su upelių ekologine kokybe ir lyginant su ankstesnių KM stočių tyrimo rezultatais įvertinti tirtų upelių ekologinės būklės ilgalaikę kaitą.

Uždaviniai:

- Aukštaitijos, Dzūkijos ir Žemaitijos KM stočių upeliuose, atitinkamai Versminio, Duburių ir Juodupio upeliose 2025 m. vegetacijos sezono pradžioje ir pabaigoje surinkti medžiagą tirtų upelių ekologinės būklės vertinimui pagal makrobestuburių rodiklius.
- Nustatyti KM stočių upelių makrobestuburių taksonominį sąstatą, įvertinti makrobestuburių taksonų gausumą ir biomasę, apskaičiuoti makrobestuburių įvairovės ir kitus biotinius rodiklius sietinus su upelių ekologine būkle - EPT, BMWP, ASPT DIUF ir LUMI.
- Palyginti 2025 m. gautus tyrimų duomenis su ankstesnių stebėsenos tyrimų duomenimis.

Metodai ir analizė

Makrobestuburių KMStai Aukštaitijos (LT01), Dzūkijos (LT02) ir Žemaitijos (LT03) integruoto monitoringo stočių (KMS) upeliuose surinkti bei upelių rodikliai tyrimų vietose išmatuoti 2025 m. vegetacijos sezono pradžioje (gegužės 5 ir 18 d.) ir pabaigoje (rugsėjo 30, spalio 1 ir 15 d.) pagal standartinę upelių monitoringo metodiką (Manual… 1993; Arbačiauskas, 2009.). Visuose KMS upeliuose makrobestuburių KMStai paimti standartiniu 25 cm skersmens panardinamu rankiniu tinklu. KMStai imami vartant gruntą prieš pasroviui pastatytą rankinį tinklą arba braukiant tinklu per priekrantės augaliją ar nuokritas. Individualų KMStą sudarė medžiaga surinkta apgaudant 0.1 m^2 plotą (25 cm × 40 cm). Kiekvienoje vietoje kiekvieną kartą imami 3 individualūs KMStai, kurie patalpinami į vieną talpą. Surinkta nefiksuota medžiaga iki analizės laikoma šaldytuve ir išrenkama ne vėliau kaip 36 valandos po surinkimo.

Anksčiau Aukštaitijos KMS Versminio upelyje makrobestuburių KMStai buvo renkami gruntosemiu, o kelis pastaruosius stebėsenos metus KMStai palyginimui buvo rankami ir gruntosemiu ir rankiniu tinklu. Duomenų palyginimas įtikinamai parodė, kad toliau Versminio upelyje medžiaga pakanka rinkti naudojant tik rankinį tinklą, tą patį tyrimo metodą kaip ir kitų KMS upeliuose (Arbačiauskas 2020). Dzūkijos KMS Duburių upelyje makrobestuburiai paskutinį kartą buvo tirti 1998 metais (Arbačiauskas 1998). 2025 metais tyrimai vėl pradedami vykdyti. Šiais metais KMStai palyginimui paimti dviejose vietose – aukštupyje, kur tyrimai buvo vykdomi ankstesniame šimtmetyje, ir žemupyje, žemiau vandens matavimo stoties.

Srovės greičiai, vidutiniai gyliai, vandens temperatūra ir kitos abiotinės sąlygos KMS upelių stebėjimų vietose 2025 m. pateiktos 1 lentelėje.

1 lentelė. Aukštaitijos, Dzūkijos ir Žemaitijos KMS (LT01, LT02 ir LT03) upelių abiotinės sąlygos makrobestuburių KMStų ėmimo metu 2025 m. pavasarį ir rudenį

Stacionaras	LT01 - Versminis		LT02 – Duburių Aukštupys / Žemupys		LT03 - Juodupis	
	Pavasaris	Ruduo	Pavasaris	Ruduo	Pavasaris	Ruduo
Srovės greitis, m s^{-1}	0,13	0,22	0,26 / 0,30	0,37 / 0,36	0,23	0,20
Gylis, cm	8,3	12,0	6,7 / 13,7	6,0 / 9,0	11,6	4,0
Temperatūra, °C	6,8	9,1	9,1 / 9,1	7,6 / 7,6	7,1	7,5
Vagos plotis, cm	100	60	130 / 90	95 / 80	101	90
Gruntas	Durpė, nuokritos		Žvyras, akmenys, smėlis, nuokritos / smėlis, nuokritos (šakos, šaknys)		Žvyras, nuokritos	

Laboratorijoje surinkti makrozoobentoso KMStai išrenkami, gyvūnai fiksuojami 70% spiritu. Toliau gyvūnai taksonomiškai identifikuojami naudojant specialią literatūrą, suskaičiuojami ir pasveriami. Gausumas ir biomasė toliau pateikiami vienam kvadratiniam metrui, atitinkamai N, ind m^{-2} ir B, g m^{-2}. Dugno gyvūnų bendrijų įvairovė įvertinta pagal Shannon-Wiener'io (H) ir Simpson'o (D) bioįvairovės indeksus. Shannon-Wiener'io bioįvairovės indekso reikšmė didėja didėjant rūšių skaičiui imtyje (tipiškos didelės bioįvairovės vertės būna tarp 1,5 ir 3,5). Simpsono indeksas, dar vadinamas dominavimo indeksu, originaliame pavidale vertina tikimybę, kad du atsitiktinai paimti iš mėginio individai bus vienos rūšies, kas reiškia, kad kuo indeksas mažesnis, tuo įvairovė didesnė. Šioje ataskaitoje naudojama modifikuota Simpsono indekso išraiška rodanti tikimybę, kad du atsitiktinai paimti iš mėginio individai bus skirtingų rūšių, kurios didesnės vertės rodo ir didesnę įvairovę.

Ekologinės kokybės įvertinimams naudoti tradiciniai rodikliai: BMWP (*Biological Monitoring Working Party*) balų originali sistema, ASPT (vidutinis balų kiekis taksonui), DIUF (Danijos indeksas upių faunai) ir EPT (Ephemeroptera, Plecoptera, Trichoptera – lašalų, ankstyvių, apsiuvų taksonų skaičių) (Arbačiauskas, 2009). Skaičiavimai atlikti naudojant Excel bei programinį paketą AQEM Asterics 4.0.4 (AQEM 2004; Hering *et al*. 2004; ASTERICS Software manual 2013; http://www.eu-star.at/). EPT indeksas – tai jautriausių taršai gyvūnų lašalų, ankstyvių ir apsiuvų atskirų taksonų (rūšių ar genčių) skaičius. Šių vabzdžių taksonų skaičius ir gausumas mažėja prastėjant vandens kokybei. BMWP indeksas sukurtas siekiant kuo paprastesnio upių kokybės vertinimo – apskaičiuojama rastų makrobestuburių šeimų tolerantiškumo taršai balų suma. Kuo didesnė balų suma, tuo geresnė vandens kokybė. DIUF (Danijos Indeksas Upių Faunai) nustatomas pagal indikatorines makrobestuburių grupes bei „teigiamų“ ir „neigiamų“ taksonų grupių skaičių skirtumą, naudojant atitinkamą lentelę (LAND 57–2003; Arbačiauskas 2009). Upelių ekologinė būklė taip pat įvertinta naudojant ir oficialų Lietuvos upių kokybės vertinimo metodą – multimetrinį Lietuvos Upių Makrobestuburių Indeksą LUMI (Šidagytė, Arbačiauskas, 2015; 2022; LR aplinkos ministro 2021 m. lapkričio 4 d. įsakymas D1-645). Šis indeksas yra keturių makrobestuburių bendrijos rodiklių (ASPT, DIUF, #DEP, dvisparnių šeimų ir lašalų bei ankstyvių rūšių bendras skaičius, %EHP-%CrHi, lašalų, blakių ir ankstyvių individų dalies mėginyje ir vėžiagyvių bei dėlių individų dalies mėginyje skirtumas) ekologinės kokybės santykių (EKS) vidurkis. Ekologinės būklės klasifikavimo ribos pagal LUMI vertes yra suskirstytos į 5 kategorijas: 0,80 - 1,00 – labai gera būklė; 0,60 - 0,79 – gera; 0,40 - 0,59 – vidutinė; 0,30 - 0,39 – bloga; 0,00 - 0,29 – labai bloga:

labai bloga	0 - 0,29	1
bloga	0,30 - 0,39	2
vidutinė	0,40 - 0,59	3
gera	0,60 - 0,79	4
labai gera	0,80 - 1	5

Integruoto monitoringo stacionarų Versminio, Duburių ir Juodupio upelių (2025 m.) makrobestuburių taksonominis sąstatas, gausumas ir atskirų taksonų biomasės pateikti 2, 4, 6 ir 8 lentelėse. Tirtų vietų bendrijų bendros biomasės, įvairovės rodikliai ir ekologinės būklės kokybės indeksai pateikti 3, 5, 7 ir 9 lentelėse bei 1-2, 4-5 paveiksluose.

3.4.1. Aukštaitijos KMS Versminio upelio makrobentoso rūšių įvairovė ir gausa 2025 m.

Aukštaitijos KMS Versminio upelyje buvo identifikuota 16 bestuburių taksonų: 13 pavasarį ir 10 rudenį (2 lentelė). Pagal gausumą, pavasarį dominavo ankstyvės (*Nemoura* sp.), vandens erkės (Hydrachnidia), vandens asiliukai (*Asellus aquaticus*) ir uodų trūklių lervos (Chironomidae). Rudenį dominavo *A. aquaticus* ir *Nemurella pictetii* ankstyvės (1030 ir 547 ind. m^{-2} atitinkamai). Pagal biomasę ir pavasarį, ir rudenį dominavo vandens asiliukai *A. aquaticus* (2 lentelė). Bioįvairovės indeksai, Shannon-Wiener'io ir Simpson'o indeksai Versminio upelyje buvo aukštesni pavasarį lyginant su rudeniu (3 lentelė).

Lyginant su ankstesnių 2020 metų stebėsenos duomenimis Versminio upelyje, bendras apibūdintų taksonų skaičius (S) ir individų gausumas (N) sumažėjo, o biomasė (B) išaugo (1 pav.). Pasikeitė ir dominantinės rūšys. Jei 2020 m pavasarį gausiausiai rasta lašalų *Centroptilum luteolum*, ankstyvių *Nemurella pictetii* ir vandens erkių, o rudenį *Leuctra* genties ankstyvių ir vandens erkių, tai 2025 m. pavasarį dominavo kitos *Nemoura* genties ankstyvės, o rudenį *A. aquaticus* ir *N. pictetii* ankstyvės. Pastarosios ankstyvės Versminio upelyje aptinkamos beveik visais stebėsenos metais, tačiau nustatomas jų gausumas kinta tiek skirtingais metais tiek ir skirtingais sezonais. 2025 m. rasta mažiau lyginant su 2020 m. apsiuvų ir dvisparnių taksonų. Didžiąją biomasės dalį sudarė taip pat skirtingos rūšys. Jei 2025 m. pagal biomasę abiem sezonais dominavo asiliukai *A. aquaticus,* tai 2020 m pavasarį dominavo Nemouridae šeimos ankstyvės, o rudenį - apsiuvos *Chaetopteryx villosa.* Makrobestuburių įvairovės rodikliai įvertinti 2025 m. buvo žemesni nei 2020 m.

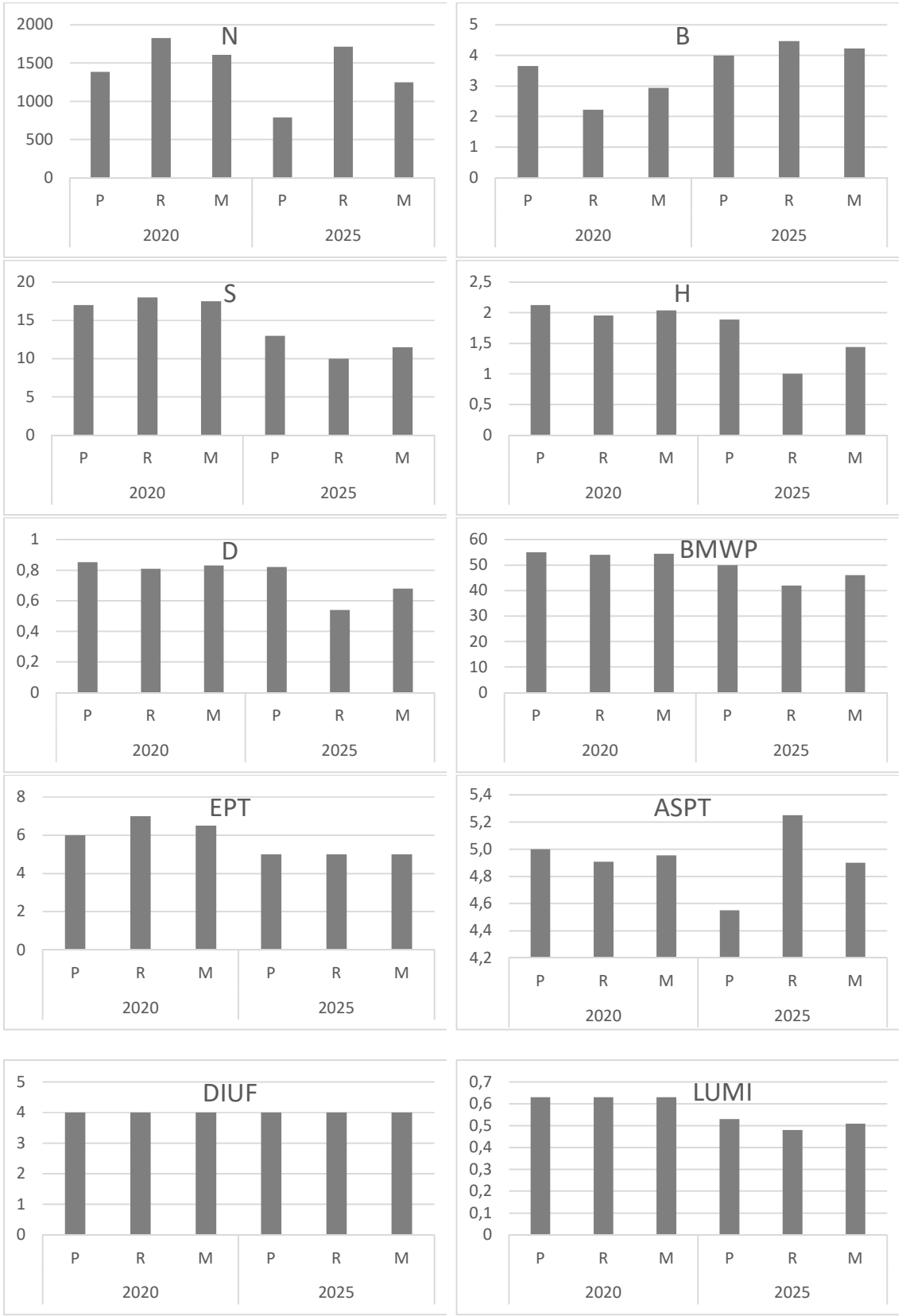
Ekologinės kokybės parametrų palyginimas 2020 ir 2025 m. pateikiamas 1 pav. DIUF abiem metais išliko toks pat – 4. Tokia šio rodiklio vertė indikuoja III – vidutinę vandens kokybės klasę. Kiti rodikliai - EPT, BMWP, ASPT ir LUMI - lyginant su 2020 m. buvo žemesni. Upių ekologinės būklės vertinimui dabar naudojamas LUMI Versminio upelio kokybę įvertino kaip gerą 2020 m. ir kaip vidutinę 2025 m. (3 lentelė, 3.20 pav.). Versminio upelis yra specifinis dėl to, kad jis teka per durpių substratą, kas, be abejonės, įtakoja šio upelio makrobestuburių sąstatą. Todėl ekologinės kokybės vertinimui įprastai naudojami rodikliai, matomai, sužemina šio upelio ekologinės kokybės įvertį. Vertinant ekspertiškai, Versminis upelis priskirtinas prie labai geros ekologinės kokybės upelių. Ar kokybės rodiklių pažemėjimas 2025 m. lyginant su 2020 m. atspindi kokią nors reikšmingą tendenciją, parodys tolimesni tyrimai.

2 lentelė. Aukštaitijos KMS Versminio upelio dugno gyvūnų taksonominis sąstatas, gausumas (N, ind m^{-2}) ir biomasė (B, g m^{-2}) 2025 m. pavasarį ir rudenį

Klasė/Būrys	Gentis/Rūšis	Pavasaris		Ruduo	
		N	B	N	B
Oligochaeta	Oligochaeta Gen. sp.	40	0,217	50	0,283
Hydrachnidia	Hydrachnidia Gen. sp.	160	0,017	43	0,010
Bivalvia	*Pisidium* sp.	7	0,005		
Gastropoda	*Stagnicola corvus*	3	0,047		
Crustacea	*Asellus aquaticus*	153	0,547	1030	3,853
Plecoptera	*Nemurella pictetii*	23	0,040	547	0,233
	Nemoura (cinerea) sp.	203	0,787		
	Leuctra (nigra) sp.	3	0,010	13	0,004
Ephemeroptera	*Centroptilum luteolum*	7	0,017		
Coleoptera	*Dytiscidae* Gen. sp. (lerva)	3	0,003		
	Anacaena sp. (suaugėlis)	3	0,003		
Diptera	*Eloeophila* sp.			3	0,007
	Chironomidae Gen. Sp.	130	0,157	13	0,003
Trichoptera	*Plectrocnemia conspersa*	53	0,813	7	0,047
	Limnephilus sp.			3	0,007
	Chaetopteryx villosa			3	0,020
	viso	**788**	**3,990**	**1712**	**4,467**

3 lentelė. Aukštaitijos KMS Versminio upelio makrozoobentoso bendrijos ir vandens kokybės 2025 m. vidutiniai rodikliai: gausumas (N, ind m^{-2}), biomasė (B, g m^{-2}), rūšinis turtingumas - apibūdintų taksonų skaičius (S), Shannon-Wiener'io bioįvairovės indeksas (H, bitai ind^{-1}), Simpson'o bioįvairovės indeksas (D) ir ekologinės kokybės rodikliai: EPT, BMWP, ASPT, DIUF, LUMI, 2025 m.

Sezonas	**N**	**B**	**S**	**H**	**D**	**EPT**	**BMWP**	**ASPT**	**DIUF**	**LUMI**
Pavasaris	788	3,99	13	1,89	0,82	5	50	4,55	4	0,53
Ruduo	1712	4,47	10	1,00	0,54	5	42	5,25	4	0,48
Metinis vidurkis	1250	4,23	11,5	1,44	0,68	5	46	4,90	4	0,51



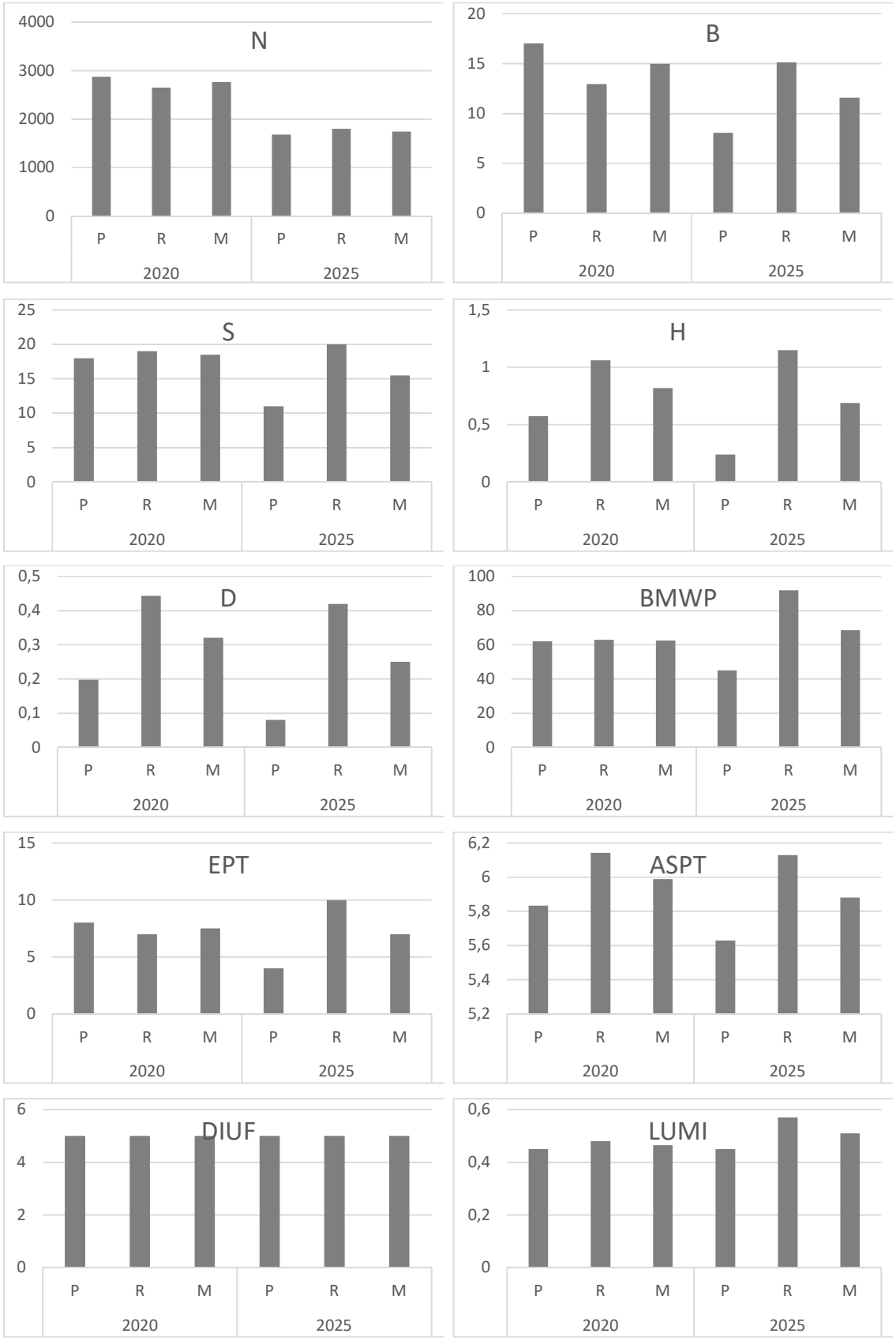
3.20 pav. Aukštaitijos KMS Versminio upelio makrobestuburių bendrijos ir ekologinės būklės kokybės rodiklių (N, B, S, H, D, BMWP, EPT, ASPT, DIUF ir LUMI) pavasarį (P), rudensį (R) ir metinio vidurkio (M) palyginimas tarp 2020 ir 2025 m.

3.4.2. Žemaitijos KMS Juodupio upelio makrobentoso rūšių įvairovė ir gausa 2025 m.

Žemaitijos KMS Juodupio upelyje buvo registruoti 26 bestuburių taksonai, 11 pavasarį ir 20 rudenį (4 lentelė). Ir pavasarį, ir rudenį pagal gausumą ir biomasę ryškiai dominavo šoniplaukos *Gammarus pulex* (situacija tokia pati kaip ir 2020 metais). Vegetacijos sezono pradžioje antroje vietoje pagal gausumą buvo *Leuctra* sp. ankstyvės, o rudenį be šoniplaukų dar vyravo vandens erkės, kai kurių rūšių apsiuvos ir dvisparniai (4 lentelė). Šiais metais neradome moliuskų, vandens asiliukų, Empididae dvisparnių ir kai kurių kitų vabzdžių. Bet rasta daugiau ankstyvių, kitokių apsiuvų rūšių, lašalų, kurių visai nebuvo 2020 metais.

4 lentelė. Žemaitijos KMS Juodupio upelyje rastų dugno gyvūnų taksonominis sąstatas, gausumas (N, ind m^{-2}) ir biomasė (B, g m^{-2}) 2025 m. pavasarį ir rudenį.

Klasė/Būrys	Gentis/Rūšis	Pavasaris		Ruduo	
		N	B	N	B
Turbellaria	*Turbellaria* Gen. sp.			7	0,067
Crustacea	*Gammarus pulex*	1617	7,173	1370	9,427
Hydrachnidia	Hydrachnidia Gen. sp.			77	0,003
Oligochaeta	Oligochaeta Gen. sp.	3	0,003	3	0,003
Plecoptera	*Leuctra (nigra)* sp.	27	0,020	37	0,023
	Nemoura sp.			10	0,010
Ephemeroptera	*Baetis digitatus*	3	0,003		
	Baetis rhodani			3	0,003
Coleoptera	*Hydraena* sp. (suaugėlis)			23	0,017
	Elodes sp. (lerva)			17	0,163
	Agabus sp. (suaugėlis)	3	0,143		
Diptera	*Dicranota* sp.	7	0,010	47	0,140
	Eloeophila sp.	3	0,013		
	Pilaria sp.	3	0,023		
	Tipulidae Gen. Sp.			3	0,950
	Chironomidae Gen. sp			47	0,005
	Simuliidae Gen. Sp.			10	0,013
	Rhagionidae Gen. Sp.	3	0,009		
Trichoptera	*Lype phaeopa*			50	0,010
	Plectrocnemia conspersa	10	0,507	10	0,397
	Halesus tesselatus	3	0,153		
	Potamophylax latipennis			50	3,727
	Lithax obscurus			3	0,007
	Sericostoma personatum			3	0,034
	Sericostoma schneideri			3	0,103
	Sericostoma sp.			27	0,003
	viso	**1682**	**8,059**	**1800**	**15,105**



3.21 pav. Makrozoobentoso bendrijos ir vandens kokybės rodiklių (N, B, S, H, D, BMWP, EPT, ASPT, DIUF ir LUMI) Žemaitijos KMS Juodupio upelyje pavasario (P), rudens (R) ir metinio vidurkio (M) kitimas 2020 ir 2025 m.

Lyginant šių metų makrobestuburių rodiklius su 2020 metais matome ***bendro taksonų skaičiaus padidėjimą (2020 buvo 23 taksonai, o 2025 m. identifikuoti 26), nors metinis vidurkis yra mažesnis 2025 metais. Individų skaičiaus, biomasės, bioįvairovės indeksų metiniai vidurkiai taip pat nežymiai mažesni 2025 metais nei 2020 m***. (3.21 pav.).

Daugelio biologinės įvairovės ir upelio ekologinės būklės rodiklių vertės lyginant su ankstesniais tyrimų metais, buvo sumažėję, DIUF nepasikeitė, o BMWP ir LUMI padidėjo (2 pav.). Rezultatai rodo, kad pagal ***biotinius rodiklius Juodupio upelio ekologinė būklė 2025 m. vertinama kaip vidutinė (pagal BMWP ir LUMI), gera (DIUF) arba labai gera*** (ASPT) (5 lentelė).

5 lentelė. Žemaitijos KMS Juodupio upelio makrozoobentoso bendrijos ir vandens kokybės rodikliai: gausumas (N, ind m^{-2}), biomasė (B, g m^{-2}), apibūdintų taksonų skaičius (S), Shannon-Wiener'io bioįvairovės indeksas (H, bitai ind^{-1}), Simpson'o bioįvairovės indeksas (D) ir biotiniai rodikliai (EPT, BMWP, ASPT, DIUF, LUMI) 2025 m.

Sezonas	N	B	S	H	D	EPT	BMWP	ASPT	DIUF	LUMI
Pavasaris	1682	8,06	11	0,24	0,08	4	45	5,63	5	0,45
Ruduo	1800	15,11	20	1,15	0,42	10	92	6,13	5	0,57
Metinis vidurkis	1741	11,58	15,5	0,69	0,25	7	68,5	5,88	5	0,51

3.4.3. Dzūkijos KMS Duburių upelio makrobentoso rūšių įvairovė ir gausa 2025 m.

Dzūkijos KMS Duburių upelyje dugno bestuburiai 2025 metais buvo rinkti dvejose vietose – aukštupyje ir žemiau patvankos. Duburių upelio aukštupyje identifikuoti 29 taksonai, o žemiau patvankos - 41 taksonas. ***Per abi vietas Duburių upelyje identifikuoti net 45 dugno bestuburių gyvūnų taksonai*** (6 ir 8 lentelės).

Aukštupyje buvo 3 taksonai, kurie nerasti žemiau patvankos – tai apsiuvos *Rhyacophila nubila, Silo pallipes* ir dvisparnis *Eloeophila* sp. Kur kas daugiau taksonų – 15 buvo rasta upelyje žemiau patvankos, bet nerasta aukštupyje. Tai apsiuvos *Chaetopteryx villosa villosa, Halesus tesselatus, H. radiatus, H. digitatus*, lašalai *Baetis* sp., ankstyvės *Protonemura* sp., *Amphinemura* sp., *Nemurella pictetii*, *Taeniopteryx nebulosa*, dvisparnis *Scleroprocta* sp., Dytiscidae šeimos vabalų lervos ir *Elmis maugetii* suaugėliai vabalai, dvigeldžiai moliuskai *Pisidium* sp. ir vandens asiliukas *Asellus aquaticus*. Taip pat žemiau patvankos rastos Lietuvos raudonosios knygos žirgelio *Cordulegaster boltonii* lervos (8 lentelė).

6 lentelė. Dzūkijos KMS Duburių upelio aukštupyje rastų dugno gyvūnų taksonominis sąstatas, gausumas (N, ind m^{-2}) ir biomasė (B, g m^{-2}) 2025 m. pavasarį ir rudenį.

Klasė/Būrys	Gentis/Rūšis	Pavasaris		Ruduo	
		N	B	N	B
Turbellaria	*Turbellaria* Gen. sp.			7	0,003
Oligochaeta	Oligochaeta Gen. sp.			3	0,003
Hydrachnidia	Hydrachnidia Gen. sp.	47	0,023	110	0,020
Gastropoda	*Ancylus fluviatilis*	13	0,050	23	0,037
Plecoptera	*Leuctra* sp.	3	0,003	267	0,070
	Nemoura sp.			40	0,037
	Isoperla sp.			280	0,410
Ephemeroptera	*Baetis muticus*	137	0,140	53	0,010
	Baetis rhodani	50	0,053	93	0,120
	Ephemera sp.	3	0,007		
Coleoptera	*Hydraena* sp. (suaugėlis)	3	0,003	77	0,033
	Elodes sp. (lerva)	3	0,017	17	0,173
Diptera	*Dicranota* sp.	90	0,267	17	0,020
	Eloeophila sp.	10	0,010	7	0,053
	Tipulidae Gen. Sp.			3	2,850
	Psychodidae Gen. sp.	7	0,010	77	0,053
	Simuliidae Gen. Sp.	97	0,130	7	0,003
	Chironomidae Gen. sp	40	0,023	27	0,010
	Dixa sp.	7	0,013	30	0,013
	Ceratopogonidae Gen. Sp.			7	0,007
Trichoptera	*Lype phaeopa*			20	0,017
	Plectrocnemia conspersa	3	0,030		
	Rhyacophila nubila	7	0,350		
	Rhyacophila fasciata	13	1,033	47	0,980
	Sericostoma personatum	17	0,053	13	0,057
	Sericostoma schneideri	13	0,520	7	0,217
	Silo pallipes	33	0,030	7	0,003
	Potamophylax latipennis	30	3,023	7	0,493
	Limnephilidae Gen. sp.	3	0,003	47	0,020
	viso	**629**	**5,793**	**1293**	**5,713**

Geltonžiedis kordulegastras arba geltonžiedis žirgelis yra stenotopinė rūšis, prisitaikiusi gyventi mažose, šaltavandenėse, šaltiniuotose ir srauniose upėse, tekančiose per miškus ar medžių užpavėsintose vietose. Jų buveinės turi būti su smėlingu ar žvyringu dugnu ir neapaugusios vandens augalais. Suaugėliai dažnai pastebimi pievose ir laukymėse netoli tokių veisimosi vietų. Lietuvos mastu daugiausiai stebimi pietų ir rytų dalyse (Budrys, 2021).

Individų gausumu Duburių aukštupyje vyravo *Baetis* genties lašalai pavasarį ir ankstyvės (*Isoperla* sp., *Leuctra* sp.) rudenį (6 lentelė). Pagal biomasę, Duburių aukštupyje pavasarį dominavo apsiuvos *Potamophylax latipennis* ir *Rhyacophila fasciata*, o rudenį – Tipulidae šeimos dvisparniai (6 lentelė).

Daugelis biologinės įvairovės ir upelio ekologinės būklės rodiklių Duburių upelio aukštupį konstatuoja kaip labai geros ekologinės būklės (7 lentelė). Jautrių taršai taksonų (lašalų, ankstyvių, apsiuvų) rasta po 12 kiekvieną sezoną kas rodo geras litoreofilines sąlygas.

7 lentelė. Dzūkijos KMS Duburių upelio aukštupio makrozoobentoso bendrijos ir vandens kokybės rodikliai: gausumas (N, ind m^{-2}), biomasė (B, g m^{-2}), apibūdintų taksonų skaičius (S), Shannon-Wiener'io bioįvairovės indeksas (H, bitai ind^{-1}), Simpson'o bioįvairovės indeksas (D) ir biotiniai rodikliai (EPT, BMWP, ASPT, DIUF, LUMI) 2025 m.

Sezonas	**N**	**B**	**S**	**H**	**D**	**EPT**	**BMWP**	**ASPT**	**DIUF**	**LUMI**
Pavasaris	629	5,79	22	2,48	0,89	12	93	6,64	6	0,80
Ruduo	1293	5,71	26	2,56	0,88	12	102	6,38	6	0,88
Metinis vidurkis	961	5,75	24	2,52	0,89	12	97,5	6,51	6	0,84

Kitoje Duburių upelio tyrimo vietoje, žemiau patvankos, individų gausumu išsiskyrė mašalai (Simuliidae) ir tie patys kaip aukštupyje lašalai (*Baetis*) pavasarį bei ankstyvės (*Leuctra* sp., *Nemoura* sp., *Isoperla* sp.) rudenį (8 lentelė).

8 lentelė. Dzūkijos KMS Duburių upelyje, žemiau patvankos rastų dugno gyvūnų taksonominis sąstatas, gausumas (N, ind m^{-2}) ir biomasė (B, g m^{-2}) 2025 m. pavasarį ir rudenį.

Klasė/Būrys	Gentis/Rūšis	Pavasaris		Ruduo	
		N	B	N	B
Turbellaria	*Turbellaria Gen. sp.*	3	0,013		
Oligochaeta	*Oligochaeta Gen. sp.*	3	0,007	13	0,090
Hydrachnidia	*Hydrachnidia Gen. sp.*	27	0,003	23	0,003
Crustacea	*Asellus aquaticus*			3	0,023
Bivalvia	*Pisidium sp.*	23	0,110	33	0,063
Gastropoda	*Ancylus fluviatilis*	7	0,033	3	0,020
Plecoptera	*Leuctra sp.*	20	0,017	800	0,290
	Nemoura sp.			550	0,443

	Nemurella pictetii	13	0,017		
	Protonemura sp.	17	0,060	3	0,010
	Amphinemura sp.	33	0,010		
	Isoperla sp.			283	1,120
	Taeniopteryx nebulosa			10	0,033
Ephemeroptera	*Baetis muticus*	497	0,407		
	Baetis rhodani	40	0,093		
	Baetis sp.			33	0,007
	Ephemera sp.	3	0,007		
Coleoptera	*Hydraena* sp. (suaugėlis)	107	0,043	67	0,033
	Elodes sp. (lerva)	107	0,660	47	0,373
	Elmis maugetii (suaugėlis)			3	0,003
	Dytiscidae Gen. sp. (lerva)	3	0,001	3	0,020
Odonata	*Cordulegaster boltonii*			7	0,040
Diptera	*Dicranota* sp.	287	1,560		
	Scleroprocta sp.	3	0,020		
	Tipulidae Gen. Sp.			57	34,370
	Psychodidae Gen. sp.	3	0,003	3	0,003
	Simuliidae Gen. Sp.	703	0,907	113	0,137
	Chironomidae Gen. sp	47	0,030	47	0,027
	Dixa sp.			10	0,003
	Ceratopogonidae Gen. Sp.	3	0,003	3	0,003
Trichoptera	*Lype phaeopa*			30	0,033
	Plectrocnemia conspersa	3	0,080	3	0,030
	Rhyacophila fasciata	7	0,130	30	0,350
	Sericostoma personatum	17	0,027	73	1,303
	Sericostoma schneideri	3	0,173	10	0,207
	Potamophylax latipennis	27	2,150		
	Limnephilidae Gen. sp.			20	0,047
	Chaetopteryx villosa	73	0,070		
	Halesus digitatus	70	5,520		
	Halesus radiatus	3	0,480		
	Halesus tesselatus	53	4,357		
	viso	**2205**	**16,993**	**2280**	**39,087**

Duburių upelyje žemiau patvankos didžiausią biomasę pavasarį sudarė *Halesus* genties ir *Potamophylax latipennis* apsiuvos, o rudenį - Tipulidae šeimos uodai (8 lentelė). Iš visų tirtų KMS vietovių Duburių upelyje žemiau patvankos rasta daugiausiai bestuburių gyvūnų taksonų (41), didžiausia EPT taksonų įvairovė, apskaičiuoti aukščiausi ekologinės būklės rodikliai (DIUF, LUMI), nors bioįvairovės rodikliai kiek žemesni nei Duburių aukštupyje (9 lentelė).

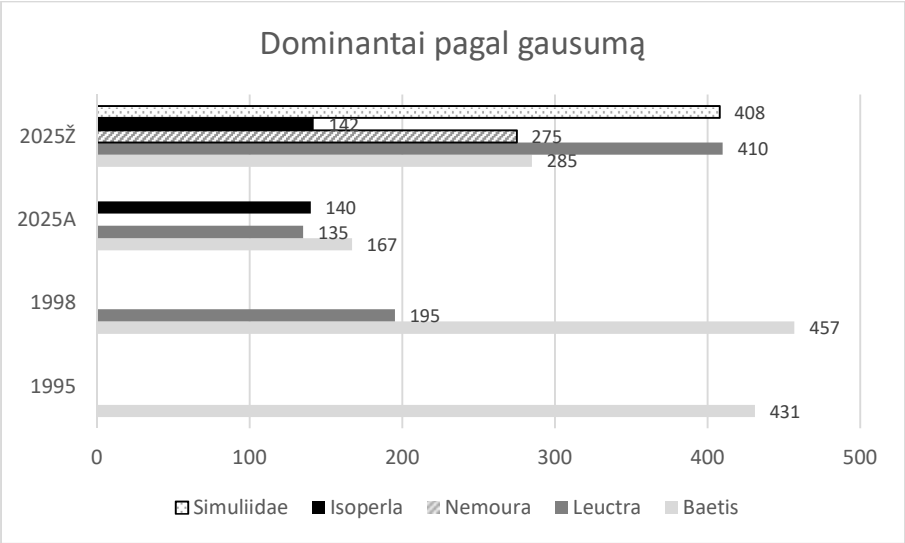
Rasta itin didelis taršai jautrių EPT taksonų (Ephemeroptera, Plecoptera, Trichoptera) skaičius – 16 rudenį ir 12 pavasarį (9 lentelė). Reikia paminėti, kad visame Duburių upelyje per abi tirtas vietas, per du sezonus, buvo identifikuoti net 24 EPT taksonai. ***Didelė visų, o ypač jautrių taksonų įvairovė tik įrodo, kad Duburių upelio sąlygos yra itin palankios daugeliui bentosinių bestuburių gyvūnų rūšių. Ekologinės būklės rodikliai DIUF ir LUMI įvertino Duburių vietą žemiau patvankos kaip labai geros ekologinės būklės upelį*** (9 lentelė).

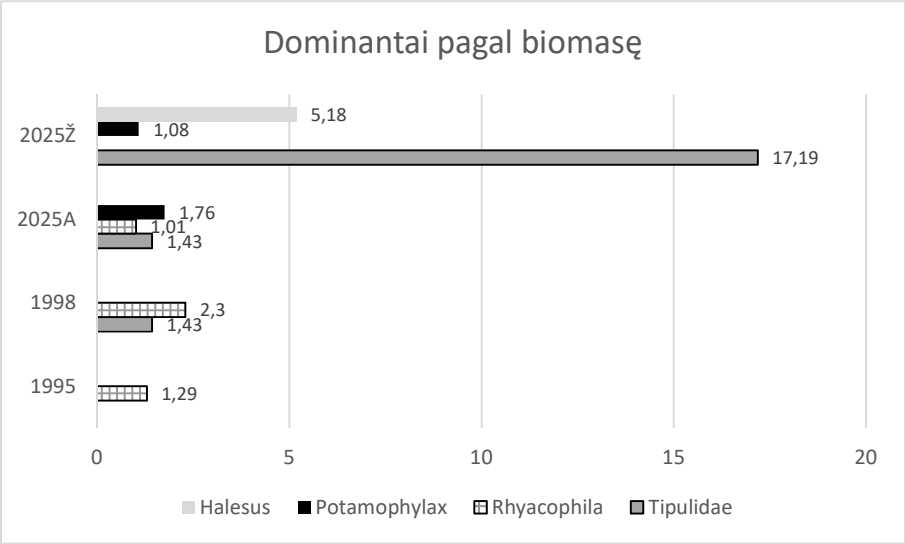
9 lentelė. Dzūkijos KMS Duburių upelio žemiau patvankos makrozoobentoso bendrijos ir vandens kokybės rodikliai: gausumas (N, ind m^{-2}), biomasė (B, g m^{-2}), apibūdintų taksonų skaičius (S), Shannon-Wiener'io bioįvairovės indeksas (H, bitai ind^{-1}), Simpson'o bioįvairovės indeksas (D) ir biotiniai rodikliai (EPT, BMWP, ASPT, DIUF, LUMI) 2025 m.

Sezonas	N	B	S	H	D	EPT	BMWP	ASPT	DIUF	LUMI
Pavasaris	2205	16,99	30	2,22	0,82	16	104	5,78	7	0,85
Ruduo	2280	39,09	28	2,10	0,80	12	133	6,05	7	0,93
Metinis vidurkis	2243	28,04	29	2,16	0,81	14	118,5	5,91	7	0,89

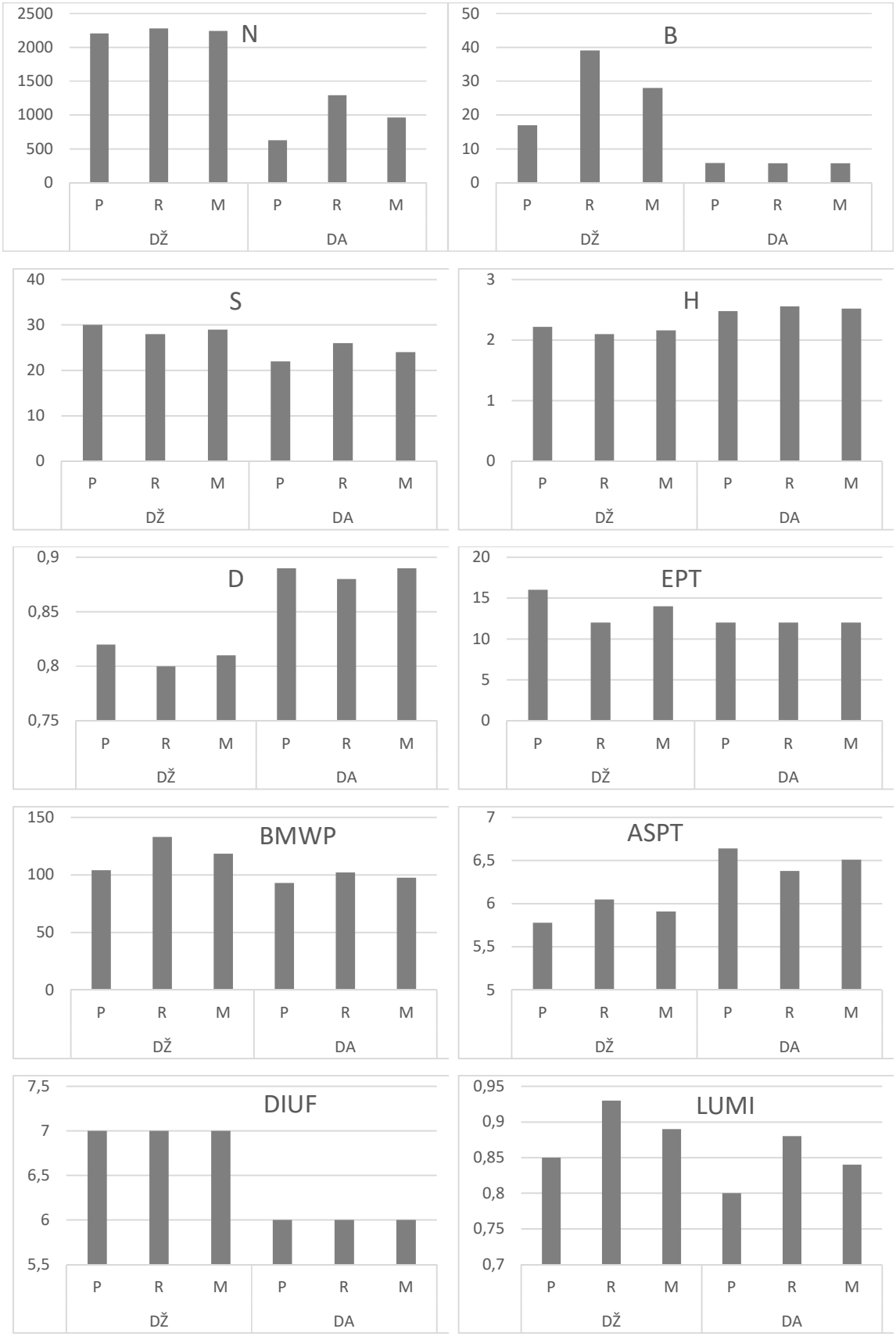
Dzūkijos KMS Duburių upelio 2025 metų makrobestuburių tyrimų negalime palyginti su praeitais monitoringo metais, nes zoobentoso tyrimai Duburiuose nevyko daug metų. Paskutiniai dugno bestuburių tyrimai Duburių upelyje vykdyti 1998 metais (Arbačiauskas 1998). Tuomet upelyje vyravo litoreofilinė fauna, buvo registruoti 35 makrobestuburių taksonai. Pagal gausumą dominavo lašalai (*Baetis*) ir ankstyvės (*Leuctra* sp.), o pagal biomasę – apsiuvos (*Rhyacophila, Potamophylax)* ar dvisparniai (Tipulidae) (Arbačiauskas, 1998).

Patikrinome ir 1995 metų duomenis kas yra lygiai 30 metų skirtumas nuo šių metų duomenų. Tuomet Duburių upelyje identifikuoti 39 makrobestuburių taksonai. Pagal gausumą dominavo lašalai (*Baetis*), o pagal biomasę –*Rhyacophila* apsiuvos (Arbačiauskas, 1995). Ilgamečiai tyrimai rodo Duburių upelio faunos stabilumą, nes per 30 metų dominantinės grupės beveik nepakito – pagal gausumą visais metais dominuoja lašalai (*Baetis*), ankstyvės (atskirais atvejais *Leuctra, Isoperla, Nemoura*) ir dvisparniai (Simuliidae), o pagal biomasę apsiuvos (atskirais atvejais *Rhyacophila, Potamophylax, Halesus*) ir dvisparniai (*Tipulidae*) (3.22 pav.).





3.22 pav. Dzūkijos KMS Duburių upelio dominantiniai bestuburių taksonai pagal individų gausumą ir biomasę skirtingais tyrimų metais: 1995, 1998 ir 2025 aukštupyje (A) ir žemiau patvankos (Ž).



3.23 pav. Makrozoobentoso bendrijos ir vandens kokybės rodiklių (N, B, S, H, D, BMWP, EPT, ASPT, DIUF ir LUMI) Dzūkijos KMS Duburių upelio aukštupyje (DA) ir žemiau patvankos (DŽ) pavasario (P), rudens (R) ir metinio vidurkio (M) pasiskirstymas 2025 m.

Lyginant Duburių upelio abi tyrimų vietas, Dauguma makrozoobentoso bendrijos ir vandens kokybės rodiklių buvo aukštesni vietoje žemiau patvankos, tik Shannon-Wiener'io, Simpson'o bioįvairovės indeksai (H ir D) bei ASPT rodiklis didesni buvo aukštupyje (4 pav.). Metinis taksonų skaičiaus vidurkis (S) tarp vietų nebuvo itin žymus – 24 taksonai aukštupyje ir 29 žemiau patvankos, bet benras aptiktų taksonų skaičius vietovėse per du sezonus gana skirtingas - 29 taksonai aukštupyje ir 41 taksonas žemiau patvankos. Individų gausumas (N) ir biomasė (B) žemiau patvankos daugiau nei dvigubai lenkia bestuburių gausumą ir biomasę aukštupyje (3.23 pav.).

3.4.4. Upelio makro bentoso rūšių įvairovės ir gausos palyginimas tarp KM stočių

Makrozoobentoso tyrimai Aukštaitijos, Žemaitijos ir Dzūkijos KMS upeliuose parodė, kad dugno bestuburių bendrijos išlieka jautriu integruotu vandens ekosistemų būklės rodikliu, atspindinčiu hidrologines sąlygas, organinės medžiagos apykaitą, buveinių struktūrą ir galimus aplinkos pokyčius. 2025 m. tyrimai patvirtino, kad miško upelių ekologinė būklė iš esmės išlieka stabili, tačiau atskirose KMS nustatyti skirtingo pobūdžio biologinių rodiklių pokyčiai.

Aukštaitijos KMS Versminio upelio tyrimai patvirtino ankstesnes išvadas, kad rankinio tinklo metodas pakankamai reprezentatyviai atspindi makrozoobentoso bendrijų sudėtį, todėl 2025 m. papildomas mėginių rinkimas gruntosėmiu nebuvo taikytas. Lyginant su 2020 m., DIUF indeksas išliko nepakitęs, o kartu su LUMI rodikliu Versminio upelio ekologinė būklė vertinama kaip vidutinė. Nors bendra makrobestuburių biomasė padidėjo, dauguma kitų biologinių rodiklių buvo šiek tiek mažesni nei 2020 m., kai LUMI reikšmės dar atitiko gerą ekologinę būklę. Tai rodo, kad Versminio upelio bendrija išlieka stabili, tačiau gali būti jautri hidrologinių ir mikroklimatinių sąlygų svyravimams.

Žemaitijos KMS Juodupio upelyje 2025 m. nustatyti 26 makrobestuburių taksonai, trimis daugiau nei 2020 m. Nepaisant taksonų skaičiaus padidėjimo, dauguma biologinės įvairovės ir bendrijos struktūros rodiklių buvo nežymiai mažesni nei ankstesnio tyrimo metu. Pagal LUMI indeksą Juodupio ekologinė būklė išlieka vidutinė, o pagal DIUF – gera, t. y. bendras ekologinis įvertinimas iš esmės nepakito nuo 2020 m.

Svarbus teigiamas Juodupio upelio pokytis yra jautrių vandens kokybės indikatorinių grupių atsistatymas. Jei 2020 m. lašalai nebuvo aptikti, o ankstyves reprezentavo tik vienas taksonas, tai 2025 m. jau nustatyti po du lašalų ir ankstyvių taksonus. Kartu registruota didesnė apsiuvų įvairovė. Tai leidžia manyti, kad, nepaisant kai kurių kiekybinių rodiklių sumažėjimo, jautrių litoreofilinių rūšių atsiradimas gali rodyti gerėjančias mikrobuveinių ir vandens kokybės sąlygas.

Didžiausia ekologine verte išsiskyrė Dzūkijos KMS Duburių upelis, kuriame makrozoobentoso tyrimai 2025 m. atlikti pirmą kartą po 1998 m. Nepaisant beveik trijų dešimtmečių pertraukos, nustatyta, kad pagrindinė dugno bestuburių bendrijų struktūra ir dominantinės grupės išliko praktiškai nepakitusios. Kaip ir ankstesniais tyrimų metais, pagal gausumą vyravo lašalai (*Baetis*), ankstyvės (*Leuctra*, *Isoperla*, *Nemoura*), o pagal biomasę – apsiuvos (*Rhyacophila*, *Potamophylax*, *Halesus*) ir dvisparniai (*Tipulidae*).

2025 m. tyrimai buvo atliekami dvejose Duburių upelio vietose – aukštupyje ir žemiau patvankos. Dauguma rodiklių buvo didesni vietovėje žemiau patvankos, išskyrus ASPT ir bioįvairovės indeksus. Pagal DIUF ir LUMI abi Duburių upelio vietos yra labai geros ekologinės būklės, priskiriamos I vandens kokybės klasei.

2025 m. Duburių upelyje nustatyta labai didelė biologinė įvairovė – iš viso 45 makrobestuburių taksonai, iš jų net 24 jautrūs EPT (Ephemeroptera, Plecoptera, Trichoptera) taksonai. Tyrimų vietoje žemiau patvankos nustatytas didesnis bendras taksonų skaičius, individų gausumas ir biomasė nei aukštupyje, tačiau aukštupis pasižymėjo didesnėmis ASPT ir biologinės įvairovės indeksų reikšmėmis. Tai rodo, kad abi vietos palaiko skirtingas, bet labai vertingas bentoso bendrijas.

Pagal DIUF ir LUMI rodiklius abi Duburių upelio tyrimų vietos priskiriamos labai gerai ekologinei būklei ir I vandens kokybės klasei. Didelis jautrių taksonų skaičius bei saugomos rūšies – geltonžiedžio kordulegastro (*Cordulegaster boltonii*) – aptikimas patvirtina išskirtinai gerą šio miško upelio ekologinę būklę ir natūralių buveinių išsaugojimą.

Apibendrinant galima teigti, kad 2025 m. KMS upelių makrozoobentoso tyrimai rodo santykinį vandens ekosistemų stabilumą, tačiau jų būklė skirtinguose regionuose skiriasi. Aukštaitijos Versminio ir Žemaitijos Juodupio upeliai išlieka vidutinės–geros ekologinės būklės, kai kuriems biologiniams rodikliams šiek tiek mažėjant, tačiau jautrių rūšių atsiradimas rodo išlikusį atsistatymo potencialą. Dzūkijos Duburių upelis per 30 metų išsaugojo beveik nepakitusią natūralią litoreofilinę fauną ir šiuo metu reprezentuoja labai geros būklės miško vandens ekosistemą.

Išvados

1. Ilgalaikiai KMS upelių makrozoobentoso tyrimai parodė, kad sąlygiškai natūralių miško baseinų vandens ekosistemos išlaiko gana stabilią biologinę struktūrą. Nepaisant klimato kaitos ir sausumos ekosistemose vykstančių pokyčių, pagrindinės dugno bestuburių funkcinės grupės išlieka, o jautrių taksonų buvimas rodo gerą ekologinį potencialą.

2. Aukštaitijos KMS Versminio upelyje 2025 m. nustatyta santykinai stabili makrozoobentoso bendrija. Nors bendra bestuburių biomasė padidėjo, dalis biologinės įvairovės rodiklių, lyginant su 2020 m., sumažėjo, o DIUF ir LUMI indeksai rodo vidutinę ekologinę būklę. Tai leidžia manyti, kad upelio ekosistema išlieka funkcionali, tačiau jautri hidrologinio režimo ir aplinkos sąlygų pokyčiams
3. Aukštaitijos KMS Versminio upelyje ekologinė būklė yra GERA. Ji nepakito vertinant DIUF rodiklį ir pablogėjo pagal LUMI.
4. Žemaitijos KMS Juodupio upelyje nustatytas taksonų skaičiaus padidėjimas (nuo 23 iki 26), tačiau dauguma kiekybinių biologinių rodiklių nežymiai sumažėjo. Nepaisant to, jautrių grupių – lašalų, ankstyvių ir apsiuvų – atsiradimas ir gausėjimas rodo galimą mikrobuveinių kokybės gerėjimą bei ekosistemos atsistatymo potencialą.
5. Žemaitijos KMS Juodupio upelio ekologinė būklė nepasikeitė. Yra GERA pagal DIUF ir VIDUTINĖ pagal LUMI.
6. Dzūkijos KMS Duburių upelis išsiskyrė didžiausia biologine verte ir ekologiniu stabilumu. Po beveik 30 metų pertraukos pakartoti tyrimai parodė, kad pagrindinė makrozoobentoso struktūra ir dominantinės grupės išliko beveik nepakitusios. Tai rodo labai aukštą natūralių miško vandens ekosistemų atsparumą ilgalaikiams aplinkos pokyčiams.
7. Duburių upelyje nustatyta didžiausia makrobestuburių įvairovė tarp tirtų KMS – 45 taksonai, iš jų 24 jautrūs EPT (lašalų, ankstyvių ir apsiuvų) taksonai. Pagal DIUF ir LUMI rodiklius abi tyrimo vietos priskirtos labai gerai ekologinei būklei ir I vandens kokybės klasei.
8. Dzūkijos KMS Duburių upelio ekologinė būklė yra LABAI GERA ir panašu itin stabili.
9. Skirtingi KMS rezultatai rodo, kad klimato kaitos sąlygomis svarbiausias vandens ekosistemų stabilumą palaikantis veiksnys yra natūralaus hidrologinio režimo ir buveinių įvairovės išsaugojimas. Stabilūs miško baseinai, tokie kaip Duburių upelis, gali išlaikyti aukštą biologinę įvairovę net vykstant reikšmingiems atmosferos ir sausumos ekosistemų pokyčiams.
10. Ateityje pagrindinė grėsmė KMS upelių makrozoobentoso bendrijoms gali būti susijusi ne su tiesioginiu taršos poveikiu, bet su klimato kaitos sukeltais hidrologiniais pokyčiais – vandens temperatūros kilimu, sumažėjusiu nuotėkiu sausros laikotarpiais ir ekstremaliais vandens lygio svyravimais, kurie gali paveikti jautriausias šaltavandenes rūšis.

KM rezultatai rodo, kad sąlygiškai natūralios Lietuvos miško ekosistemos vis dar išlaiko aukštą ekologinį atsparumą: vandens ekosistemų biologinė struktūra ir jautriausių rūšių bendrijos išlieka stabilios, tačiau sausumos komponentuose – dirvožemio biotoje, epifitinių kerpių rūšinėje sudėtyje ir medynų būklėje – jau registruojami pirmieji klimato ir besikeičiančių aplinkos veiksnių sukelti struktūrinės bei funkcinės transformacijos požymiai.

Literatūra

AQEM. 2004. Manual for AQEM European stream assessment program version 2.3. 24 p.

Arbačiauskas K. 1995. Upelių bentofaunos monitoringas, toksinių medžiagų ir radionuklidų akumuliacijos dugno nuosėdose kontrolė. Atskaita. Aplinkos ministerija, Ekologijos institutas.

Arbačiauskas K. 1998. Upelių bentofaunos monitoringas, toksinių medžiagų ir radionuklidų akumuliacijos dugno nuosėdose kontrolė. Atskaita. Aplinkos ministerija, Ekologijos institutas.

Arbačiauskas K. 2009. Bentoso makrobestuburiai. *Gyvūnijos monitoringo metodai*, Vilnius, VU Ekologijos institutas: 22–46.

Arbačiauskas K. 2020. Aukštaitijos ir Žemaitijos integruoto monitoringo stočių makrozoobentosas. Ataskaita. Gamtos tyrimų centras.

ASTERICS Software manual 2013. (version 4.0.4). http://www.fliessgewaesserbewertung.de

Budrys E. 2021. Geltonžiedis kordulegastras *Cordulegaster boltonii* (Donovan, 1807). Kn.: Rašomavičius, V. (red.), Lietuvos raudonoji knyga. Gyvūnai, augalai, grybai. – Vilnius, psl. 98.

Hering D., Moog O., Sandin L., Verdonschot P.F.M. 2004. Overview and application of the AQEM assessment system. *Hydrobiologia* 516: 1–20.

LR aplinkos ministro 2021 m. lapkričio 4 d. įsakymas D1-645 "Dėl paviršinių vandens telkinių būklės nustatymo metodikos patvirtinimo", https://e-seimas.lrs.lt/portal/legalAct/lt/TAD/aa7c4f013dae11ec99bbc1b08701c7f8?jfwid=136mjqglz5).

Manual for integrated monitoring, Program phase 1993-1996. Environmental data centre, National board of water and the environment, Helsinki, 1993. 114 pp.

Šidagytė E., Arbačiauskas K. 2015. Report: Fitting the new Lithuanian River Macroinvertebrate Index (LRMI) to the results of the Central-Baltic Geographical Intercalibration Group. 20 p.

Šidagytė E., Arbačiauskas K. 2022. A multimetric macroinvertebrate index for the assessment of the ecological status of Lithuanian rivers. *Limnologica* 97: 1-10. https://doi.org/10.1016/j.limno.2022.126010

3.5. Miško ekosistemų biotos komponentų rūšių įvairovės ir gausumo tyrimo rezultatų apibendrinimas

1993-1994 m tyrimų pradžioje didžiausiu gausumu žaliadumbliai pasižymėjo Aukštaitijos KMS teritorijoje. Kiek mažesniu gausumu pasižymėjo Žemaitijos KMS teritorijoje. 2010-15 m. Aukštaitijos ir Žemaitijos KMS baseinų tarša azoto junginiais turėtų išlikti panašiame lygmenyje ar demonstruoti mažėjimo tendenciją. 2016-2017 m. Aukštaitijos KMS stebimų eglių spyglių padengimas žaliaisiais oro dumbliais iš esmės nepakito. Žaliadumbiais padengiami vis senesni spygliai, o stebimų eglių būklė taip pat išlieka labai gera. Žemaitijos KMS oro užterštumas azoto junginiais išliko stabilus. Pagrindinis rodiklis indikuojantis tokią kaitą jauniausio ūglio amžius, kurio spygliai pradedami apaugti žaliaisiais oro dumbliais.

Pasikartojančios sausros Aukštaitijos KMS neturėjo esminės įtakos žaliųjų oro dumblių gausos padidėjimui paskutiniaisiais 2018-2019 m. Pasitvirtino teiginys, kad šiltėjantis klimatas, dėl organinių junginių skaldimosi intensyvumo skatinimo, mažina aplinkos užterštumą N junginiais. Jauniausio eglės ūglio amžius Aukštaitijos KMS 2019 m. padidėjo vidutiniškai iki 2,8 m., kas rodo mažėjantį oro baseino užterštumą šiais junginiais. 2019 m. žaliųjų oro dumblių gausa Žemaitijos KMS didėjo, ir [priešingai negu Aukštaitijos KMS, indikavo didėjanti oro baseino užterštumą N junginiais.

2020 metais registruoti du priešingi procesai žaliųjų oro dublių gausos rezultatuose. Aukštaitijos KMS nustatytas nors ir neženklus šių dumbių gausos padidėjimas, koks buvo registruojamas dar 2006 – 2007 m. Žemaitijos KMS žaliųjų oro dublių gausos tyrimo stotyje nustatyta, kad šių dumblių gausa ant eglių spyglių sumažėjo.

2025 m. tyrimų rezultatai rodo, kad tirtų eglių spyglių amžius pastaraisiais metais pasiekė 8 m metų ribą, kuri buvo registruojama tik tyrimų pradžioje. Tirtų medžių vidutinė defoliacija siekė vos 5 %. Vieni didžiausi ūglių spygliuotumo parametrai taip pat indikuoja labai gerą tirtų eglių būklę.

Prie tokių sąlygų ir eglės reakcijų į aplinkos kaitą nustatyta, kad žaliųjų oro dumblių gausa 2025 m buvo arti savo minimalių reikšmių, o jauniausio ūglio amžius, ant kurio spyglių buvo registruojami žaliadumblių pradinės kolonijos viršijo 3 m. Tai didžiausia reikšmė per visą tiriamąjį laikotarpį, kas rodo, kas Aukštaitijos oro baseino užterštumas azoto junginiais taip pat turėtų būti mažiausias per visą tiriamąjį laikotarpį. Cheminių analizių rezultatai rodo, kad amonio jonų ir nitratų koncentracijos ore yra sumažėjusi, dėl ko bendro azoto koncentracija per paskutiniuosius 5rius metus yra sumažėjusi 10 %. Tokiu būdų žzliųjų oro dumblių gausos kaitos rezultatai gerai patvirtina oro cheminių rezultatų kaitą.

Žemaitijos KMS tirtų eglių parametrai buvo taip pat vieni iš geresnių, o žaliųjų oro dumblių gausa kiek tai didesnė negu Aukštaitijos KMS, bet mažesnė negu per paskutiniuosius 2018-2020 metus. Oro cheminių tyrimų rezultatai parodė, kad 2021-2025 m. amonio jonų ir nitratų koncentracijos buvo žemesnės negu 2015-2020 m. laikotarpiu, o bendro azoti koncentracijos paskutiniaisiais metais buvo mažesnės, bent tik iki 10% buvusio lygio. Išskirtiniai tik 2025 m. amonio koncentracijų ore rezultatai, kurie Žemaitijos KMS baseine ženkliai viršija paskutiniųjų 5rių metų vidurkį ir siekia 1 μg/m3.

2021-2025 m. vakarinis Lietuvos regionas yra intensyviau teršiamas šiuo junginio negu šiaurė rytinis regionas, informuodamas, kad pagrindinis taršos šaltinis yra tolimosios oro pernašos. Atnaujinus tyrimus Dzūkijos KMS, kitų metų ataskaitoje bus galimybė įvertinti tolimųjų oro teršalų pernašų poveikį žaliųjų oro dublių gausai visos Lietuvos mastu.

Dzūkijos KMS tirtų eglių parametrai buvo prasčiausi lyginant su kitais dviejų stočių parametrais. Žaliųjų oro dumblių kolonijų gausa šiose stotyje taip pat buvo didžiausios, o ūglio amžius, kurio spygliai buvo padengti pirminėmis dumblių kolonijomis buvo mažiausias. Oro cheminių tyrimo rezultatų stoka neleido patvirtinti šios bioindikacinio parametro išvados.

Epifitinių kerpių gausos tyrimų rezultatai 2025 m. rodo, kad Aukštaitijos KMS kerpių tyrimo stotyje, tirtų medžių kamienų kerpėtumas padidėjo ar išliko maksimaliame lygmenyje registruotą per visą tiriamąjį laikotarpį. Ypač kerpėtumas padidėjo 60 cm ir 1,2 m aukštyje. Vyraujančios kerpės: putliojo plynkėžio gausos rezultatai rodo kiek tai priešingą tendenciją. Šios kerpės gausa sumažėjo paminėtuose aukščiuose. Tokį rezultatą sąlygojo rūšių kaita. Putlųjį plynkėžį šiame aukštyje pradeda keisto Kladonios genties kerpės, kurių gausa priklauso ir nuo apšvietimo sumažėjimo, dėl gerėjančios medžių būklės, ir dėl gausėjančių kritulių, kurie didina oro santykinę drėgmę. Tokią kerpių kaitą gerai iliustruoja gauti rezultatai, pateikti 3.2 pav. Pateikti duomenys rodo, kad ***pastaraisiais metais tirtų medžių kerpėtumas pasiekė savo maksimalią reikšme per visą tiriamąjį laikotarpį, oro užterštumas sieros junginiais – mažiausią reikšmę.***

Nustatyta, kad 2015 m. nitratų srautas Aukštaitijos KMS sumažėjo nuo 2 kg/ha 2010 m. iki 1,5 kg/ha, o amonio – nuo 3 kg/ha iki 2 kg/ha. 2020 m. šis srautas iekė jau tik 1,3, o paskutiniuoju laikotarpiu dar labiau mažėja ir 2025 m. sumažėjo jau iki 1,1 kgN/ha. Amonio srautas per tą patį laikotarpį kito taip: iki 2015 m. mažėjo nuo 2,7-2,8 kg/ha iki 2,5 kg/ha, 2020 m. siekė 2,2 kg/ha ir paskutiniuoju laikotarpiu vėl padidėjo iki 2 kg/ha ribos, ką patvirtino ir oro chemijos tyrimų rezultatai.

Tokiu būdu apskaičiavus bendrą srautą buvo nustatyta, kad 2020 m. azoto srautui sumažėjus nuo 5 kg/ha iki 3,5 kg/ha epifitinių kerpių gausumas reikšmingai padidėjo. Tai būtų galima teigti, kad kritinis srautas lemiantis epifitinių kerpių reikšmingus pokyčius nitratams būtų apie 1,5 kg/ha, o amonio jonams – apie 2 kg/ha. Bendrai tai sudarytų apie 3-4 kg/ha. Paskutiniojo 2021-2025 m. laikotarpio rezultatai parodė, kad atskirų komponenčių srautas sudaro 1,4+2,2 kg/ha atitinkamai, arba 3,6 kgN/ha bendrai. Šiandieną kritinis N srautas yra 5 kg/ha. Gauti duomenys rodo, kad ši reikšmė jautriose miško ekosistemose turėtų būti mažesnė, t.y. iki 3 kg/ha., ką patvirtina pastarųjų metų tyrimai Skandinavijos šalyse. Viršijantys 3kg/ha srautas iš dalies patvirtina ankstesnę išvada. 2025 m. Aukštaitijos KMS nors ir registruotas vienas didžiausių epifitinių kerpių padengimo lygis, bet jautrių kerpių taršai padengimo lygis mažėjo. Šią kaitą patvirtina ir sulfatų srauti kaita Aukštaitijos KMS baseine.

Nustatyta, kad 2005-2010 m. sulfatų srautas Aukštaitijos KMS siekė apie 2,3-2,6 kgS/ha, 2015 m. jis sumažėjo iki maždaug 1,7, o 2018-2022 m. laikotarpiu net iki 1,5. Paskutiniųjų dviejų metų laikotarpiu (2024-2025) registruojamas ženklus sulfatų srauto padidėjimas Aukštaitijos KMS baseine, kuris pradėjo viršyti 2 kg/ha riba ir paskutiniaisiais metais siekia net 2,3 kg/ha. Panaši S komponenčių srautas buvo registruojamas 15 metų, t.y. 2005-2010 m. Tai nauja grėsmė sąlygiškai natūralioms miško ekosistemoms, kuri jau pradiniame etape pasireiškė puliojo plynkežio padengimo mažėjimu, bei kitų kerpių, ne tokių jautrų taršai, padengimo didėjimu.

Epifitinių kerpių gausos tyrimų rezultatai 2025 m. rodo, kad Žemaitijos KMS kerpių tyrimo stotyje, tirtų medžių kamienų kerpėtumas iš esmės nepakito ir liko 2020 m. lygmenyje.

Vyraujančios kerpės: putliojo plynkėžio gausos rezultatai rodo panašią tendenciją, kas indikuotų kad per pastarųjų 2021-2025 m. laikotarpį iš esmės nepakito ir oro užterštumas N ir S komponentėmis, bei iš esmės nepakito ir jų srautai į miško paklotę. Oro chemijos rezultatai rodo, kad per šį laikotarpį S srautas padidėjo nuo 1,5 iki 2 kg S/ha, Amonio praktiškai išliko stabilus, o nitratų skirtingai negu Aukštaitijos KMS padidėjo nuo 2 iki 2,5 kg/ha, Kas bendroje sumoje sudarytų bendro azoto nuo 4 iki 4,5 kgN/ha, kas rodytų, kad N srautas jau pradeda artėti prie savo kritinis reikšmės miško ekosistemoms. Ar tokia koncentracija galėjo reikšmingai sąlygoti epifitinių kerpių rūšių įvairovę ir gausą buvo atsakyta kitame skyriuje, kuriame pateikti detalūs visame baseine augančių kerpių tyrimo rezultatai.

Ažvinčių sengirėje stebėtas ryškus kerpių rūšinės įvairovės sumažėjimas: nuo 10,6 2015 m. iki 8,3 2025 m. Priežastingumui nustatyti reikalinga detali analizė tiek atskiroms rūšims, rūšių pokyčiams konkrečiuose bareliuose, tiek ir įvertinant atskirų veiksnių poveikį.

Plokštinės rezervate kerpių rūšinės įvairovės tendencijos yra fluktuacijos stadijoje. Natūralių miškų struktūra dar besiformuojanti, tad ateityje galimi įvairūs rūšiniai pakitimai.

Dzūkijos nacionalinio parko teritorijoje nustatyta didžiausia rūšinė įvairovė su 9 unikaliomis rūšimis.

Aukštaitijos KMS dirvožemyje 2025 m. duomenimis mikroartropodų gausumas buvo vidutiniškai 131,2 tūkst. ind./m^2. Dominuojanti grupė – oribatidinės erkės, kurios sudaro vidutiniškai 78 % visų mikroartropodų. Jų vidutinis gausumas yra 102,0 tūkst. ind./m^2. Gamazidinių erkių vidutinis gausumas – 4,3 tūkst. ind./m^2, jos sudaro 3,3 % visų mikroartropodų. Akaridinių erkių aptikta vidutiniškai 8,3 tūkst. ind./m^2, jos sudaro 6,3 % visų mikroartropodų. Kitos erkės sudaro 6,0 % visų mikroartropodų (vid 7,9 tūkst. ind./m^2). Kolembolų gausumas – 8,7 tūkst. ind./m^2. Jos sudaro 6,6 % visų mikroartropodų.

Aukštaitijos KM stoties dirvožemio oribatidinių erkių bendrijos įvairovės rodikliai (3.1.3 lentelė) rodo santykinai nedidelę rūšinę įvairovę ir ryškų bendrijos netolygumą. Shannon–Wiener indekso reikšmė (H' = 0,96) leidžia vertinti bendriją kaip mažos įvairovės, tai gali būti būdinga mažiau palankioms arba labiau selektyvioms aplinkos sąlygoms. Simpsono dominavimo indeksas (D = 0,18) rodo, kad bendrijoje egzistuoja dominuojančios rūšys, tačiau dominavimas nėra itin stiprus, o individai pasiskirstę tarp kelių pagrindinių rūšių. Pielou tolygumo indeksas (J' = 0,28) atskleidžia mažą bendrijos tolygumą, t. y. rūšių gausumas pasiskirstęs labai netolygiai, ir didžioji dalis individų priklauso nedideliam rūšių skaičiui. Tokia indeksų kombinacija apibūdina nevienalytę bendrijos struktūrą**,** kuriai būdingas ribotas rūšių skaičius ir aiškiai išreikštas atskirų rūšių dominavimas.

Žemaitijos KMS miško dirvožemis pasižymi didesniu mikroartropodų gausumu. Čia jų gausumas vidutiniškai 197,6 tūkst. ind./m^2 . Dominuojanti grupė yra oribatidinės erkės, kurios sudaro vidutiniškai 78,0 % visų mikroartropodų. Jų vidutinis gausumas yra 154,9 tūkst. ind./m^2. Gamazidinių erkių vidutinis gausumas – 10,1 tūkst. ind./m^2, jos sudaro 5,1 % visų mikroartropodų. Akaridinių erkių aptikta vidutiniškai 6,8 tūkst. ind./m^2, jos sudaro 3,4 % visų mikroartropodų. Kitų erkių vidutinis gausumas 9,3 tūkst. ind./m^2, jos sudaro 4,7 % visų mikroartropodų. Kolembolų vidutinis gausumas – 16,5 tūkst. ind./m^2. Kolembolos sudaro 8,4 % visų mikroartropodų.

Žemaitijos KMS dirvožemio oribatidinių erkių bendrijos įvairovės rodikliai rodo santykinai vidutinę rūšinę įvairovę ir palyginti tolygų rūšių pasiskirstymą. Shannon–Wiener indekso reikšmė (H' = 2,45) leidžia vertinti bendriją kaip vidutinės įvairovės, tai gali būti būdinga palankiai aplinkai, kurioje sąlygos leidžia egzistuoti kelioms reikšmingoms rūšKMS. Simpsono dominavimo indeksas (D = 0,15) rodo, kad bendrijoje dominuojančių rūšių yra nedaug, o individai gana tolygiai pasiskirstę tarp kelių pagrindinių rūšių. Pielou tolygumo

indeksas (J' = 0,71) atskleidžia pakankamai aukštą bendrijos tolygumą, kas reiškia, kad rūšių gausumas yra gana vienodai pasiskirstęs, o bendrijoje nėra ryškių monopolinių rūšių. ***Tokia indeksų kombinacija apibūdina*** *subalansuotą ir stabilią mikroartropodų bendriją****, kuriai būdingas*** *pakankamas rūšių turtingumas ir vidutinis individų pasiskirstymas tarp rūšių****, tai gali rodyti palankias ekologines sąlygas ir tinkamą mitybos bei buveinių įvairovę šioje teritorijoje.***

Dzūkijos KMS miško dirvožemyje nustatytas mažesnis mikroartropodų gausumas, palyginti su Aukštaitijos ir Žemaitijos KM stotyse tirtais dirvožemiais. Čia jų gausumas siekia vidutiniškai 163,2 tūkst. ind./m^2. Mažesnis mikroartropodų gausumas gali būti susijęs su Dzūkijos regionui būdingais smėlingais, mažo humusingumo dirvožemiais.

Dominuojanti grupė yra oribatidinės erkės, kurios sudaro vidutiniškai 81,0 % visų mikroartropodų (3.1.1 lentelė). Jų vidutinis gausumas yra 132,0 tūkst. ind./m^2. Gamazidinių erkių vidutinis gausumas – 8,1 tūkst. ind./m^2, jos sudaro 5,0 % visų mikroartropodų. Akaridinių erkių aptikta vidutiniškai 5,1 tūkst. ind./m^2, jos sudaro 3,1 % visų mikroartropodų. Kitų erkių vidutinis gausumas – 9,4 tūkst. ind./m^2, jos sudaro 5,8 % visų mikroartropodų. Kolembolų vidutinis gausumas – 8,6 tūkst. ind./m^2. Kolembolos sudaro 5,3 % visų mikroartropodų.

Dzūkijos KMS tiriamos dirvožemio oribatidinių erkių bendrijos biologinės įvairovės rodikliai rodo vidutinę rūšių įvairovę ir santykinai netolygų individų pasiskirstymą. Shannon–Wiener įvairovės indekso reikšmė (H' = 1,81) rodo ***vidutinį rūšinės įvairovės lygį****, būdingą natūralioms, tačiau ne itin turtingoms rūšimis dirvožemio ekosistemoms.* Simpsono dominavimo indeksas (D = 0,25) rodo, kad bendrijoje yra aiškiai dominuojančių rūšių, o tai reiškia, kad ***didelė dalis individų priklauso nedideliam rūšių skaičiui***. Pielou tolygumo indeksas (J' = 0,58) patvirtina, kad bendrija yra vidutiniškai tolygi, tačiau rūšių gausumas pasiskirstęs netolygiai – kai kurios rūšys yra žymiai gausesnės už kitas. Tokie indeksų deriniai rodo, kad tiriama ***mikroartropodų bendrija yra*** *struktūriškai diferencijuota****, su ryškia dominavimo struktūra (dominuoja oribatidinės erkės).***

Didžiausias mikroartropodų gausumas nustatytas Žemaitijos KMS (197,6 tūkst. ind./m^2), kiek mažesnis – Dzūkijoje (163,2 tūkst. ind./m^2), o mažiausias – Aukštaitijoje (131,2 tūkst. ind./m^2). Tokie skirtumai gali būti susiję su dirvožemio savybėmis: Žemaitijos dirvožemiai yra palankesni dėl didesnio drėgnumo ir organinės medžiagos kiekio, o Dzūkijoje vyrauja smėlingi, mažo humusingumo dirvožemiai, kurie riboja mikroartropodų gausumą.

Biologinės įvairovės indeksai patvirtina šiuos skirtumus. Žemaitijos KMS nustatytas didžiausias Shannon–Wiener indeksas (H' = 2,45) ir aukštas Pielou tolygumo indeksas (J' = 0,71), rodantys subalansuotą ir tolygią bendriją (3.1.3 lentelė). Dzūkijoje įvairovė yra vidutinė (H' = 1,81), tačiau būdingas didesnis dominavimas (D = 0,25) ir mažesnis tolygumas (J' = 0,58).

Aukštaitijoje nustatyta mažiausia įvairovė (H' = 0,96) ir labai mažas tolygumas (J' = 0,28), rodantys stipriai dominuojančią, mažiau įvairią bendriją.

2025 m. duomenys rodo sumažėjimą AKMS (131,2 tūkst.ind./m²) ir ŽKMS (197,6 tūkst.ind./m²), o DKMS vidurkis padidėjo (163,2 tūkst.ind./m²) lyginant su ilgamečiu vidurkiu.

Aukštaitijos KMS Versminio upelyje buvo identifikuota 16 bestuburių taksonų: 13 pavasarį ir 10 rudenį (2 lentelė). Pagal gausumą, pavasarį dominavo ankstyvės (*Nemoura* sp.), vandens erkės (Hydrachnidia), vandens asiliukai (*Asellus aquaticus*) ir uodų trūklių lervos (Chironomidae). Rudenį dominavo *A. aquaticus* ir *Nemurella pictetii* ankstyvės (1030 ir 547 ind. m^{-2} atitinkamai). Pagal biomasę ir pavasarį, ir rudenį dominavo vandens asiliukai *A. aquaticus*. Bioįvairovės indeksai, Shannon-Wiener'io ir Simpson'o indeksai Versminio upelyje buvo aukštesni pavasarį lyginant su rudeniu

Versminio upelio kokybė 2020 m. buvo vertinta kaip gera, o 2025 m. kaip vidutinė. Ar kokybės rodiklių pažemėjimas 2025 m. lyginant su 2020 m. atspindi kokią nors reikšmingą tendenciją, parodys tolimesni tyrimai.

Žemaitijos KMS Juodupio upelyje buvo registruoti 26 bestuburių taksonai, 11 pavasarį ir 20 rudenį. Ir pavasarį, ir rudenį pagal gausumą ir biomasę ryškiai dominavo šoniplaukos *Gammarus pulex* (situacija tokia pati kaip ir 2020 metais). Vegetacijos sezono pradžioje antroje vietoje pagal gausumą buvo *Leuctra* sp. ankstyvės, o rudenį be šoniplaukų dar vyravo vandens erkės, kai kurių rūšių apsiuvos ir dvisparniai (4 lentelė). Šiais metais neradome moliuskų, vandens asiliukų, Empididae dvisparnių ir kai kurių kitų vabzdžių. Bet rasta daugiau ankstyvių, kitokių apsiuvų rūšių, lašalų, kurių visai nebuvo 2020 metais.

Lyginant šių metų makrobestuburių rodiklius su 2020 metais matome bendro taksonų skaičiaus padidėjimą (2020 buvo 23 taksonai, o 2025 m. identifikuoti 26), nors metinis vidurkis yra mažesnis 2025 metais. Individų skaičiaus, biomasės, bioįvairovės indeksų metiniai vidurkiai taip pat nežymiai mažesni 2025 metais nei 2020 m.

Dzūkijos KMS Duburių upelyje dugno bestuburiai 2025 metais buvo rinkti dvejose vietose – aukštupyje ir žemiau patvankos. Duburių upelio aukštupyje identifikuoti 29 taksonai, o žemiau patvankos - 41 taksonas. Per abi vietas Duburių upelyje identifikuoti net 45 dugno bestuburių gyvūnų taksonai.

Individų gausumu Duburių aukštupyje vyravo *Baetis* genties lašalai pavasarį ir ankstyvės (*Isoperla* sp., *Leuctra* sp.) rudenį. Pagal biomasę, Duburių aukštupyje pavasarį dominavo apsiuvos *Potamophylax latipennis* ir *Rhyacophila fasciata*, o rudenį – Tipulidae šeimos dvisparniai.

Daugelis biologinės įvairovės ir upelio ekologinės būklės rodiklių Duburių upelio aukštupį konstatuoja kaip labai geros ekologinės būklės (7 lentelė). Jautrių taršai taksonų (lašalų, ankstyvių, apsiuvų) rasta po 12 kiekvieną sezoną kas rodo geras litoreofilines sąlygas.

Didelė visų, o ypač jautrių taksonų įvairovė tik įrodo, kad Duburių upelio sąlygos yra itin palankios daugeliui bentosinių bestuburių gyvūnų rūšių. Ekologinės būklės rodikliai DIUF ir LUMI įvertino Duburių vietą žemiau patvankos kaip labai geros ekologinės būklės upelį (9 lentelė).

Ilgamečiai tyrimai rodo Duburių upelio faunos stabilumą, nes per 30 metų dominantinės grupės beveik nepakito – pagal gausumą visais metais dominuoja lašalai (*Baetis*), ankstyvės (atskirais atvejais *Leuctra, Isoperla, Nemoura*) ir dvisparniai (Simuliidae), o pagal biomasę apsiuvos (atskirais atvejais *Rhyacophila, Potamophylax, Halesus*) ir dvisparniai (*Tipulidae*).

Lyginant Duburių upelio abi tyrimų vietas, Dauguma makrozoobentoso bendrijos ir vandens kokybės rodiklių buvo aukštesni vietoje žemiau patvankos, tik Shannon-Wiener'io, Simpson'o bioįvairovės indeksai (H ir D) bei ASPT rodiklis didesni buvo aukštupyje

Aukštaitijos KMS Versminio upelyje ekologinė būklė yra GERA. Ji nepakito vertinant DIUF rodiklį ir pablogėjo pagal LUMI. Žemaitijos KMS Juodupio upelio ekologinė būklė nepasikeitė. Yra GERA pagal DIUF ir VIDUTINĖ pagal LUMI. Dzūkijos KMS Duburių upelio ekologinė būklė yra LABAI GERA ir, panašu, kad itin stabili.

Išplėstinės išvados apie bioindikatorių rūšinės įvairovės ir gausumo kaitą Lietuvos kompleksinio monitoringo stotyse

1. Ilgalaikiai (1993–2025 m.) kompleksinio monitoringo stočių tyrimai parodė, kad skirtingos bioindikatorių grupės atspindi skirtingus miško ekosistemų atsako į aplinkos kaitą etapus. Atmosferos poveikiui jautriausi organizmai (žaliadumbliai ir epifitinės kerpės), dirvožemio biota (mikroartropodai) ir vandens ekosistemų makrozoobentosas sudaro nuoseklią indikacinę sistemą, leidžiančią vertinti pokyčius nuo atmosferos poveikio iki cheminių komponenčių transformacijų miško ekosistemose bei jų sąvaikų su meteorologiniais veiksniais.
2. Žaliadumblių ir epifitinių kerpių tyrimai patvirtino reikšmingą ilgalaikio atmosferos taršos mažėjimo poveikį miško ekosistemoms. Sieros junginių apkrovų mažėjimas skatino epifitinių kerpių gausumo didėjimą, tačiau rūšinės sudėties pokyčiai parodė, kad bendras padengimo intensyvumas nebūtinai atspindi visišką bendrijų atsistatymą. Ažvinčių sengirėje nustatytas kerpių rūšinės įvairovės sumažėjimas nuo 10,6 rūšies 2015 m. iki 8,3 rūšies 2025 m. rodo, kad natūralių miškų bendrijų kaitą vis labiau lemia kompleksinis klimato, medyno struktūros ir mikrobuveinių pokyčių poveikis.

3. Skirtingų KMS palyginimas parodė regioninius epifitinių kerpių bendrijų atsako skirtumus. Aukštaitijos KMS nustatytas didžiausias ilgalaikis kerpėtumo padidėjimas, susijęs su ilgalaikiu atmosferinės depozicijos mažėjimu, Žemaitijos KMS stebima stabilizacijos fazė, o Dzūkijos KMS pasižymėjo didžiausia rūšine įvairove ir unikalių rūšių skaičiumi. Tai patvirtina, kad biologinei įvairovei viena svarbiausių yra oro kokybė.
4. Dirvožemio mikroartropodų bendrijos per tris dešimtmečius išlaikė pagrindinę struktūrą – visų KMS dirvožemiuose dominavo oribatidinės erkės, todėl šias sistemas galima apibūdinti kaip mikroartropodines-oribatidines. Nepaisant 2025 m. nustatyto bendro gausumo sumažėjimo Aukštaitijos ir Žemaitijos KMS, oribatidinių erkių rūšinė įvairovė išliko gana stabili, rodydama dirvožemio biologinės struktūros atsparumą.
5. Didžiausią jautrumą aplinkos pokyčiams demonstravo funkcinės dirvožemio mikroartropodų grupės – gamazidinės erkės ir kolembolos. Jų gausumo svyravimai buvo glaudžiausiai susiję su dirvožemio temperatūros ir drėgmės režimo pokyčiais. Tai rodo, kad klimato kaitos poveikis pirmiausia pasireiškia ne rūšių nykimu, bet dirvožemio bendrijų funkcinių ryšių ir medžiagų apykaitos procesų pokyčiais.
6. Upelių makrozoobentoso tyrimai atskleidė didžiausią vandens ekosistemų stabilumą. Dzūkijos KMS Duburių upelyje po beveik 30 metų išlikusi panaši dominantinių grupių struktūra ir nustatyti 24 jautrūs EPT taksonai patvirtina labai aukštą natūralių miško vandens ekosistemų atsparumą. Aukštaitijos ir Žemaitijos KMS upeliai taip pat išlaikė stabilias bendrijas, nors kai kurie rodikliai rodo didesnį jautrumą hidrologiniams svyravimams.
7. Integruota visų bioindikatorių analizė parodė, kad sumažėjusi atmosferos tarša sudarė sąlygas daliniam miško ekosistemų atsistatymui, tačiau klimato kaitos sąlygomis pradeda ryškėti naujas ekosistemų transformacijos etapas. Organizacijų gausumas daugeliu atvejų išlieka stabilus arba didėja, tačiau rūšinės sudėties, jautrių rūšių dalies ir funkcinių grupių pokyčiai rodo prasidedantį biologinių bendrijų persitvarkymą.
8. 2025 m. registruotus neigiamus epifitinių kerpių ir dirvožemio pedobiontų rūšių įvairovės ir gausos pokyčius iš dalies galėjo lemti ir padidėjusios užteršto oro pernašos iš karo židinių degančių naftos perdirbimo įmonių, kurių poveikyje įvyko ne tik sieros koncentracijų iškritose padidėjimas bet ir pagrindinių meteorologinių veiksnių kaita pasireiškianti per šaltėjantį žemos laikotarpį bei gausėjančius kritulius vegetacijos laikotarpiu.
9. Ateityje pagrindiniu hemiborealinių miško ekosistemų stabilumo rodikliu turėtų būti laikomas ne vien bendras organizmų gausumas, bet rūšinės įvairovės, jautrių indikatorinių rūšių ir funkcinių grupių struktūros kaita. Šie parametrai leidžia prognozuoti klimato kaitos poveikį miško ekosistemų atsparumui ir jų funkcijų išsaugojimui.

Galimos grėsmės biologinės įvairovės ir bioindikatorių bendrijų stabilumui

Ilgalaikiai KMS tyrimai rodo, kad sumažėjus atmosferos taršai daugelis biologinių indikatorių grupių demonstravo atsistatymo požymius, tačiau klimato kaitos sąlygomis pradeda formuotis naujos grėsmės, susijusios ne tiek su tiesioginiu rūšių nykimu, kiek su bendrijų struktūros, funkcinių ryšių ir ekosisteminių procesų pokyčiais.

Pagrindine ateities grėsme tampa klimato ekstremumų dažnėjimas. Didėjanti oro ir dirvožemio temperatūra, nepastovus kritulių pasiskirstymas, dažnesnės sausros ir perteklinės drėgmės laikotarpiai gali sutrikdyti nusistovėjusius ekologinius ryšius. Ypač jautriai į šiuos pokyčius reaguoja tos organizmų grupės, kurių gyvybiniai procesai tiesiogiai priklauso nuo drėgmės režimo – epifitinės kerpės, kolembolos, gamazidinės erkės ir šaltavandenių upelių makrobestuburiai.

Epifitinių kerpių tyrimai rodo, kad pagrindinė rizika ateityje gali būti susijusi ne su bendro kerpėtumo mažėjimu, bet su rūšinės sudėties paprastėjimu. Bendras kerpių padengimas gali išlikti aukštas ar net didėti, tačiau jautrios specializuotos rūšys gali būti keičiamos ekologiniu požiūriu platesnės amplitudės rūšimis. Ažvinčių sengirėje nustatytas rūšinės įvairovės sumažėjimas gali būti vienas pirmųjų tokių struktūrinių pokyčių signalų.

Papildomą riziką kelia azoto ir sieros junginių apkrovų stabilizacija arba didėjimas dėl karo viksmų Ukrainoje. Nors per pastaruosius dešimtmečius rūgštinančių junginių srautai reikšmingai sumažėjo, tyrimų rezultatai rodo, kad jautriose miško ekosistemose net santykinai mažos azoto apkrovos gali lemti ilgalaikius rūšinės sudėties pokyčius. Tai ypač aktualu oligotrofinėms pušynų ekosistemoms, kuriose prisitaikiusios rūšys jautriai reaguoja į eutrofikaciją.

Dirvožemio biotai didžiausią grėsmę kelia hidroterminio režimo destabilizacija. Oribatidinės erkės kol kas išlieka stabilios ir palaiko pagrindinę dirvožemio bendrijų struktūrą, tačiau jautresnių grupių – gamazidinių erkių ir kolembolų – gausumo svyravimai rodo galimus dirvožemio maisto tinklų pokyčius. Ilgainiui tai gali paveikti organinės medžiagos skaidymo greitį, maisto medžiagų apytaką ir anglies kaupimą miško dirvožemyje.

Vandens ekosistemoms pagrindinė grėsmė susijusi su hidrologinio režimo pokyčiais. Šiuo metu natūralūs miško upeliai, ypač Dzūkijos KMS Duburių upelis, išlaiko labai aukštą ekologinę būklę, tačiau vandens temperatūros didėjimas, vasaros nuotėkio mažėjimas ir ekstremalūs hidrologiniai svyravimai ateityje gali mažinti šaltavandenių, deguonies turtingų buveinių plotą ir paveikti jautrias EPT grupes.

Apibendrinant galima teigti, kad pagrindinė ateities grėsmė Lietuvos hemiborealinių miškų biologinei įvairovei yra ne staigus rūšių išnykimas, bet palaipsnis ekosistemų funkcinių ryšių persitvarkymas. Mažėjant atmosferos taršos poveikiui, pagrindiniu biologinių bendrijų kaitos veiksniu tampa klimato reguliuojami procesai – vandens režimas, mikroklimatas ir medžiagų apykaitos pokyčiai. Todėl ilgalaikėje perspektyvoje svarbiausia stebėti ne tik rūšių skaičių ar organizmų gausumą, bet ir jautrių rūšių, funkcinių grupių bei ekologinių procesų pokyčius.

Tikėtinos bioindikatorių bendrijų kaitos prognozės

Remiantis ilgalaikiais KMS tyrimų rezultatais galima prognozuoti, kad artimiausiais dešimtmečiais Lietuvos hemiborealinės miško ekosistemos išlaikys santykinai aukštą ekologinį atsparumą, tačiau biologinių bendrijų struktūra ir jų funkciniai ryšiai palaipsniui keisis, prisitaikydami prie naujų klimato ir aplinkos sąlygų.

Toliau mažėjant arba išliekant žemam atmosferos sieros junginių poveikiui, tikėtinas bendras epifitinių kerpių gausumo stabilizavimasis arba didėjimas. Tačiau jų rūšinės sudėties kaita gali tęstis: jautriausios, siaurų ekologinių nišų rūšys gali mažėti, o plačios ekologinės amplitudės ir prie kintančių sąlygų prisitaikančios rūšys gali tapti gausesnės. Todėl ateityje kerpių rūšinė sudėtis taps jautresniu miško ekosistemų būklės rodikliu nei bendras kamienų padengimo intensyvumas.

Žaliadumblių dinamika ir toliau turėtų išlikti vienu jautriausių atmosferinio azoto poveikio indikatorių. Net esant santykinai mažoms azoto apkrovoms, galimi jų gausumo pokyčiai, atspindintys eutrofikacijos procesus. Todėl tikėtina, kad žaliadumblių ir kerpių bendrijų santykis ateityje bus svarbus rodiklis vertinant azoto poveikio ribines reikšmes natūralioms miško ekosistemoms.

Dirvožemio mikroartropodų bendrijose tikėtinas pagrindinės struktūros išlikimas, kurioje ir toliau dominuos oribatidinės erkės. Šios grupės ekologinis stabilumas leidžia prognozuoti, kad staigių dirvožemio biologinės įvairovės pokyčių artimiausiu metu neturėtų įvykti. Tačiau dažnėjant sausroms ir didėjant hidroterminio režimo svyravimams, tikėtini didesni trumpaamžių ir jautresnių grupių – kolembolų bei gamazidinių erkių – gausumo svyravimai.

Ilgalaikėje perspektyvoje dirvožemio biotos pokyčiai gali pasireikšti ne rūšių praradimu, o funkcinių grupių santykio pasikeitimu. Tai gali keisti organinės medžiagos mineralizacijos greitį, maisto medžiagų ciklus ir anglies kaupimą dirvožemyje. Šių procesų kryptis priklausys nuo temperatūros kilimo ir drėgmės prieinamumo santykio: šiltesnis ir pakankamai drėgnas klimatas gali skatinti biologinį aktyvumą, o sausros – jį riboti.

Vandens ekosistemų makrozoobentoso bendrijos, ypač natūraliuose miško upeliuose, tikėtina išliks stabiliausia bioindikatorių grupe. Dzūkijos KMS Duburių upelio rezultatai rodo, kad esant išsaugotam natūraliam hidrologiniam režimui ir buveinių struktūrai jautrios rūšys gali išlikti stabilios dešimtmečius. Tačiau ateityje didžiausia rizika bus susijusi su vandens temperatūros kilimu ir mažėjančiu vasaros nuotėkiu.

Skirtingų KMS reakcija ateityje greičiausiai dar labiau diferencijuosis. Žemaitijos KMS dėl didesnio drėgmės kiekio ir produktyvesnių dirvožemių gali ilgiau išlaikyti didesnę biologinę įvairovę, tačiau gali jautriau reaguoti į hidrologinio režimo pokyčius. Aukštaitijos KMS tikėtini vidutinio intensyvumo struktūriniai pokyčiai, o Dzūkijos KMS dėl smėlinių dirvožemių ir mažesnių vandens atsargų gali tapti jautriausia ilgalaikių sausrų poveikiui.

Apibendrinant galima prognozuoti, kad ateityje pagrindinis Lietuvos miško ekosistemų pokytis bus ne bendras biologinės įvairovės mažėjimas, o biologinių bendrijų persitvarkymas. Ekosistemos gali išlaikyti aukštą produktyvumą ir bendrą rūšių skaičių, tačiau didės funkcinių grupių kaita, jautrių indikatorinių rūšių mažėjimo rizika ir priklausomybė nuo klimato ekstremumų dažnumo. Didėjanti laikina tolimųjų oro teršalų pernaša iš karo veiksmų regionų, turėtų baigtis ir pastebėti galimi pokyčiai dėl ypač didelių emisijų degant naftos perdirbino įmonėms tiek pietiniuose, tiekrytiniuose tiek ir šiauriniuose regionuose turėtų stabilizuotis ir sumažėjus gršįti į pradinį lygį. Todėl ilgalaikis integruotas monitoringas tampa būtinas siekiant nustatyti ankstyvus ekosistemų atsparumo mažėjimo signalus.

.

IV. ŽOLINĖS AUGALIJOS TYRIMAI AUKŠTAITIJOS IR ŽEMAITIJOS KMS AUGALIJOS INTENSYVIŲ TYRIMŲ STACIONARUOSE

Žolinė augmenija yra vienas iš pagrindinių miško ekosistemų komponentų, reikšmingai prisidedantis prie biologinės įvairovės palaikymo, maistinių medžiagų ciklų reguliavimo ir bendro ekosistemų funkcionavimo. Borealiniuose ir hemiborealiniuose miškuose paviršinė augmenija, kurią sudaro žoliniai augalai, žemaūgiai krūmai, samanos ir kerpės, dažnai sudaro didžiąją dalį augalų rūšinės įvairovės ir atlieka svarbų vaidmenį reguliuojant dirvožemio procesus, mikroklimatą bei organinės medžiagos apykaitą (Gilliam, 2007; De Frenne ir kt., 2013; Landuyt ir kt., 2019). Dėl tiesioginio kontakto su dirvožemiu ir greito reagavimo į šviesos, drėgmės bei maisto medžiagų prieinamumo pokyčius paviršinė augmenija plačiai pripažįstama kaip jautrus ilgalaikės miško ekosistemų būklės ir aplinkos streso indikatorius.

Tarptautinės kompleksinio monitoringo programos (ICP Integrated Monitoring, ICP Forests) ir ilgalaikių Europos miškų tyrimų rezultatai rodo, kad pomiškio ir žolinės augalijos bendrijos reaguoja ne tik į klimato kaitą, bet ir į atmosferines iškritas, dirvožemio cheminės sudėties pokyčius bei medynų struktūrą (Dirnböck ir kt., 2014; Verheyen ir kt., 2017). Nustatyta, kad azoto depozicijos didėjimas keičia rūšių sudėtį – skatina nitrofilinių, greitai augančių ir konkurencingų rūšių plitimą, o mažai maisto medžiagų reikalaujančių oligotrofinių rūšių dalis palaipsniui mažėja. Šie pokyčiai gali išlikti ilgą laiką net ir sumažėjus atmosferinėms apkrovoms dėl ekosistemų ekologinės inercijos.

Pastaraisiais metais vis daugiau dėmesio skiriama klimato kaitos poveikiui miško paviršinei augmenijai. Didėjanti temperatūra, ilgėjantis vegetacijos laikotarpis ir besikeičiantis kritulių režimas veikia augalų fenologiją, produktyvumą bei rūšių konkurencinius santykius. Europos miškuose nustatomas palaipsnis bendrijų termofilizacijos procesas – šiltesnes sąlygas toleruojančių rūšių gausėjimas ir vėsesniam klimatui būdingų rūšių mažėjimas (De Frenne ir kt., 2013; Zellweger ir kt., 2020).

Tačiau miško ekosistemose klimato kaitos poveikis žolinei augalijai dažnai yra netiesioginis. Medžių lajų tankumas ir struktūra reguliuoja pomiškio mikroklimatą, mažindami temperatūros ekstremumus ir palaikydami didesnę oro bei dirvožemio drėgmę. Todėl medynai gali veikti kaip klimato kaitos poveikio buferis, tačiau lajų struktūros pokyčiai dėl sausrų, kenkėjų, medžių žūties ar rūšinės sudėties kaitos gali reikšmingai pakeisti žolinės augalijos vystymosi sąlygas (De Frenne ir kt., 2021).

Hemiborealiniuose miškuose, kuriuose vyrauja paprastoji pušis, paprastoji eglė ir karpuotasis beržas, žolinės augalijos dinamikai didelę įtaką daro ir augavietės derlingumas.

Paprastosios pušies medynams būdingos oligotrofinės sąlygos, tokios kaip Aukštaitijos KMS, palaiko stresą toleruojančias rūšis, prisitaikiusias prie mažo maistinių medžiagų prieinamumo, o derlingesnės vietos, tokios kaip Žemaitijos KMS, po eglynais paprastai pasižymi didesniu produktyvumu ir didesne rūšių įvairove. Tarptautinės programos (ICP) KM stebėjimai rodo, kad klimato kaitos ir atmosferos iškritų sąveika gali lemti laipsniškus, bet nuolatinius rūšių sudėties pokyčius, įskaitant būdingų oligotrofinių rūšių mažėjimą ir konkurencingų žolių bei žolinių augalų gausėjimą (Dirnböck ir kt., 2014).

Naujausi tyrimai rodo, kad ilgalaikė klimato kaitos, atmosferinės depozicijos ir medynų struktūros pokyčių sąveika gali lemti ne tik rūšių gausumo pokyčius, bet ir miško augalijos bendrijų funkcinę transformaciją. Viena iš galimų pasekmių yra biotinė homogenizacija – skirtingų ekosistemų rūšinės sudėties panašėjimas, kai mažėja specializuotų rūšių dalis ir didėja ekologiniu požiūriu plačiai prisitaikiusių rūšių reikšmė (Staude ir kt., 2020).

Ilgalaikiai žolinės augalijos tyrimai yra būtini vertinant miško ekosistemų atsparumą globaliai kaitai. Paviršinės augmenijos rūšinės sudėties, gausumo ir funkcinių grupių pokyčiai leidžia nustatyti ankstyvus ekosistemų transformacijos požymius bei prognozuoti galimą klimato kaitos, atmosferinių iškritų ir medynų struktūros pokyčių poveikį hemiborealinių miškų stabilumui.

Tokiu būdu, antžeminė žolinė augmenija yra ir jautrus indikatorius, ir aktyvus ekosistemos procesų variklis miško aplinkoje. ICP KM ir susijusių stebėsenos duomenys suteikia esminės informacijos norint suprasti ilgalaikius ekologinius pokyčius ir įvertinti bendrą klimato kaitos, oro taršos ir miškų tvarkymo poveikį. Todėl antžeminės žolinės augmenijos dinamikos integravimas į miškų būklės vertinimą yra labai svarbus, kuriant tvarias ir prisitaikančias tvarkymo strategijas kintančiomis aplinkos sąlygomis. Dėl šios priežasties augalijos tyrimų stacionaruose tyrimai vykdomi kasmet, o visose KMS baseino teritorijose kas 5 metų laikotarpį.

Tyrimus visose stotyse atliko **(**Ainis Pivoras; Jonė Pivoraitė, Anita, Elizabeth Clarke)**).**

Uždaviniai:

1. Atlikti Aukštaitijos, Žemaitijos ir Dzūkijos KM stočių teritorijų žolių-krūmokšnių ir samanų-kerpių ardų rūšių tyrimus pagal ICP KM vadovo 7.17-19 (FINNISH ENVIRONMENT INSTITUTE, 2013) dalyje nustatytus reikalavimus;

2. Nustatyti augalijos rūšinę įvairovę, atskirų augalijos ardų ir rūšių projekcinį padengimą, aptikimo dažnumą ir fertilumą intensyvaus stebėjimo laukeliuose Aukštaitijos, Žemaitijos ir Dzūkijos KM stočių intensyvaus stebėjimo laukeliuose;

3. Palyginti 2021-2025 metų duomenis su ankstesnių tyrimų duomenimis. Identifikuoti pokyčius, išanalizuoti ir detalizuoti jų priežastis ir pateikti išvadas bei prognozes, jei įmanoma, pateikti išsamias rekomendacijas dėl būklės gerinimo;

4. Pagal galimybes nustatyti augalijos struktūros / rūšinės sudėties / gausumo pokyčių priežastis.

Metodika

Botaninio monitoringo darbai vykdyti naudojant integruoto monitoringo, VG paprogramės metodiką parengtą pagal Finnish Environment Institute (2013). Vadovaujantis metodika stebėjimai vykdomi sąlyginai natūraliose miško ekosistemose, kur nėra tiesioginės ūkinės veiklos, gamtinių rezervatų teritorijose, mažų upelių baseinų lygmeniu. Aukštaitijoje LT-01, Ažvinčių sengirės rezervate, Versminio upelio baseine. Dzūkijoje LT-02, Skroblaus gamtiniame rezervate, Duburių upelio baseine. Žemaitijoje Plokštinės gamtiniame rezervate, Juodupio upelio baseine. Stebimų upelių baseino teritorijoje parinkti 1-2 vnt., 40 x 40 m. vietovę gerai reprezentuojantys intensyvaus stebėjimo stacionarai (poligonai). Intensyvaus stebėjimų stacionaruose atsitiktine tvarka išdėstyta 32-50 pastovių 0,25 m^2 (0,5 m x 0,5 m) stebėjimo aikštelių (4.0.1 – 4.0.2 pav). Aukštaitijoje 2 stacionarai (A100 ir A102) po 50 aikštelių; Žemaitijoje vienas stacionaras (Ž100) su 32 aikštelėmis; Dzūkijoje vienas stacionaras (D100) su 50 aikštelių. Intensyvaus stebėjimų stacionarai su visais >10 cm skersmens medžiais ir stebėjimo aikštelėmis kartografuotas. Stebėjimo aikštelių kampai stacionariai paženklinti įkalamais kuoliukais iš PVC vandentiekio vamzdžio. Augalijos stebėjimo aikštelėse vadovaujantis Finnish Environment Institute (2013) metodika stebimi šie parametrai:

a) Atskirų augalijos ardų (medžių, krūmų, žolių, samanų ir kerpių) bei nuokritų bendras projekcinis padengimas.

b) Krūmokšnių, žolių, epigėjinių samanų ir kerpių atskirų rūšių projekcinis padengimas.

c) Krūmokšnių, žolių, epigėjinių samanų ir kerpių atskirų rūšių aptikimo dažnumas.

d) Krūmokšnių, žolių ir epigėjinių samanų fertilumas – vertinamas balais, perskaičiavus išreiškiamas procentais.

Gamtiniai stebėjimai Aukštaitijos ir Žemaitijos KMS atlikti 2021-2025 m., Dzūkijos KMS 2025 metų liepos – rugpjūčio mėnesiais. Duomenų palyginimui buvo panaudoti 1993–

2020 metų Aukštaitijos KMS; 1994–2020 metų Žemaitijos KMS ir 1993–1997 metų Dzūkijos KMS stebėjimų duomenys. Botaniniai stebėjimai Dzūkijos KMS 2025 metais pagal integruoto monitoringo VG paprogramę vietovėje atnaujinti po 27 metų pertraukos.

Rezultatai aptariami atskiruose skyriuose, pagal tyrimų geografinę vietovę. Aukštaitija KMS – Aukštaitija_100 stacionaras (4.1 skyrius) ir Aukštaitija_102 stacionaras (4.2 skyrius), Žemaitijos KMS - Žemaitija_100 (4.3 skyrius) ir Dzūkijos KMS – Dzūkija_100 stacionaras (4.4 skyrius).

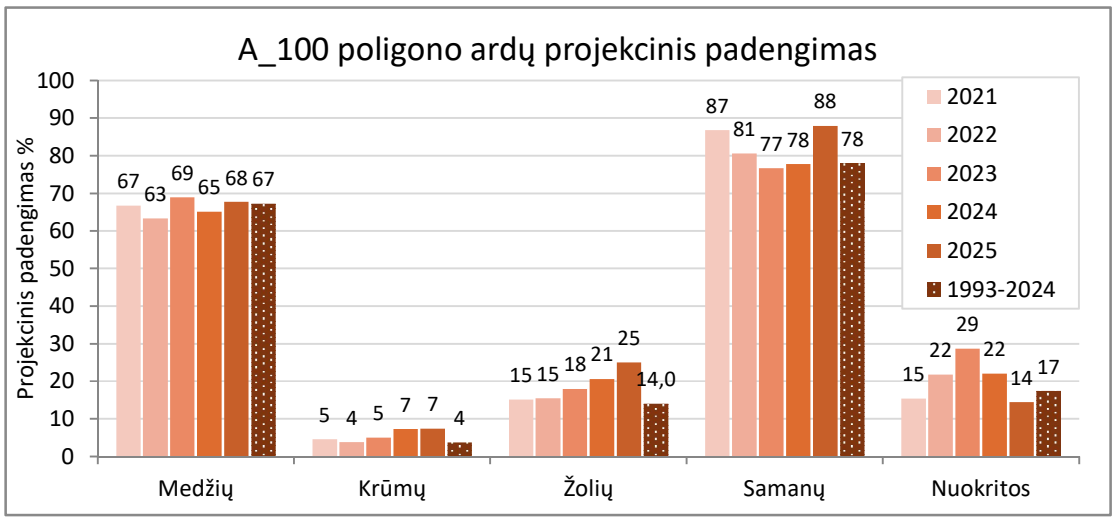
4.1 Aukštaitija_100

Aukštaitija_100 (A_100) augalijos intensyvių tyrimų stacionaras įkurtas viršutinėje Versminio upelio baseino dalyje, normalaus drėgnumo, nederlingoje lengvos granuliometrinės sudėties (Nbl) augavietėje, aukšto produktyvumo (I boniteto), brukniniame (v), perbrendusiame (15 amžiaus klasė) pušyne su silpnai išreikšta eglės priemaiša bei antru jos ardu ir pomiškiu. Gruntinio vandens lygis šiame stacionare dažnai nukrenta žemiau 10 m. Tai būdinga šio baseino miško augavietė su jai būdinga sumedėjusių ir žolinių augalų rūšių įvairove.

4.0.1 pav. *Augalijos tyrimai, Aukštaitija_100 intensyvių stebėjimų stacionare.*

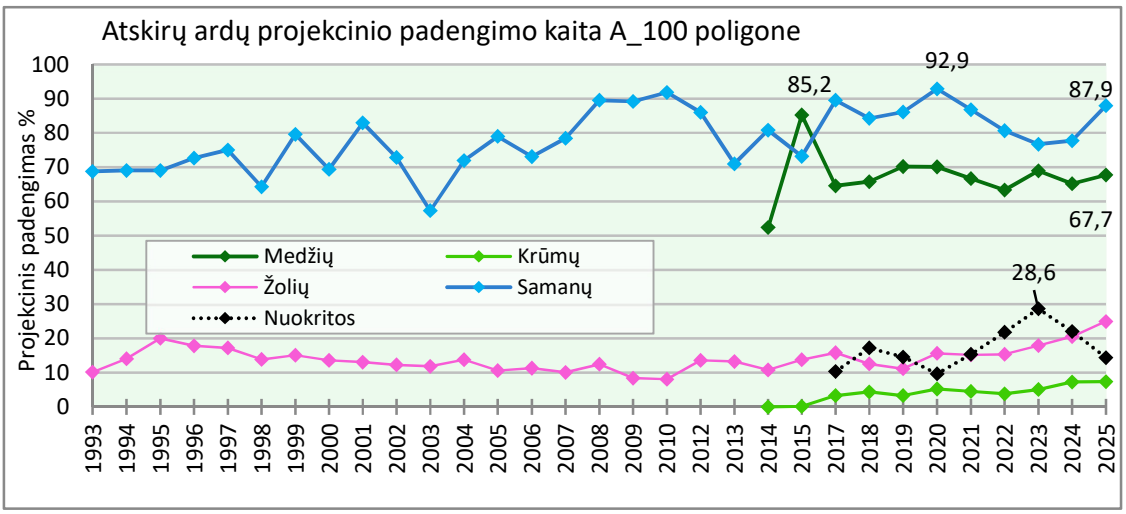
Aukštaitija_100 poligone yra stebima pušyno bendrija. I arde dominuoja paprastosios pušys su paprastosios eglės ir karpotojo beržo priemaiša. Pastaruoju laikotarpiu stebėtas palaipsnis brandžių eglių ir kiek mažiau beržų žuvimas. Jų vietą pamažu užima jaunesnių eglių generacija. 2021-2025 metais medžių ardo vidutinis projekcinis padengimas svyravo tarp 63,3 – 68,9 % (4.1.1 - 4.1.2 pav.) ir išliko artimas ilgamečiui vidurkiui (detaliau apie medžių ardo pokyčius žr. II skyrius. Miško ekosistemų sumedėjusios augmenijos monitoringas).

4.1.1. Projekcinis padengimas



4.1.1 pav. *Aukštaitija_100 poligono ardų vidutinio projekcinio padengimo kaita 2021–2025 m.*

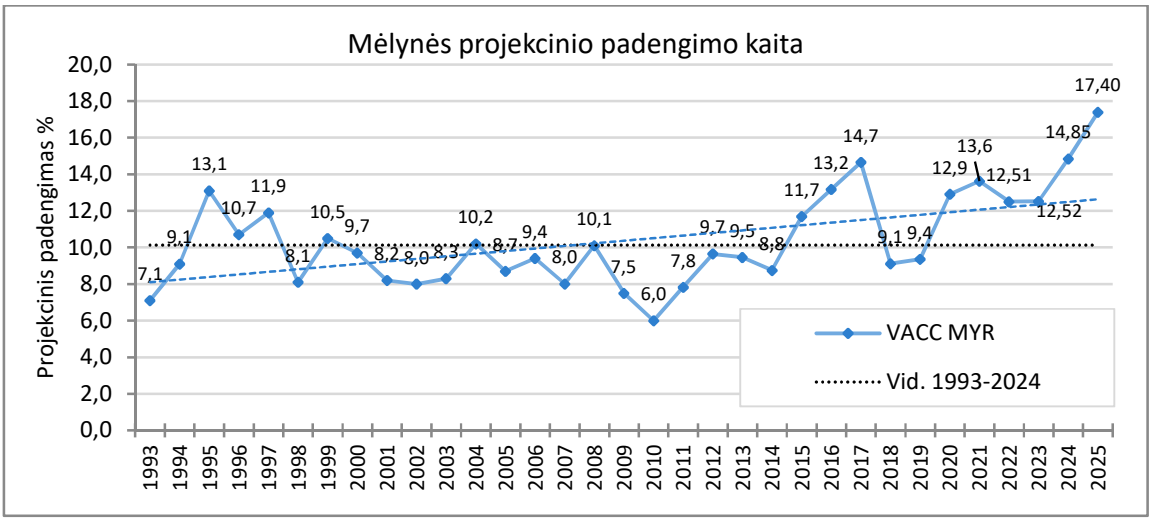
Krūmų ardas dengia mažiausią plotą poligone, vidutiniškai tik 3,7 %. Pastaruoju laikotarpiu stebėtas ženklus augimas nuo 3,8 iki 7,4 %. Tai tikėtina nulėmė medžių retinimasis poligone. Žolių ir krūmokšnių ardo projekcinis padengimas per stebimąjį 1993–2020 metų laikotarpį Aukštaitija-100 tiriamajame poligone svyravo 8 – 20 % ribose, o pastaraisiais 2024-2025 metais registruotas nuoseklus augimas iki rekordiškai aukštos 25 % vertės (4.1.1 - 4.1.2 pav). Dabar jis beveik dvigubai viršija ilgametį vidurkį 13,7 %. Šiuos pokyčius kaip ir samanų ardo atveju galėjo lemti brandaus pušyno, kuriame išdėstyti tyrimų bareliai, lajų išretėjimas ar brandžių senų medžių žūtis.



4.1.2 pav. *Žolių ir krūmokšnių ardo vidutinio projekcinio padengimo kaita Aukštaitija_100 poligone 1993–2025 metais*

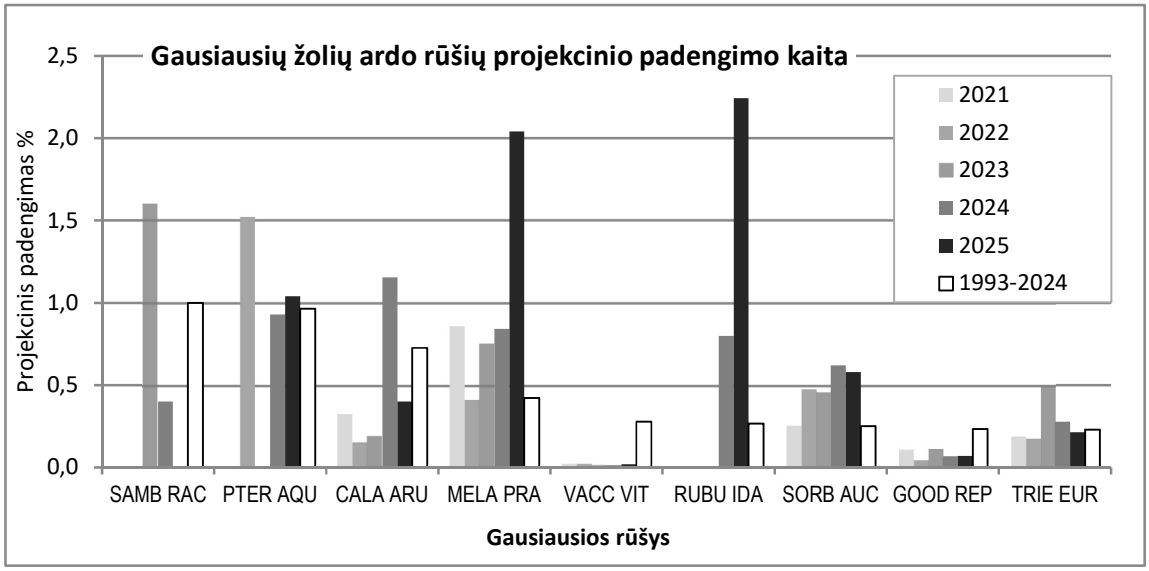
Medžiams žuvus, miško paklotei tenka daugiau šviesos ir kritulių, maisto medžiagų nuokritų bei yrančių šaknų pavidalu, taip sudaromos geresnės sąlygos žoliniams induočiams. Svarbus veiksnys ir eglių pomiškio formavimasis šiaurinėje poligono dalyje, sąlygojantis žolinės dangos nykimą dalyje poligono. Bendrus žolių ardo pokyčius geriausiai atspindi pagrindinio ardo dominanto – mėlynės, projekcinio padengimo kaita (4.1.3 pav).

Žolių ir krūmokšnių arde 1993-2020 m. laikotarpiu iš viso buvo užregistruota ir stebima 15 rūšių induočių augalų (miškinis lendrūnas – *Calamagrostis arundinacea,* paprastoji pakalnutė – *Convallaria majalis,* avinis eraičinas – *Festuca ovina,* šliaužiančioji sidabriukė – *Goodyera repens,* plaukuotasis kiškiagrikis – *Luzula pilosa,* dvilapė medutė – *Maianthemum bifolium,* pievinis kupolis – *Melampyrum pratense,* paprastoji eglė – *Picea abies* (juv), paprastoji pušis – *Pinus sylvestris* (juv.), didžialapis šakys – *Pteridium aquilinum,* paprastoji katuogė – *Rubus saxatilis,* paprastasis šermukšnis – *Sorbus aucuparia,* miškinė septynikė – *Trientalis europaea,* mėlynė – *Vaccinium myrtillus,* bruknė – *Vaccinium vitis-idaea*) 4.1 priedas. 2021-2025 metų laikotarpį užregistruotos net 6 naujos žolių ir krūmokšnių ardo rūšys: miškinė zuiksalotė - *Mycelis muralis*, paprastasis kiškiakopūstis - *Oxalis acetosella*, paprastoji avietė - *Rubus idaeus*, blindė - *Salix caprea*, raudonuogis šeivamedis - *Sambucus racemosa* ir daržinė žliūgė - *Stellaria media.* Nors 1993-2021 metais vidutiniškai registruojama 10 ardo rūšių, 2024-2025 registruota atitinkamai 17 ir 16 rūšių. Daugiausia per visą stebėjimų istoriją (4.1 priedas). Tai indikuoja ženklias permainas poligone. Šeivamedis, blindė, avietė ir žliūgė – šviesamėgės pionierinės derlingesnių vietų rūšys. Jos įsitvirtino naujai susidariusiose nuokritų gausiose aikštelėse, žuvusių medžių vietose. Tuo tarpu kiškiakopūstis ir zuiksalotė, labiau unksmingų klimaksiškesnių eglynų rūšys. Tačiau šiuo atveju būtent eglių žūties sąlygoti pokyčiai sudarė galimybes joms sudygti, tikėtina, iš dirvoje buvusių sėklų banko. Taip pat daugiau nei po 10 metų pertraukos tiriamuosiuose laukeliuose vėl registruoti eglių ir pušų daigai. Priešingai medutė ir eraičinas neregistruojami jau daugiau nei 10 metų. Bendrus viso žolių ir krūmokšnių ardo projekcinio padengimo pokyčius labiausiai nulemia ardo pagrindinis ir pastovus dominantas - mėlynė (4.1.3 pav). Mėlynės vidutinis projekcinis padengimas visą 2021 – 2025 metų laikotarpį išliko ženkliai didesnis už visų stebėjimų vidurkį (10,1 %), o 2024-2025 metais registruoti du absoliutūs rekordai paeiliui, atitinkamai 14,8 ir 17,4% (4.1.3 pav). Mėlynės yra krūmokšniai, jos pastoviai auga tose pačiose vietose, net ir žiemą numeta tik lapus, o jų šakelės išlieka žalios ir nenudžiūvusios ištisus metus. Mėlynių projekcinį padengimą nulemia ne tik individų gausa, bet ir grybinių ligų protrūkiai, sukeliantys defoliaciją. Taip pat šaltos besniegės žiemos. Toks populiacijos gausėjimas gali indikuoti, kad tiek vykę sukcesiniai medyno pokyčiai, tiek ir laikotarpio meteorologinės ypatybės, mėlynėms buvo palankios.



4.1.3 pav. *Mėlynės vidutinio projekcinio padengimo skirtingais metais palyginimas.*

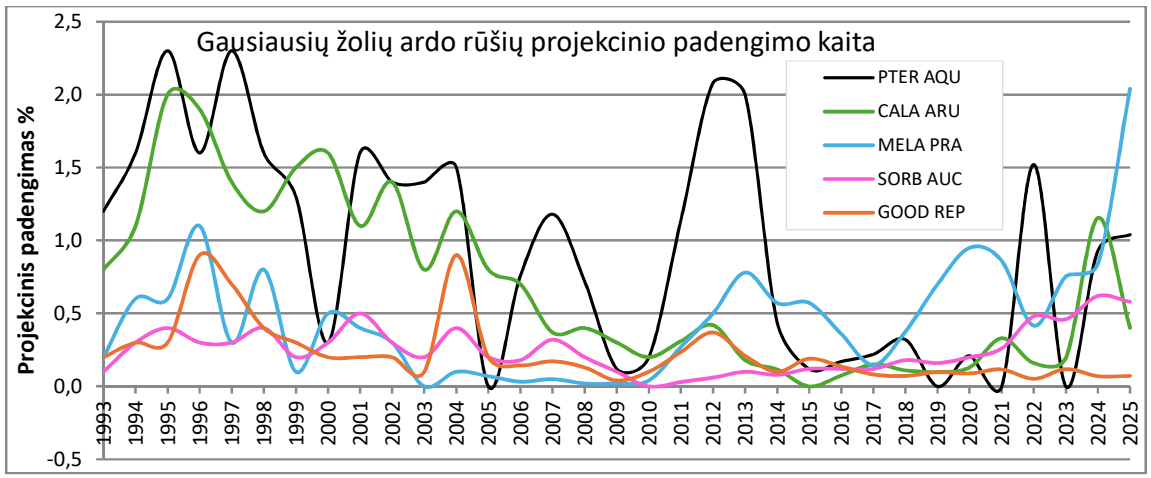
Analizuojant atskirai likusių rūšių projekcinį padengimą, matyti (4.1.4 pav; 4.1.5 pav; 4.1 priedas), kad jų vidutinis projekcinis padengimas nesiekia net 1%. Lyginant 2021-2025 metų duomenis su ilgamečiu vidurkiu matyti (4.1.4 pav), kad naujai registruotas šeivamedis išnyko iš žolių ardo, nes peraugo į krūmų ardą. Tuo tarpu avietės gerai įsitvirtino, ir, nors registruojamos vos poroje tiriamųjų laukelių, 2025 metais buvo antra gausiausių rūšių. Iš pastoviai aptinkamų rūšių, stebimi pokyčiai labai teigiamai paveikė pievinio kupolio populiacija. 2025 metais jis registruotas gausiausiai per visą stebėjimų laikotarpį ir ilgametį vidurkį viršijo net 4 kartus. Kupolis vienmetis, pusiau parazitinis augalas, mažiau jautrus meteorologiniams ekstremumams, bei labai greitai išnaudojantis apšvietimo pokyčius, paklotės pažaidas. Tikėtina tai ir išprovokavo stebimą jo pupuliacijos augimą.



4.1.4 pav. *Aukštaitija_100 poligono gausiausių žolių ir krūmokšnių ardo rūšių (išskyrus mėlynę) projekcinio padengimo kaita 1993–2020 m.*

Po pertraukos vėl gausiau registruotas plačialapis šakys. Jis yra nepastovus dominantas. Jo nepastovumą nulemia gyvenimo strategija. Didžialapis šakys plinta šakniastiebiais, ant kurių išaugina lapus. Lapai kasmet išauga kitose šakniastiebių vietose. Lapai būna išsidėstę gan retai, bet dengia didelį plotą. Ne visada lapai pasitaiko sąlyginai mažuose intensyvaus stebėjimo laukeliuose, todėl klaidingai atrodo, kad šios rūšies projekcinis padengimas skirtingais metais labai svyruoja. Miškinis lendrūnas – daugiametis, šviesamėgis, tankius kerus formuojantis augalas – jis kaip ir didžialapis šakys labiau mėgsta derlingesnes ir atviresnes vietas, įsikuria kirtavietėse, po trikdymų. Matyt eglių žūties sąlygoti trikdymai ir nulėmė ženklų gausumo augimą 2024 metais.

Labiausiai sumažėjusios, lyginant su ilgamečiu vidurkiu, išliko bruknių ir šliaužiančiųjų sidabriukių populiacijos. Bruknės, visžalis krūmokšnis, užimantis gana panašią ekologinę nišą kaip ir mėlynės, tačiau sunkiau pakelia eglynams būdingą unksmę, nors yra atsparesnės šalčiui ir sausroms, konkurencingesnės skurdesniuose, rūgštesniuose dirvožemiuose. Tikėtina, jog bruknes pamažu išstumia mėlynės, didėjantis eglių poveikis, augantis augavietės derlingumas. Antra vertus tiriamojoje augavietėje bruknių populiacija niekad nebuvo gausi, tad stebimus dėsningumus gali lemti ir atsitiktinumai. Tuo tarpu sidabriukės gali būti mažiau konkurencingos kitiems žoliniams augalams ir jautresnės greitiems aplinkos pokyčiams.



4.1.5 pav. *Aukštaitija_100 poligono gausiausių žolių ir krūmokšnių ardo rūšių (išskyrus mėlynę) projekcinio padengimo kaita 1993–2025 m.*

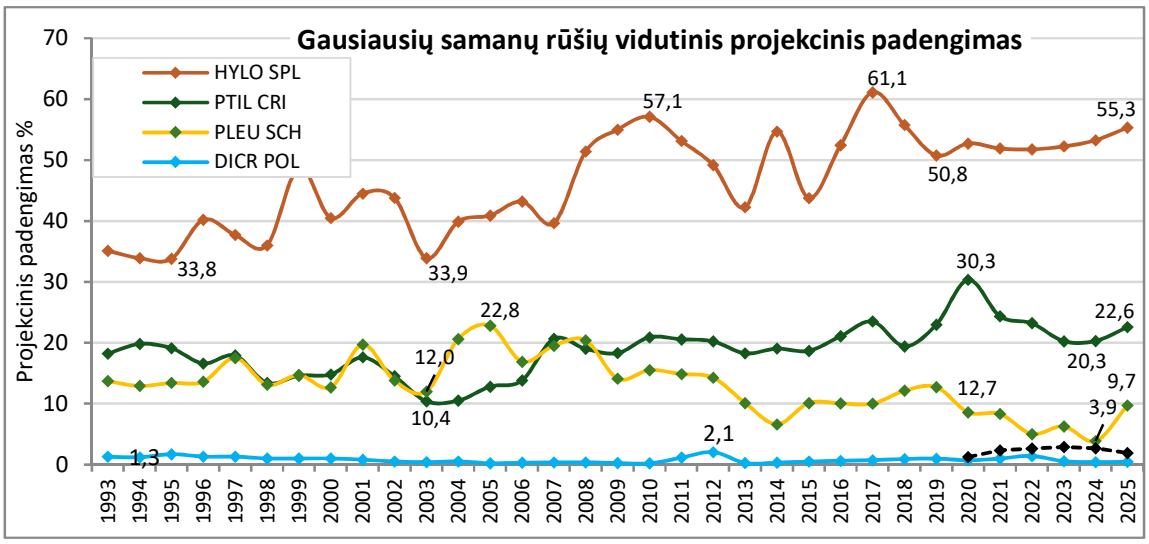
Samanų ir kerpių ardo padengimas poligone beveik ištisinis, ilgametis ardo projekcinio padengimo vidurkis 78.0 % (4.1.2 pav.). Per visą stebėjimų laikotarpį ardo projekcinis padengimas svyravo 35,6 % diapazone: mažiausias buvo 57,3 % (2003 m), didžiausias 92,9 % (2020 m). 2015-2021 metais samanų ardo projekcinis padengimas buvo ženkliai išaugęs, o 2022-2024 m. laikotarpiu nukrito iki ilgamečio vidurkio. 2025 metais vėl stebėtas ženklus kilimas iki 87,9 %. Kasmetinius samanų dangos svyravimus įprastai nulemia drėgmės kiekis ir pasiskirstymas vegetacijos laikotarpiu. Registruotas ardo sumenkimas 2022-2024 metais gali būti susijęs ir su išaugusia nuokritų gausa žuvus daliai medžių. Nuokritų uždengtos samanos trumpam nunyksta (4.0.2 pav.), bet greitai atsigauna jas apgaubdamos iš viršaus. Samanų ardo vertinimui svarbus būtent vertinimo metu esantis drėgmės kiekis paklotėje, kas gali „paslėpti" ilgalaikio pokyčio dėsningumus.

4.0.2 pav. *Tiriamasis laukelis (0,25 m^2) Aukštaitija_100 tyrimų poligone.*

Nagrinėjant atskiras rūšis, per visą stebėjimų laikotarpį buvo stebėta 15 epigėjinių samanų - kerpsamanių rūšių: (tikroji trumpė – *Brachythecium oedipodium,* gelsvažalė trumpė – *Brachythecium salebrosum,* purioji dvyndantė – *Dicranum polysetum,* šakotoji dvyndantė – *Dicranum scoparium,* dantytoji kemsenė – *Herzogiella seligeri,* atžalinė gūžtvė – *Hylocomium splendens,* dvidantė gludutė – *Lophocolea bidentata,* įvairialapė gludutė – *Lophocolea heterophylla,* riestalapė raguotė - *Nowellia curvifolia*, smailialapė lapūnė - *Plagiomnium cuspidatum,* kreivalapė pažulnutė – *Plagiothecium curvifolium,* dantytoji pažulnutė – *Plagiothecium denticulatum,* paprastoji šilsamanė – *Pleurozium schreberi,* lenktagalvė polija – *Pohlia nutans,* liekninis gegužlinis – *Polytrichum formosum,* puošnioji blakstienė – *Ptilidium pulcherrimum,* šilinė plunksnė – *Ptilium crista-castrensis,* vaiskioji keturdantė – *Tetraphis pellucida*) (4.2 priedas). Kasmet vidutiniškai registruojama 6,5 epigėjinių samanų rūšių. Per 2021-2025 metų laikotarpiu registruota 10 epigėjinių samanų

ardo rūšių (5-8 kasmet). Per visą stebėjimo laikotarpį ištisai nepranykdamos augo tik 4 samanų rūšys: purioji dvyndantė, atžalinė gūžtvė, paprastoji šilsamanė ir šilinė plunksnė (4.1.6 pav).

Įdomu, kad per pastarąjį, 2021-2025 metų laikotarpį poligone registruota net 30 epiksilinių samanų, kerpsamanių, kerpių rūšių augusių ant laukeliuose esančios negyvos medienos, nuokritų. Taigi, nors bendrai paėmus epiksilinės ardo rūšys dengia vos 1-3 % (4.1.6) vertinamo paviršiaus ploto, jų biologinė įvairovė yra 3 kartus didesnė už visų likusių, epigėjinių rūšių, dengiančių net 70-90 % tiriamojo ploto. Nepaisant to, epiksilinės ardo rūšys pagal metodiką įprastai nevertinamos ir čia detaliau neanalizuojamos. Augant negyvos medienos kiekiams, jai pamažu yrant ir smengant į dirvožemį, jų negalima ignoruoti, ir būtina įtraukti į ateities tyrimus.



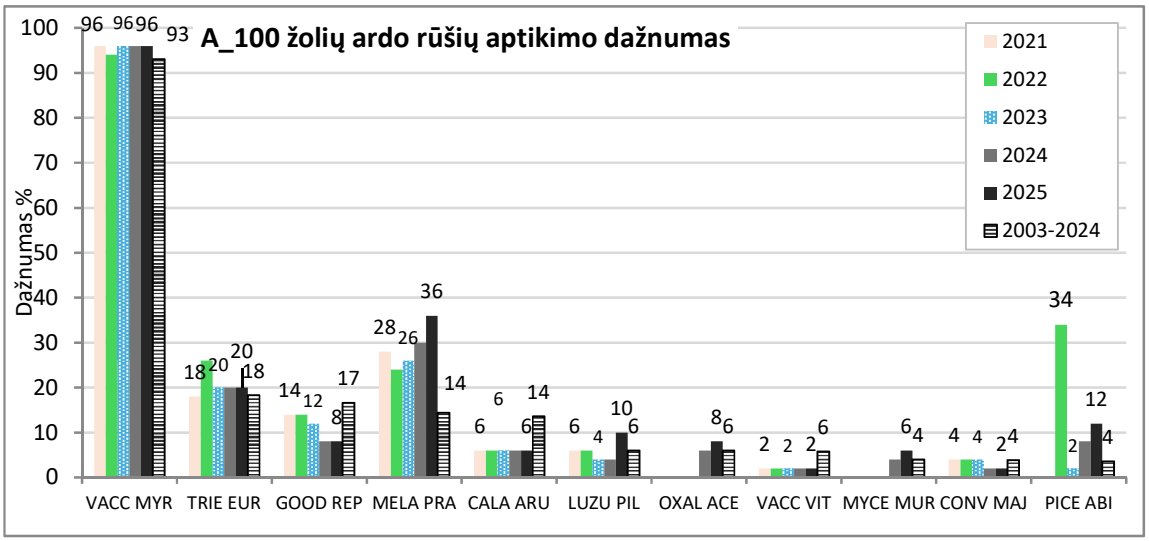
4.1.6 pav. *Aukštaitija_100 poligono vyraujančių samanų ir kerpių ardo rūšių vidutinio projekcinio padengimo kaita 1993–2025 metais.*

Pagrindinis samanų ardo dominantas – atžalinė gūžtvė *(Hylocomium splendens).* Jos projekcinio padengimo kreivė (4.1.6 pav.) bendrai paėmus 1993–2025 metais gana nuosekliai kilo ir, nors 2012, 2015, 2019 metais buvo sumažėjęs lyginant su itin lietingais 2017 metais, pastaraisiais (2021-2025) metais projekcinis padengimas išlieka ženkliai didesnis už visų stebėjimų vidurkį. Antros pagal gausumą, šilinės plunksnės, projekcinis padengimas, irgi gana tolygiai didėjo visą tyrimų laikotarpį ir 2020 metais registruota išskirtinai aukšta 37,3 % vertė, daugiau nei dvigubai viršijanti ilgametį vidurkį (17,4 %). 2021-2025 metais plunksnės gausa ženkliai sumažėjo, bet lyginant su ilgamečiu vidurkiu, vis dar išlieka didelė. Paprastosios šilsamanės gausa, priešingai gūžtvei ir plunksnei, nuo 2005 metų nuosekliai mažėja. 2022-2024 metais šilsamanės populiacija buvo mažiausia per visą stebėjimų istoriją, ir tik 2025 m. registruotas labai ženklus augimas nuo 3,9 iki 9,7 %. Puriosios dvyndantės gausa 2019-2022 metais buvo ženkliai išaugusi, tačiau 2023-2025 nukrito perpus žemiau ilgamečio vidurkio, ir yra sąlyginai žema 0,4% (4.1.6 pav).

Samanų ardo projekcinio padengimo svyravimui ir rūšinės sudėties kaitai didžiausią įtaką turi kasmetinis drėgmės kiekis ir apšvietimas. Esant drėgnesniems metams, samanų danga vešlesnė, joje stebimos kerpsamanės, kurios sausesniais metais neaptinkamos. Išvirtus daliai eglių ir karpotųjų beržų, pasikeitė šviesos rėžimas, vietomis laikinai išaugo nuokritų kiekis, išvešėjo žolinė augmenija, tai vietomis laikinai pablogino samanų ardo būklę. Tačiau 2025 metų duomenys rodo, kad ji išlieka sąlyginai labai gera, ir greitai atsistato. Taip pat dėl žuvusių beržų mažėja kasmetinis lapų nuokritų kiekis, kuris mechaniškai stelbdavo samanas. Būtų įdomu detaliau paanalizuoti gūžtvės, plunksnės ir šilsamanės sąveikas atskirų laukelių lygmeniu, kas būtent nulemia skirtingus jų gausos ilgalaikius pokyčius? Norint nustatyti tikslesnes samanų gausos kaitos priežastis reikalingos detalesnės duomenų analizės įtraukiant kitų integruoto monitoringo paprogramių duomenis.

4.1.2 Dažnumas

Dažniausia Aukštaitija_100 poligono induočių augalų rūšis per stebimąjį 2003–2025 metų laikotarpį buvo mėlynė (*Vaccinium myrtillus)* (4.1.7 pav). Jos aptikimo dažnumas svyravo 86–98% ribose, ir 2017 bei 2019 m. buvo rekordiškai aukštas 98%.



4.1.7 pav. *Aukštaitija_100 poligono dažniausių žolių ir krūmokšnių ardo rūšių dažnumo kaita.*

Pastaraisiais (2021-2025) metais smuktelėjo iki 96%, 2022 – 94%, tačiau išlieka didesnis už ilgametį vidurkį (93 %). Mėlynei augti tinkančios sąlygos yra rūgščių dirvožemių ne per daug ūksmėti miškai, kokie ir yra susiformavę Aukštaitija-100 poligone. Mėlynės išsiaugina toli šliaužiančius požeminius stiebus, kurie leidžia suformuoti ištisinius sąžalynus ir plisti nepaisant vešlaus samanų ardo. Likusių rūšių dažnumas žymiai mažesnis. Sąlyginai dažnesnės rūšys (dažnumas 10–20%) yra miškinis lendrūnas – *Calamagrostis arundinacea,*

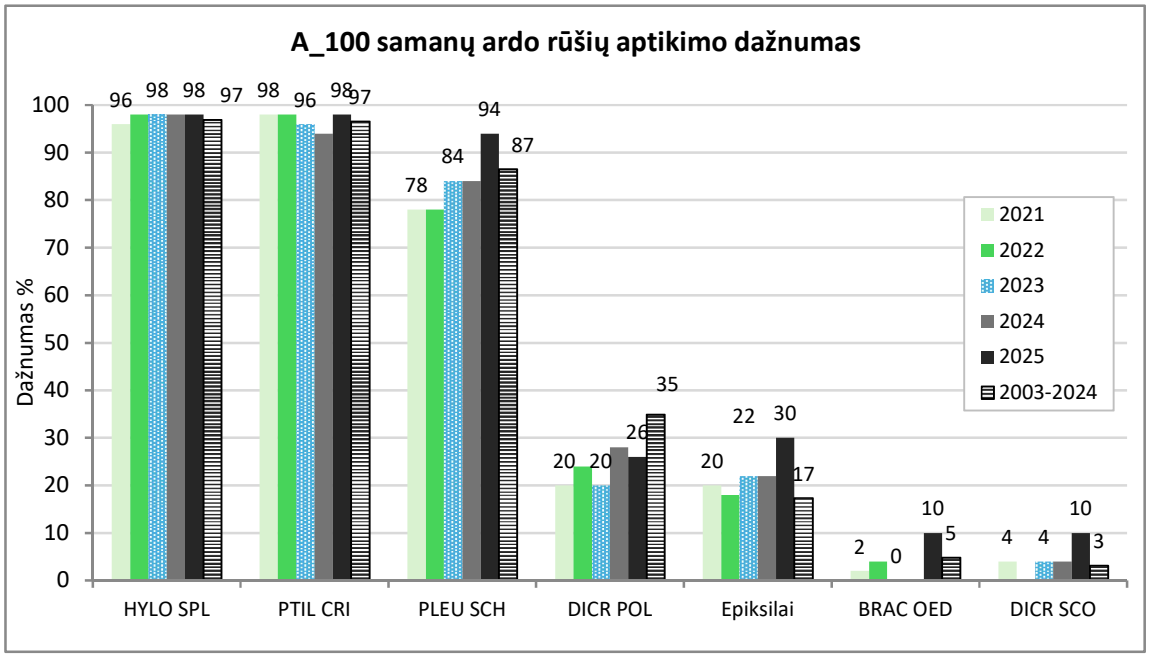
šliaužiančioji sidabriukė – *Goodyera repens,* pievinis kupolis – *Melampyrum pratense,* miškinė septynikė – *Trientalis europaea* (4.1.7 pav). Pastaraisiais metais, lyginant su visų stebėjimų vidurkiu, labai išaugęs (iki 36 %) pievinio kupolio aptikimo dažnumas ir dabar jis didžiausias per visą stebėjimų laikotarpį. Pievinio kupolio dažnumo parametrai nežymiai svyruoja nuolatos, kadangi tai vienmetės žolės – tarpiniai parazitai su menkomis šaknimis. Jos plinta sėklomis ir auga prisisiurbusios prie medžių ar krūmų šaknų. Dėl tokios gyvenimo strategijos jų dažnumas palyginus mažiau nei kitų augalų priklauso nuo nepalankių sąlygų, labiau nuo tarprūšinės konkurencijos, sėklų subrandinimo ir pasisėjimo sėkmingumo praėjusiais metais. Labiausiai sumažėjęs miškinio lendrūno, bruknės ir šliaužiančiosios sidabriukės dažnumas. Miškinio lendrūno dažnumo parametro svyravimus galbūt sąlygoja gyvenimo strategija. Miškinis lendrūnas sudaro kerus ir plinta šakniastiebiais. Seni dideli kerai aptinkami pastoviai, kasmet tose pačiose vietose, o dažnumo svyravimus duoda neišsilaikantys iš šakniastiebių išaugę jauni augalai. Palankesniais metais išauga daugiau jaunų augalų, kurie, esant blogesnėms sąlygoms, neišgyvena. Svarbus ir šviesos faktorius, didesni kerai išsilaiko tik atviresnėse miškų vietose. Tikėtina pastaraisiais metais žuvus daliai medžių, jų aptikimo dažnumas augs. Bruknės dažnumo kaip ir gausumo parametrai nuosekliai mažėja beveik nuo pat tyrimų pradžios (2003 m). Tikėtina, jog stebimą pokytį sąlygoja mėlynių įsivyravimas, besiformuojantis eglių pomiškis. Norint išsiaiškinti tikrąsias kaitos priežastis būtini išsamesni tyrimai. 2025 metais ženkliai augo plaukuotojo kiškiagrikio aptikimo dažnumas bei gausa – tai galėjo lemti naujų aikštelių formavimasis medžių žuvimo vietose.

Samanų ir kerpių arde Aukštaitija-100 poligone per stebimąjį 2003–2025 metų laikotarpį dažniausios kaip ir gausiausios išliko tos pačios 4 rūšys: purioji dvyndantė (*Dicranum polysetum),* atžalinė gūžtvė *(Hylocomium splendens),* paprastoji šilsamanė (*Pleurozium schreberi),* šilinė plunksnė *(Ptilium crista-castrensis)* (4.1.8 pav., 4.2 priedas). Gūžtvė ir plunksnė nuolatos aptinkamos beveik visuose laukeliuose. Labiausiai pakito šilsamanės aptikimo dažnumas, jis augo visą pastarąjį laikotarpį ir 2025 metais buvo registruos 94% laukelių. Paskutinį sykį tokia aukšta vertė registruota tik 2009 metais. Tai, kartu su rūšies gausumo pokyčiais, indikuoja ženklų rūšies būklės gerėjimą poligone. Galbūt šilsamanė geriau prisitaiko, atsikuria po trikdymų, o esant stabilioms sąlygoms ilgainiui yra išstumiama gūžtvės? Puriosios dvyndantės dažnumas išlieka ženkliai mažesnis už stebėjimų vidurkį. Įdomu kad jos gausumas buvo pakilęs 2019-2022 metais, ir sumažėjo 2024-2025 m., tuo tarpu dažnumas – priešingai, 2020-2023 metais buvo žemas, ir 2024-2025 m. padidėjo. Tai rodo, jog nepaisant dalies populiacijų išnykimo dalyje laukelių, kitose vietose populiacijos

gali sėkmingai plėstis. Tai indikuoja, kad populiacijų būklę gali reikšmingai lemti lokalios vietos sąlygos, tarprūšinė konkurencija, o ne didesnio lygmens pokyčiai.

Vidutiniškai dažnų rūšių: 2025 metais labai ženkliai išaugo tikrosios trumpės ir šakotosios dvyndantės, taip pat epiksilinių rūšių kartu paėmus aptikimo dažnumas. Trumpė registruota po dviejų metų pertraukos, ir toks platus paplitimas poligone stebėtas tik 2005 metais. Matyt visos šios rūšys susijusios su pažaidomis, nuokritomis, ir sąlygos jų plitimui dalyje laukelių buvo labai palankios.

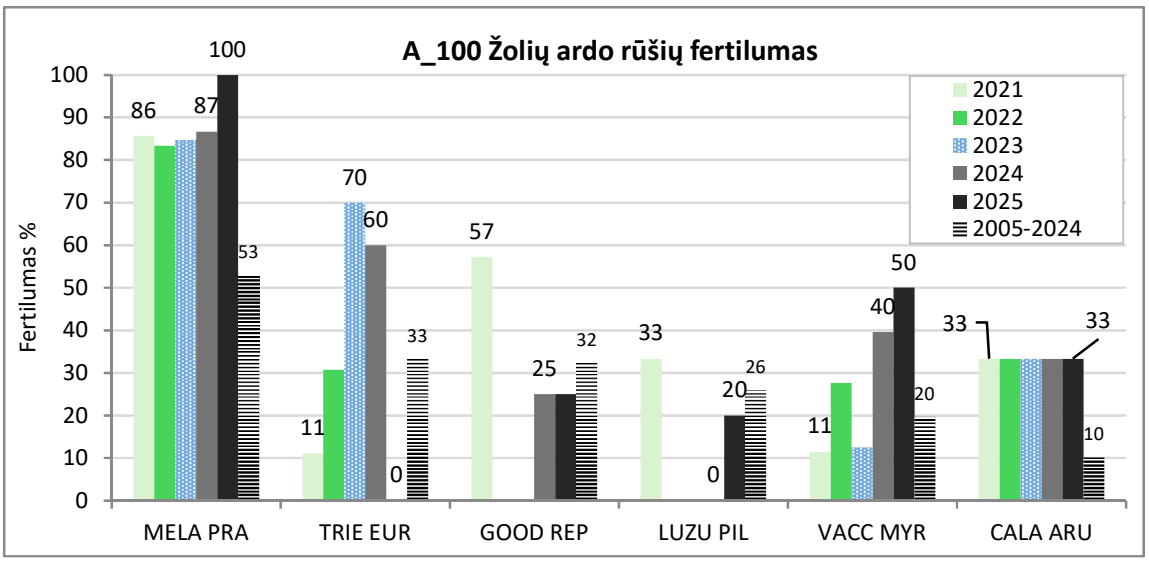
Daugelis vidutiniškai gausių rūšių yra susijusios su negyva mediena (4.12 priedas), ir jų paplitimą iš esmės nulemia negyvos medienos gausa ir irimo stadija – jos įprastai poligone įsikuria ant negyvos medienos, bet vadovaujantis metodika neregistruojamos, kaip epiksilinės rūšys, tačiau medienai yrant ir smengant į žemę, gali laikinai tarpti žemės paviršiuje kaip epigėjinės, kol dominuojančios epigėjinės rūšys jas galiausiai visiškai išstumia. Tai patvirtina, 2021-2025 metais atskirai registruotų epiksilinių rūšių gausa, kuri čia detaliau nenagrinėjama.



4.1.8 pav. *Aukštaitija_100 poligono dažniausių samanų ir kerpių ardo rūšių aptikimo dažnumo kaita.*

4.1.3 Fertilumas

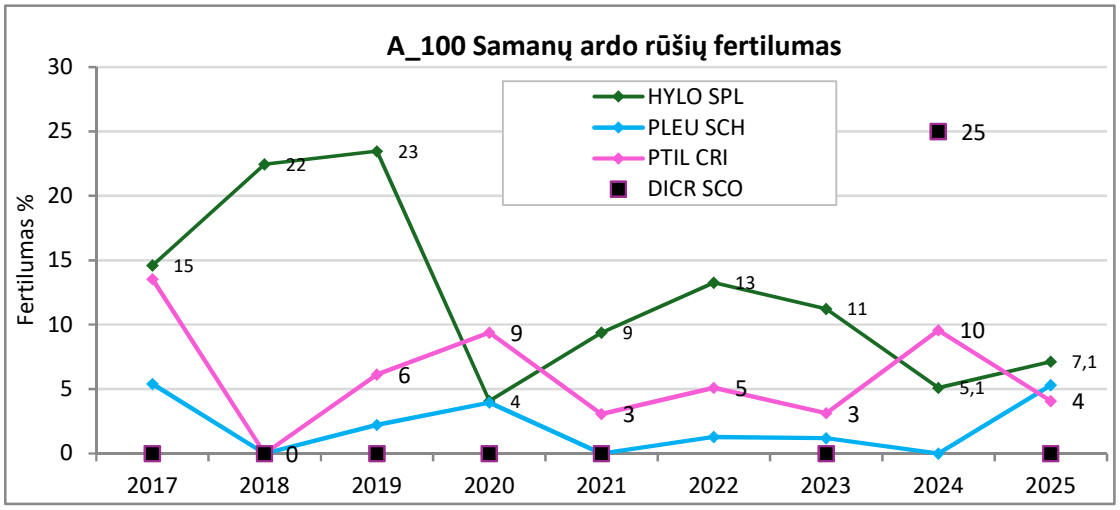
Trečias stebimas parametras – krūmokšnių, žolių ir samanų fertilumas (vaisingumas). Aukštaitija-100 poligono intensyvaus stebėjimo laukeliuose aptinkama mažai fertilių rūšių. Induočių augalų šioje miško bendrijoje gausumas mažas, todėl ir žydinčių bei derančių augalų mažai. Itin sunku objektyviai įvertinti fertilumą rūšių, kurių aptikimo dažnumas mažas, nes aptikus vienintelį individą, jeigu jis žydi, gaunamas 100% fertilumas.



4.1.9 pav. *Dažniausių Aukštaitija_100 poligono induočių augalų fertilumo kaita.*

Pastaraisiais (2021 - 2025) metais itin dideliu fertilumu pasižymėjo pievinis kupolis (83-100 %) (4.1.9 pav). Kupoliui, esant vienmečiui augalui, būtina kasmet subrandinti sėklas. Tik labai užstelbti individai nesukrauna žiedų. Tad augant jo gausai, natūralu, kad didelis ir fertilumas. Taip pat registruotas padidėjęs miškinio lendrūno ir miškinės septynikės fertilumas, lyginant su ankstesniais stebėjimais. Fertilus miškinis lendrūnas registruojamas 7 metus iš eilės, nepaisant santykinai žemo augalo projekcinio padengimo, bei dažnumo. Septinikių kaip ir plaukuotojo kiškiagrikio fertilumas poligone nepastovus, dėl mažo individų skaičiaus tiriamuosiuose laukeliuose. Priešingai mėlynės fertilumas, kaip ir projekcinis padengimas bei aptikimo dažnumas – išaugę. Paskutinį sykį toks aukštas mėlynių fertilumas kaip 2025 metais buvo tik 2015 metais. Tai, kartu su išaugusiu gausumu ir aptikimo dažnumu, indikuoja labai gerą ir stabilią krūmokšnio būklę. Šliaužiančiosios sidabriukės fertilumas dėl mažo individų skaičiaus taip pat nėra stabilus, bet paskutinius tris metus yra sumažėjęs. Tai kartu su sumažėjusiu projekciniu padengimu ir aptikimo dažnumu poligone – indikuoja suprastėjusią rūšies būklę.

Samanų fertilumas visada būna gana mažas, nes jos sporifikuoja ne kiekvienais metais dėl savo gyvenimo strategijos. Dalies samanų ir ypač kerpsamanių fertilumą, dėl generatyvinių organų smulkumo tiksliai įvertinti sunku. Visų rūšių fertilūs individai registruojami ne kasmet (4.1.10 pav.). Pastaruoju laikotarpiu aptikti 4 rūšių sporifikuojantys atstovai: atžalinė gūžtvė (5-13 %), šilinė plunksnė (3-10 %), paprastoji šilsamanė (0-5 %) ir šakotoji dvyndantė (0-25 %). Lyginant su visų stebėjimų vidurkiu, dominuojančios samanos - atžalinės gūžtvės - fertilumas yra neženkliai sumažėjęs, tuo tarpu šilsamanės, ypač 2025 metais, fertilumas išaugęs (4.1.10 pav). Sporifikuojanti šakotoji dvyndantė, kaip epigėjinė samana, poligone sporifikuojanti 2024 metais užfiksuota pirmą ir kol kas vienintelį sykį.



4.1.10 pav. *Dažniausių Aukštaitija_100 poligono samanų fertilumo kaita.*

Apibendrinant, augalijos būklė Aukštaitija_100 poligone 2021–2025 m. laikotarpiu buvo gana nestabili, nustatyti ženklūs augalijos struktūros ir rūšinės sudėties pokyčiai, kurie išsiskiria viso 1993–2025 m. stebėjimų laikotarpio kontekste. Nustatyti pokyčiai daugiausia sietini su dalies eglių ir beržų žūtimi, medyno retėjimu, pakitusiu apšvietimo režimu bei padidėjusiu nuokritų, maisto medžiagų kiekiu. Pastaruoju laikotarpiu ženkliai padidėjo žolių ir krūmokšnių ardo projekcinis padengimas. 2024–2025 m. jis pasiekė didžiausias reikšmes per visą stebėjimų laikotarpį – iki 25 %, kai ilgametis vidurkis siekia 13,7 %. Ryškiausiai pokyčius atspindėjo pagrindinės dominuojančios rūšies – mėlynės gausumo didėjimas. Taip pat ženkliai augo žolių ir krūmokšnių ardo rūšinė įvairovė. 2024–2025 m. nustatytas didžiausias rūšių skaičius per visą stebėjimų istoriją. Dalis naujai aptiktų rūšių yra šviesamėgės pionierinės rūšys, įsikūrusios medžių žuvimo vietose, todėl jų pagausėjimas indikuoja vykstančius sukcesinius pokyčius ir didėjančią mikrobuveinių įvairovę. Taip pat po ilgesnės pertraukos vėl registruoti pušų ir eglių daigai. Priešingai bruknės bei šliaužiančiosios sidabriukės gausumas ir dažnumas išliko mažesni už ilgamečius vidurkius. Samanų ir kerpių

arde 2022–2024 m. stebėtas laikinas projekcinio padengimo sumažėjimas iki ilgamečio vidurkio, tikėtina susijęs su išaugusiu nuokritų kiekiu bei žolinės augalijos konkurencija. Tačiau 2025 m. samanų ardo projekcinis padengimas vėl reikšmingai padidėjo. Dominuojanti rūšis – atžalinė gūžtvė – visą pastarąjį laikotarpį išliko gausesnė už ilgametį vidurkį. 2021–2025 m. laikotarpiu registruota ir itin didelė epiksilinių samanų bei kerpių įvairovė, susijusi su didėjančiu negyvos medienos kiekiu poligone. Tai rodo augančią negyvos medienos svarbą ekosistemos biologinei įvairovei ir poreikį šias rūšis detaliau vertinti ateities tyrimuose. Apibendrinant galima teigti, kad pastaraisiais metais Aukštaitija_100 poligone vyko ženklūs augalijos struktūros pokyčiai, susiję su medyno retėjimu ir sąlygų kaita, kas bendrai paėmus žemesnius augalijos ardų gausumą ir bioįvairovę paveikė teigiamai, bet to pasėkoje ateityje gali nukentėti labiau pokyčiams jautrios specializuotos rūšys.

4.2 Aukštaitija _102

Antrasis augalijos intensyvių tyrimų stacionaras įkurtas pelkinėje gana derlingoje (Pcl) augavietėje su durpės sluoksniu. Stacionare medžių arde dominuoja brandus – perbrendęs mišrus medynas su egle (*Picea abies*), karpotuoju (*Betula pendula*) ir plaukuotuoju (*Betula pubescens*) beržais, paprastąja pušimi (*Pinus sylvestris*), negausia juodalksnio (*Alnus glutinosa*) priemaiša. Antrajame medžių arde ir pomiškyje duominuoja eglės, vietomis suformuodamos ištisinį tankų monokultūrinį sąžalyną. Vietomis įsitvirtinę pavieniai paprastojo klevo, uosio, karpotojo ir plaukuotojo beržų savaiminukai. Krūmų arde tarp gausių eglaičių yra paprastųjų šaltekšnių, lazdynų, šermukšnių, ievų. Žolių ir krūmokšnių ardas šioje miško bendrijoje išsivystęs netolygiai. Šiaurinėje poligono dalyje, ypač drėgnose aikštelėse, žolynas labai vešlus, o pietinėje – skurdus.

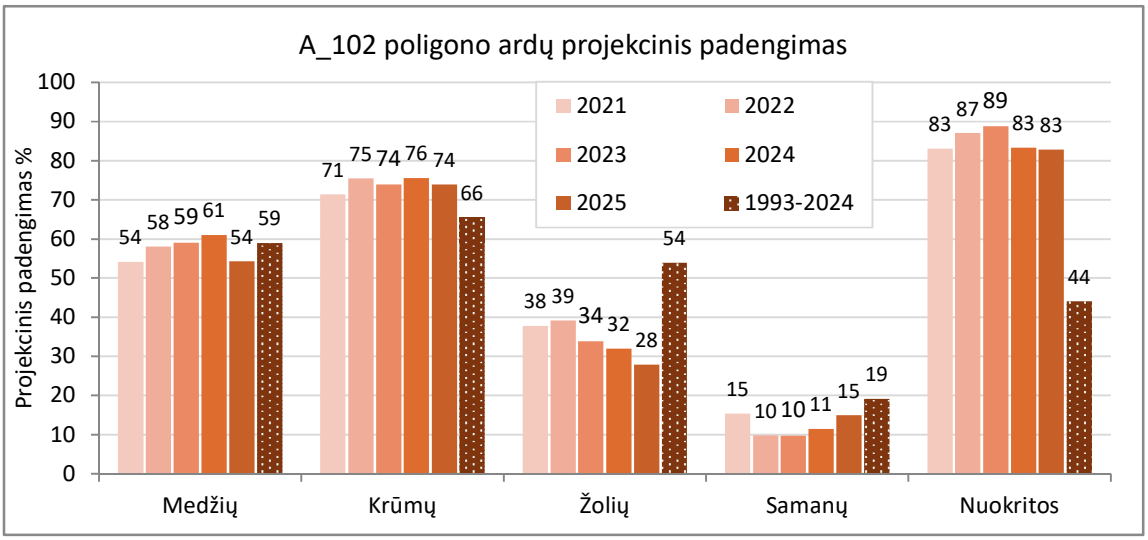
4.0.3 pav. *Dalinai užsemtas tiriamasis laukelis Aukštaitija_102 tyrimų poligone.*

Per pastaruosius 20 metų, žuvus nemažai daliai brandžių, I ardo medžių, susiformavo tankus eglių pomiškis stipriai stelbiantis žolinę augmeniją. Gruntinio vandens lygis stacionaro teritorijoje nenusileidžia žemiau 50 cm. 2024-2025 metais, pirmą sykį nuo 1993 metų registruotas gruntinio ir Versminio upelio paviršinio vandens kilimas, dėl to susidarė ilgalaikės šlapynės dirvos paviršiuje. Keletas tiriamųjų laukelių dalį vegetacijos sezono buvo visiškai ar dalinai užsemti (4.0.3 pav).

4.0.7 pav. *Medžių laja Aukštaitija_102 tyrimų poligone – pagrindinis žemutinių augalijos ardų formuotojas.*

4.2.1 Projekcinis padengimas

Vertinant 2021-2025 metų atskirų ardų projekcinio padengimo duomenis matyti (4.2.1 pav.), kad medžių ardo padengimas išliko labai stabilus (metodo paklaidos ribose) ir artimas visų stebėjimų vidurkiui. Detaliau apie medžių ardo pokyčius žr. II skyrius - Miško ekosistemų sumedėjusios augmenijos monitoringas. Krūmų ardas šiame stacionare išliko stabiliai išskirtinai gausus, ir gausiausias iš visų augalijos ardų. Tai pasekmė tankaus eglių pomiškio susiformavimo po I ardo medžių žūties. Bendras žolių ardo projekcinis padengimas yra ženkliai (26%) žemesnis už visų stebėjimų vidurkį, ir nuosekliai mažėjo. Trejus paskutinius metus (2023-2025) iš eilės registruotos rekordiškai žemos žolių ardo vertės (4.2.1 pav). Tai išvešėjusio krūmų ardo, tankaus eglių pomiškio pasekmė. Po medžių žūties stebėtas laikinas žolinės augmenijos suvešėjimas, tačiau netrukus po išaugusiu tankiu jaunų eglių pomiškiu, dėl šviesos ir kritulių stygiaus, sunyksta beveik visa žolinė augmenija (4.0.4 pav).



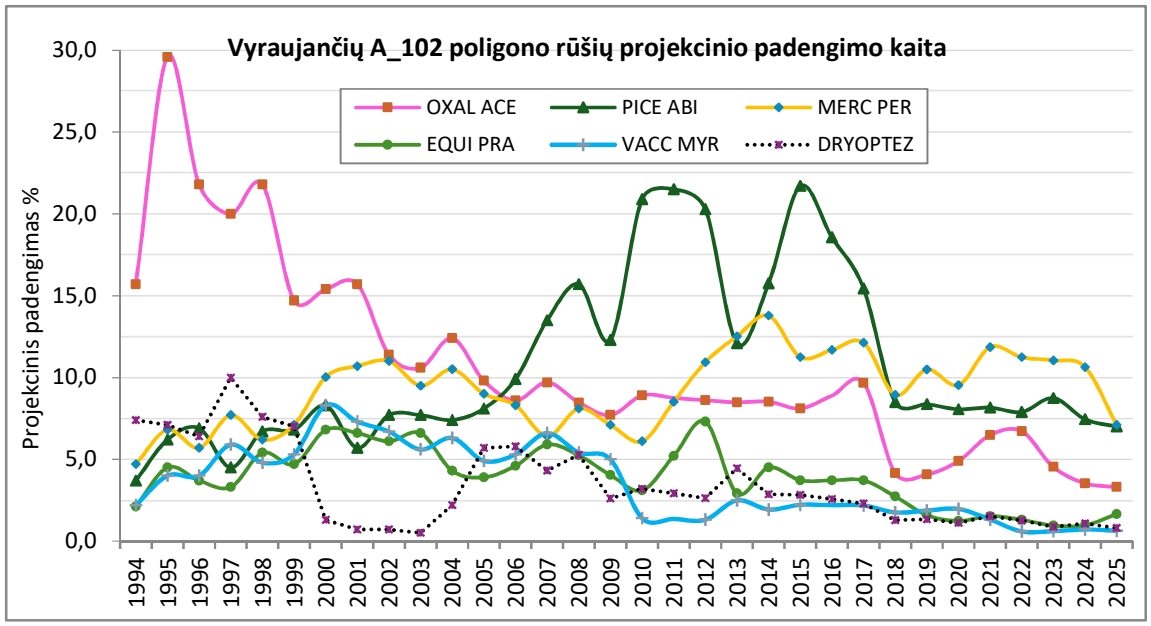
4.2.1 pav. *Aukštaitija_102 poligono atskirų augalijos ardų ir nuokritų vidutinio projekcinio padengimo kaita 2021–2025 metais.*

Pastaruoju metu poligono struktūra netolygi. Pietinėje dalyje jau prasidėjęs jaunų eglių savaiminis retinimasis dėl vidurūšinės konkurencijos. Žolinė augalija čia labai skurdi, bet tikėtina, pradės gausėti. Šiaurinėje dalyje išlikę daugiau brandžių medžių, o esančios mažos aikštelės užauginėja daug lėčiau dėl veršlios žolinės augmenijos ir didelės dirvožemio drėgmės. Poligono viduryje vyrauja, jaunų 0,5 – 1,5 m. aukščio eglių sąžalynas, po jomis žolinė augmenija skurdi. Šiuo metu, viena vertus, toliau sparčiai formuojasi tankus eglių pomiškis, išstumdamas didžiąją dalį žolinių augalų, antra vertus, seni brandūs medžiai po truputi vis apmiršta, taip nuolatos sudarydami naujų atvirų aikštelių.

Aukštaitija_102 (A_102) poligone žolių ir krūmokšnių arde 1994–2025 metais buvo stebėtos 69 induočių augalų rūšys: paprastasis klevas – *Acer platanoides,* paprastoji garšva –

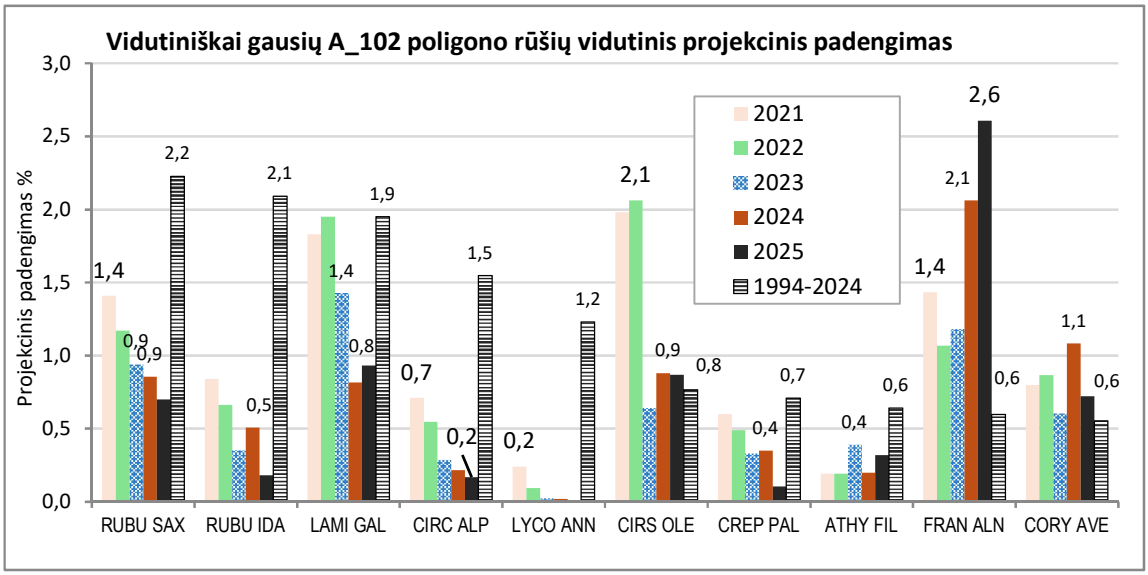
Aegopodium podagraria, baltoji smilga – *Agrostis stolonifera,* juodalksnis – *Alnus glutinosus,* paprastasis blužniapapartis – *Athyrium filix-femina,* plaukuotasis beržas – *Betula pubescens,* karčioji kartenė – *Cardamine amara,* pirštuotoji viksva – *Carex digitata,* kupstinė viksva – *Carex cespitosa,* svidrinė viksva – *Carex loliacea,* retavarpė viksva – *Carex remota,* pražangialapė blužnutė – *Chrysosplenium alternifolium,* mažoji dantenė – *Circaea alpina,* gelsvalapė usnis – *Cirsium oleraceum,* trapioji sprakšė – *Cystopteris fragilis,* paprastasis lazdynas – *Corylus avellana,* pelkinė kreisvė – *Crepis paludosa,* paprastasis žalčialunkis – *Daphne mezereum,* skėstalapis papartis – *Dryopteris dilatata,* smailialapis papartis – *Dryopteris carthusiana,* nelygialapis papartis – *Dryopteris expansa,* šuninis elimas – *Elymus caninus,* karpotasis ožekšnis *Euonymus verrucosus,* ožkabarzdis asiūklis – *Equisetum pratense,* miškinis asiūklis – *Equisetum sylvaticum,* paprastoji žemuogė – *Fragaria vesca,* paprastasis šaltekšnis – *Frangula alnus,* paprastasis uosis – *Fraxinus excelsior,* aklė – *Gleopsis sp.,* raudonstiebis snaputis – *Geranium robertianum,* raudonoji žiognagė – *Geum rivale,* geltonoji žiognagė – *Geum urbanum*, trikampis tikrapapartis – *Gymnocarpium dryopteris,* šliaužiančioji tramažolė – *Glechoma hederacea,* statusis atgiris – *Huperzia selago,* paprastoji sprigė – *Impatiens noli-tangere,* geltonžiedis šalmutis – *Lamiastrum galeobdolon,* paprastasis sausmedis – *Lonicera xylosteum*, pataisas varinčius – *Lycopodium annotinum,* paprastojis šilingė – *Lysimachia vulgaris,* plaukuotasis kiškiogrikis – *Luzula pilosa,* dvilapė medutė – *Maianthemum bifolium,* pievinis kupolis – *Melampyrum pratense,* nusvirusioji striepsnė – *Melica nutans,* daugiametis laiškenis – *Mercurialis perrennis,* miškinė sorokė - *Milium effusum,* miškinė zuiksalotė – *Mycelis muralis,* rusvuolė lizduolė – *Neottia nidus-avis,* vienašalė užgina – *Orthilia secunda,* paprastasis kiškiakopūstis – *Oxalis acetosella,* paprastoji ieva – *Padus avium,* keturlapė vilkauogė – *Paris quadrifolia,* paprastoji eglė – *Picea abies,* paprastoji pušis – *Pinus sylvestris,* pelkinė miglė – *Poa palustris,* drebulė – *Populus tremula,* paprastoji avietė – *Rubus idaeus,* paprastoji katuogė – *Rubus saxatilis,* karklavijas – *Solanum dulcamara,* paprastasis šermukšnis – *Sorbus aucuparia,* miškinė žliūgė – *Stellaria nemorum,* miškinė septynikė – *Trientalis europaea,* ankstyvasis šalpusnis – *Tussilago farfara,* didžioji dilgėlė – *Urtica dioica,* mėlynė – *Vaccinium myrtillus,* bruknė – *Vaccinium vitis-idaea,* pelkinė našlaitė – *Viola epipsila,* puošnioji našlaitė – *Viola mirabilis* durpyninė našlaitė – *Viola palustris* ir Rivino našlaitė – *Viola riviniana* (4.3 priedas). Tačiau visą stebėjimų laikotarpį nepranykdamos augo mažiau nei trečdalis jų – 18 rūšių. 2021-2025 metais tiriamuosiuose laukeliuose fiksuotos 46 induočių augalų rūšys.

Pastaruoju laikotarpiu praktiškai visų vyraujančių ardo rūšių (paprastojo kiškiakopūsčio, mėlynės, ožkabarzdžio asiūklio, paprastojo šermukšnio, dvilapės medutės ir smailialapio paparčio grupės (DRYOPTEZ = *D, carthusiana* + *D. expansa* + *D. dilatata)* vidutinis projekcinis padengimas stabiliai mažėjo arba išliko sumažėjęs ir praktiškai žemiausias per visą stebėjimų istoriją (4.2.2 pav). Kiek išsiskiria iš žolių gausiausiai aptinkamas daugiametis laiškenis. Jis auga tik drėgnesnėje šiaurinėje poligono dalyje, kur eglių trakas – pomiškis dar retas. Jų projekcinis padengimas 2021-2024 metais buvo artimas visų stebėjimų vidurkiui (9,3 %), bet 2025 metais, matyt dėl perteklinės drėgmės, irgi ženkliai mažėjo iki 7,1 %. Vienintelio ožkabarzdžio asiūklio 2025 metais gausumas nežymiai išaugo, tačiau išlieka beveik tris kartus žemesnis už stebėjimų vidurkį. Eglių padengimas žolių arde taip pat yra ženkliai sumažėjęs lyginant su 2007 – 2018 metais. Tačiau svarbu įvertinti, kad eglių projekcinio padengimo sumažėjimą žolių ardę nulėmė tai, jog didelė dalis jaunų eglaičių viršijo 0,5 m aukštį ir peraugo į krūmų ardą. Tad, nepaisant jų projekcinio padengimo žolių arde mažėjimo, eglės kaip edafinės augavietėse rūšies poveikis didėja. Apšvietimo, medžiagų prieinamumo sąlygos prastėja. Spyglių pavidalo nuokritos keičia dirvožemio cheminę sudėtį. Dėl to žolių ardas skursta. Įprastai vešlius drėgnesnių stacionaro vietų laukelius, 2024-2025 metais neigiamai paveikė ir neįprastai pakilęs vandens lygis.



4.2.2 pav. *Aukštaitija_102 poligono vyraujančių žolių ir krūmokšnių ardo rūšių gausumo kaita 1994–2025 metais.*

Lyginant mažesnį projekcinį padengimą užimančių, tačiau nuolatos aptinkamų rūšių kaitą su ilgamečiu vidurkiu, matyti (4.2.3 pav.), jog išliko stipriai sumažėjęs arba ir toliau mažėjo: paprastosios katuogės, paprastosios avietės, geltonžiedžio šalmučio, mažosios dantenės, pataiso varinčiaus, pelkinės kreisvės ir paprastojo blužniapaparčio gausumas. Gelsvalapės usnies, augančios tik labai mažoje poligono dalyje, projekcinis padengimas 2017-2022 dėka išvartų buvo didžiausias nuo 1993 metų, tačiau 2024-2025 nukrito iki stebėjimų vidurkio. Savo būkle žolių arde išsiskiria krūmai. Lazdynų sėjinukų ar jaunų ūglių yra sąlyginai daugiau nei įprastai ar bent arti ilgamečio vidurkio. Šaltekšniai vieninteliai išsiskiria itin išaugusiu gausumu. Jų projekcinis padengimas ilgametį vidurkį viršija daugiau nei 4 kartus. Tai gali indikuoti, kad krūmų ardas bent kurį laiką toliau išliks dominuojantis, o žolinė tyrimų stacionaro danga liks užstelbta it toliau skurs. Antra vertus, lapuočių krūmų priemaiša, ypač šlapesnėse vietose, turėtų ilgainiui praturtinti monodominantinį eglių pomiškį.



4.2.3 pav. *Vidutiniškai gausių Aukštaitija_102 poligono žolių ir krūmokšnių ardo rūšių projekcinio padengimo kaita 1994-2025 m.*

Dryopteris carthusiana complex grupės paparčiai remiantis Ekrt L. et al. (2010), apima *D. carthusiana, D. expansa, D. dilatata* rūšis ir jų tarpusavio hibridus ir dėl jaunų individų didelio morfologinio panašumo ir dažnos hibridizacijos atskirai nevertinti.

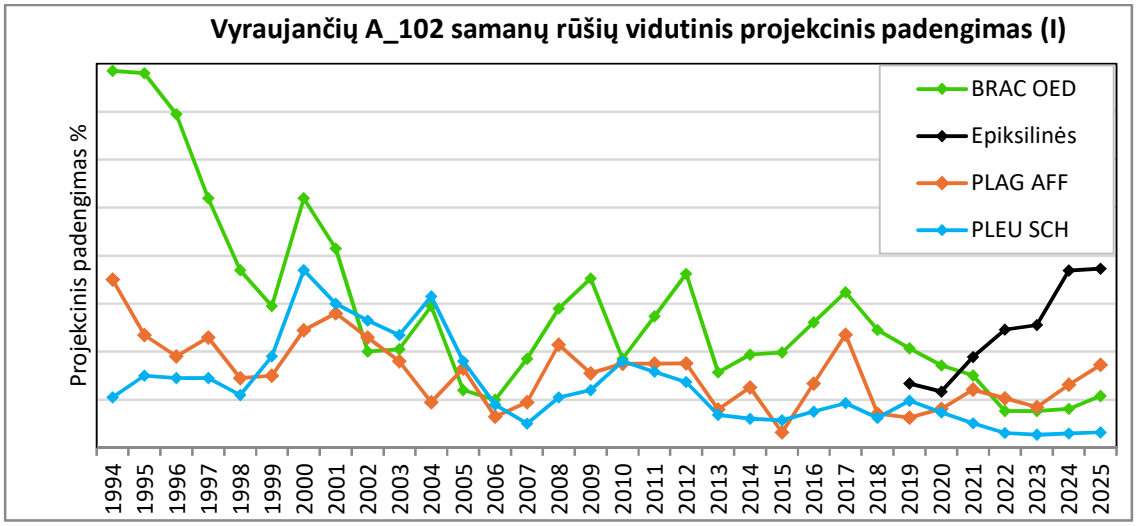
Aukštaitija-102 intensyvaus stebėjimo poligone stebimoje miško bendrijoje samanų ardas sąlyginai skurdus. Per stebimąjį 1994–2024 metų laikotarpį epigėjinės samanos vidutiniškai dengė 19 % intensyvaus stebėjimo laukelių ploto. Pastaruoju laikotarpiu (2021-2025 m.) samanų gausa išliko ženkliai sumažėjusi. 2022-2023 metais pasiekė žemiausią vertę (10 %) ir tik 2025 ženkliau išaugo iki 15 % (4.2.1 pav). Bendrą samanų ardo būklę lemia kritulių kiekis, bei apšvietimo sąlygos. Augavietės pomiškyje įsivyraujant eglėms, samanų ardui tenka mažiau šviesos, kritulių, maisto medžiagų. Nuokritos spyglių pavidalu keičia paklotės cheminius parametrus. Tokios aplinkybės, tikėtina, lems panašius šio ardo pokyčius ir ateityje. Svarbu, kad šiuo metu papildomai net 7.5% užima ant negyvos medienos ir nuokritų augančios epiksilinės samanos ir kerpės ir jų dalis nuosekliai auga (4.13 priedas).

Per visą tyrimų laikotarpį registruotos 53 samanų kerpių ardo rūšys: Paprastoji plaukalapė (Blepharotoma trichophyllum), Mildės trumpė (Brachythecium mildeanum), Lenktoji trumpė (Brachythecium reflexum), upelinė trumpė (Brachythecium rivulare), žalioji trumpė (Brachythecium rutabulum), štarkės trumpė (Brachythecium starkei), tikroji trumpė (Brachythecium oedipodium), gelsvažalė trumpė (Brachythecium salebrosum), siauralapė trumpė (Brachythecium velutinum), Šliaužiančioji rumbainė (Callicladium haldanianum), cefalozija (Cephalozia sp.), unksminė ylenė (Cirriphyllum piliferum), šiurė (Cladonia sp.), palminė junetė (Climacium dendroides), rudeninė kryžmelė (Crossogyna autumnalis), rusvoji dvyndantė (Dicranum fuscescens), kalninė dvyndantė (Dicranum montanum), purioji dvyndantė (Dicranum polysetum), šakotoji dvyndantė (Dicranum scoparium), švelnioji dvyndantėlė (Dicranella subulata), Bukoji gražiasnapė (Eurhynchium angustirete), dantytoji kemsenė (Herzogiella seligeri), atžalinė gūžtvė (Hylocomium splendens), kiparisinė patįsa (Hypnum cupressiforme), blyškioji patįsa (Hypnum pallescens), šliaužiančioji lepidozija (Lepidozia reptans) įvairialapė gludutė (Lophocolea heterophylla), paprastoji maršantija (Marchantia polymorpha), riestalapė raguotė (Nowellia curvifolia), papartinė tįsena (Plagiochila asplenioides), gulsčioji lapūnė (Plagiomnium affine), smailialapė lapūnė (Plagiomnium cuspidatum), pelkinė lapūnė (Plagiomnium elipticum), vingialapė lapūnė (Plagiomnium undulatum), kreivalapė pažulnutė (Plagiothecium curvifolium), žalsvoji pažulnutė (Plagiothecium laetum), dantytoji pažulnutė (Plagiothecium denticulatum), paprastoji šilsamanė (Pleurozium schreberi), liekninis gegužlinis (Polytrichum formosum), grakštusis gegužlinis (Polytrichum longisetum), vislioji pilezija (Pylaisia polyantha), puošnioji blakstienė (Ptilidium pulcherrimum), šilinė plunksnė (Ptilium crista-castrensis), plokščioji miltuotė (Radula complanata), taškuotoji gaurenė (Rhizomnium punctatum), tribriaunė kerėža (Rhytidiadelphus triquetrus), skrotelinė rožiasamanė (Rhodobryum roseum), plačiaskiautė rikardija (Riccardia latifrons), riestalapė sanionia (Sanionia uncinata),

Girgensono kiminas (Sphagnum girgensohnii), vaiskioji keturdantė (Tetraphis pellucida), riestalapė tujinutė (Thuidium delicatulum), daugiašakė tujinutė (Thuidium tamariscinum) (4.4 priedas). Kaip induočių augalų, taip ir samanų, tik mažuma rūšių (9 rūšys) aptiktos visą stebėjimų laikotarpį. 2022-2025 metais kaip epigėjinės registruotos 26 samanų - kerpsamanių rūšys (4.4 priedas). Ant negyvos medienos ir nuokritų registruotos net 43 epiksilinės samanų, kerpsamanių, kerpių rūšys (4.13 priedas), tačiau remiantis tyrimų metodika į detalesnę analizę jos kol kas neįtrauktos. Augant negyvos medienos kiekiams, jai pamažu smengant po žeme, dalis minėtų rūšių kurį laiką tarpsta kaip epigėjinės, tad ateityje, norint geriau suprasti arde vykstančius pokyčius, siektina visas rūšis įtrauktį į analizę. Svarbu įvertinti ir tai, kad dėl dalies kerpsamanių smulkumo ir mikroskopavimo tiksliam identifikavimui būtinybės, vertinti jų įvairovės gausumo ir dažnumo kaitą reikėtų atsargiai.

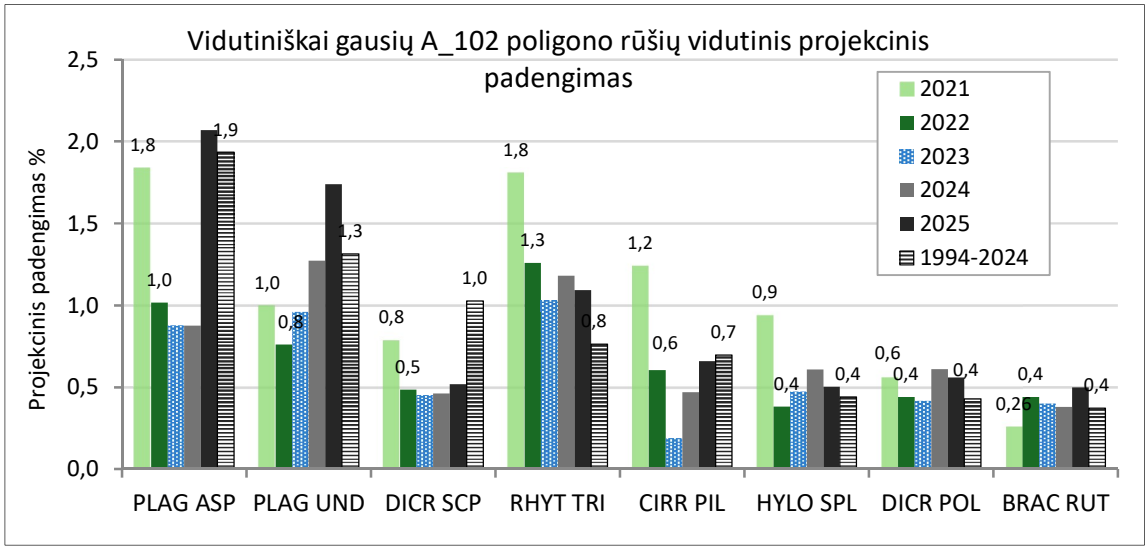
4.0.4 pav. *Samanos išlikę tik ant negyvos medienos Aukštaitija_102 tyrimų poligone.*

Vyraujančių rūšių (gausumas >2 %) yra nedaug: tikroji trumpė, gulsčioji lapūnė, paprastoji šilsamanė (4.2.4 pav). Trumpės ir šilsamanės projekcinis padengimas išliko rekordiškai žemas. Tai sąlygoja tankus eglių pomiškis. Gulsčiosios lapūnės gausumas 2024-2025 metais ženkliai augo ir dabar 0,4 % viršija ilgametį vidurkį (3,1 %). Tai galėjo sąlygoti itin pakilęs gruntinio vandens lygis, didesnė drėgmė vegetacijos sezono metu. Svarbu atkreipti dėmesį, kad visų minėtų rūšių gausa ženkliai svyravo visą tyrimų laikotarpį. Ryškiausi pikai susiję su vėjovartų padarytomis pažaidomis, kritulių kiekiu. Vis tik atsidūrę po tankiu eglių pomiškiu daugelis rūšių priverstos kuriam laikui pasitraukti (4.0.4 pav). Įdomu jog ant negyvos medienos augančių, epiksilinių samanų, bendras projekcinis padengimas nuosekliai auga nuo 2021 metų, nepaisant prastos epigėjinių samanų būklės.



4.2.4 pav. *Aukštaitija-102 poligono vyraujančių samanų ir kerpių ardo rūšių gausumo kaita 1994–2025 m.*

Vertinant vidutiniškai gausių (0,4-1,9 %), tačiau nuolatos aptinkamų (4.4 priedas, 4.2.5 pav.) samanų projekcinį padengimą, kasmet stebimi gana ryškūs svyravimai, nes daugelis samanų aptinkamos negausiai ir tik dalyje tiriamųjų laukelių, tad aiškias išvadas daryti sunku.

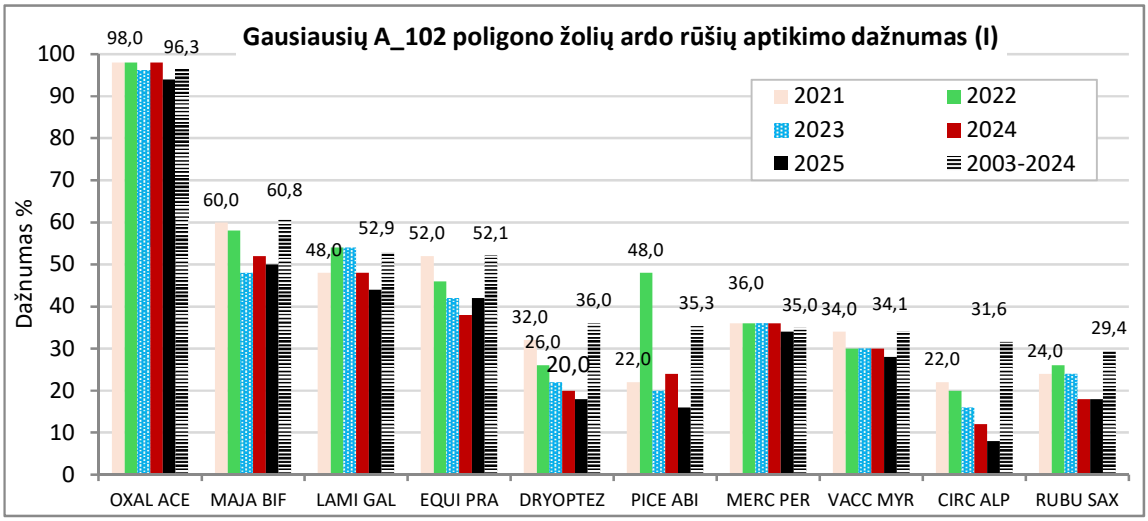


4.2.5 pav. *Vidutiniškai gausių Aukštaitija_102 poligono samanų ir kerpių ardo rūšių gausumo kaita 1994–2025 m.*

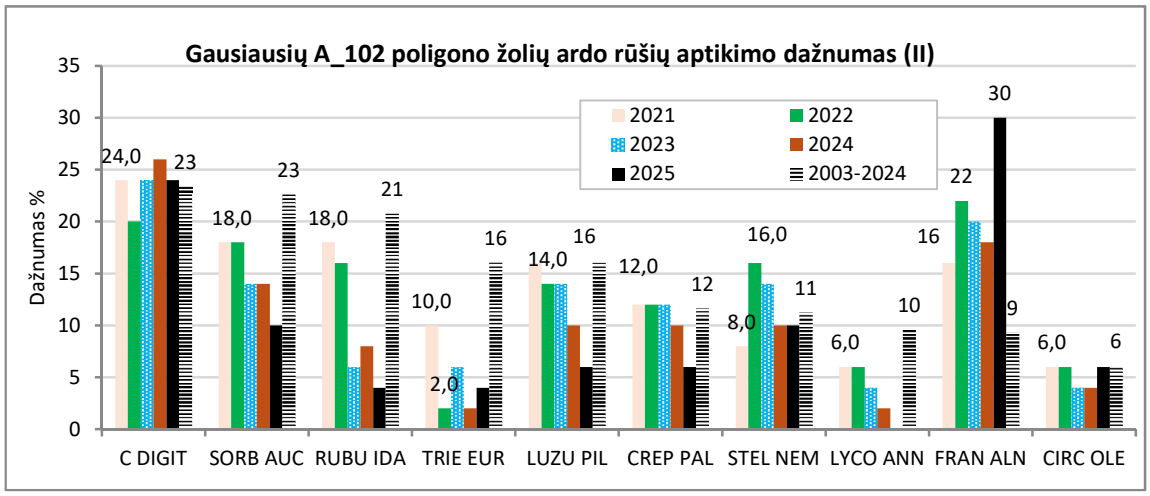
Visgi, lyginant su daugiamečiu vidurkiu (4.2.5 pav) laikosi pastoviai didelė tribriaunių kerėžų populiacija. Stabili, artima ilgamečiui vidurkiui atžalinių gūžtvių, puriųjų dvyndančių ir žaliųjų trumpių gausa. Taip pat nors ir nepastoviai, bet paskutiniais metais padidėjęs papartinės tisenos ir vingialapės lapūnės gausumas. Lyginant su ilgamečiu vidurkiu, vienintelės šakotosios dvyndantės projekcinis padengimas visą pastarąjį laikotarpį išliko stabiliai žemas.

4.2.2 Dažnumas

Aukštaitija-102 poligone intensyvaus stebėjimo laukeliuose 2003–2025 metais buvo stebimos 68 induočių augalų rūšys, 4 iš jų (paprastasis kiškiakopūstis, dvilapė medutė, ožkabarzdis asiūklis ir geltonžiedis šalmutis) kasmet aptinkamos daugiau nei pusėje tiriamųjų laukelių (4.2.6 pav). Iš vyraujančių rūšių (dažnumas >25 %) pastaraisiais (2021-2025) metais lyginant su 2003-2024 metų vidurkiu vienintelės eglės aptikimo dažnumas 2022 metais žolių arde buvo ženkliai viršijęs ilgamečius vidurkius. Kiškiakopūsčių, geltonžiedžių šalmučių, daugiamečių laiškenių ir mėlynių, nepaisant sumažėjusio projekcinio padengimo, aptikimo dažnumas laikėsi gana stabilus ir artimas ilgamečiui vidurkiui. Dvilapių medučių, ožkabarzdžių asiūklių, *Dryopteris carthusiana* grupės paparčių, eglių (išskyrus 2022 metus), mažosios dantenės ir paprastosios katuogės aptikimo dažnumas buvo žemesnis už ilgametį vidurkį ir mažėjo.

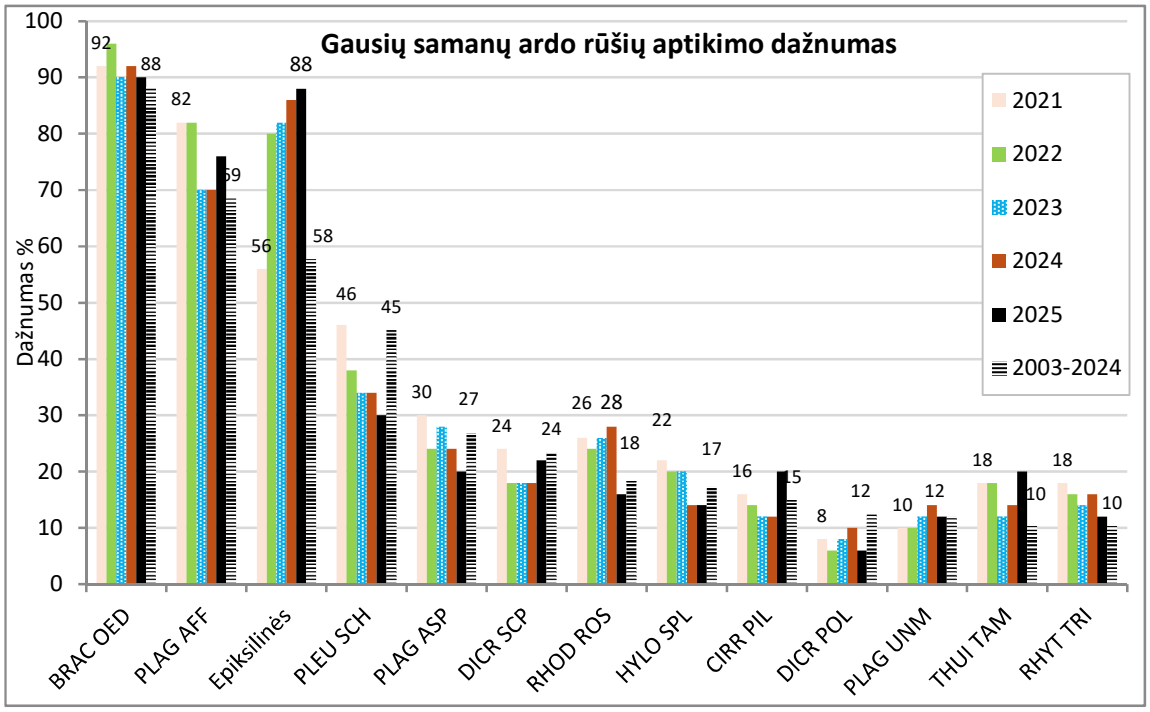


4.2.6 pav. *Aukštaitija_102 poligone vyraujančių žolių ir krūmokšnių ardo rūšių dažnumo kaita 2003–2025 m.*



4.2.7 pav. *Aukštaitija_102 poligone vidutiniškai dažnų žolių ir krūmokšnių ardo rūšių dažnumo kaita 2003–2025 m.*

Iš mažiau gausių rūšių žolių ardo rūšių (4.2.7 pav), kurių vidutinis dažnumas poligone svyruoja tarp 5-25 %, pastaraisiais metais labiausiai išaugęs išliko ir toliau didėjo šaltekšnių aptikimo dažnumas. Tai sutampa ir su rūšies projekcinio padengimo augimu poligone. Laikinai (2022-2023 m.) buvo pakilęs ir miškinės žliūgės aptikimo dažnumas. Pirštuotosios viksvos, pelkinės kreisvės ir gelsvalapės usnies aptikimo dažnumas laikėsi artimas ilgamečiui vidurkiui. Paprastųjų šermukšnių, paprastųjų aviečių, miškinių septynikių, plaukuotųjų kiškiagrikių ir pataiso varinčiaus aptikta vidutiniškai mažesniame skaičiuje tiriamųjų laukelių, tad jų aptikimo dažnumas ženkliai mažėjo. Pataisas varinčius, paprastoji sprigė, miškinė zuiksalotė, keturlapė vilkauogė ir garšva, kai kurias metais tiriamuosiuose laukeliuose visai neberegistruota. Pastarosios rūšys, ypač kurių kartu su aptikimo dažnumu mažėja ir projekcinis padengimas, jautriausiai neigiamai reaguoja į susidariusias sąlygas, ir laikinai gali visiškai pasitraukti. Samanų kerpių tik tikroji trumpė ir gulsčioji lapūnė įprastai aptinkamos daugiau nei pusėje tiriamųjų laukelių (4.2.8 pav). Abiejų jų aptikimo dažnumas 2021-2025 metų laikotarpiu buvo didesnis ar artimas ilgamečiui stebėjimų vidurkiui. Svarbu, kad trumpės aukštas dažnumas išliko, nepaisant mažėjančio projekcinio padengimo poligone. Taip pat ir iš vidutiniškai dažnų samanų ardo rūšių, aptinkamų >10 % laukelių, pastaruoju laikotarpiu registruotas padidėjęs ar artimas ilgalaikiui aptikimo dažnumas: papartinės tįsenos, skrotelinės rožiasamanės, atžalinės gūžtvės, unksminės ylenės, vingialapės lapūnės, daugiašakės tujinukės ir tribriaunės kerėžos. Ir tik paprastosios šilsamanės, šakotosios ir puriosios dvyndančių aptikta mažiau tiriamųjų laukelių nei įprasta. Tai indikuoja kad, daugelis samanų rūšių, nors ir užima mažesnius plotus, vis dar yra plačiai išplitę poligono teritorijoje.



4.2.8 pav. *Aukštaitija_102 poligone dažniausiai aptinkamų samanų ir kerpių ardo rūšių dažnumo kaita 2003–2018 m.*

Įdomu, jog tankaus eglių trako – pomiškio formavimasis, nepaisant stipraus neigiamo poveikio samanų projekciniam padengimui, daugeliu atveju, kol kas neturi ryškaus neigiamo poveikio gausiausių samanų dažnumui. Atvirkščiai, kartais stebimas net teigiamas ryšys. Vertinant bioįvairovės indeksus, būtent tolygus rūšių pasiskirstymas, dažnumas, yra svarbiau už rūšių gausumą, procentinį padengimą. Likusių rūšių dažnumas išliko panašus, arba yra pernelyg žemas, kad tokio masto tyrimai parodytų aiškias kitimo tendencijas. Taip pat stebimas dalies rūšių plitimas būtent ant nuokritų ar negyvos medienos, dėl ko jos į bendrą apskaitą nepatenka.

4.2.3 Fertilumas

Aukštaitija_102 intensyvaus stebėjimo poligonas pasižymi induočių augalų ir samanų rūšių gausa, tačiau žydi ir dera tik apie ketvirtadalis jų. 2021-2025 metais registruota 16 fertilių induočių augalų ir net 9 sporifikuojančios samanų rūšys (4.1 – 4.2 lentelės). Daugelio jų atstovai žydėjo ar sporifikavo, kai kuriais metais. Induočių augalų tarpe sąlyginai didesniu nei įprasta fertilumu išsiskyrė paprastasis blužniapapartis, mažoji dantenė, gelsvalapė usnis, raudonoji žiognagė, paprastoji sprigė ir miškinė zuiksalotė. Visos minėtos rūšys auga mažame plote, aikštelėje šiaurinėje poligono dalyje, kur nėra tankaus eglių pomiškio. Mažiau fertilių individų nei įprasta aptikta: retažiedžių viksvų, pelkinių kreisvių, geltonžiedžių šalmučių – šios rūšys kartu pasižymėjo ir sumažėjusiu gausumu poligone.

Samanų fertilumas visada būna gana mažas, jos sporifikuoja ne kiekvienais metais. Dalies samanų ir ypač kerpsamanių fertilumą, dėl generatyvinių organų smulkumo tiksliai įvertinti sunku. Tad aiškesnėms išvadoms suformuoti būtinos arba labai ilgos duomenų sekos arba detali specifinė analizė. Iš samanų ardo rūšių 2021-2025 metų laikotarpiu fertilios buvo: žalioji trumpė, purioji dvyndantė, dantytoji kemsenė, vingialapė ir gulsčioji lapūnės, žalsvoji ir dantytoji pažulnutės. Daugumas jų nėra įprastos epigėjinės samanų rūšys ir įprastai sporifikuojančios aptinkamos ant negyvos medienos nuokritų.

Apibendrinant, galima teigti, kad 2021-2025 m. laikotarpiu Aukštaitija_102 poligone dėl itin vešlaus krūmų ardo, tankaus eglių pomiškio - žolių ir samanų ardų danga išlieka itin užstelbta ir toliau skursta. Nuokritos dengia >80 % laukelių ploto. 2023–2025 m. registruotos rekordiškai žemos žolių ardo projekcinio padengimo reikšmės. Ypač sumažėjo paprastojo kiškiakopūsčio, mėlynės, dvilapės medutės, Dryopteris grupės paparčių, bei ožkabarzdžio asiūklio gausa. Dalis rūšių (pataisas varinčius, paprastoji sprigė, miškinė zuiksalotė) kai kuriais metais apskritai nebebuvo registruojamos tiriamuosiuose laukeliuose. Tai rodo didėjantį daugelio šviesai reiklesnių rūšių išstūmimą. Samanų ir kerpių ardo būklė taip pat išliko prasta. 2022–2023 m. bendras epigėjinių samanų projekcinis padengimas buvo rekordiškai žemas. 2025 metais registruotas samanų ardo plėtimasis, matyt dėl didesnio drėgmės kiekio, tačiau lyginant su ilgamečiu vidurkiu jis išlieka ženkliai sumažėjęs. Nepaisant sumažėjusio epigėjinių samanų padengimo, poligone stebėtas didelis epiksilinių samanų gausumas ir rūšinė įvairovė. 2021–2025 m. jų projekcinis padengimas nuosekliai augo. Tai rodo didėjančią negyvos medienos svarbą poligono biologinei įvairovei. Nepaisant reikšmingai mažėjančio žolių ir samanų ardų projekcinio padengimo, rūšinė įvairovė poligone išlieka didelė. Daugelis rūšių nors užima daug mažesnį plotą, vis dar aptinkamos gana didelėje poligono dalyje ir sąlygoms pakitus galėtų atsikurti. Daugelis užstelbtų rūšių tampa jautresnės ir klimato kaitos ar aro taršos sąlygotiems pokyčiams, tačiau dabartinėmis sąlygomis savitajį atskirų tolimųjų oro pernašų sąlygotą poveikį atskiroms rūšims išskirti sudėtinga.

4.1 – 4.2 lentelės. *Induočių augalų ir samanų ardų rūšių fertilumas intensyvaus stebėjimo poligone Aukštaitija-102, 2005-2025 metais*

A_102 žolės	2006	2007	2008	2009	2010	2012	2013	2014	2015	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2005-2024
AEGO POD	0	0	0	0	0	0	100	100	0	0	0	0	0	0	0	**0**	**0**	0	**11.1**
ATHY FIL	0	0	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0	**50**	**0**	50	**11.1**
C DIGITA	61	88	50	100	100	100	0	0	0	43	38	61	29	42	30	**25**	**15**	17	**44.3**
C REMOTA	50	100	0	100	0	100	100	0	100	33	33	0	0	0	0	**0**	**0**	0	**34.3**
CARD AMA	0	50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	**0**	**0**	**0**	**2.8**
CHRY ALT	0	0	0	0	50	0	0	0	0	0	50	0	50	0	0	**0**	**0**	0	**8.3**
CIRC ALP	0	50	0	0	0	50	50	0	50	4	21	29	8	14	40	**13**	**67**	25	**23.3**
CIRS OLE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25	33	67	0	50	33	**0**	**0**	0	**11.6**
CREP PAL	30	88	50	100	100	100	50	0	0	67	14	67	57	67	8	**17**	**20**	33	**48.2**
DRYOPTEZ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14	16	6	0	6	6	**3**	**10**	0	**3.4**
EQUI PRA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	6	0	0	4	0	**0**	**0**	0	**0.9**
GERA ROB	0	0	0	0	100	0	0	0	0	0	0	100	100	0	0	**0**	**0**	0	**16.7**
GEUM RIV	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0	100	100	**0**	**0**	**0**	**16.7**
IMPA NOL	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	17	50	50	**100**	**0**	**0**	**17.6**
LAMI GAL	2	0	50	75	0	57	50	0	50	0	3	4	0	8	4	**4**	**0**	0	**17.1**
LYSI VUL	39	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	**0**	**0**	**0**	**2.2**
LUZU PIL	0	83	50	75	100	0	50	0	0	36	38	44	0	13	14	**14**	**0**	33	**30.6**
MAIA BIF	13	50	50	75	100	88	67	0	63	2	9	0	0	7	3	**0**	**0**	0	**29.2**
MELI NUT	50	50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	**0**	**0**	0	**5.6**
MERC PER	9	0	50	75	50	67	50	0	50	8	8	32	11	0	28	**3**	**33**	0	**26.3**
MYCE MUR	0	0	50	0	0	0	0	0	0	0	50	50	0	100	100	**0**	**0**	**0**	**19.4**
OXAL ACE	15	50	50	50	0	0	50	0	50	9	7	2	3	2	7	**6**	**21**	5	**18.3**
PARI QUA	0	0	50	0	0	50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	**0**	**0**	**0**	**5.6**
RUBU IDA	0	0	0	0	0	0	50	0	0	0	0	0	8	0	0	**0**	**0**	0	**3.2**
RUBU SAX	3	0	50	75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	**0**	**0**	0	**7.1**
STEL NEM	0	50	50	0	0	0	0	0	0	25	29	50	40	38	13	**14**	**0**	20	**18.2**
TRIE EUR	0	50	100	0	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0	**0**	**0**	0	**13.9**
VACC MYR	0	0	0	0	0	0	0	0	50	5	6	0	0	0	0	**0**	**0**	0	**3.4**
VIOL EPI	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	**0**	**0**	**0**	**5.6**
VIOL MIR	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	**0**	**0**	0	**5.6**
VIOL RIV	100	0	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	**0**	**0**	0	**11.1**
Suma:	**11**	**11**	**12**	**9**	**8**	**10**	**11**	**2**	**7**	**13**	**16**	**13**	**10**	**15**	**14**	**11**	**6**	**7**	**10.3**

A102 samanos	2006	2007	2008	2009	2010	2012	2013	2014	2015	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2005-2024
BRAC OED	1	50	50	50	0	0	0	0	0	8	7	7	7	1	0	**0**	**0**	0	10.1
BRAC RUT	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**50**	**0**	0	2.8
BRAC SAL	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	50	25	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	4.2
CIRR PIL	0	0	0	0	0	0	0	0	50	0	0	0	0	0	0	**0**	**0**	0	2.8
DICR POL	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0	0	0	13	17	**13**	**0**	0	2.7
DICR SCO	0	0	0	0	50	0	0	0	0	8	8	4	4	0	0	**0**	**0**	0	4.1
HERZ SEL	0	0	50	0	0	0	0	0	0	0	50	43	33	50	50	**0**	**50**	**0**	18.1
HYLO SPL	0	0	0	0	0	0	50	0	0	0	0	0	0	0	0	**0**	**0**	0	2.8
HYPN CUP	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	50	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	2.8
MARS POL	0	0	0	0	0	0	0	0	0	50	0	0	0	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	2.8
PLAG AFF	0	0	50	50	0	0	0	0	0	3	1	0	0	0	2	**1**	**0**	0	6.0
PLAG ASP	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	**0**	**0**	0	0.2
PLAG DEN	0	50	50	0	0	0	0	0	0	50	25	**0**	0	0	50	**0**	**0**	**0**	12.5
PLAG LAE	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	17	0.9
PLAG UND	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25	0	0	10	0	**0**	**0**	0	1.9
POLY FOR	0	50	0	0	0	0	0	0	0	0			0	0	0	**0**	**0**	0	3.1
RHOD ROZ	0	0	0	0	0	0	50	100	0	0	0	0	0	0	4	**0**	**0**	0	8.6
SANI UNC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	50	33	25	0	**0**	**0**	**0**	**0**	6.0
Suma:	**2**	**3**	**4**	**2**	**1**	**0**	**2**	**1**	**1**	**6**	**9**	**5**	**4**	**4**	**5**	**3**	**1**	**1**	**3.0**

4.3 Žemaitija_100, LT-03

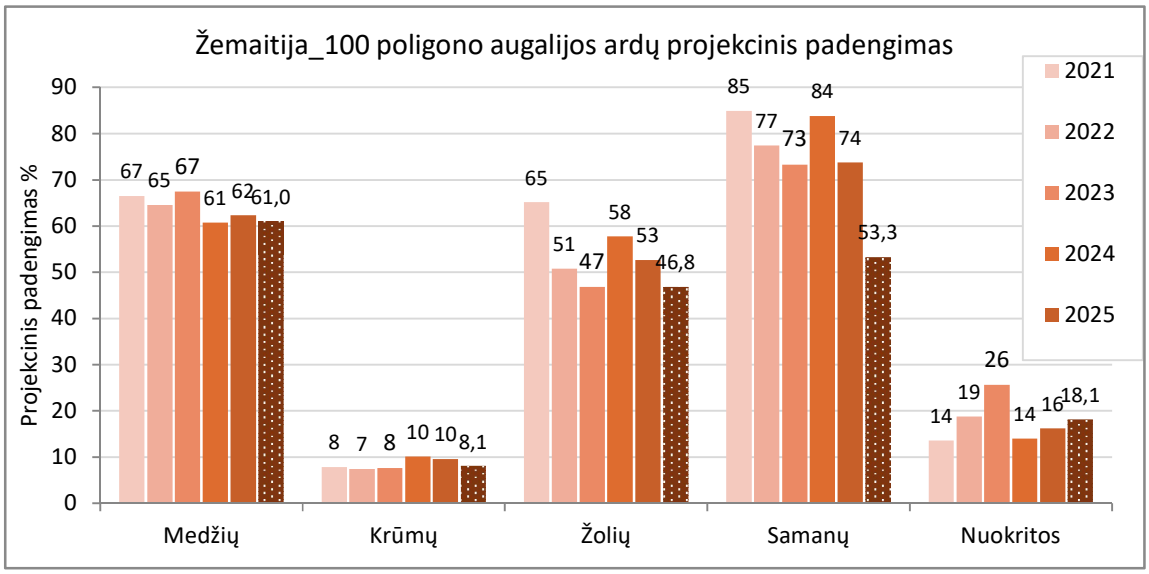
Žemaitijos KM stoties, intensyvių stebėjimų stacionaras, yra Juodupio upelio hidrografiniame baseine, Plokštinės gamtiniame rezervate, Platelių girininkijos miškuose. Augavietė normalaus drėgnumo, vidutiniškai derlinga (Ncl), su priesmėlio dirva. Augalijos intensyvių tyrimų stacionare dominuoja vietovei būdingas įvairiaamžis eglynas, su paprastosios pušies ir pavienių karpotųjų beržų priemaiša. Augavietė įvardijama kaip mėlyninis-kiškiakopustinis eglynas su keliomis, skirtingo amžiaus eglės kartomis (4.0.5 pav). Poligone visą stebėjimų laikotarpį vyko nežymus medyno retinimasis. Pastaraisiais (2022-2024) metais šiaurinėje tyrimų stacionaro pusėje susiformavo nemaža aikštė, žuvus didžiajai daliai pirmo ardo eglių. Tačiau pačioje augalijos stebėjimų poligono teritorijoje žuvo tik keletas medžių, todėl poveikis augalijai dar nėra labai ženklus.

4.0.5 pav. *Žemaitija_100 tyrimų poligonas.*

4.3.1 Projekcinis padengimas

Žemaitijos KMS poligone yra stebima spygliuočių miško bendrija, kurios medyne dominuoja paprastosios eglės (*Picea abies*). Bendras medžių ardo projekcinis padengimas (4.3.1 pav.) 2021-2025 metų laikotarpiu išliko stabilus, artimas ilgalaikiam stebėjimų vidurkiui (61,0 %). Detaliau apie medžių ardo pokyčius žr. II skyrius - miško ekosistemų sumedėjusios augmenijos monitoringas. Krūmų ardas poligone skurdus, jo projekcinis padengimas nuo 2014 metų kito 5,5 – 10.1% ribose. Pastaraisiais metais išliko sąlyginai stabilus ir neženkliai didėjo. Vertinant visą tyrimų laikotarpį žolių ardo projekcinis padengimas svyravo nuo 20,8 % (1995 m.) iki 66 % (2014 m), t. y. beveik 40 % ribose. Pastaraisiais metais jis nors ir ženkliai svyravo, išliko sąlyginai aukštas arba artimas ilgamečiui vidurkiui (46,8 %), (4.3.1 pav). Šiuo metu medynas, kaip eglynas, sąlyginai yra

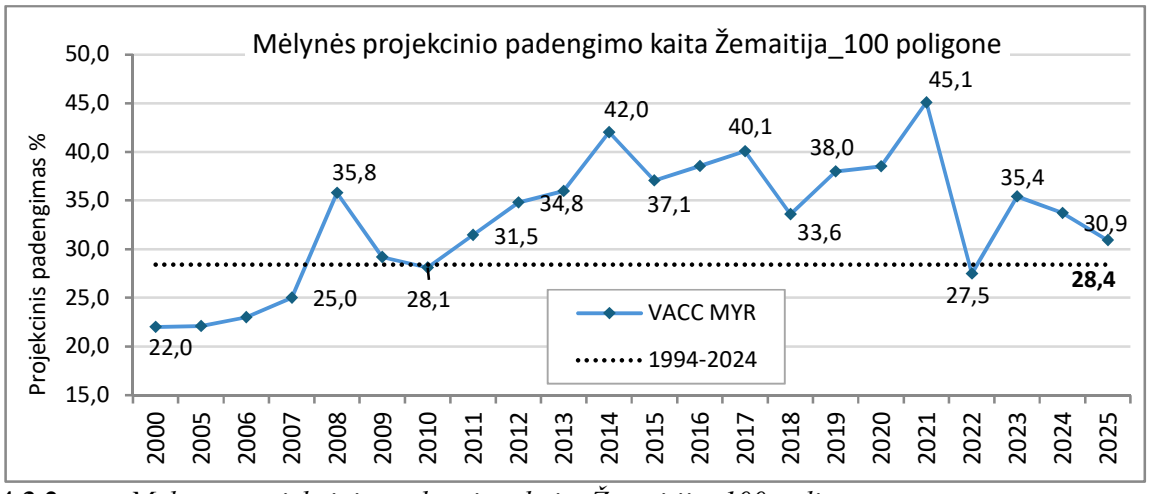
gana šviesus, dėl dalies pirmo ardo medžių žūties, tačiau dalyje poligono jau formuojasi žolinę augmeniją išstumiantis tankus eglių pomiškis. Taip pat poligone gana stiprus šernų poveikis. Po didesnių pažaidų, žolių ardo projekcinis padengimas ženkliai sumažėja, trikdymui sustojus



– samanos ir žoliniai induočiai netrukus vėl sugrįžta į anksčiau šernų išknistus plotus.

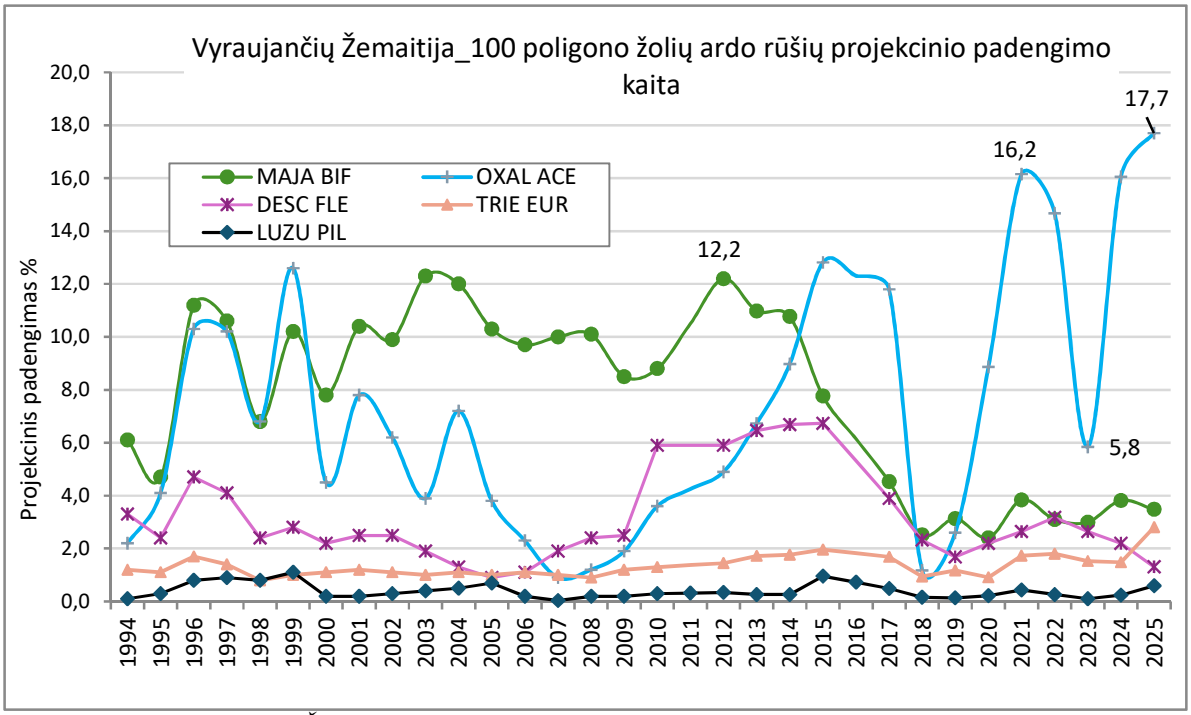
4.3.1 pav. *Žemaitija_100 poligono atskirų augalijos ardų ir nuokritų vidutinio projekcinio padengimo kaita 1994–2025 m.*

Žolių ir krūmokšnių arde per visą stebėjimų laikotarpį užregistruota 21 induočių augalų rūšis: (miškinis lendrūnas (*Calamagrostis arundinacea*), gumulinė viksva (*Carex pilulifera),* lanksčioji šluotsmilgė (*Deschampsia flexuosa),* nelygialapis papartis (*Dryopteris expansa),* paprastasis šaltekšnis (*Frangula alnus),* mažažiedė aklė *(Galeopsis bifida),* pataisas varinčius (*Lycopodium annotinum),* plaukuotasis kiškiagrikis (*Luzula pilosa),* dvilapė medutė (*Maianthemum bifolium),* pievinis kupolis *(Melampyrum pratense),* miškinė zuiksalotė (*Mycelis muralis),* paprastasis kiškiakopūstis (*Oxalis acetosella),* paprastoji eglė (*Picea abies*), paprastoji pušis *(Pinus sylvestris),* didžialapis šakys *(Pteridium aquilinum),* paprastasis ąžuolas (*Quercus robur),* paprastoji avietė (*Rubus idaeus),* paprastasis šermukšnis (*Sorbus aucuparia),* miškinė septynikė (*Trientalis europaea),* mėlynė *(Vaccinium myrtillus)* ir bruknė (*Vaccinium vitis-idaea*) (4.5 priedas). Ne visos jų išaugdavo kasmet. Per visą stebėjimo laikotarpį nepranykdamos augo tik 7 rūšys: lanksčioji šluotsmilgė, plaukuotasis kiškiagrikis, dvilapė medutė, paprastasis kiškiakopūstis, miškinė septynikė, mėlynė, bruknė. Pastaruosius (2021-2025) metus laukeliuose registruota 12 - 13 rūšių (4.5 priedas).



4.3.2 pav. *Mėlynės projekcinio padengimo kaita Žemaitija_100 poligone.*

Žolių ir krūmokšnių arde dominuoja: mėlynė, lanksčioji šluotsmilgė, paprastasis kiškiakopūstis, dvilapė medutė. Kiek retesnės: miškinė septynikė ir plaukuotasis kiškiagrikis. Mėlynės projekcinis padengimas su mažais nuosmukiais augo beveik visą stebėjimų laikotarpį, ir tik pastaraisiais 2022-2025 metais ženkliai sumažėjo, bet vis dar išlieka 2,5 % didesnis nei ilgalaikių stebėjimų vidurkis (28,4 %) (4.3.2 pav.).



4.3.3 pav. *Vyraujančių Žemaitija_100 poligono žolių ir krūmokšnių ardo rūšių projekcinio padengimo kaita 1994–2020 m.*

Antroji pagal gausumą žolių ardo rūšis – paprastasis kiškiakopūstis (4.3.3). Jo gausumas su pertrūkiais auga nuo 2008 metų ir 2021-2025 metais buvo rekordiškai aukštas (14,7-17,7 %). Tačiau 2022 metais registruotas anomalus sumažėjimas iki 5,8 %, panašiai

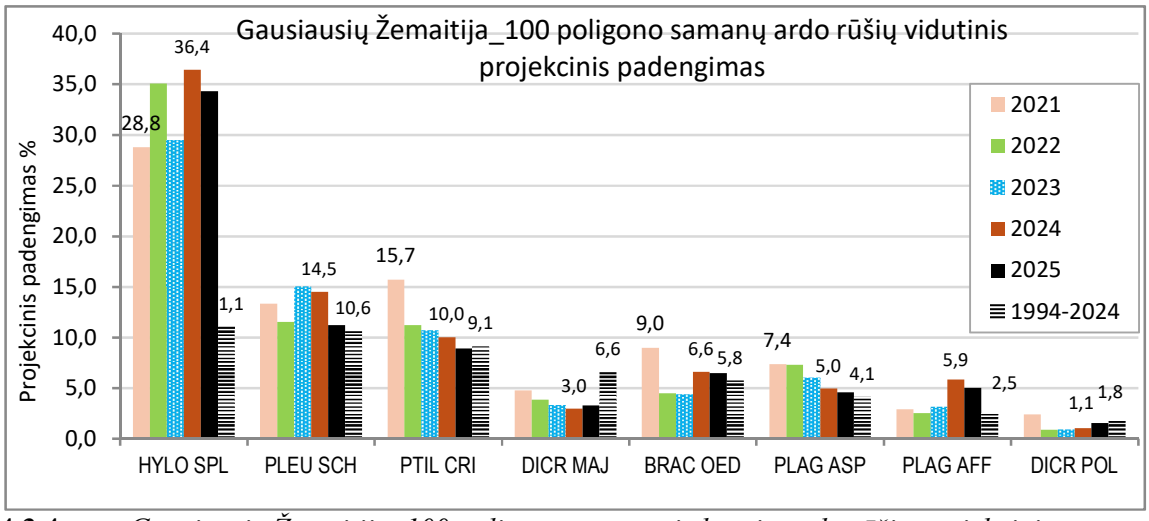
kaip ir 2018-2019 metais. Siekiant nustatyti šių pokyčių priežastis, būtini detalesni tyrimai įtraukiant kitų integruoto monitoringo paprogramių duomenis. Visos likusios induočių augalų rūšys kartu paėmus, dengia mažiau negu 10 % poligono ploto. Iš jų gausiausia dvilapė medutė. Medutės gausumas per 2015 - 2018 metus sumažėjo 5 kartus ir pastarąjį laikotarpį išliko stabiliai rekordiškai žemas. Aptartos rūšys yra tipingos eglynams, tad jų būklės prastėjimas, gali indikuoti visos eglyno ekosistemos nestabilumą, drėgmės ir apšvietimo pokyčius, arba būti mėlynių įsivyravimo pasekmė. Gana panašiai sumažėjęs išliko ir labiau šviesamėgės lanksčiosios šluotsmilgės projekcinis padengimas (4.3.3 pav). Tokius minėtų rūšių projekcinio padengimo pokyčius gali lemti ir šernų veiklos sumažėjimas, ištisinės samanų dangos ir mėlynių išvešėjimas – medutės ir šluotsmilgės įprastai nunyksta suvešėjus mėlynėms (4.3.4; 4.3.3 pav). Keista kad tipingos panašių augaviečių rūšies - miškinės septynikės projekcinis padengimas 2025 metais ženkliai padidėjo iki 2,8%, ir dabar dvigubai viršija ilgametį vidurkį (1,3 %).

Samanų ardo vidutinis projekcinis padengimas Žemaitijos intensyvaus stebėjimo poligone gana nuosekliai augo beveik visą stebėjimų laikotarpį ir pastaraisiais (2021 – 2025) metais laikėsi rekordiškai aukštas, 73-85 % ribose (4.3.1 pav). Labai artimos vertės registruojamos ir Aukštaitija_100 poligone, kas gali indikuoti panašią abiejų bendrijų sukcesinę stadiją, kur žolių arde stabiliai įsivyrauja mėlynės, o samanų arde – atžalinės gūžtvės. Tai galimai indikuoja sąlyginai didelį aplinkos sąlygų stabilumą vietovėje.

Žemaitijos KMS 1994–2025 metais buvo stebėtos 30 samanų - kerpių ardo rūšys: vingialapė kemsa – *Atrichum undulatum,* tikroji trumpė – *Brachythecium oedipodium,* lenktoji trumpė – *Brachythecium reflexsum,* didžioji dvyndantė – *Dicranum majus,* kalninė dvyndantė – *Dicranum montanum,* purioji dvyndantė – *Dicranum polysetum,* šakotoji dvyndantė – *Dicranum scoparium,* atžalinė gūžtvė – *Hylocomium splendens,* gūžtvė *Hylocomium umbrosum,* rudeninė kryžmenė – *Jamesoniella autumnalis,* šliaužiančioji lepidozija – *Lepidozia reptans,* įvairialapė gludutė – *Lophocolea heterophylla,* kreivalapė pažulnutė – *Plagiothecium curvifolium,* papartinė tįsena – *Plagiochila asplenioides,* gulsčioji lapūnė – *Plagiomnium affine,* smailialapė lapūnė – *Plagiomnium cuspidatum,* žalsvoji pažulnutė - *Plagiothecium laetum,* paprastoji šilsamanė – *Pleurozium schreberi,* paprastasis gegužlinis – *Polytrichum commune,* liekninis gegužlinis – *Polytrichum formosum,* smiltyninis gegužlinis – *Polytrichum juniperinum,* grakštusis gegužlinis – *Polytrichum longisetum,* vislioji pilezija – *Pylaisia polyantha,* puošnioji blakstienė – *Ptilidium pulcherrimum,* šilinė plunksnė – *Ptilium crista-castrensis,* riestalapė sanionija - *Sanionia uncinata,* girgensono kiminas – *Sphagnum girgensohnii* ir 1 kerpių rūšis - putlusis plynkežis – *Hypogymnia physodes* (4.6 priedas). Visą

laikotarpį nepranykdamos augo 8 rūšys (tikroji trumpė – *Brachythecium oedipodium,* didžioji dvyndantė – *Dicranum majus,* purioji dvyndantė – *Dicranum polysetum,* atžalinė gūžtvė – *Hylocomium splendens,* papartinė tįsena – *Plagiochila asplenioides,* gulsčioji lapūnė – *Plagiomnium affine,* paprastoji šilsamanė – *Pleurozium schreberi,* šilinė plunksnė – *Ptilium crista-castrensis*.

2021-2025 metais registruota 13 epigėjinių ir 21 epiksilinė, ant negyvos medienos ir nuokritų augusi samanų ir kerpių rūšis (4.14 priedas). Dalis aiškiai ne epigėjinių rūšių (kaip *Hypogymnia physoides*), kurios anksčiau buvo įtraukiamos į bendrą ataskaitą, dabar, remiantis metodika, atskiriamos ir detaliau neanalizuojamos.

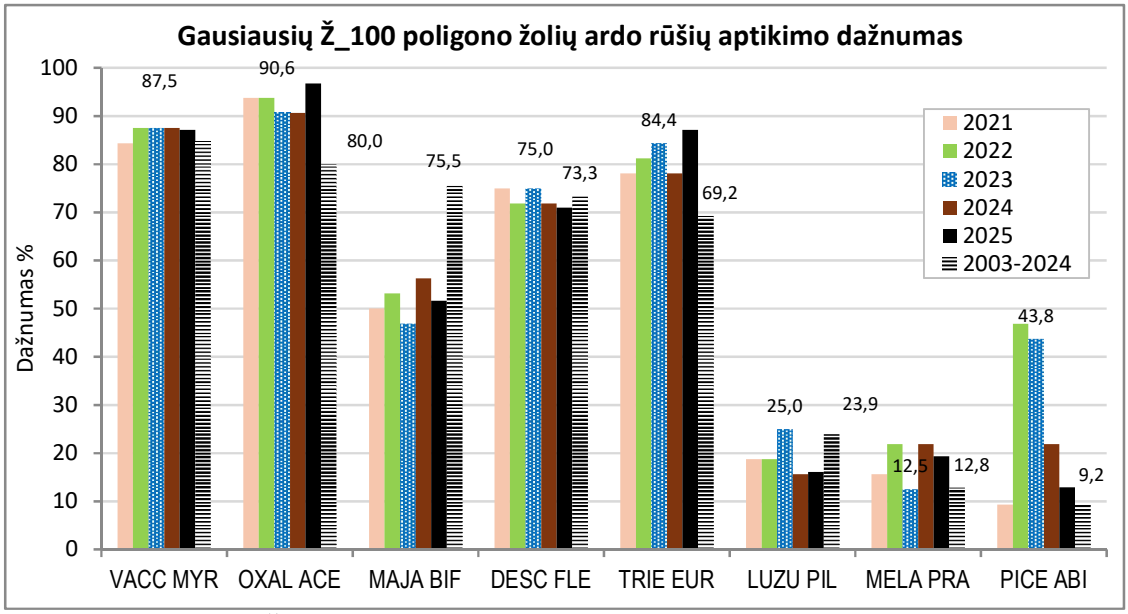


4.3.4 pav. *Gausiausių Žemaitija_100 poligono samanų ir kerpių ardo rūšių projekcinio padengimo kaita 1994-2020 m.*

Pastaraisiais metais gausiausios samanų ardo rūšies atžalinės gūžtvės projekcinis padengimas toliau augo ir buvo rekordiškai aukštas (28,8-36,4 %), taip viršydamas ilgametį vidurkį (11,1 %) daugiau nei tris kartus (4.3.4 pav). Tai labiausiai lėmė ir viso samanų ardo projekcinio padengimo pokyčius. Daugumos vidutiniškai gausių samanų ardo rūšių: paprastosios šilsamanės, šilinės plunksnės, tikrosios trumpės ir papartinės tįsenos projekcinis padengimas svyravo, bet taip pat išliko didesnis arba artimas visų stebėjimų vidurkiui. Tik didžiosios dvyndantės jis nuosekliai mažėjo ir šiuo metu yra dvigubai mažesnis už ilgametį vidurkį (6 %). Remiantis pateiktais rezultatais, galima vertinti, jog 2021-2025 m. augimo sąlygos samanoms buvo palankios.

4.3.2 Dažnumas

Žemaitijos KMS induočių augalų arde pagal aptikimo dažnumą aiškiai dominuoja 5 rūšys: mėlynė *(Vaccinium myrtillus),* dvilapė medutė (*Majanthemum bifolium),* paprastasis kiškiakopūstis (*Oxalis acetosella),* miškinė septynikė *(Trientalis europaea)* ir lanksčioji šluotsmilgė (*Deschampsia flexuosa*). Nuo pat 2003 metų jų atstovai kasmet registruojami daugiau nei 50 % laukelių. Visos minėtos rūšys, išskyrus šluotsmilgę, yra tipiškos spygliuočių miškų, eglynų rūšys. Pastoviai aukštas jų dažnumas tyrimų laikotarpiu liudija miško bendrijos stabilumą. Tos pačios rūšys dažniausios išliko ir per 2021–2025 metų stebėjimų laikotarpį. Šiuo laikotarpiu paprastojo kiškiakopūsčio ir miškinės septynikės aptikimo dažnumas išliko ženkliai didesnis už vidutinį ir toliau augo. Mėlynės ir lanksčiosios šluotsmilgės buvo stabilus ir labai artimas ilgamečiui vidurkiui. Vienintelės dvilapės



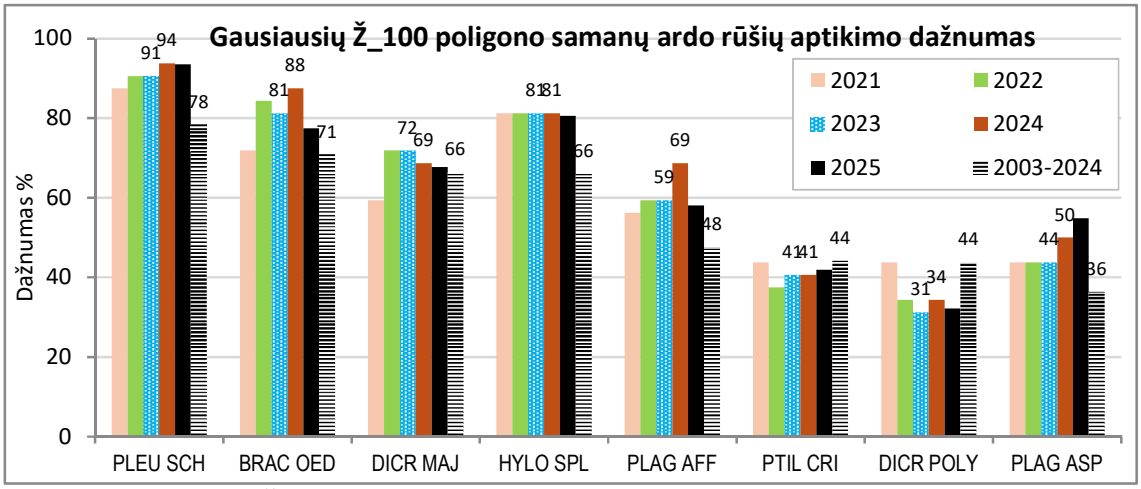
4.3.5 pav. *Poligone Žemaitija_100 vyraujančių žolių ir krūmokšnių rūšių dažnumo kaita.*

Medutės, jau nuo 2020 metų, individai registruojami sąlyginai rekordiškai mažame laukelių skaičiuje (~ 50 %). Tai kartu su prastėjančiais gausumo rodikliais rodo, jog rūšis 2020 metais patyrė tam tikrą lūžį, galbūt buvo išstumta iš dalies laukelių ir tikėtina dabar stabilizavosi naujoje būsenoje (4.3.5 pav).

Iš rečiau registruojamų žolių ardo rūšių, 2022 metais itin ženkliai (5 kartus) išaugo paprastosios eglės dažnumas. Eglių sėjinukai aptikti beveik pusėje tiriamųjų laukelių. Matyt tai sąlygojo sėkliniai metai, arba gausus priešmirtinis paskutinis derlius gretimai išdžiūvusiame plote. Svarbus ir šernų veiklos sąlygotos paklotės pažaidos, sukuriančios palankias sąlygas sudygti sėjinukams. Tačiau dažnumo ir kartu gausumo nuoseklus mažėjimas 2023-2025 metai indikuoja, kad didžioji dalis jų neišgyveno. Taip pat beveik visą

laikotarpį laikėsi itin aukštas pievinio kupolio dažnumas. Jis registruotas penktadalyje tiriamųjų laukelių. Tuo tarpu plaukuotojo kiškiagrikio aptikimo dažnumas lyginant su ilgamečiu vidurkiu laikėsi žemas.

Samanų arde 2021-2025 metais 5 rūšys pastoviai registruotos daugiau nei pusėje laukelių: paprastoji šilsamanė, tikroji trumpė, atžalinė gūžtvė, didžioji dvyndantė ir gulsčioji lapūnė (4.3.6 pav). Likusių trijų iš dažniausių samanų ardo rūšių dažnumas irgi buvo sąlyginai didelis (31 - 54 %). Vyraujančių rūšių skaičius, gausumo ir dažnumo augavietėje tolydumas, labai svarbus biologinės įvairovės indeksų rodiklis, rodantis tiriamosios bendrijos stabilumą (MAGURRAN, 2004). Iš paminėtųjų rūšių, paprastoji šilsamanė ir atžalinė gūžtvė yra būdingos visiems spygliuočių miškams. Papartinė tįsena, didžioji dvyndantė, šilinė plunksnė – eglynams, purioji dvyndantė – pušynams, o likę (tikroji trumpė ir gulsčioji lapūnė) yra dažnos mišrių miškų (ypač eglynų su karpotaisiais beržais) samanos. 2021 – 2025 metais atžalinės gūžtvės, paprastosios šilsamanės, tikrosios trumpės, gulsčiosios lapūnės ir papartinės tįsenos aptikimo dažnumas išliko labai aukštas, ženkliai didesnis už visų stebėjimų vidurkį. Didžiosios dvyndantės artimas ilgamečiui vidurkiui. Vienintelės puriosios dvyndantės visą minėtą laikotarpį aptikta ženkliai mažiau nei įprastai. Toks rūšių aukšto dažnumo išsilaikymas ir augimas rodo gerą bendrą samanų ardo būklę ir stabilumą.

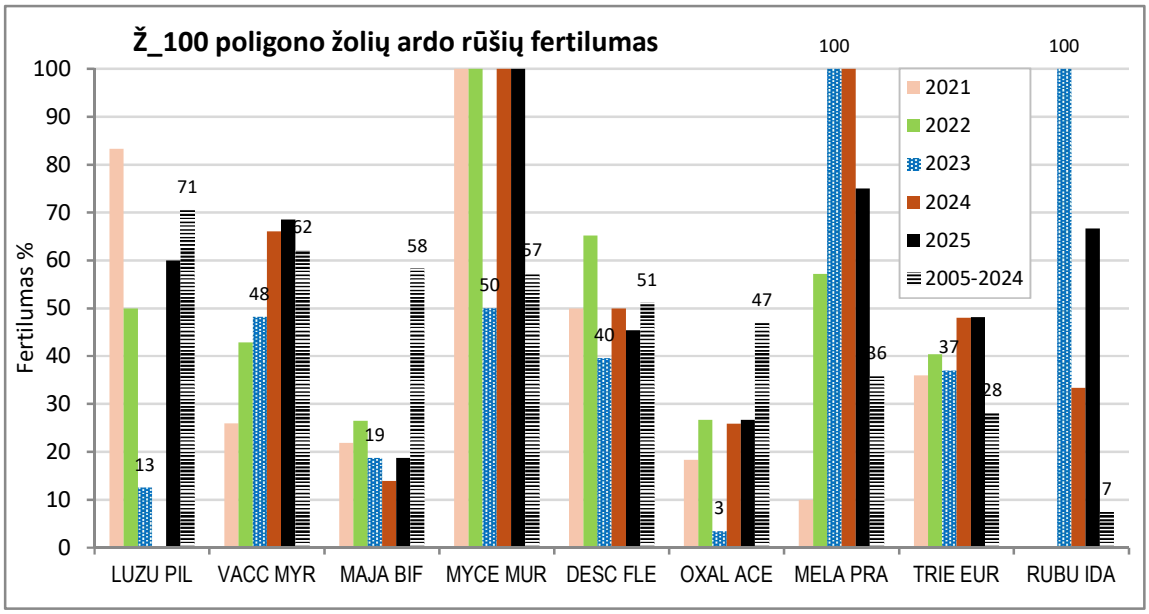


4.3.6 pav. *Poligone Žemaitija_100 vyraujančių samanų ir kerpių ardo rūšių dažnumo kaita 2003–2025 m.*

4.3.3 Fertilumas

Žemaitijos KMS poligone yra panašus skaičius induočių augalų ir samanų rūšių. Žydi ir dera tik apie pusė jų, ir didesnė dalis ne kasmet. 2021-2025 metais registruotos net 9 fertilios induočių augalų rūšys (4.3.7 pav): plaukuotasis kiškiagrikis, dvilapė medutė, mėlynė,

paprastasis kiškiakopūstis, lanksčioji šluotsmilgė, miškinė zuiksalotė, pievinis kupolis, miškinė septynikė ir pievinis kupolis. Iš jų, lyginant su ilgamečiu vidurkiu, registruota išskirtinai daug miškinės zuiksalotės, pievinio kupolio, miškinės septynikės ir paprastosios avietės individų. Žydinti paprastoji avietė 2023-2025 metais registruotą pirmą kartą. Paprastojo kiškiakopūsčio ir dvilapės medutės fertilumas visą laikotarpį buvo ženkliai sumažėjęs. Tuo tarpu plaukuotojo kiškiagrikio ir mėlynės buvo labai nepastovus, nors paskutinio vertinimo metu, abiejų rūšių fertilumas buvo gana artimas ilgalaikei normai. Padidėjęs daugelio rūšių fertilumas, gali indikuoti padidėjusį šviesos kiekį, kas stebima šiaurinėje poligono dalyje, šalimais žuvusio miško ploto. Sumažėjęs medutės fertilumas, kartu su sumažėjusiu projekciniu padengimu ir aptikimo dažnumu tik patvirtina kad rūšis



išgyvena nepalankų laikotarpį.

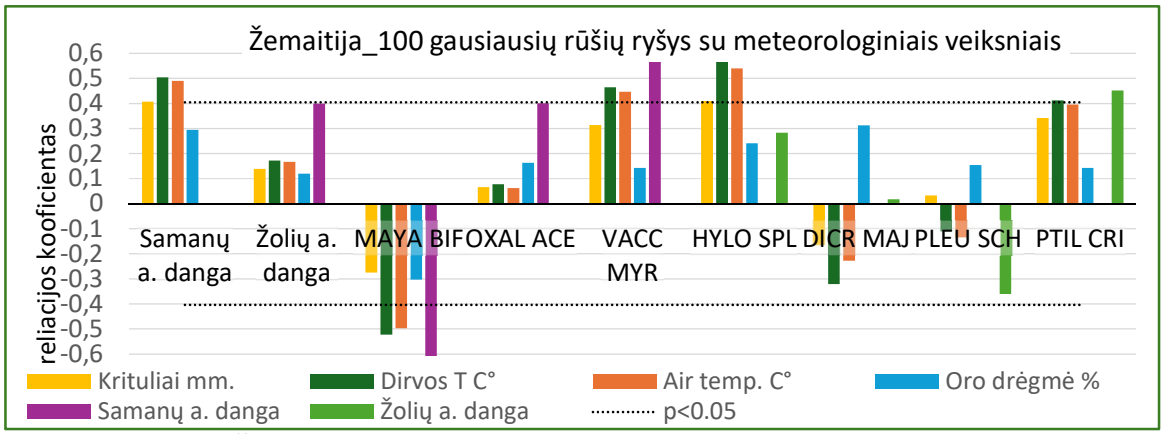
4.3.7 pav. *Žemaitijos KMS žolių ir krūmokšnių ardo rūšių fertilumo kitimas 2005–2020 metais.*

Žemaitijos KMS poligone samanų fertilumas apskritai paėmus menkas. Vidutinis fertilių ardo rūšių skaičius vos 1,7 rūšies. Visų rūšių sporifikuojantys individai aptinkami ne kasmet. Pastaraisiais (2021-2025) metais užregistruota neįprastai daug, net 5 ardo rūšių sporifikuojantys atstovai: tikroji trumpė, šilinė plunksnė, didžioji dvyndantė, paprastoji šilsamanė ir atžalinė gūžtvė (4.3 lentelė). Apskritai paėmus, dėl dauginimosi organų smulkumo ir didelio individų tankio, smulkiųjų samanų ir kerpsamanių rūšių fertilumą sąlyginai dideliame plote tiksliai įvertinti sudėtinga, tad rezultatus apibendrinančias išvadas galima daryti tik sukaupus pakankamai daug duomenų. Gausesnis sporifikuojančių epigėjinių samanų skaičius gali indikuoti ir labai gerą populiacijos būklę, bet ir trikdymą.

4.3 lentelė. *Žemaitijos KMS samanų ardo rūšių fertilumo kaita 2005–2025 metais.*

Z100 samanos	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2012	2013	2014	2015	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2005-2024
BRAC OED	50	70	0	50	50	100	0	50	0	100	50	23	12	0	11	4	2	2	4	**31.9**
SANI UNC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25	0	0	0	0	0	0	**1.4**
ATRI UND	0	0	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	**5.6**
PLAG CUR	0	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	**5.6**
PTIL CRI	0	0	0	0	0	50	0	0	0	0	0	6	3	8	0	13	0	4	0	**4.6**
DICR MAJ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	50	0	2	0	0	0	0	2	2	**3.0**
PLEU SCH	0	50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	3	2	**3.1**
HYLO SPL	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	2	0	2	4	6	4	0	**1.3**
Rūšių sk.	1	2	0	2	2	2	0	1	0	1	2	3	5	1	2	3	3	5	3	**1.9**

Vertinant gausiausių poligono rūšių tiesinę koreliaciją su pagrindiniais aplinkos veiksniais, matyti (4.3.8 pav.), kad daugumą dominuojančių apatinių augalijos ardų rūšių 2000 – 2024 metų laikotarpiu teigiamai veikė padidėjęs metinių kritulių kiekis, auganti dirvožemio ir oro temperatūra. Dvilapės medutė ir parastoji šilsamanė pasižymėjo visiškai priešinga reakcija. Absoliutaus žolių ardo dominanto - mėlynės projekcinis padengimas teigiamai koreliuoja su bendru samanų sluoksnio padengimu, ypač su gulsčiosios lapūnės ir atžalinės gūžtvės gausa. Tačiau absoliutaus samanų ardo dominanto – atžalinės gūžtvės gausumas neigiamai veikia dvilapės medutės gausumą. Koreliacijos tarp atskirų veiksnių buvimas dar nereiškia kad veiksniai tiesiogiai susiję priežastiniais ryšiais, todėl ir šiuo duomenis reikia interpretuoti atsargiai ir tam reikalingos detalesnės analizės.



4.3.8 pav. *Žemaitijos KMS gausiausių rūšių projekcinio padengimo koreliacija su aplinkos veiksnių kaita 2000 – 2024 metų laikotarpiu.*

Apibendrinant Žemaitijos tyrimų poligono duomenis, galima teigti, kad augalijos būklė vietovėje pastarųjų metu laikotarpiu išliko stabili ir gana gera. Nepaisant šalimais registruotų intensyvaus eglių džiūvimo, poligono teritorijoje virš tiriamųjų laukelių esančių medžių ardas sumažėjo neženkliai. Krūmų ardas išliko stabilus. Žolių ir samanų ardų būklė buvo nepastovi, bet bendras vidutinis padengimas išlieka arti maksimalaus. Palankiausios sąlygos buvo kiškiakopūsčiams, miškinei septynikei, atžalinei gūžtvei. Labai nepalankus laikotarpis buvo dvilapėms medutėms, taip pat didžiajai dvyndantei.

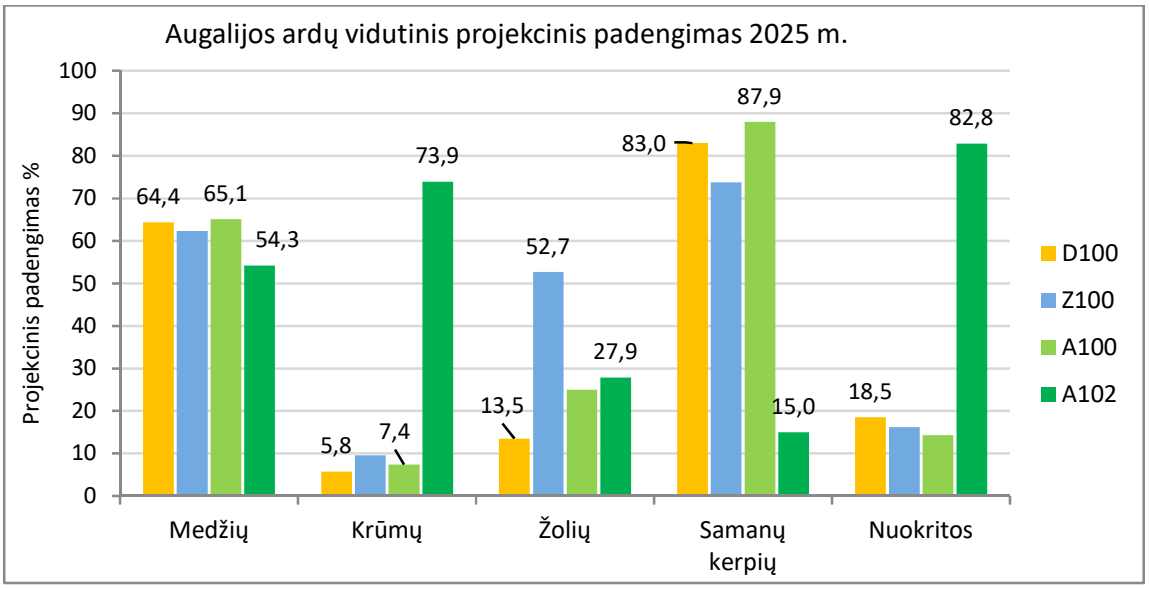
4.4 Dzūkija_100, LT-02

Dzūkijos integruoto monitoringo stoties gyvosios gamtos tyrimai vykdomi Skroblaus gamtiniame rezervate, Skroblaus kairiojo intako, Duburių (Beršibarkos / Šlaitinio) upelio hidrografinio baseino šiaurinėje dalyje. Vietovės dirvožemiai susiformavo smėlingose ledyninės kilmės lygumose, veikiant vandens erozijai ir vėjo pustymams. Vietovėje vyrauja neturtingi maistinėmis medžiagomis jauriniai šilaininiai silpnai nujaurėję dirvožemiai (Nal augavietė). Lyginant tarpusavyje visų integruoto monitoringo intensyvaus stebėjimo stacionarų augavietes, pastaroji yra ženkliai skurdžiausia ir sausiausia (4.0.6 pav). Botaniniai tyrimai stacionare pagal integruoto monitoringo VG paprogramę pradėti 1993 m. ir vykdyti kasmet iki 1997 metų. Tačiau pilnos duomenų sekos, metaduomenys neišliko. Tyrimai atnaujinti 2025 metais, po 27 metų pertraukos.

4.4.1. Projekcinis padengimas

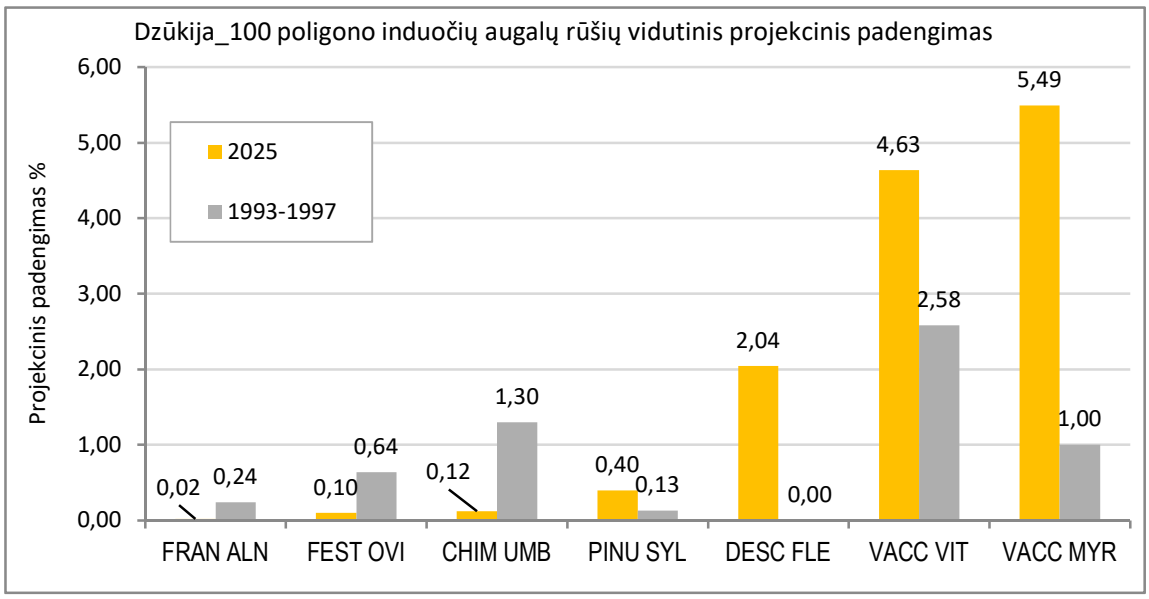
Bendras medžių ardo projekcinis padengimas virš tiriamųjų laukelių šiuo metu yra 64,4 %, labai artimas Aukštaitija_100 ir Žemaitija_100 stacionarams (4.4.1 pav). Dzūkijos stacionaras išsidėstęs gana gryname, šviesiame, savaiminės kilmės 115 metų amžiaus pušyne. Pastarąjį dešimtmetį, tikėtina augant maistinių medžiagų kiekiui, šiauriniame poligono pakraštyje, antrame arde ir pomiškyje, pamažu įsitvirtino pavienės eglės, beržai. Nepaisant to, krūmų ardas virš tiriamųjų laukelių išlieka skurdžiausias iš visų tiriamųjų poligonų, ir šiuo metu užima 5,8 % laukelių ploto. Krūmų arde dominuoja paprastieji kadagiai, šaltekšniai, paprastųjų pušų ir paprastųjų eglių savaiminukai.

4.0.6 pav. *Dzūkija_100 tyrimų poligono tipiškas tiriamasis laukelis.*.



4.4.1 pav. *Augalijos ardų ir nuokritų vidutinis projekcinis padengimas atskiruose augalijos stebėjimo stacionaruose 2025 metais.*

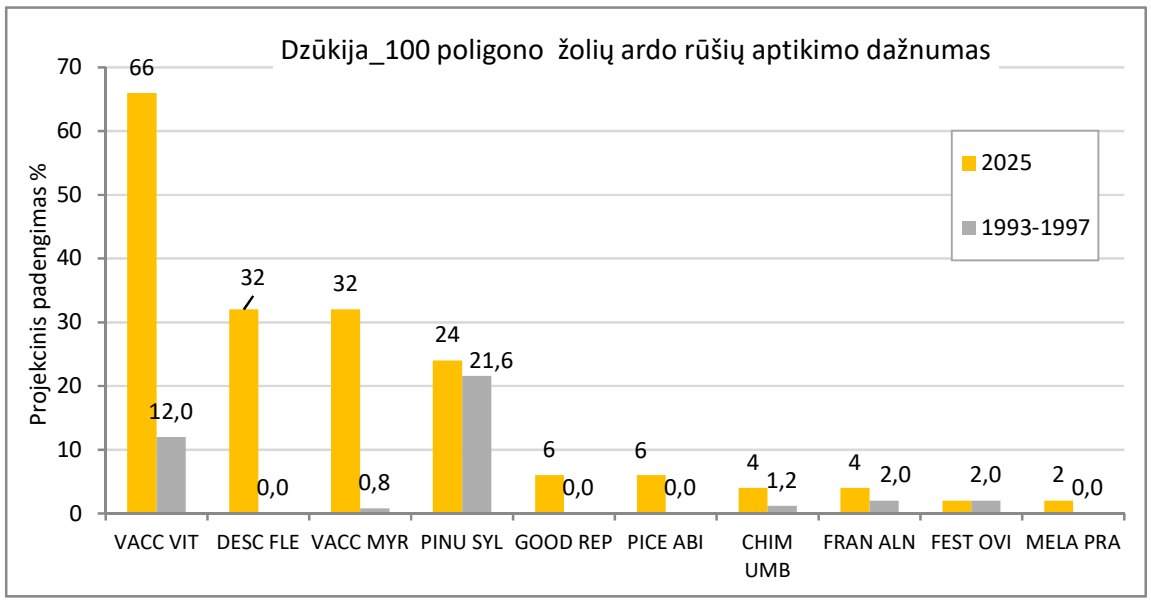
Žolių ir krūmokšnių ardas, kaip ir krūmų, Dzūkijos poligone užimamo ploto atžvilgiu yra pats skurdžiausias (4.0.6 pav.) ir šiuo metu dengia 13,5 % tiriamųjų laukelių. 1993-1997 metų laikotarpiu poligone registruota 13 žolių ir krūmokšnių ardo rūšių: plaukuotasis beržas – *Betula pubescens,* šilinė viksva – *Carex ericetorum*, skėtinė marenikė – *Chimaphila umbellata*, smiltyninis šepetukas – *Corynephorus canescens,* avinis eraičinas – *Festuca ovina,* paprastasis šaltekšnis – *Frangula alnus,* skėtinė vanagė – *Hieracium umbellatum*, paprastasis kadagys – *Juniperus communis*, paprastoji pušis – *Pinus sylvestris,* smulkioji rūgštynė – *Rumex acetosella*, paprastasis čiobrelis – *Thymus serpyllum*, mėlynė – *Vaccinium myrtillus,* bruknė – *Vaccinium vitis-idaea.* Vidutiniškai kasmet buvo aptinkama 10,2 ardo rūšių. Atnaujinus tyrimus po 27 metų pertraukos, 2025 metais stacionare pakartotinai registruotos tik 6 rūšys (4.7 priedas). Naujai registruotos 4: paprastoji eglė – *Picea abies,* pievinis kupolis – *Melampyrum pratense,* šliaužiančioji sidabriukė – *Goodyera repens*, lanksčioji šluotsmilgė – *Deschampsia flexuosa.*



4.4.2 pav. *Žolių ardo rūšių projekcinis padengimas Dzūkija_100 poligone.*

4.3.2. Dažnumas

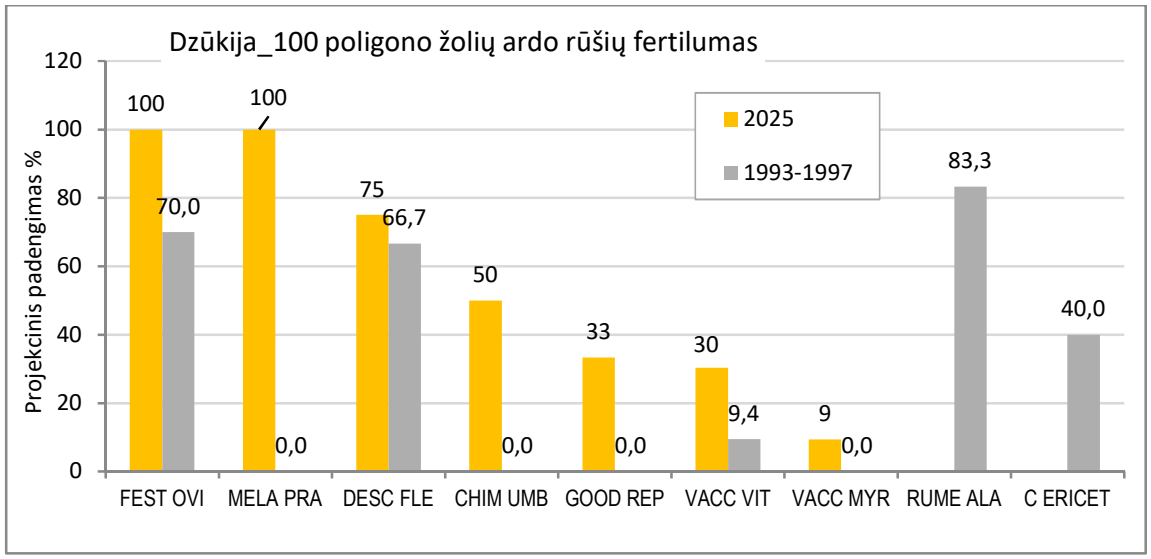
Lyginant 1993-1997 metų duomenis su dabartiniais, matyti (4.4.2 pav.) kad ženkliai padidėjo bendras suminis žolinės dangos projekcinis padengimas. Tai labiausiai sąlygojo didžiulis mėlynių populiacijos augimas daugiau nei 5 kartus. Anksčiau jos buvo registruojamos ne kiekvienais metais. Beveik dvigubai augo ir ankstesnių stebėjimu metu dominavusių bruknių populiacija. Pagal šiuos duomenis galima teigti, kad augavietė, bent dalyje tiriamųjų laukelių tampa palankesnė lepesnei derlingesnių ir drėgnesnių augaviečių krūmokšniui – mėlynei. Įdomu, jog šiuo metu trečia pagal gausumą lanksčioji šluotsmilgė ankstesnių tyrimų laikotarpiu visai nepateko į tiriamuosius laukelius, o dabar dengia 2 % viso ploto. Visiškai išnyko, anksčiau itin gausi buvusi smulkioji rugštynė (4.7 priedas). Ji poligone pirma sykį registruota 1994 metais (22%), sekančiais metais dengė net 30 % laukelių ploto ir sudarė ¾ viso žolių ardo, o 1996 metais kaip ir 2025 jau visiškai neberegistruota. Tai tipiškas pionierinis augalas, greitai užimantis pažeistas teritorijas, tikėtina išplitęs po paklotės pažaidų, o paskutiniu metu nesant trikdymo nunykęs. Taip pat ženkliai sumažėjusi skėtinių marenikių ir avinių eraičinų populiacijos. Priešingai, daugiau aptinkama pušų sėjinukų. Žolių ardo rūšių aptikimo dažnumo duomenys (4.4.3 pav.; 4.9 priedas) indikuoja kaip tolygiai rūšys pasiskirstę po tyrimų poligoną. Matyti, kad tolygiausiai, labiausiai išplitusi bruknė. Turint omenyje ir jos projekcinio padengimo augimą – tai indikuoją gerą rūšies būklę. Mėlynės, nors ir užima didžiausią plotą, aptinkamos tik trečdalyje poligono, kas indikuoja, jog dalyje polygono jos suformavę ištisinį sąžalyną, bet kitur visai neaptinkiamos. Įdomu, kad lanksčioji šluotsmilgė nors ir dengia mažą plotą, bet jau yra išplitusi gana plačiai po poligoną.



4.4.3 pav. *Žolių ardo rūšių aptikimo dažnumas Dzūkija_100 poligone.*

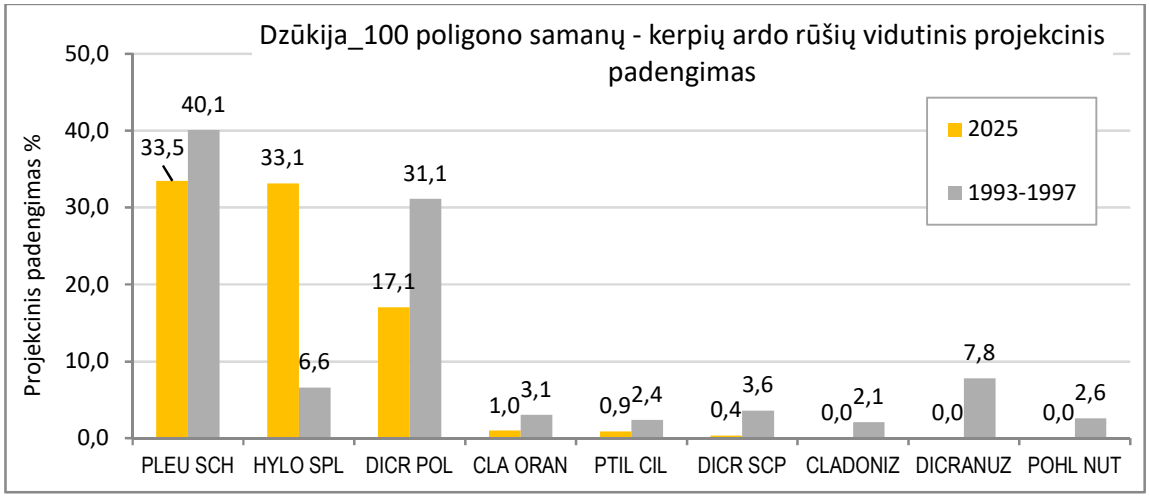
4.4.3. Fertilumas

Žolių ardo fertilumo duomenys (4.4.4 pav.; 4.11 priedas) rodo, jog 2025 metais fertilios buvo visos registruotos žolių rūšys. Net ir santykinai retos poligone rūšys: avinis eraičinas, pievinis kupolis, skėtinė marenikė, yra gyvybingos ir turi palankias sąlygas žiedų ar vaisių sukrovimui. Matyt tai yra gana reto, šviesaus medžių ir krūmų ardų pasekmė. Žemas gausiausios rūšies, mėlynės, fertilumas indikuoja, kad bent pastarieji metai joms nebuvo itin palankūs. Bet tai gali būti ir šalnų pasekmė, neatspindinti bendros ilgalaikės krūmokšnių būklės.



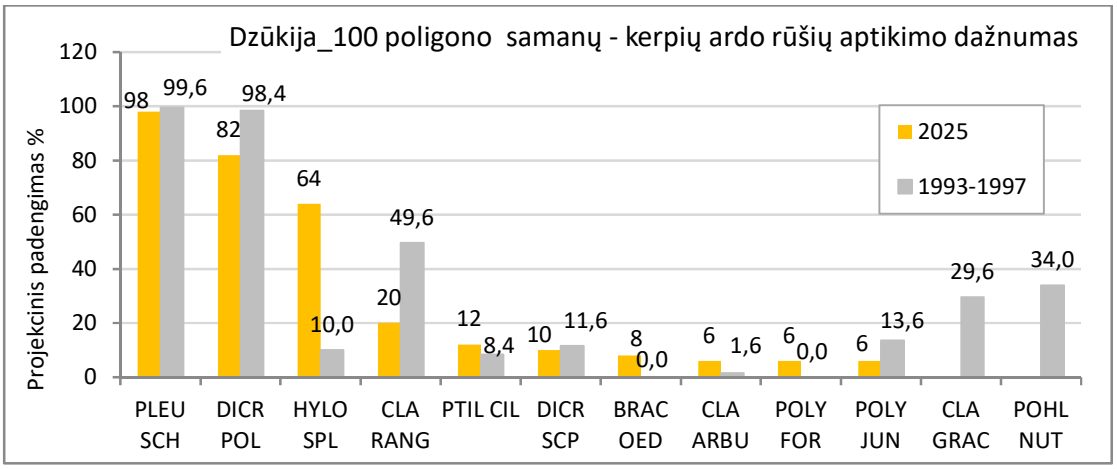
4.4.4 pav. *Žolių ardo rūšių fertilumas Dzūkija_100 poligone*

Samanų - kerpių ardas Dzūkija_100 poligone itin gausus (84%) ir projekciniu padengimu nežymiai nusileidžia tik Aukštaitija_100 poligonui. Per visą tyrimų laikotarpį laukelių teritorijoje registruota 16 atskirų ardo rūšių. Iš jų 11 samanų (4.8 priedas): tikroji trumpė - *Brachythecium oedipodium,* purioji dvyndantė – *Dicranum polysetum,* šakotoji dvyndantė – *Dicranum scoparium,* atžalinė gūžtvė – *Hylocomium splendens,* kiparisinė patisa – *Hypnum cupressiforme,* paprastoji šilsamanė – *Pleurozium schreberi,* lenktagalvė polija – *Pohlia nutans,* liekninis gegužlinis. – *Polytrichum formosum,* smiltyninis gegužlinis – *Polytrichum juniperinum,* plačiaskiautė blakstienė – *Ptilidium ciliare,* šilinė plunksnė – *Ptilium crista-castrensis* ir 5 rūšių epigėjinės kerpės: miškinė šiurė – *Cladonia arbuscula,* garbanotoji šiurė – *Cladonia crispata,* lieknoji šiurė – *Cladonia gracilis,* šašuotoji šiurė – *Cladonia ramulosa* (*pityrea),* elninė šiurė – *Cladonia rangiferina.* Šiurės, gegužliniai ir dvyndantės, dažnai identifikuotos tik iki genties. Pastaraisiais tyrimų metais naujai registruotos: tikroji trumpė, kiparisinė patisa, liekninis gegužlinis (verta patikrinti ar nesumaišytas su smiltyniniu), šilinė plunksnė. Nebeaptiktos: lenktagalvė polija, garbanotoji šiurė, lieknoji šiurė, šašuotoji šiurė. Lyginant su 1993-1997 metų vidurkiu (4.4.5 pav.), net 5 kartus išaugo atžalinių gūžtvių gausa. Ženkliai sumažėjo puriųjų dvyndančių, šilsamanių, beveik visų kerpių rūšių atstovų.



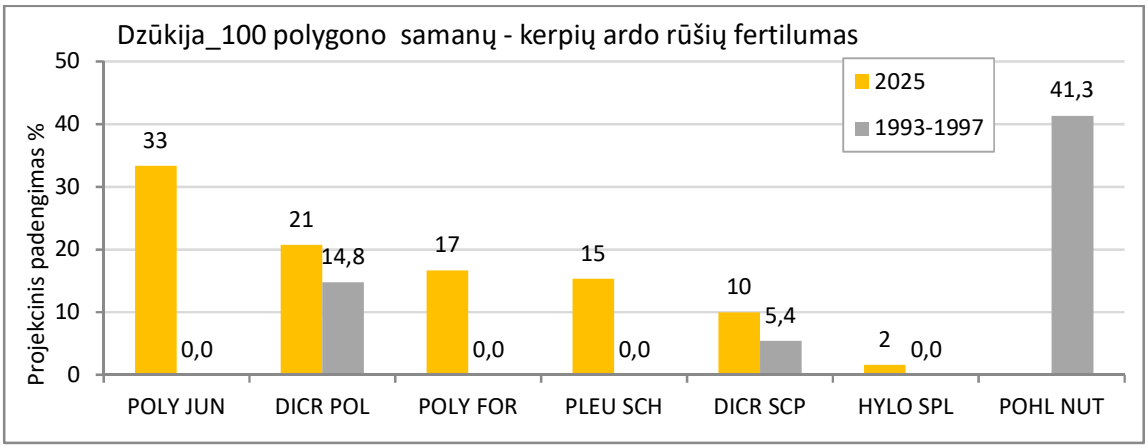
4.4.5 pav. *Samanų - kerpių ardo rūšių projekcinis padengimas Dzūkija_100 poligone.*

Vertinant samanų – kerpių ardo rūšių aptikimo dažnumą, matyti (4.4.6 pav.; 4.10 priedas), kad tiek projekcinis padengimas, tiek ir aptikimo dažnumas, labiausiai (daugiau nei 6 kartus) augo atžalinių gūžtvių. Tai rodo, kad ne tik sparčiai auga jų dengiamas plotas, bet vyksta ir spartus plitimas į naujas teritorijas. Vis tik tiek anksčiau, tiek ir dabar, dažniausiai aptinkama (98 % laukelių) stabiliai išliko šilsamanė, nepaisant sumažėjusio rūšies gausumo. Tuo tarpu puriosios dvyndantės, ne tik mažėja užimamas plotas, bet ji visai išnyksta dalyje poligono. Analogiškai nyksta ir daugumas epigėjinių kerpių.



4.4.6 pav. *Samanų - kerpių ardo rūšių aptikimo dažnumas Dzūkija_100 poligone.*

Epigėjinių samanų fertilumas miško paklotėje dažniausiai būna gana žemas, jos sporifikuoja ne kiekvienais metais. Dalies samanų ir ypač kerpsamanių fertilumą, dėl generatyvinių organų smulkumo tiksliai įvertinti sunku. Tad aiškesnėms išvadoms suformuoti būtinos arba labai ilgos duomenų sekos, arba detali specifinė analizė. Nepaisant to, Dzūkijos tyrimų poligonas, lyginant su Aukštaitijos ir Žemaitijos, išsiskiria aiškiai didžiausiu samanų ardo fertilumu. 2025 metais fertilios buvo beveik visos gausiausios samanų rūšys (4.4.7 pav.; 4.11 priedas). Lyginant su ankstesnių stebėjimų duomenimis, itin dideliu fertilumu išsiskyrė gegužliniai ir paprastoji šilsamanė. Kerpių fertilumas nevertintas.



4.4.7 pav. *Samanų - kerpių ardo rūšių fertilumas Dzūkija_100 poligone*

Apibendrinant, galima daryti išvadas, kad per 32 metų laikotarpį, drastiškų augalijos pokyčių neįvyko. Tai lėmė stabili pirmo ardo medžių, pušų būklė. Jie išlieka pagrindiniai buveinės edifikatoriai, lemiantys žolių ir samanų ardų būklę. Vis tik, aiškiai matyti, kad augavietė kinta iš kerpinio pušyno į brukninį ar mėlyninį. Daugėja derlingesniems pušynams būdingų mėlynių, lanksčiųjų šluotsmilgių, atžalinių gūžtvių. Samanų ir žolių danga tankėja, nyksta epigėjinės kerpės.

4.5. Žolinės augalijos kaitos KMS baseinuose apibendrinimas

Ilgalaikiai žolinės augalijos tyrimai Aukštaitijos, Žemaitijos ir Dzūkijos kompleksinio monitoringo stotyse parodė, kad apatinių miško ardų kaita pirmiausia atspindi natūralius medynų sukcesinius procesus, kuriuos pastaraisiais metais sustiprina klimato kaitos sąlygoti trikdžiai. Medžių rūšinės sudėties pokyčiai, brandžių medžių žūtis, lajų išretėjimas, eglių pomiškio formavimasis ir negyvos medienos kiekio didėjimas tampa pagrindiniais veiksniais, reguliuojančiais šviesos, drėgmės ir maisto medžiagų prieinamumą žoliniam, samanų ir kerpių ardams.

Aukštaitijos KMS rezultatai atskleidė dvi skirtingas miško vystymosi kryptis. Medyno išretėjimas dėl brandžių eglių ir beržų žūties sudarė sąlygas žolių ir krūmokšnių ardo plėtrai, didžiausiam rūšių skaičiui per visą stebėjimų laikotarpį ir šviesamėgių bei pionierinių rūšių gausėjimui. Priešingai, tankaus eglių pomiškio formavimasis sumažino šviesos patekimą į miško paklotę, dėl ko mažėjo daugelio žolinių augalų gausumas ir didėjo krūmų ardo dominavimas. Tai rodo, kad net tame pačiame regione medyno struktūros pokyčiai gali lemti priešingas apatinių ardų vystymosi kryptis.

Žemaitijos KMS žolinės augalijos pokyčiai buvo mažiau intensyvūs, nes viršutinio medžių ardo struktūra išliko santykinai stabili. Nepaisant aplinkiniuose medynuose registruoto eglių džiūvimo, žolių ir samanų ardų padengimas išliko artimas maksimalioms reikšmėms, o klimaksinėms miško bendrijoms būdingos rūšys išlaikė palankias augimo sąlygas. Tai rodo didesnį drėgnesnių ir produktyvesnių hemiborealinių eglynų atsparumą trumpalaikiams aplinkos pokyčiams.

Dzūkijos KMS po 27 metų pertraukos atnaujinti tyrimai parodė santykinį pušynų žolinės augalijos stabilumą, kurį palaikė išlikusi pirmojo medžių ardo struktūra. Tačiau nustatyta aiški ilgalaikė augavietės transformacijos kryptis – kerpiniams pušynams būdingų požymių mažėjimas ir perėjimas link brukninių bei mėlyninių pušynų. Didėjantis mėlynių, žolių ir samanų padengimas bei epigėjinių kerpių mažėjimas rodo palaipsnį augavietės derlingėjimą ir mikroklimato pokyčius.

Bendri KMS rezultatai patvirtina, kad žolinės augalijos pokyčiai nėra vien tik tiesioginė klimato kaitos ar atmosferinės taršos pasekmė. Didžiausią reikšmę turi kompleksinis poveikis, kai klimato ekstremumai, oro taršos pokyčiai ir natūrali medynų sukcesija pirmiausia keičia pagrindinius ekosistemos edifikatorius – medžius, o per jų lajų struktūrą, nuokritų kiekį, negyvos medienos kaupimąsi ir mikroklimatą transformuoja žemesniuosius augalijos ardus.

Nepaisant vykstančių pokyčių, KMS miško ekosistemų žolinė augalija išlaiko aukštą ekologinį atsparumą. Dauguma tipinių klimaksinių rūšių išlieka stabilios arba gausėja, o didėjanti negyvos medienos ir mikrobuveinių įvairovė sudaro sąlygas epiksilinių samanų bei kerpsamanių plitimui. Tačiau nustatyti rūšinės sudėties ir funkcinių grupių pokyčiai rodo prasidedančią ilgalaikę miško ekosistemų transformaciją, kurios kryptį ateityje daugiausia lems klimato ekstremumų dažnumas ir medynų gebėjimas išlaikyti stabilų mikroklimatą.

IŠVADOS

2021–2025 m. laikotarpiu vykdyti žolinės augalijos tyrimai Aukštaitijos, Žemaitijos ir Dzūkijos integruoto monitoringo stotyse indikuoja reikšmingus augalijos struktūros, rūšinės sudėties, projekcinio padengimo ir rūšių gausumo pokyčius. Detalesnė pokyčių analizė atskleidžia ne tik ilgalaikę miško ekosistemų sukcesinę raidą bet ir atskirų rūšių, ar jų grupių reakciją į natūralius bei antropogeninius aplinkos veiksnius.

Aukštaitija_100 poligone pastaraisiais metais stipriausiai veikė procesai susiję su dalies brandžių eglių ir beržų žūtimi. Dėl medyno išretėjimo žolių ir krūmokšnių ardo projekcinis padengimas išaugo iki didžiausių reikšmių per visą stebėjimų istoriją. Ypač padidėjo mėlynių, pievinio kupolio, miškinio lendrūno bei kai kurių pionierinių rūšių gausumas, atsirado naujų šviesamėgių ir trikdymams būdingų rūšių. Tiriamuosiuose laukeliuose registruotas didžiausias žolių ardo rūšių skaičius nuo stebėjimų pradžios. Bet sumažėjo kai kurių skurdesnėms ir stabilesnėms sąlygoms būdingų rūšių, pavyzdžiui bruknių ar šliaužiančiųjų sidabriukių, gausumas. Po medžių žūties ir padidėjusios nuokritų gausos 2022–2024 m. buvo stebėtas laikinas samanų projekcinio padengimo sumažėjimas, tačiau 2025 m. jau registruotas ryškus atsistatymas. Kartu išaugo epiksilinių samanų, kerpsamanių ir kerpių įvairovė. Šie pokyčiai rodo, kad poligone vyksta aktyvi miško bendrijos restruktūrizacija po medžių žūties sukeltų pažaidų.

Aukštaitija_102 poligone stebėti priešingos krypties pokyčiai. Čia toliau ryškėjo tankaus eglių pomiškio dominavimas po ankstesnių pirmojo medžių ardo retinimųsi. Tankus eglių pomiškis sumažino apšvietimą, kritulių ir maisto medžiagų prieinamumą, pakeitė nuokritų pobūdį ir dirvožemio chemines savybes. Dėl šio proceso krūmų ardas tapo dominuojančiu, o žolių ardo projekcinis padengimas sumažėjo iki mažiausių reikšmių per visą stebėjimų laikotarpį. Daugumos būdingų rūšių – mėlynės, kiškiakopūsčio, medutės, paparčių, asiūklių ir kitų – gausumas bei aptikimo dažnumas sumažėjo. Drėgnesnių atviresnių vietų augalija buvo neigiamai paveikta neįprastai aukšto gruntinio ir paviršinio vandens lygio 2024–2025 metais, kuomet dalis laukelių buvo užsemti. Kai kurios krūmų rūšys, ypač paprastasis šaltekšnis, žolių arde išliko labai gyvybingos ir ženkliai gausėjo. Tai leidžia

prognozuoti, kad artimiausiais metais krūmų ardo mozaikiškumas didės bet jis išliks dominuojantis, o žolių ardo atsikūrimas vyks lėtai. Samanų ardo būklė taip pat buvo prastesnė nei Aukštaitija_100 poligone. Epigėjinių samanų projekcinis padengimas išliko sumažėjęs, tačiau tuo pat metu sparčiai didėjo epiksilinių samanų gausa bei rūšinė įvairovė. Tai rodo, kad vykstant medyno kaitai ir gausėjant negyvos medienos kiekiui formuojasi naujos mikrobuveinės, kompensuojančios dalies epigėjinių rūšių nykimą.

Žemaitijos intensyvaus monitoringo stacionare pastaruoju laikotarpiu stebėti mažesnio masto augalijos pokyčiai nei Aukštaitijos poligonuose. Nepaisant šalimais registruoto intensyvaus eglių džiūvimo, poligono teritorijoje virš tiriamųjų laukelių esančių medžių ardas sumažėjo neženkliai. Krūmų ardas tyrimų vietovėje išliko stabilus. Žolių ir samanų ardų būklė buvo nepastovi, bet bendras vidutinis padengimas išlieka arti maksimalaus. Palankiausios sąlygos buvo kiškiakopūsčiams, miškinei septynikei, atžalinei gūžtvei. Labai nepalankus laikotarpis buvo dvilapėms medutėms, taip pat didžiajai dvyndantei.

Dzūkijos intensyvaus monitoringo stacionare 2025 m. atnaujinti botaniniai stebėjimai po 27 metų pertraukos. Išlikusi gana stabili pirmo ardo medžių, pušų, būklė palaikė gana stabilią žemesnių augalijos ardų struktūrą. Vis tik, aiškiai matyti, kad augavietė kinta iš kerpinio pušyno į brukninį ar mėlyninį. Daugėja derlingesniems pušynams būdingų mėlynių, lanksčiųjų šluotsmilgių, atžalinių gūžtvių. Samanų ir žolių danga tankėja, nyksta epigėjinės kerpės.

Apibendrinat, turimų rezultatai rodo, kad Žemaitijos, Dzūkijos ir Aukštaitija_100 poligonuose, dėl palaipsnio viršutinio medžių ardo retėjimo, ūkinės veiklos nebuvimo, mažo trikdymo – apatinių ardų augalija išlieka gana skurdi. Tačiau daugumas klimaksinių, šioms buveinėms tipingų rūšių šiuo metu klesti. Samanų ir krūmokšnių ardas daugelyje vietų ištisinis. Aukštaitija _102 poligone, dėl dominuojančio tankaus jaunų eglių pomiškio, nuokritų gausos - žolių ir samanų ardas vietomis beveik visai sunykęs. Bet dėl išaugusios substratų įvairovės ir poligono heterogeniškumo bendra augalijos įvairovė išlieka didžiausia. Remiantis tirtais augalijos parametrais, aiškiai matyti medynų sukcesinės kaitos įvairialypis poveikis žemesniems augalijos ardams. Žolių ir krūmokšnių, bei samanų ir kerpių ardų rūšinės sudėties, projekcinio padengimo ir dažnumo svyravimai iš esmės atspindi natūralią medynų sukcesiją, tiek tebesitęsiančią po ūkinės veiklos nutraukimo, tiek suintensyvėjusią po didesnių pažaidų medynuose. Labiau pionierinės medžių rūšys (pušys, beržai) po truputį retėja, užleisdamos vietą klimaksinėms rūšims (eglėms). Tai sukelia ryškius tiek apšvietimo, tiek ir mikroklimatinius pokyčius, kurie labiausiai ir veikia apatinių medyno ardų kaitą (4.0.7 pav). Kintantys nuokritų, negyvos medienos kiekiai, sąlygoja epiksilinių samanų ir kerpsamanių

įvairovės, gausumo, bei aptikimo dažnumo augimą. Nepaisant tebevykstančios medynų sukcesijos, taip pat akivaizdžiai matyti meteorologinių veiksnių (kritulių kiekio, vėjų, vidutinių temperatūrų, saulės aktyvumo) poveikis. Itin svarbūs ekstremalūs meteorologiniai veiksniai (užsitęsę sausros, vėtros, neįprastai žemos arba aukštos temperatūros), nes būtent po jų pasireiškimo stebimi didžiausi medynų ir visos augalijos pokyčiai. Tolimųjų oro pernašų sąlygotos taršos savitąjį poveikį konkrečioms rūšims išskirti sunku, nes tarša kartu paveikia visą ekosistemą. Kadangi ekosistema yra labai kompleksiška sistema, superorganizmas, su tolimosiomis oro pernašomis patenkančios taršos poveikis išsisklaido per visas ekosistemos komponentes. T.y. nesant pakankamai ilgos kompleksinių duomenų sekos, sunku įvertinti kiek konkretus oro taršos komponentas atskiras žemesnių ardų rūšis veikia tiesiogiai, ar per poveikį pagrindiniams edifikatoriams - medžiams. Todėl šiam tikslui pasiekti būtinas ne tik ilgalaikis nenutrūkstamas kompleksinių tyrimų tęstinumas, bet ir detalesnės kompleksinės duomenų analizės pasitelkiant šiuolaikinius dirbtinio intelekto įrankius. Jau dabar turimos santykinai ilgos ir kompleksinės duomenų sekos yra išskirtinai vertingos viso regiono lygmeniu.

Ilgalaikiai KMS žolinės augalijos tyrimai parodė, kad hemiborealinių miško ekosistemų apatinių ardų pokyčius pastaraisiais dešimtmečiais lemia ne pavieniai aplinkos veiksniai, bet kompleksinė klimato kaitos, mažėjančios atmosferinės taršos ir natūralios medynų sukcesijos sąveika. Medžių ardo struktūros pokyčiai, lemiantys šviesos režimo, mikroklimato, nuokritų ir negyvos medienos kiekio kaitą, tapo pagrindiniu mechanizmu, reguliuojančiu žolinės augalijos, samanų ir kerpių bendrijų transformaciją. Nepaisant registruojamų rūšinės sudėties ir funkcinių grupių pokyčių, dauguma tirtų miško ekosistemų išlaiko aukštą atsparumą, tačiau ateityje jų stabilumas vis labiau priklausys nuo gebėjimo išlaikyti medynų struktūrinę įvairovę ir stabilų mikroklimatą dažnėjančių klimato ekstremumų sąlygomis.

Galimos grėsmės žolinės augalijos stabilumui

Ilgalaikiai KMS tyrimai rodo, kad pagrindinė grėsmė žolinės augalijos bendrijoms yra susijusi ne su tiesioginiu rūšių išnykimu, bet su spartėjančia miško ekosistemų struktūrine transformacija klimato kaitos sąlygomis. Medynų sukcesijos krypties pokyčiai, medžių rūšių kaita, lajų struktūros persitvarkymas ir dažnėjantys ekstremalūs meteorologiniai reiškiniai gali reikšmingai pakeisti apatinių ardų vystymosi sąlygas.

Viena svarbiausių grėsmių yra klimato kaitos sukelta pagrindinių medyno edifikatorių destabilizacija. Dažnėjančios sausros, karščio bangos, kenkėjų protrūkiai ir ekstremalūs vėjo reiškiniai gali didinti brandžių medžių, ypač paprastosios eglės, žūtį. Staigus lajų išretėjimas keičia šviesos ir drėgmės režimą, skatindamas pionierinių bei konkurencingų rūšių plitimą ir mažindamas stabilioms miško sąlygoms prisitaikiusių rūšių konkurencinį pranašumą.

Kita galima grėsmė yra apatinių ardų homogenizacija. Nors bendras augalijos projekcinis padengimas gali išlikti didelis ar net didėti, ilgalaikėje perspektyvoje galimas specializuotų oligotrofinių ir jautrių miško rūšių mažėjimas, jas pakeičiant plačios ekologinės amplitudės rūšimis. Tai ypač aktualu nederlingiems pušynams, kuriuose stebimas kerpinių bendrijų traukimasis ir perėjimas link produktyvesnių brukninių bei mėlyninių bendrijų.

Tankaus eglių pomiškio formavimasis gali sukelti priešingos krypties pokyčius – perteklinį užpavėsinimą, žolių ir krūmokšnių ardo nykimą bei biologinės įvairovės sumažėjimą. Tokia tendencija jau stebima Aukštaitijos KMS 102 poligone, kur sumažėjęs apšvietimas ir pasikeitusios paklotės sąlygos riboja daugelio tipinių žolinių augalų vystymąsi.

Papildoma ilgalaikė rizika yra susijusi su atmosferinio azoto poveikiu ir augaviečių derlingumo didėjimu. Net sumažėjus bendroms atmosferinės taršos apkrovoms, ilgalaikis azoto kaupimosi efektas gali skatinti konkurencingesnių rūšių plitimą ir mažinti mažo maisto medžiagų kiekio sąlygoms prisitaikiusių rūšių dalį.

Apibendrinant galima teigti, kad pagrindinė ateities grėsmė hemiborealinių miškų žolinei augalijai yra ne bendros augalų dangos mažėjimas, bet palaipsnė rūšinės sudėties ir funkcinių grupių transformacija. Klimato kaitos sąlygomis didės rizika, kad stabilias, ilgai besiformavusias miško bendrijas pakeis dinamiškesnės, tačiau ekologiniu požiūriu paprastesnės ir mažiau specializuotos augalų bendrijos.

Tikėtinos žolinės augalijos kaitos prognozės

Remiantis ilgalaikiais KMS tyrimų rezultatais galima prognozuoti, kad artimiausiais dešimtmečiais hemiborealinių miškų žolinės augalijos pokyčius labiausiai lems klimato kaitos, medynų sukcesijos ir trikdžių sąveika. Kadangi žemesnieji augalijos ardai tiesiogiai priklauso nuo medžių ardo formuojamo mikroklimato, ateities pokyčių kryptį daugiausia nulems medynų gebėjimas išlaikyti stabilią struktūrą.

Miškuose, kuriuose vyks palaipsnė natūrali sukcesija ir išliks stabilus medžių ardas, tikėtinas lėtas perėjimas link brandesnėms bendrijoms būdingos struktūros. Didėjantis negyvos medienos kiekis ir mikrobuveinių įvairovė sudarys palankias sąlygas epiksilinių

samanų, kerpsamanių ir su brandžiais miškais susijusių rūšių plitimui. Tokiose ekosistemose bendras rūšių skaičius gali išlikti stabilus ar net didėti.

Tačiau dažnėjant klimato ekstremumams ir didėjant medžių pažaidoms, galimas spartesnis apatinių ardų persitvarkymas. Staigus lajų išretėjimas gali skatinti šviesamėgių, pionierinių ir konkurencingų žolinių rūšių plitimą, didinti bendrą projekcinį padengimą, tačiau kartu mažinti specializuotų, stabilioms miško sąlygoms prisitaikiusių rūšių dalį.

Aukštaitijos KMS rezultatai rodo, kad ateityje galimos dvi priešingos vystymosi kryptys: medžių žūties paveiktose vietose didės žolinio ardo produktyvumas ir rūšių kaita, o tankėjančio eglių pomiškio plotuose gali tęstis žolių bei krūmokšnių ardo slopinimas dėl mažėjančio apšvietimo ir pakitusios paklotės struktūros.

Žemaitijos KMS, dėl didesnio drėgmės kiekio ir produktyvesnių augaviečių, tikėtina ilgiau išlaikys stabilias žolinės augalijos bendrijas. Tačiau šio regiono ateitis stipriai priklausys nuo eglynų atsparumo klimato kaitai ir kenkėjų poveikiui. Didėjant eglių žūčiai, galima spartesnė rūšinės sudėties transformacija.

Dzūkijos KMS oligotrofiniai pušynai ateityje gali būti jautriausi ilgalaikiams pokyčiams. Tikėtinas tolesnis kerpinių pušynų transformavimasis į produktyvesnes bruknines–mėlynines bendrijas, didėjant samanų ir krūmokšnių dangai. Šis procesas gali būti spartinamas klimato šiltėjimo, azoto kaupimosi ir augaviečių sąlygų pokyčių.

Apibendrinant galima prognozuoti, kad ateityje žolinės augalijos pokyčiai pasireikš ne bendru biologinės įvairovės mažėjimu, bet bendrijų persitvarkymu. Didžiausią reikšmę įgis rūšių funkcinė sudėtis: mažės siaurai specializuotų rūšių dalis, o didės prie kintančių sąlygų prisitaikančių rūšių vaidmuo. Todėl žolinės augalijos rūšinės sudėties ir funkcinių grupių stebėsena taps vienu svarbiausių ankstyvųjų miško ekosistemų atsparumo klimato kaitai indikatorių.

PRIEDAI

4.1 priedas. Aukštaitija_100 poligono, žolių ardo rūšių projekcinis padengimas.

A100 žolės	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2012	2013	2014	2015	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	1993-2025	Stebėjimų sk.
CALA ARU	0.8	1.1	2.0	1.9	1.4	1.2	1.5	1.6	1.1	1.4	0.8	1.2	0.8	0.7	0.4	0.4	0.3	0.2	0.4	0.2	0.1		0.2	0.1	0.1	0.1	0.3	0.2	0.2	1.2	0.4	**0.7**	**30**
CONV MAJ	0.1	1.0	0.1		0.1	0.1	0.1	0.1				0.00	0.02	0.04	0.1	0.04	0.1	0.7	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	**0.1**	**27**
FEST OVI		0.2	0.3	0.3	0.2	0.2	0.1	0.4	0.3	0.2		0.2	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01														0.1	**0.2**	**16**
GOOD REP	0.2	0.3	0.3	0.9	0.7	0.4	0.3	0.2	0.2	0.2	0.1	0.9	0.2	0.1	0.2	0.1	0.0	0.1	0.4	0.2	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	**0.2**	**31**
LUZU PIL	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1			0.1	0.2		0.1	0.1	0.2	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.3	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0		**0.1**	**27**
MAJA BIF																															2.0	**2.0**	**1**
MELA PRA	0.2	0.6	0.6	1.1	0.3	0.8	0.1	0.5	0.4	0.3		0.1	0.1	0.0	0.1	0.02	0.02	0.04	0.5	0.8	0.6	0.6	0.1	0.4	0.7	1.0	0.9	0.4	0.8	0.8		**0.4**	**29**
MYCE MUR																														0.0	1.0	**0.5**	**2**
OXAL ACE																														0.1	0.7	**0.4**	**2**
PICE ABI												0.002						0.01										0.0	0.0	0.0	0.1	**0.0**	**6**
PINU SYL																												0.0			0.0	**0.0**	**2**
PTER AQU	1.2	1.6	2.3	1.6	2.3	1.6	1.3	0.3	1.6	1.4	1.4	1.5		0.8	1.2	0.7	0.1	0.2	2.1	2.0	0.4	0.1	0.2	0.3		0.2		1.5		0.9	1.0	**1.1**	**27**
RUBU IDA																														0.8	2.2	**1.5**	**2**
RUBU SAX															0.2														0.0			**0.1**	**2**
SALI CAP																													0.1	0.1	0.3	**0.2**	**3**
SAMB RAC																													1.6	0.4		**1.0**	**2**
SORB AUC	0.1	0.3	0.4	0.3	0.3	0.4	0.2	0.3	0.5	0.3	0.2	0.4	0.2	0.2	0.3	0.2	0.1		0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.3	0.5	0.5	0.6	0.6	**0.3**	**30**
STEL MED																														0.0		**0.0**	**1**
TRIE EUR	0.1	0.1	0.1		0.2	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.2	0.3	0.4	0.2	0.3	0.5	0.5	0.3	0.2	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.5	0.3	0.2	**0.2**	**30**
VACC MYR	7.1	9.1	13.1	10.7	11.9	8.1	10.5	9.7	8.2	8.0	8.3	10.2	8.7	9.4	8.0	10.1	7.5	6.0	9.7	9.5	8.8	11.7	14.7	9.1	9.4	12.9	13.6	12.5	12.5	14.9	17.4	**10.4**	**31**
VACC VIT	0.5	0.6	0.8	1.0	0.8	0.9	0.8	0.6	0.5	0.4	0.3	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	**0.3**	**31**
Rūšių sk.	**10.0**	**11.0**	**11.0**	**9.0**	**11.0**	**11.0**	**10.0**	**10.0**	**10.0**	**10.0**	**7.0**	**12.0**	**10.0**	**11.0**	**12.0**	**11.0**	**11.0**	**10.0**	**10.0**	**10.0**	**10.0**	**9.0**	**10.0**	**10.0**	**9.0**	**10.0**	**9.0**	**12.0**	**13.0**	**17.0**	**16.0**	**10.7**	**10.7**

4.2 priedas. Aukštaitija_100 poligono, samanų - kerpių ardo rūšių projekcinis padengimas.

A100 samanos	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2012	2013	2014	2015	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	1993-2021	Stebėjimų sk.
BARC SAL	0.2	0.3	0.2	0.2		0.1	0.1	0.2	0.1	0.1															0.1							**0.2**	**10**
BRAC OED	0.1	0.3	0.2	0.3	0.2	0.7	0.1	0.2	0.1			0.3	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0				0.1		0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0			0.1	**0.1**	**23**
DICR POL	1.3	1.2	1.7	1.3	1.3	1.0	1.0	1.0	0.8	0.5	0.4	0.5	0.2	0.3	0.3	0.4	0.2	0.2	2.1	0.3	0.3	0.5	0.7	0.9	1.0	0.7	1.0	1.4	0.5	0.4	0.4	**0.8**	**31**
DICR SCO												0.1	0.0	0.0		0.0							0.8	0.0	0.0	0.0	0.0		0.0	0.1	0.2	**0.1**	**12**
HYLO SPL	35.1	33.9	33.8	40.2	37.7	36.0	48.8	40.5	44.5	43.8	33.9	39.9	40.9	43.2	39.6	51.4	55.0	57.1	49.2	42.2	54.7	43.8	61.1	55.8	50.8	52.7	51.9	51.8	52.2	53.3	55.3	**46.1**	**31**
LOPH HET	0.2	0.3	0.4	0.3	0.1								0.0	0.0	0.0		0.0								0.1		0.0					**0.1**	**11**
PLAG CUR											0.1	0.1	0.0	0.0																		**0.0**	**4**
PLAG DEN	0.1	0.1	0.3	0.1	0.1		0.2				0.1			0.0	0.0	0.0	0.0									0.0	0.0					**0.1**	**13**
PLEU SCH	13.7	12.9	13.4	13.6	17.5	13.1	14.7	12.7	19.7	13.8	12.0	20.6	22.8	16.9	19.5	20.4	14.1	15.5	14.3	10.1	6.6	10.1	10.0	12.1	12.7	8.6	8.3	5.0	6.3	3.9	9.7	**13.1**	**31**
POLY FOR																									0.4							**0.4**	**1**
PTIL CRI	18.2	19.8	19.1	16.6	17.9	13.4	14.6	14.8	17.6	14.5	10.4	10.5	12.8	13.8	20.7	19.0	18.3	20.9	20.2	18.3	19.0	18.7	23.5	19.4	23.0	30.3	24.3	23.2	20.3	20.3	22.6	**18.6**	**31**
Rūšių sk.	**8.0**	**8.0**	**8.0**	**8.0**	**7.0**	**6.0**	**7.0**	**6.0**	**6.0**	**5.0**	**6.0**	**7.0**	**8.0**	**9.0**	**7.0**	**7.0**	**7.0**	**4.0**	**4.0**	**4.0**	**5.0**	**4.0**	**6.0**	**6.0**	**9.0**	**7.0**	**8.0**	**5.0**	**5.0**	**5.0**	**6.0**	**11.0**	

4.3 priedas. Aukštaitija_102 poligono, žolių ardo rūšių projekcinis padengimas. I dalis

A102a žolės	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2012	2013	2014	2015	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	1994-2021	Stebėjimų sk.
ACER PLA	0.50	0.50	0.50	1.00	1.10	1.00	1.20	1.30	1.10	1.20	0.90	0.00	0.50	-	0.64	0.01	0.30	0.10	0.07	0.06	-	-	-	-	-	-	-	0.04	0.02	0.04	**0.4**	**22**
AEGO POD	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.00	-	0.16	0.06	0.06	0.44	0.96	0.24	-	0.08	0.12	0.22	0.08	0.12	0.62	0.40	-	-	**0.1**	**14**
ALNU GLU	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.03	-	-	-	-	-	-	-	-	**0.0**	**1**
ATHY FIL	0.60	0.60	1.00	0.60	1.00	0.80	0.30	1.00	1.00	0.90	1.10	0.34	1.30	1.70	1.10	0.30	0.30	1.52	0.09	0.64	0.21	0.01	0.36	0.38	0.46	0.19	0.19	0.39	0.20	0.32	**0.6**	**30**
BETU PUB	0.20	0.10	0.20	0.20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	**0.0**	**5**
C CESPIT	-	-	-	0.10	0.10	-	-	-	-	-	-	0.02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.01	-	0.01	-	-	0.01	0.02	-	-	**0.0**	**7**
C DIGIT	0.50	0.40	0.40	0.20	0.30	0.40	0.30	0.60	0.30	0.50	0.20	0.40	0.50	0.80	1.10	0.60	1.20	1.41	0.70	0.67	0.45	0.63	0.48	0.47	0.34	0.33	0.24	0.26	0.24	0.28	**0.5**	**30**
C LOLIAC	0.20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	**0.0**	**1**
C REMOT	-	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	-	0.04	0.08	0.40	0.20	0.40	0.30	-	0.21	0.26	0.16	0.08	0.08	0.10	0.04	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	**0.1**	**27**
CARD AMA	-	-	-	-	-	0.10	-	-	-	-	0.02	0.01	0.01	0.20	0.04	-	-	0.01	-	-	-	0.01	-	-	-	-	-	-	-	-	**0.0**	**8**
CHRY ALT	-	-	-	-	0.10	3.00	0.30	0.20	0.10	0.10	0.05	0.04	0.01	0.10	0.50	0.20	0.04	-	0.02	0.01	0.01	0.22	0.20	0.14	0.20	0.30	0.12	0.20	0.16	0.46	**0.2**	**25**
CIRC ALP	1.80	3.30	1.40	1.90	2.20	2.30	1.80	1.40	1.50	1.60	0.80	2.80	3.00	2.80	1.70	0.70	2.20	1.80	1.44	1.08	0.86	1.89	1.01	1.10	0.74	0.71	0.55	0.29	0.22	0.17	**1.5**	**30**
CIRS OLE	-	0.60	0.90	0.10	0.20	0.10	0.30	0.30	0.80	0.30	0.30	0.70	0.80	0.70	0.33	0.05	0.60	0.56	-	0.98	0.40	2.18	1.54	2.40	1.55	1.98	2.06	0.64	0.88	0.87	**0.8**	**28**
CYST FRA	0.30	0.20	0.20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.27	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	**0.0**	**4**
CONV MAJ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.18	0.16	**0.0**	**2**
CORY AVE	-	-	-	-	-	-	0.20	0.40	-	-	0.02	0.30	1.20	1.50	1.10	0.20	1.00	0.08	2.17	2.08	2.08	0.17	-	0.12	0.08	0.80	0.87	0.60	1.08	0.72	**0.6**	**21**
CREP PAL	0.60	0.20	0.50	0.30	0.80	0.40	0.50	0.50	0.60	0.40	0.80	0.60	1.20	1.00	1.80	0.70	0.70	0.92	0.63	1.38	1.06	0.69	0.83	0.72	0.97	0.60	0.49	0.33	0.35	0.10	**0.7**	**30**
DAPH MEZ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.13	0.08	0.12	0.12	0.14	0.20	0.14	0.06	0.06	**0.0**	**10**
DRYO CAR	7.40	7.10	5.40	9.50	6.60	7.00	1.30	0.70	0.70	0.10	0.30	0.40	0.90	1.02	0.65	0.50	1.10	0.40	1.79	1.04	-	0.71	0.94	0.34	0.23	0.25	0.16	0.36	0.49	0.59	**1.9**	**29**
DRYO DIL	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.50	3.50	2.00	4.02	0.90	1.90	1.50	2.30	1.82	2.83	1.14	0.33	0.30	0.05	-	0.10	-	0.08	-	**0.8**	**16**
DRYO EXP	-	-	1.00	0.50	1.00	-	-	-	-	0.40	1.90	2.80	1.40	1.30	0.60	1.20	0.20	0.72	0.35	-	-	0.44	-	0.70	0.83	1.24	0.87	0.52	0.50	0.16	**0.6**	**21**
DRYOPTEZ	7.40	7.10	6.40	####	7.60	7.00	1.30	0.70	0.70	0.50	2.20	5.70	5.80	4.32	5.27	2.60	3.20	2.62	4.45	2.86	2.83	2.29	1.27	1.34	1.11	1.51	1.26	0.88	1.07	0.80	**3.4**	**30**
ELYM CAN	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.02	0.02	0.00	0.06	0.00	0.02	-	-	0.02	0.06	0.00	0.10	-	0.01	-	-	-	-	-	-	**0.0**	**11**
EQUI PRA	2.10	4.50	3.70	3.30	5.40	4.70	6.80	6.60	6.10	6.60	4.30	3.90	4.60	5.90	5.24	4.04	3.10	7.31	2.91	4.50	3.72	3.71	2.73	1.59	1.23	1.53	1.30	0.95	0.97	1.65	**3.8**	**30**
EQUI SYL	0.90	1.10	0.20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-					**0.1**	**3**
EUON VER	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.13	-	-	-	-	-	-	-	-	**0.0**	**1**
FRAG VES	-	-	-	0.10	0.10	0.10	-	0.20	-	-	0.10	0.02	0.04	0.10	0.20	0.06	0.02	0.04	0.05	0.04	0.01	0.02	-	-	-	-	-	-	-	-	**0.0**	**16**
FRAN ALN	0.10	0.80	0.30	0.50	1.00	0.60	0.80	-	0.50	0.70	0.20	0.12	0.20	0.30	0.22	0.12	-	0.06	0.98	0.18	0.20	0.64	0.88	1.27	0.93	1.43	1.07	1.18	2.06	2.61	**0.7**	**28**
FRAX EXC	1.70	1.90	0.50	0.40	0.60	0.10	0.10	0.20	0.30	-	0.10	0.16	0.00	-	0.02	-	-	-	0.01	0.02	0.02	-	0.12	0.20	0.14	0.08	0.60	0.68	0.44	0.32	**0.3**	**24**
GERA ROB	-	-	-	-	0.10	0.10	0.10	-	-	-	-	-	-	-	0.02	0.04	0.06	0.01	0.02	0.01	0.01	-	0.03	0.07	0.01	0.02	0.02	-	-	-	**0.0**	**15**
GEUM RIV	-	-	-	0.20	-	-	-	-	-	-	-	0.12	-	0.12	0.06	0.04	-	0.12	0.04	-	-	-	0.08	0.12	0.12	0.12	0.08	0.08	0.16	0.38	**0.1**	**15**

4.3 priedas. Aukštaitija_102 poligono, žolių ardo rūšių projekcinis padengimas. II dalis

A102b žolės	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2012	2013	2014	2015	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	1994-2021	Stebėjimų sk.
GEUM URB	-	-	0.30	1.00	0.70	0.50	4.50	5.70	5.80	3.10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-					**0.8**	**8**
GYMN DRY	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	**0.0**	**1**
GLEC HED	0.20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	**0.0**	**1**
GOOD REP	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.01	0.01	0.02	0.00	**0.0**	**4**
HUPE SEL	0.80	0.50	-	0.10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	**0.0**	**3**
IMPA NOL	0.40	0.30	0.30	0.20	-	0.10	0.30	0.40	0.10	-	0.06	0.01	0.10	0.08	0.01	0.06	0.10	0.28	0.24	0.34	0.48	1.04	0.36	0.24	0.37	0.12	0.26	0.16	-	-	**0.2**	**26**
LAMI GAL	0.80	1.00	1.40	2.00	2.40	3.30	5.90	3.30	2.00	2.20	1.10	0.90	1.40	2.30	1.50	1.04	1.34	2.33	2.82	2.70	2.09	2.69	1.47	1.35	1.19	1.83	1.95	1.42	0.82	0.93	**1.9**	**30**
LYCO ANN	0.70	1.70	1.80	1.20	2.50	2.60	3.40	2.70	2.40	2.60	1.50	1.70	1.40	1.40	1.60	0.90	2.04	0.86	0.30	0.20	0.21	0.73	0.38	0.30	0.20	0.24	0.09	0.02	0.02	-	**1.2**	**29**
LYSI VUL	-	0.10	-	-	-	-	0.10	-	-	-	0.01	0.02	0.01	0.01	0.00	-	-	-	-	-	0.01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	**0.0**	**8**
LONI XYL	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.05	-	-	-	-	-	-	-	**0.0**	**1**
LUZU PIL	0.20	0.30	0.10	0.20	0.10	0.10	0.20	0.40	0.40	0.20	0.30	0.20	0.20	0.30	0.40	0.40	0.20	0.12	0.17	0.15	0.10	0.38	0.21	0.12	0.09	0.17	0.08	0.10	0.10	0.08	**0.2**	**30**
MAJA BIF	1.80	2.60	2.70	3.10	2.60	3.60	4.80	4.80	4.20	4.90	5.40	3.60	3.50	4.00	3.30	2.50	1.40	2.14	2.38	1.76	1.56	1.59	1.08	0.70	0.70	0.80	0.76	0.72	0.83	0.55	**2.5**	**30**
MELA PRA																												0.02	0.01	-	**0.0**	**2**
MELI NUT	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.04	0.04	0.08	0.04	0.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	**0.0**	**5**
MERC PER	4.7	6.8	5.7	7.7	6.2	7.1	10.0	10.7	11.0	9.5	10.5	9.0	8.3	6.4	8.1	7.1	6.1	10.9	12.5	13.8	11.3	12.1	8.9	10.5	9.54	11.9	11.2	11.1	10.6	7.10	**9.2**	**30**
MYCE MUR	0.30	0.50	0.20	0.20	0.30	0.20	0.40	0.70	0.10	0.10	0.40	0.10	0.03	-	0.50	0.05	0.02	0.02	0.02	0.01	-	0.10	0.09	0.07	0.03	0.16	0.10	-	0.01	-	**0.2**	**26**
MILI EFF	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.04	-	-	-	-	-	0.02	-	-	-	-	**0.0**	**2**
ORTH SEC	-	-	0.10	0.10	0.10	-	-	0.10	-	-	0.01	0.02	0.02	0.01	-	-	-	-	0.04	-	-	-	-	-	-	-					**0.0**	**9**
OXAL ACE	15.7	29.6	21.8	20.0	21.8	14.7	15.4	15.7	11.4	10.6	12.4	9.80	8.60	9.70	8.47	7.70	8.90	8.61	8.49	8.52	8.11	9.68	4.16	4.08	4.89	6.48	6.71	4.53	3.53	3.30	**10.8**	**30**
PARI QUA	0.10	0.10	0.10	0.10	-	0.10	0.10	0.10	0.10	-	0.08	0.14	0.08	0.13	0.14	0.05	0.03	0.14	0.01	0.03	0.03	0.06	0.01	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	-	**0.1**	**27**
PICE ABI	3.70	6.20	6.90	4.50	6.70	6.80	8.30	5.70	7.70	7.70	7.40	8.10	9.90	13.5	15.7	12.3	20.9	20.3	12.1	15.8	21.7	15.4	8.5	8.37	8.06	8.16	7.90	8.74	7.45	7.00	**10.0**	**30**
PINU SYL	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.00	0.00	0.00	-	-	-	-	-	-	-	-	**0.0**	**3**
POA PAL	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.06	0.01	0.03	0.16	0.05	0.06	0.00	0.10	**0.0**	**8**
POPU TRE	-	-	-	-	-	0.10	0.40	0.10	-	0.20	0.10	0.20	0.02	0.70	0.30	0.30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-					**0.1**	**10**
PRUN PAD	-	-	-	-	-	-	0.20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.42	0.56	0.80	0.32	0.48	0.12	0.40	0.18	0.22	**0.1**	**10**
RUBU IDA	2.10	4.10	3.40	4.20	4.60	3.70	5.40	5.00	3.00	4.40	2.70	3.00	0.90	1.10	1.40	0.80	1.10	0.48	0.50	0.66	1.76	1.31	0.74	0.93	0.97	0.84	0.66	0.35	0.51	0.18	**2.0**	**30**
RUBU SAX	1.90	2.00	2.30	2.60	3.90	2.90	5.00	3.80	3.30	4.30	2.20	2.50	2.70	2.80	3.30	1.40	1.80	1.82	1.63	1.23	1.14	1.85	1.19	1.36	1.26	1.41	1.17	0.94	0.85	0.70	**2.2**	**30**
SOLA DUL	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.02	-	0.06	-	-	-	-	-	0.08	-	**0.0**	**3**
SORB AUC	2.30	1.50	1.70	3.60	5.90	5.70	5.30	4.00	5.80	3.90	4.70	6.20	4.40	7.40	6.80	4.40	2.80	3.02	3.37	2.83	1.74	2.31	1.90	2.08	2.12	1.08	1.42	1.29	1.32	0.74	**3.4**	**30**
STEL NEM	0.40	0.10	0.20	0.30	0.60	0.50	0.70	0.70	0.30	0.20	0.30	0.20	0.20	0.30	0.30	0.20	0.30	0.36	0.42	0.18	0.03	0.42	0.72	0.29	0.28	0.24	0.54	0.29	0.19	0.22	**0.3**	**30**
TRIE EUR	0.30	0.20	0.30	0.20	0.20	0.10	0.20	0.30	0.30	0.40	0.30	0.14	0.30	0.30	0.20	0.20	0.10	0.22	0.16	0.23	0.18	0.38	0.10	0.07	0.05	0.05	0.01	0.04	0.02	0.02	**0.2**	**30**
TUSS FAR	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.08	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	**0.0**	**1**
URTI DIO	0.20	0.20	0.10	0.10	0.60	0.60	1.30	0.50	0.40	0.10	0.20	0.07	0.02	0.30	0.01	0.12	0.10	0.06	0.20	0.02	0.06	0.02	-	-	-	-	-	-	-	-	**0.2**	**22**
VACC MYR	2.20	4.00	4.00	5.90	4.80	5.30	8.30	7.30	6.70	5.60	6.30	4.90	5.30	6.60	5.41	5.00	1.40	1.31	2.49	1.93	2.22	2.18	1.75	1.87	1.96	1.32	0.59	0.61	0.71	0.64	**3.6**	**30**
VACC VIT	0.20	0.10	0.20	0.20	-	0.10	0.10	0.10	0.10	-	0.05	0.01	0.04	0.02	0.40	0.01	-	0.02	0.01	0.04	-	0.02	0.01	-	-	-	-	-	-	-	**0.1**	**19**
VIOL EPI	-	-	-	-	0.10	0.10	0.10	0.20	0.10	0.10	0.08	0.03	0.06	0.04	0.03	0.02	0.04	0.06	0.01	0.08	0.02	0.04	0.03	-	-	-	-	-	-	-	**0.0**	**19**
VIOL MIR	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.02	0.02	0.030	0.02	0.02	0.02	0.01	**0.0**	**7**
VIOL PAL	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.02	-	0.02	-	-	0.00	-	0.08	-	-	-	-	-	-	-	-	**0.0**	**4**
VIOL RIV	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.01	0.02	0.06	0.10	0.08	0.04	0.10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			**0.0**	**7**
VIOLA Z	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.01	-	-	**0.0**	**1**
COUNT-1	**33**	**34**	**35**	**37**	**34**	**36**	**37**	**35**	**32**	**29**	**41**	**46**	**43**	**40**	**45**	**40**	**35**	**37**	**41**	**41**	**35**	**43**	**38**	**39**	**37**	**37**	**39**	**39**	**39**	**33**	**37.7**	**30**

4.4 priedas. Aukštaitija_102 poligono samanų - kerpių ardo rūšių projekcinis padengimas.

A102 samanos	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2012	2013	2014	2015	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	1994-2021	Stebėjimų sk.
BRAC MIL	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.08	-	-	-	-	-	0.0	1
BRAC OED	15.70	15.60	13.90	####	7.40	5.90	####	8.30	4.00	4.10	5.90	2.40	2.00	3.70	5.80	7.06	3.70	7.24	3.14	3.88	3.97	6.48	4.91	4.14	3.43	3.02	1.53	1.53	1.62	2.16	5.8	30
BRAC RIV	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.30	-	-	-	-	0.1	1
BRAC RUT	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.38	0.26	0.44	0.40	0.38	0.50	0.4	6
BRAC SAL	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.04	0.64	-	-	-	-	-	-	0.0	2
BRAC STA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.03	0.0	1
BRAC VEL	0.10	0.10	-	-	-	-	-	-	-	.	0.02	0.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0	4
CIRR PIL	0.50	0.40	0.30	0.70	0.30	0.50	0.50	0.70	0.20	0.40	0.50	0.60	0.14	0.60	0.40	1.70	1.20	1.47	0.70	1.14	1.44	0.58	0.67	0.95	1.08	1.24	0.60	0.19	0.47	0.66	0.7	30
CROS AUT	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.02	-	-	-	-	-	0.0	1
DICR POL	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.40	0.30	0.40	0.20	0.40	0.40	0.40	0.40	0.85	0.72	1.80	0.80	0.70	0.17	0.08	0.18	0.42	0.26	0.46	0.56	0.56	0.44	0.42	0.61	0.56	0.4	30
DICR SCP	1.20	2.00	1.10	1.10	1.10	1.50	1.20	1.30	1.50	1.30	1.40	1.50	2.04	1.20	1.10	0.70	1.00	0.71	0.81	0.40	0.61	0.91	0.40	0.73	0.74	0.79	0.48	0.45	0.46	0.52	1.0	30
Epiksilinės	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.67	2.34	3.77	4.92	5.11	7.38	7.46	4.8	7
EURH ANG	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.08	0.1	1
HERZ SEL	0.20	0.20	0.40	0.60	0.20	0.10	0.10	0.10	-	-	0.02	-	-	0.02	0.01	-	-	-	-	-	-	-	0.06	0.31	0.20	0.04	0.05	-	0.01	-	0.1	17
HYLO SPL	0.60	0.60	0.20	0.60	0.30	0.30	0.30	0.30	0.10	0.20	0.30	0.14	0.20	0.20	0.30	0.50	1.00	0.36	0.22	0.19	0.63	0.75	0.69	0.69	0.70	0.94	0.38	0.47	0.61	0.50	0.4	30
HYPN CUP	0.10	0.10	0.10	0.10	0.20	0.10	0.10	0.10	-	-	0.04	-	-	-	-	-	-	1.87	-	-	-	-	0.16	-	-	-	0.02	-	-	-	0.1	12
LEPI REP	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.02	-	-	-	-	-	-	0.0	1
LOPH HEP	0.10	0.10	-	0.10	-	-	-	0.10	-	-	0.02	0.02	0.01	0.03	0.02	-	-	-	-	-	-	-	0.10	0.09	0.08	-	-	-	-	-	0.0	12
MARC POL	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.08	0.31	0.33	0.10	0.12	0.01	-	-	-	-	-	0.0	6
NOWE CUR	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.04	0.18	-	-	-	-	-	-	0.0	2
PLAG AFF	7.00	4.70	3.80	4.60	2.90	3.00	4.90	5.60	4.60	3.60	1.90	3.30	1.30	1.90	4.30	3.10	3.50	3.51	1.60	2.51	0.64	4.71	1.42	1.26	1.62	2.42	2.07	1.70	2.62	3.46	3.1	30
PLAG ASP	2.40	1.40	2.30	3.20	2.00	1.70	3.00	3.50	3.70	1.90	1.60	1.80	1.40	1.20	3.00	2.70	2.60	1.87	1.50	1.75	0.94	2.02	1.36	1.58	1.05	1.84	1.02	0.88	0.88	2.07	1.9	30
PLAG CUR	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.02	0.00	0.01	-	0.0	3
PLAG CUS	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	-	0.05	0.0	6
PLAG DEN	0.30	0.50	0.20	0.20	-	-	0.10	0.10	-	0.10	0.05	0.04	0.01	0.04	0.06	0.01	-	-	-	-	0.01	0.08	0.10	-	0.00	-	0.03	0.00	-	-	0.1	19
PLAG ELI	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.02	0.03	0.03	0.01	-	-	-	0.0	4
PLAG LAE	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.01	0.04	0.00	0.00	0.02	0.02	0.0	6
PLAG UND	1.10	2.00	1.70	3.00	1.00	0.60	1.80	1.20	1.70	1.30	1.40	1.00	0.20	1.00	0.90	0.70	1.70	2.48	0.97	1.90	1.50	1.46	0.87	1.40	1.23	1.00	0.76	0.96	1.27	1.74	1.3	30
PLEU SCH	2.10	3.00	2.90	2.90	2.20	3.80	7.40	6.00	5.30	4.70	6.30	3.60	1.80	1.00	2.10	2.40	3.60	2.74	1.37	1.21	1.14	1.86	1.24	1.96	1.47	1.01	0.61	0.55	0.59	0.64	2.6	30
POHL NUT	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.00	-	-	-	-	0.0	1
POLY FOR	-	-	-	-	-	-	-	-	0.10	-	0.06	0.04	-	0.02	-	-	0.20	-	-	-	-	-	-	-	0.02	0.06	0.01	0.02	0.06	0.08	0.0	11
POLY LON	-	0.10	0.10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0	2
PTIL CRI	0.10	-	-	0.10	-	-	-	0.10	-	-	0.03	0.02	0.01	0.04	0.14	0.06	-	-	-	-	-	0.02	-	0.04	0.00	-	0.04	-	-	-	0.0	13
PTIL PUL	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.02	-	-	-	-	-	-	0.0	1
RADU COM	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.01	-	-	-	-	-	-	0.0	1
RHYT TRI	0.20	0.70	0.70	0.30	1.00	0.20	0.50	0.30	0.10	0.20	0.50	0.10	0.50	0.40	0.99	0.80	1.20	2.17	-	0.20	0.67	0.55	0.99	1.77	1.80	1.81	1.26	1.03	1.18	1.09	0.8	29
RHIZ PUN	0.60	0.20	-	-	-	-	-	-	-	0.10	0.10	0.10	0.00	0.04	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.1	7
RHOD ROS	-	-	-	-	-	0.10	0.10	0.10	-	-	0.06	0.05	0.05	0.03	0.13	0.11	0.80	0.28	-	0.16	0.03	0.45	0.29	0.36	0.31	0.49	0.20	0.45	0.30	0.50	0.2	22
RICC LAT	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.02	-	-	-	-	-	-	0.0	1
SANI UNC	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.14	0.32	0.16	0.02	-	-	-	-	0.0	4
SPH GIR	-	-	-	-	-	0.40	-	0.20	0.40	-	0.20	0.01	0.02	0.02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.1	7
TETR PEL	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.00	0.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.02	0.10	0.12	-	-	-	-	-	0.0	5
THUI DEL	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0	1
THUI TAM	1.60	1.60	1.60	0.90	0.10	0.30	0.20	0.30	0.10	0.10	0.20	0.10	0.10	0.02	0.02	0.10	0.10	0.12	-	0.28	0.30	0.21	0.26	0.25	0.32	0.46	0.40	0.30	0.30	0.60	0.4	29
Rūšių sk.	18	18	15	16	13	15	15	18	13	14	22	19	17	19	17	14	13	13	9	13	14	15	21	27	27	22	23	19	18	19	17.2	30

4.5 priedas. Žemaitija_100 poligono žolių ardo rūšių projekcinis padengimas.

Z100 žolės	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2012	2013	2014	2015	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	1994-2021	Stebėjimų sk.
VACC MYR	13.0	7.5	19.3	24.3	14.3	21.8	22.0	24.3	19.0	23.7	29.9	22.1	23.0	25.0	35.8	29.2	28.1	34.8	36.0	42.0	37.1	40.1	33.6	38.0	38.5	45.1	27.5	35.4	33.7	30.9	**28.50**	**30**
MAJA BIF	6.1	4.7	11.2	10.6	6.8	10.2	7.8	10.4	9.9	12.3	12.0	10.3	9.7	10.0	10.1	8.5	8.8	12.2	11.0	10.8	7.8	4.5	2.5	3.1	2.4	3.8	3.1	3.0	3.8	3.5	**7.70**	**30**
OXAL ACE	2.2	4.1	10.3	10.2	6.8	12.6	4.5	7.8	6.2	3.9	7.2	3.8	2.3	0.9	1.2	1.9	3.6	4.9	6.7	9.0	12.8	11.8	1.2	2.6	8.9	16.2	14.7	5.8	16.1	17.7	**7.26**	**30**
DESC FLE	3.3	2.4	4.7	4.1	2.4	2.8	2.2	2.5	2.5	1.9	1.3	0.9	1.1	1.9	2.4	2.5	5.9	5.9	6.5	6.7	6.7	3.9	2.3	1.7	2.2	2.6	3.2	2.6	2.2	1.3	**3.09**	**30**
TRIE EUR	1.2	1.1	1.7	1.4	0.8	1.0	1.1	1.2	1.1	1.0	1.1	1.0	1.1	1.0	0.9	1.2	1.3	1.5	1.7	1.8	2.0	1.7	0.9	1.2	0.9	1.7	1.8	1.5	1.5	2.8	**1.34**	**30**
LUZU PIL	0.1	0.3	0.8	0.9	0.8	1.1	0.2	0.2	0.3	0.4	0.5	0.7	0.2	0.0	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	1.0	0.5	0.2	0.1	0.2	0.4	0.3	0.1	0.2	0.6	**0.39**	**30**
MELA PRA	0.1	0.2	0.8	1.2	0.4	0.8	0.4	0.2	0.1	-	0.1	0.0	-	0.1	0.3	0.2	0.1	0.2	0.0	0.1	0.0	0.7	0.6	0.4	1.2	0.5	0.7	0.3	0.8	0.6	**0.37**	**28**
MYCE MUR	-	-	-	-	0.1	-	-	-	0.1	0.3	0.4	0.4	0.0	0.2	0.1	0.2	0.2	0.1	0.1	0.0	0.3	2.8	0.0	0.1	0.3	0.6	0.2	0.1	0.1	0.1	**0.23**	**23**
VACC VIT	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.3	0.2	0.1	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.1	0.7	0.1	0.3	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	**0.18**	**30**
PICE ABI	0.1	-	0.1	0.1	0.1	0.1	-	-	-	-	0.0	0.0	0.0	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-	0.3	0.0	0.0	1.7	0.3	0.1	0.1	0.1	0.1	**0.12**	**24**
CALA ARU	-	-	0.6	0.3	0.5	0.2	0.2	0.1	0.2	-	0.1	0.2	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	**0.11**	**14**
RUBU IDA	-	-	0.1	-	0.2	-	-	-	0.1	-	0.2	0.0	0.1	-	-	-	-	0.1	0.1	0.4	0.3	0.3	0.1	0.1	0.2	0.6	0.8	0.8	2.6	2.2	**0.30**	**19**
PTER AQU	0.2	-	0.4	-	0.8	0.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.6	-	-	1.8	**0.19**	**6**
DRYO EXP	0.1	-	0.1	0.3	0.2	0.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	**0.05**	**5**
C PILULI	-	-	0.1	-	0.1	-	-	-	-	-	0.10	-	0.01	-	0.02	-	0.01	0.01	0.03	0.03	0.03	0.02	0.06	0.02	0.02	0.01	-	-	-	-	**0.02**	**15**
FRAN ALN	-	-	-	-	-	-	-	-	0.1	-	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	-	-	0.03	-	-	-	0.03	0.03	0.09	0.02	0.03	0.06	0.11	0.16	**0.02**	**16**
SORB AUC	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.20	0.01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	**0.009**	**2**
LYCO ANN	-	-	0.10	0.10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	**0.008**	**2**
PINU SYL	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.01	-	-	-	-	-	-	0.03	-	-	0.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	**0.002**	**3**
QUER ROB	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.03	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	**0.001**	**1**
Rūšių sk.	**11**	**8**	**15**	**12**	**15**	**12**	**9**	**9**	**12**	**8**	**15**	**13**	**13**	**13**	**14**	**13**	**12**	**13**	**13**	**12**	**12**	**12**	**13**	**13**	**13**	**13**	**13**	**12**	**12**	**13**	**12.27**	**20**

4.6 priedas. Žemaitija_100 poligono samanų – kerpių ardo rūšių projekcinis padengimas.

Z100 samanos	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2012	2013	2014	2015	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	1994-2021	Stebėjimų sk.
HYLO SPL	1.4	2.3	1.2	0.9	1.2	2.2	2.1	2.9	2.8	2.8	5.0	4.6	5.8	9.2	10.6	9.6	10.4	5.6	6.9	5.6	10.3	17.3	18.7	22.5	29.0	28.8	35.1	29.4	36.4	34.3	**11.83**	**30**
PLEU SCH	7.5	6.7	8.5	5.8	7.0	10.4	9.5	16.1	14.8	13.1	22.7	11.8	9.8	13.0	20.4	13.8	6.7	2.4	3.5	3.3	3.8	9.6	10.9	12.0	10.7	13.3	11.5	15.1	14.5	11.2	**10.65**	**30**
PTIL CRI	3.4	2.1	2.9	2.8	3.9	5.6	4.4	5.9	6.6	6.2	8.2	4.2	8.3	9.6	13.0	12.5	13.4	9.6	11.9	11.3	14.2	14.5	15.2	12.6	14.8	15.7	11.2	10.7	10.0	8.9	**9.12**	**30**
DICR MAJ	7.9	6.8	10.8	9.3	7.6	10.0	5.6	9.4	6.9	0.2	7.3	5.7	6.3	6.9	8.3	6.9	7.5	5.7	7.5	5.6	9.4	6.9	7.2	5.3	5.4	4.8	3.9	3.3	3.0	3.3	**6.49**	**30**
BRAC OED	4.7	3.5	4.1	4.3	4.9	3.1	2.4	5.6	3.4	2.5	4.5	1.9	3.8	5.3	8.7	10.8	11.1	2.0	3.8	3.7	12.6	10.2	9.0	6.0	10.5	9.0	4.5	4.4	6.6	6.5	**5.78**	**30**
PLAG ASP	2.7	2.2	3.0	2.3	1.5	2.0	1.3	1.2	1.2	0.7	0.8	0.9	1.9	1.7	2.3	3.0	3.3	7.0	8.0	6.7	8.8	8.3	8.5	7.9	7.4	7.4	7.3	6.0	5.0	4.6	**4.16**	**30**
PLAG AFF	0.7	2.2	2.4	1.0	2.9	0.9	0.5	1.3	1.2	0.6	0.9	0.2	0.6	2.5	2.9	5.2	5.7	1.8	0.6	3.9	4.9	3.5	3.0	2.6	7.0	2.9	2.6	3.2	5.9	5.0	**2.62**	**30**
DICR POL	2.7	2.5	3.0	2.2	1.8	2.6	1.3	0.8	0.4	0.4	0.6	0.6	0.7	0.9	1.6	0.6	1.6	2.2	3.1	4.5	2.1	3.6	2.8	2.4	1.9	2.4	0.9	0.9	1.1	1.6	**1.79**	**30**
SPHA GIR	0.5	-	0.6	0.5	0.7	0.7	0.6	0.7	0.9	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3	0.4	0.5	1.1	2.0	2.5	2.3	1.9	2.2	1.8	1.6	1.9	1.9	1.1	0.6	1.0	1.4	**1.02**	**29**
POLY FOR	0.20	0.40	0.60	0.50	0.40	-	0.20	0.40	0.40	0.20	0.60	0.00	0.00	0.07	0.01	0.01	0.01	-	-	-	0.01	0.03	0.06	0.10	0.16	0.06	0.03	0.03	0.01	0.03	**0.15**	**26**
LOPH HEP	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.10	-	-	-	-	0.02	0.01	0.01	0.02	0.03	0.01	0.01	0.01	0.13	0.04	0.07	0.03	0.00	0.10	0.13	-	-	-	-	-	**0.06**	**21**
HYPO PHY	-	0.30	0.20	0.40	0.20	0.30	-	-	-	-	0.04	0.00	0.03	0.20	0.08	0.03	0.05	-	-	0.01	0.07	-	-	0.06	-	-	0.02	-	-	-	**0.07**	**16**
PLAG CUR	3.00	0.70	1.00	1.10	0.50	0.70	0.20	0.30	0.10	-	0.02	0.00	-	0.05	0.07	-	0.01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	**0.35**	**14**
DICR SCO	0.40	0.40	0.10	0.30	-	-	-	-	-	-	0.02	0.10	-	0.01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.02	-	-	0.03	0.03	-	0.10	**0.05**	**11**
POLY COM	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.20	-	0.01	-	-	-	0.00	0.01	-	-	-	-	-	-	-	-	**0.01**	**4**
Epiksilai		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.00	1.84	2.47	2.78	4.17	3.53	**2.63**	**6**
Rūšių sk.	**13**	**13**	**14**	**14**	**13**	**12**	**11**	**11**	**11**	**10**	**14**	**14**	**12**	**14**	**14**	**12**	**14**	**10**	**10**	**11**	**13**	**12**	**11**	**13**	**12**	**11**	**13**	**12**	**11**	**12**	**12.23**	**16**

4.7 priedas. Dzūkija_100 poligono žolių ardo rūšių projekcinis padengimas.

D100_COV žolės	1993	1994	1995	1996	1997	2025	1993-1997	Stebėjimų sk.
PICE ABI						0.02	**0**	**1**
FRAN ALN	0.50	0.30	0.20	0.10	0.10	0.02	**0.24**	**6**
MELA PRA						0.02	**0.00**	**1**
GOOD REP						0.06	**0.00**	**1**
FEST OVI	0.50	0.70	0.70	1.00	0.30	0.10	**0.64**	**6**
CHIM UMB		1.50	1.50	0.90		0.12	**1.30**	**4**
PINU SYL		0.14	0.10	0.15	0.13	0.40	**0.13**	**5**
DESC FLE						2.04	**0.00**	**1**
VACC VIT	2.87	3.07	2.16	2.50	2.32	4.63	**2.58**	**6**
VACC MYR	1.00		1.00			5.49	**1.00**	**3**
BETU PUB		0.10					**0.10**	**1**
C ERICET	1.20	1.50	1.00	1.10	1.00		**1.16**	**5**
CORY CAN	1.00	0.20	0.20				**0.47**	**3**
HIER UMB	0.50	0.20	0.20	0.20	0.20		**0.26**	**5**
JUNI COM	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10		**0.10**	**5**
RUME ACE		22.00	30.00	5.00			**19.00**	**3**
THYM SER	2.00	1.50	0.50	0.30	0.20		**0.90**	**5**
Rūšių sk.	**9.00**	**12.00**	**12.00**	**10.00**	**8.00**	**10.00**	**10.20**	**6**

4.8 priedas. Dzūkija_100 poligono samanų - kerpių ardo rūšių projekcinis padengimas.

D100_COV samanos	1993	1994	1995	1996	1997	2025	1993-1997	Stebėjimų sk.
PLEU SCH	42.3	44.7	41.8	38.5	33.1	33.5	**40.1**	**6**
HYLO SPL	6.5	4.6	8.2	7.6	6.1	33.1	**6.6**	**6**
DICR POL	29.2	29.7	32.3	34.6	29.7	17.1	**31.1**	**6**
CLA ORAN	3.1	3.0	3.6	2.8	2.8	1.0	**3.1**	**6**
PTIL CIL	1.9	1.8	2.4	2.9	2.9	0.9	**2.4**	**6**
DICR SCP	5.2	2.8	3.3	4.0	2.7	0.4	**3.6**	**6**
BRAC OED						0.3	0.3	**1**
CLA ARBU				3.5	3	0.2	**3.2**	**3**
POLY JUN	1.0	0.8	0.7	1.0	1.3	0.2	**1.0**	**6**
HYPN CUP						0.1	0.1	**1**
POLY FOR						0.1	0.1	**1**
PTIL CRI						0.1	0.1	**1**
CLA CRIS	0.6	0.6	0.6	0.7	1.1	0.0	**0.6**	**6**
CLA GRAC	1.3	1.0	1.9	1.6	1.4	0.0	**1.2**	**6**
CLA RAMU				0.1	0.2	0.0	**0.2**	**3**
CLADONIZ			4.0	1.1	3.3	0.0	**2.1**	**4**
DICRANUZ	7.8					0.0	**7.8**	**2**
POHL NUT	2.4	2.7	4.6	3.5	2.4	0.0	**2.6**	**6**
POHLIA Z	0.4					0.0	**0.4**	**2**
Rūšių sk.	**12.00**	**10.00**	**11.00**	**13.00**	**13.00**	**12.00**	**19.00**	**6**

4.9 priedas. Dzūkija_100 poligono žolių ardo rūšių aptikimo dažnumas.

D100 žolės	1993	1994	1995	1996	1997	2025	1993-1997	Stebėjimų sk.
VACC VIT	6	6	14	16	18	66	**12.0**	**6**
DESC FLE						32	**0.0**	**1**
VACC MYR	2	0	2	0	0	32	**0.8**	**3**
PINU SYL	0	84	8	4	12	24	**21.6**	**5**
GOOD REP						6	**0.0**	**1**
PICE ABI						6	**0.0**	**1**
CHIM UMB	0	2	2	2	0	4	**1.2**	**4**
FRAN ALN	2	2	2	2	2	4	**2.0**	**6**
FEST OVI	2	2	2	2	2	2	**2.0**	**6**
MELA PRA						2	**0.0**	**1**
BETU PUB	0	4	0	0	0	0	**0.7**	**1**
C ERICET	2	2	2	2	2	0	**1.7**	**5**
CORY CAN	2	2	2	0	0	0	**1.0**	**3**
HIER UMB	2	2	2	2	2	0	**1.7**	**5**
JUNI COM	2	2	2	2	2	0	**1.7**	**5**
RUME ALA	0	2	2	2	0	0	**1.0**	**3**
THYM SER	2	2	2	2	2	0	**1.7**	**5**
Rūšių sk.	**9.00**	**12.00**	**12.00**	**10.00**	**8.00**	**10.00**	**10.20**	**17.0**

4.10 priedas. Dzūkija_100 poligono samanų - kerpių ardo rūšių aptikimo dažnumas.

D100 samanos	**1993**	**1994**	**1995**	**1996**	**1997**	**2025**	**1993-1997**	**Stebėjimų sk.**
PLEU SCH	98	100	100	100	100	98	**99.6**	**6**
DICR POL	96	98	98	100	100	82	**98.4**	**6**
HYLO SPL	8	10	10	12	10	64	**10.0**	**6**
CLA ORAN	46	48	50	52	52	20	**49.6**	**6**
PTIL CIL	4	6	10	10	12	12	**8.4**	**6**
DICR SCP	12	10	12	14	10	10	**11.6**	**6**
BRAC OED	0	0	0	0	0	8	**0.0**	**1**
CLA ARBU	0	0	0	6	2	6	**1.6**	**3**
POLY FOR						6	**0.0**	**1**
POLY JUN	12	14	16	12	14	6	**13.6**	**6**
HYPN CUP						2	**0.0**	**1**
PTIL CRI						2	**0.0**	**1**
CLA CRIS	6	6	6	4	2		**4.8**	**5**
CLA GRAC	22	26	32	34	34		**29.6**	**5**
CLA RAMU	0	0	0	2	2		**0.8**	**2**
CLADONIZ	0	0	2	4	4		**2.0**	**3**
DICRANUZ	2	0	0	0	0		**0.4**	**1**
POHL NUT	32	34	34	36	34		**34.0**	**5**
POHLIA Z	2	0	0	0	0		**0.4**	**1**
Rūšių sk.	**12.00**	**10.00**	**11.00**	**13.00**	**13.00**	**12.00**	**11.80**	**19.0**

4.11 priedas. Dzūkija_100 poligono žolių ir samanų – kerpių ardų rūšių fertilumas.

D100_FERT žolės	1993	1994	1995	1996	1997	2025	1993-1997	Stebėjimų sk.
FEST OVI	0	50	100	100	100	100	**70.0**	**5**
MELA PRA						100	**0.0**	**1**
DESC FLE	50	50	100			75	**66.7**	**4**
CHIM UMB		0	0	0		50	**0.0**	**1**
GOOD REP						33	**0.0**	**1**
VACC VIT	0	0	0	25	22	30	**9.4**	**3**
VACC MYR	0		0			9	**0.0**	**1**
FRAN ALN	0	0	0	0	0	0	**0.0**	**0**
PICE ABI						0	**0.0**	**0**
PINU SYL		0	0	0	0	0	**0.0**	**0**
RUME ALA		50	100	100			**83.3**	**3**
C ERICET	0	0	0	100	100		**40.0**	**2**
BETU PUB		0					**0.0**	**0**
CORY CAN							**0.0**	**0**
HIER UMB	0	0	0	0	0		**0.0**	**0**
JUNI COM	0	0	0	0	0		**0.0**	**0**
THYM SER	0	0	0	0	0		**0.0**	**0**
Rūšių sk.	**1**	**3**	**3**	**4**	**3**	**7**	**5**	**9**

D100_FERT samanos	1993	1994	1995	1996	1997	2025	1993-1997	Stebėjimų sk.
POLY JUN	25	7	0	17	9	33	**0.0**	**5**
DICR POL	10	7	11	12	33	21	**14.8**	**6**
POLY FOR						17	**0.0**	**1**
PLEU SCH	27	4	8	12	8	15	**0.0**	**6**
DICR SCP	0	0	0	7	20	10	**5.4**	**3**
HYLO SPL	0	0	0	0	0	2	**0.0**	**1**
PTIL CRI						0	**0.0**	**0**
BRAC OED						0	**0.0**	**0**
HYPN CUP						0	**0.0**	**0**
PTIL CIL	0	0	0	0	0	0	**0.0**	**0**
POHL NUT	22	21	47	58	59		**41.3**	**5**
CLA GRAC	9	0	0	0	0		**1.8**	**1**
CLA CRIS	0	0	0	0	0		**0.0**	**0**
CLA RAMU				0	0		**0.0**	**0**
CLAD RAN							**0.0**	**0**
CLA RANG	0	0	0	0	0		**0.0**	**0**
CLADONIZ			0	0	0		**0.0**	**0**
DICRANUZ	0						**0.0**	**0**
CLA ARBU				0	0		**0.0**	**0**
Rūšių sk.	**5**	**4**	**3**	**5**	**5**	**6**	**4.4**	**8**

4.12 priedas. Aukštaitija_100 poligono samanų - kerpių ardo epiksilinių rūšių vidutinis projekcinis padengimas.

A100 epiksilai	A1_2020	A1_2021	A1_2022	A1_2023	A1_2024	A1_2025	Stebėjimų vidurkis	Aptikimų sk.
Epiksilai ∑	1.24	2.33	2.646	2.88	2.7	1.89	**1.96**	**6**
BRAC OED	0	0	0.044	0.006	0.03	0.426	**0.08**	**5**
BRAC POP	0	0	0	0.01	0.008	0.006	**0.00**	**3**
BRAC RUT	0	0.1	0.04	0.06	0	0	**0.03**	**3**
BRAC SAL	0.06	0	0	0	0	0	**0.01**	**1**
BRAC STA	0	0	0	0	0.006	0	**0.00**	**1**
CLADONIZ	0	0.2	0.152	0.12	0.176	0.074	**0.10**	**5**
DICR MON	0	0	0.058	0.07	0.038	0.04	**0.03**	**4**
DICR POL	0	0	0.004	0	0	0	**0.00**	**1**
DICR SCP	0	0.092	0.124	0.204	0.096	0.094	**0.09**	**5**
EVER PRU	0	0	0.004	0	0	0	**0.00**	**1**
HERZ SEL	0.042	0.04	0.006	0.02	0.06	0.05	**0.03**	**7**
HYLO SPL	0	0.28	0.7	0.84	1.08	0.46	**0.48**	**5**
HYPN AND	0	0	0.004	0	0	0	**0.00**	**1**
HYPN CUP	0	0	0.054	0.06	0.066	0	**0.03**	**3**
HYPO PHY	0	0	0.134	0	0	0	**0.02**	**1**
HYPO TUB	0	0	0.048	0	0	0	**0.01**	**1**
LOPH BID	0.14	0	0	0	0	0	**0.03**	**2**
LOPH HET	0.05	0.15	0.03	0.072	0.092	0.076	**0.07**	**6**
NOWE CUR	0.004	0.07	0.002	0	0.002	0	**0.01**	**4**
PARM AMB	0	0	0.002	0	0	0	**0.00**	**1**
PELTIGEZ	0	0.04	0.022	0	0.04	0.02	**0.02**	**4**
PLAG CUS	0.002	0	0	0	0	0	**0.00**	**1**
PLAG LAE	0	0.33	0.002	0.022	0.014	0.01	**0.05**	**5**
PLAG LAT	0	0	0	0.004	0	0	**0.00**	**1**
PLAT GLA	0	0	0.15	0.02	0.12	0	**0.04**	**3**
PLEU SCH	0.06	0.5	1.16	0.72	0.898	0.562	**0.56**	**6**
PSEU FUR	0	0	0.058	0	0	0	**0.01**	**1**
PTIL CRI	0	0.14	0.26	0.422	0.348	0.144	**0.19**	**5**
PTIL PUL	0.312	0.6	0.404	0.274	0.18	0.18	**0.28**	**6**
TETR PEL	0	0	0	0	0.01	0	**0.00**	**1**
ULOT CRI	0	0	0.004	0	0	0	**0.00**	**1**
USNEA Z	0	0	0.002	0	0	0	**0.00**	**1**
Rūšių sk.	**8**	**12**	**25**	**16**	**18**	**13**	**13.57**	**7**

4.13 priedas. Aukštaitija_102 samanų - kerpių ardo epiksilinių rūšių vidutinis projekcinis padengimas.

A102 epiksilai	A2_2022	A2_2023	A2_2024	A2_2025	Stebėjimų vidurkis	Aptikimų sk.
Epiksilai ∑	4.798	5.112	7.378	7.464	**6.19**	**4**
BLEP TRI	0.012	0.028	0.046	0.06	**0.04**	**4**
BRAC OED	1	1.092	1.162	1.716	**1.24**	**4**
BRAC REF		0.04	0.08	0.02	**0.05**	**3**
BRAC RUT	0.24	0.31	0.52	0.35	**0.36**	**4**
BRAC SAL	0	0.02	0.04	0	**0.02**	**2**
BRAC STA	0.05	0.07	0.08	0.02	**0.06**	**4**
CALL HAL	0.12	0.04	0	0.04	**0.05**	**3**
CEPH HAM	0.02	0	0	0	**0.01**	**1**
Cephalozia sp	0	0.02	0.04	0	**0.02**	**2**
CIRR PIL	0.06	0.124	0.174	0.234	**0.15**	**4**
CLADONIZ	0.066	0.04	0.078	0.02	**0.05**	**4**
CROS AUT	0.082	0.332	0.224	0.24	**0.22**	**4**
DICR FUS	0	0.04	0.056	0	**0.02**	**2**
DICR MON	0.02	0.01	0.1	0.02	**0.04**	**4**
DICR POL	0.02	0.04	0.1	0.02	**0.05**	**4**
DICR SCO	0.278	0.298	0.394	0.26	**0.31**	**4**
EURH ANG	0	0.06	0	0	**0.02**	**1**
HERZ SEL	0.738	0.724	0.738	0.884	**0.77**	**4**
HYLO SPL	0.104	0.1	0.02	0.06	**0.07**	**4**
HYPN CUP	0.08	0.166	0.2	0.38	**0.21**	**4**
HYPN PAL	0.02	0.1	0.12	0.06	**0.08**	**4**
LEPI REP	0.15	0.07	0.19	0.1	**0.13**	**4**
LOPH HET	0.12	0.11	0.144	0.08	**0.11**	**4**
NOWE CUR	0.088	0.034	0.08	0.368	**0.14**	**4**
PYLA POL	0	0.16	0.1	0	**0.07**	**2**
PLAG AFF	**0.402**	**0.288**	**0.326**	**0.624**	**0.41**	**4**
PLAG ASP	0.108	0.066	0.082	0.14	**0.10**	**4**
PLAG CUR	0.006	0.01	0.006	0.004	**0.01**	**4**
PLAG DEN	0.06	0.004	0	0	**0.02**	**2**
PLAG LAE	0.042	0.092	0.082	0.088	**0.08**	**4**
PLAG UND	0.004	0	0.05	0.06	**0.03**	**3**
PLEU SCH	0.438	0.806	0.91	0.476	**0.66**	**4**
POLY FOR	0	0	0.004	0	**0.00**	**1**
PTIL CRI	0	0.008	0	0	**0.00**	**1**
PTIL PUL	0.062	0.142	0	0.04	**0.06**	**3**
RADU COM	0.024	0.068	0.2	0.16	**0.11**	**4**
RHYT TRI	0.16	0.212	0.2	0.21	**0.20**	**4**
RHOD ROS	0.006	0	0.012	0.002	**0.01**	**3**
RICC LAT	0.01	0	0	0	**0.00**	**1**
SANI UNC	0.27	0.266	0.446	0.66	**0.41**	**4**
TETR PEL	0.286	0.278	0.36	0.11	**0.26**	**4**
THUI TAM	0.08	0	0	0	**0.02**	**1**
Rūšių sk.	**35**	**37**	**35**	**32**	**34.75**	**4**

4.14 priedas. Žemaitija_100 poligono samanų - kerpių ardo epiksilinių rūšių vidutinis projekcinis padengimas.

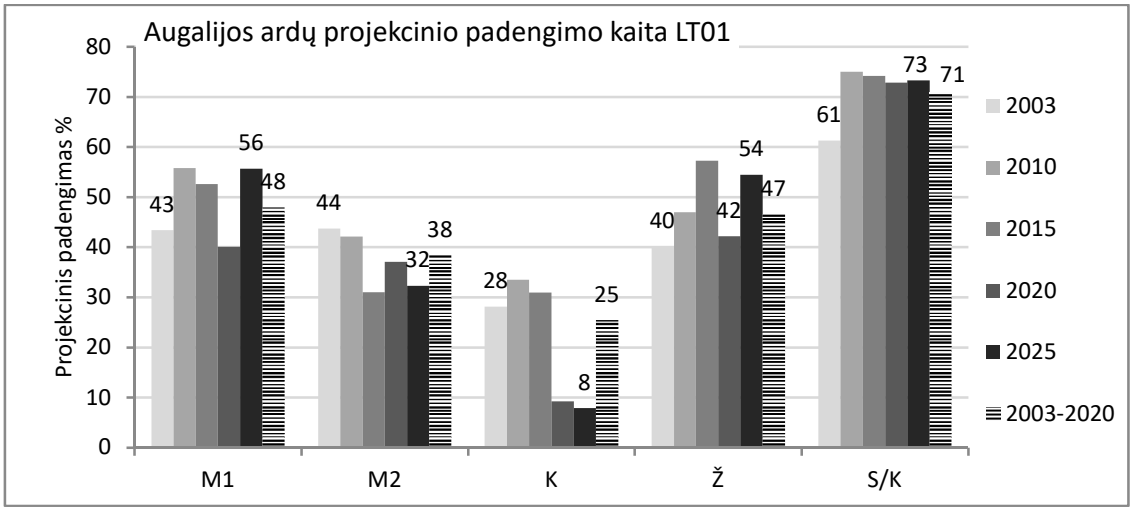
Z100 epiksilai	2022	2023	2024	2025	Stebėjimų vidurkis	Aptikimų sk.
Epiksilai ∑	2.47	2.78	4.17	3.53	**3.24**	**4**
BRAC OED	2.47	2.78	4.17	3.53	**3.24**	**4**
BRAC REF	0.26	0.53	0.70	1.85	**0.84**	**4**
CLADONIZ	0.00	0.03	0.00	0.00	**0.01**	**1**
DICR MAJ	0.05	0.05	0.08	0.10	**0.07**	**4**
DICR MON	0.00	0.00	0.02	0.00	**0.00**	**1**
DICR POL	0.03	0.07	0.02	0.06	**0.04**	**4**
HERZ SEL	0.06	0.08	0.11	0.06	**0.08**	**4**
HYLO SPL	0.17	0.02	0.17	0.05	**0.10**	**4**
HYLO UMB	0.31	0.19	0.48	0.44	**0.35**	**4**
HYPN PAL	0.47	0.56	0.74	0.54	**0.58**	**4**
LOPH HET	0.28	0.02	0.06	0.00	**0.09**	**3**
NOWE CUR	0.06	0.10	0.09	0.13	**0.09**	**4**
PLAG AFF	0.13	0.05	0.09	0.00	**0.07**	**3**
PLAG ASP	0.09	0.44	0.34	0.52	**0.35**	**4**
PLAT REP	0.06	0.20	0.27	0.15	**0.17**	**4**
PLEU SCH	0.03	0.00	0.00	0.00	**0.01**	**1**
POLY COM	0.36	0.31	0.94	0.71	**0.58**	**4**
PTIL CRI	0.11	0.20	0.14	0.08	**0.13**	**4**
PTIL PUL	0.00	0.02	0.02	0.00	**0.01**	**2**
SANI UNC	0.00	0.00	0.00	0.03	**0.01**	**1**
SPHA GIR	0.06	0.05	0.06	0.03	**0.05**	**4**
Rūšių sk.	**17**	**18**	**18**	**15**	**17.00**	**4**

V. ŽOLINĖS AUGALIJOS TYRIMAI AUKŠTAITIJOS IR ŽEMAITIJOS KMS BASEINŲ MIŠKO EKOSISTEMOSE.

Siekiant įvertinti bendrą augalijos kaitą ne tik sąlyginai mažuose (50 x 50 m^2) intensyvaus stebėjimų stacionaruose, bet visoje tiriamųjų upelių baseinų teritorijoje, 2025 metais vykdyti augalijos tyrimai pagal VS (Vegetation structure and species cover) paprogramę. Tyrimai vykdyti pagal FINNISH ENVIRONMENT INSTITUTE (2013b) pateiktą metodiką, 100 m^2 skritulinėse aikštelėse. Aukštaitijos KMS, Versminio upelio baseine, Ažvinčių sengirės gamtiniame rezervate - 50 aikštelių (5.1 priedas), Žemaitijos KMS, Juodupio baseine, Plokštinės gamtiniame rezervate - 35 aikštelėse (5.3 priedas) ir Dzūkijos KMS, Duburių (Beršibarkos / Šlaitinio) upelio baseine, Skroblaus gamtiniame rezervate 56 aikštelėse (5.2 priedas). Tyrimų metu vertintas I ir II ardo medžių (M1, M2), krūmų (K), žolių ir krūmokšnių (Ž), bei samanų ir kerpių (S/K) ardų bendras projekcinis padengimas procentais, bei atskirai kiekvienos ardo rūšies projekcinis padengimas. Nustatyta visų tiriamųjų laukelių EUNIS buveinės vadovaujantis Davies et al., (2004) ir EUROPEAN ENVIRONMENTAL AGENCY (2019) pateikta EUNIS buveinių klasifikacija. Tyrimų rezultatai glaustai apibendrinti, palyginti su ankstesnių, 2003-2024 metų tyrimų rezultatais. Dzūkijos KMS skritulinėse aikštelėse augalija pagal VS paprogramę vertinta pirmą sykį, arba ankstesnių inventorizacijų duomenys nėra išlikę. Tyrimus KMS baseinuose atliko VDU dr. Ainis Pivoras ir dokt. Monika Kalvaitienė.

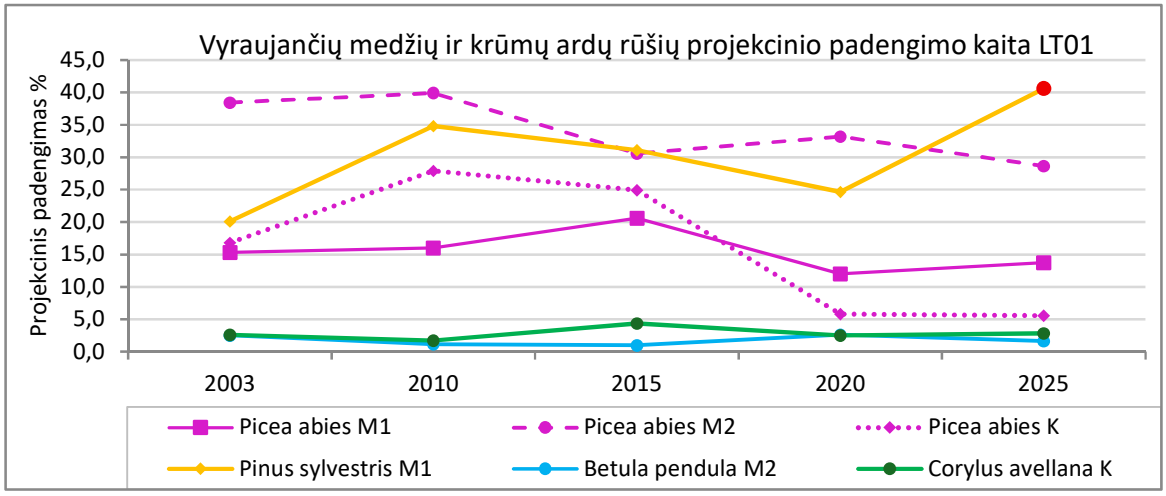
5.1. Aukštaitijos KMS, Versminio upelio baseino miško ekosistemos

Aukštaitijos tyrimų poligone, vertinant atskirų ardų lygmeniu, projekcinio padengimo dydžiu išsiskiria samanų ir medžių ardai (I+II), dengiantys arti 70 % viso tiriamųjų laukelių ploto (5.1.1 pav.).

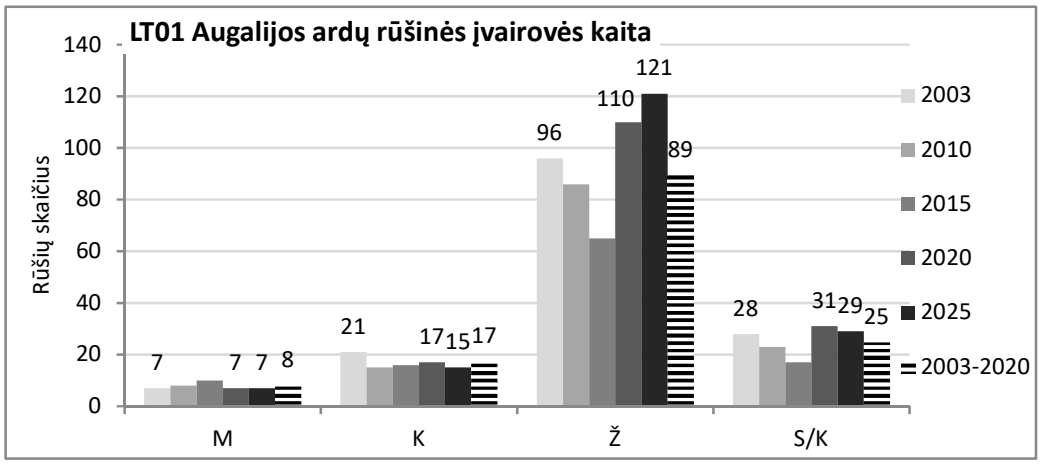


5.1.1 pav. *Atskirų augalijos ardų vidutinio projekcinio padengimo kaita 2003 – 2025 metais.*

Pastaruoju metu ženkliai sumažėjo II medžių ardo ir išaugo I medžių ardo bendras projekcinis padengimas tiriamosiose aikštelės. Tačiau bendras abiejų medžių ardų dengiamas plotas kartu paėmus beveik nepakito. Tai indikuotų, kad ženkli dalis II ardo medžių peraugo į pirmąjį ardą. Tačiau praktiškai nemaža dalis I ardo eglių žuvo 2023 – 2024 metais, dėl sausrų ir karščio bangų sąlygoto žievėgraužio tipografo poveikio, taip pat 10 % mažėjo beržų aptikimo dažnumas. Priešingai, labiausiai išaugo būtent pušų projekcinis padengimas I medžių arde (5.1.2 pav.). Tai praktiškai negali būti tiesa, nes medyne dominuoja senos >100 metų amžiau pušys ir naujų neatsirado, aptikimo dažnumas išliko stabilus. Turbūt žuvus daliai I ardo eglių ir beržų, anksčiau vertinant iš apačios dengusių pušų lają, dėl vizualinio projekcinio padengimo vertinimo subjektyvumo ir galbūt dėl sumažėjusios defoliacijos, pastaraisiais metais pušys gavo ženkliai didesnius įverčius. Detaliau apie būtent medžių ardo pokyčius žr. II skyrius - miško ekosistemų sumedėjusios augmenijos monitoringas.



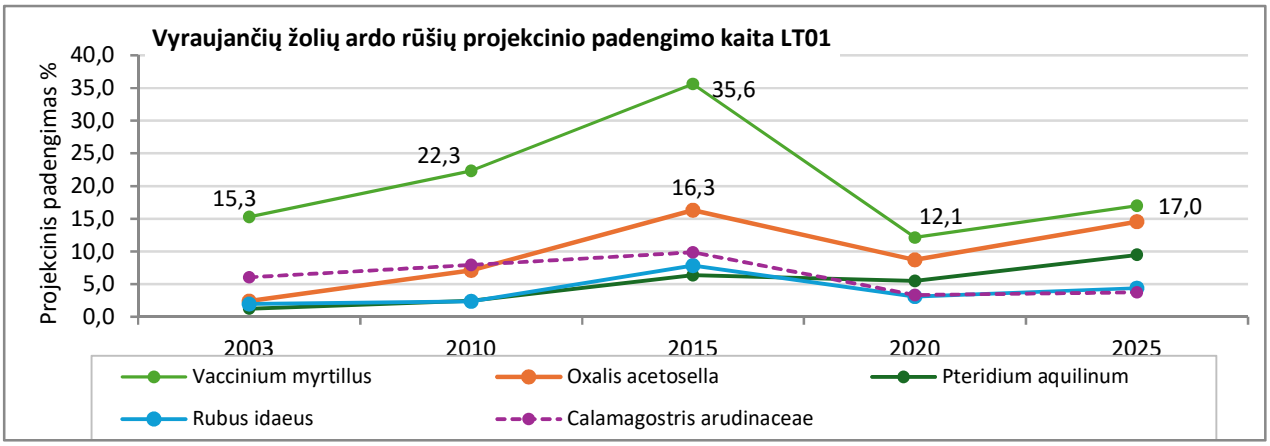
5.1.2 pav. *Vyraujančių medžių ir krūmų ardų rūšių projekcinio padengimo kaita LT01 poligone.*



5.1.3 pav. *Aukštaitijos tyrimų poligono, ardų rūšinės įvairovės kaita 2003 – 2025 metais.*

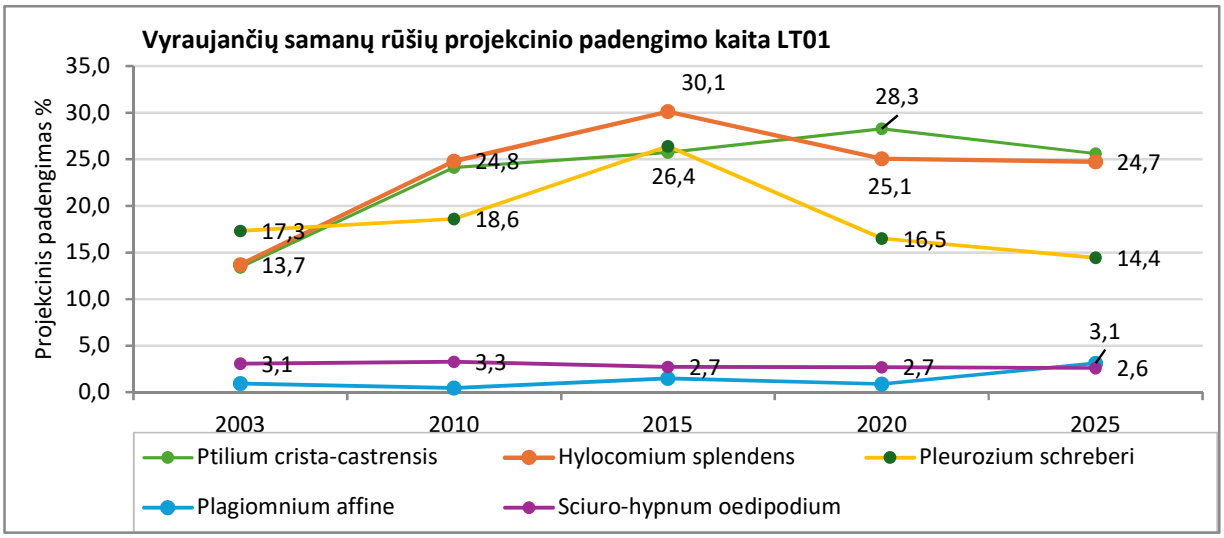
Įdomu kad išliko labai žemas ir toliau nežymiai mažėjo bendras krūmų ardo projekcinis padengimas (5.1.1 pav.), nepaisant nemažo skaičiaus naujai atsivėrusių aikštelių žuvus eglėms. Praktiškai visai nepakito krūmų arde esančių eglių užimamas plotas (5.1.2 pav.). Turbūt krūmams reikia daugiau laiko įsitvirtinti, ir kol viršija 0,5 m. aukštį ir jau yra priskiriami krūmų ardui.

Priešingai žolių ir krūmokšnių bendras projekcinis padengimas augo labai ženkliai (12 %) ir dabar dengia daugiau nei pusę viso tiriamųjų aikštelių ploto (5.1.1 pav.). Taip pat ženkliai augo ir ardo rūšinė įvairovė (5.1.3 pav.) ir paskutiniais metais registruota net 32 rūšimis daugiau nei įprastai. Tai tikriausiai sąlygojo miško mozaikiškumo didėjimas, didesnis atvirų ar pusiau atvirų aikštelių kiekis.



5.1.4 pav. *Vyraujančių žolių ardo rūšių projekcinio padengimo kaita LT01 poligone.*

Matyti kad tyrimų vietovėje dominuojančių žolių ardo rūšių (mėlynės, paprastojo kiškiakopūsčio ir didžialapio šakio) projekcinis padengimas taip pat augo 4-6 %, bet vienintelio šakio yra didžiausias nuo stebėjimų pradžios (5.1.4 pav).

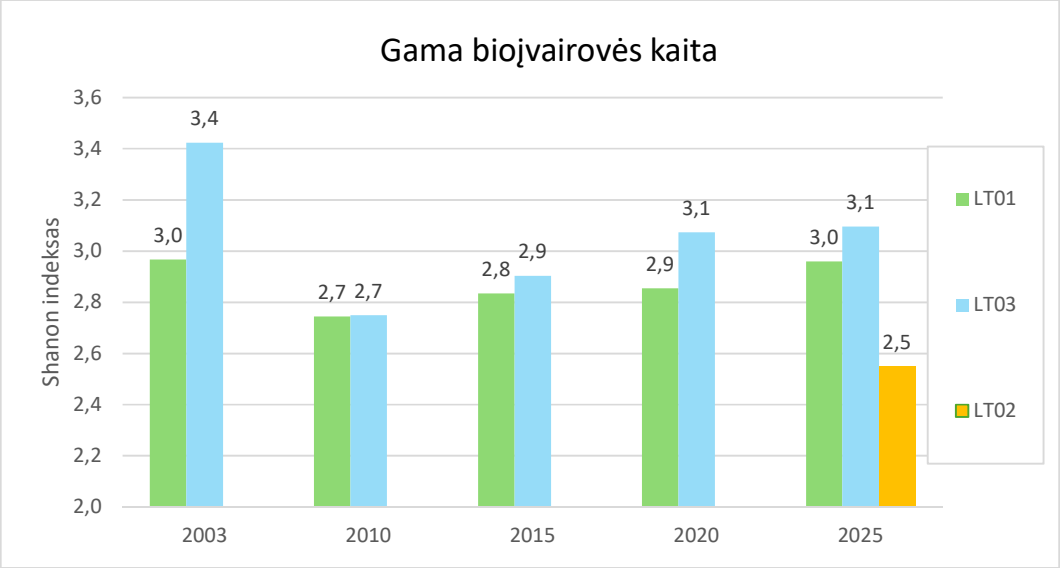


5.1.5 pav. *Vyraujančių samanų - kerpių ardo rūšių projekcinio padengimo kaita LT01 poligone.*

Samanų danga tiriamoje teritorijoje išlieka svarbi ir gerai išsivysčiusi miško paklotės dalis. Iš viso registruotos 29 rūšys (5.1.3 pav.), o tai rodo išlaikytą gana didelę įvairovę ir santykinai stabilią bendrijos struktūrą. Šis rūšių skaičius yra vienas didžiausių per visą tyrimų laikotarpį ir tik nežymiai mažesnis nei 2020 m., todėl galima teigti, kad 2025 m. samanų ardas išlieka ekologiškai turtingas ir gerai išsivystęs. Bendras samanų padengimas 2025 m. taip pat išlieka stabiliai aukštas (5.1.1pav.), tačiau šis augimas nėra tiesiogiai susijęs su dominuojančių rūšių gausėjimu.

Priešingai, kelios iki šiol vyravusios rūšys 2025 m. rodo mažėjimo tendencijas, o tai leidžia teigti, kad samanų bendrijos patiria struktūrinius pokyčius. Lyginant su 2010–2015 m. laikotarpiu, kai *Hylocomium splendens* ir *Pleurozium schreberi* buvo pasiekusios didžiausią padengimą, 2025 m. abi rūšys pasižymi mažesniu gausumu (5.1.5 pav.). *Hylocomium splendens* išlieka plačiai paplitusi, tačiau jos padengimas sumažėjęs, o tai rodo, kad rūšis nebeatkartoja ankstesnio augimo. *Pleurozium schreberi* mažėjimas yra dar ryškesnis ir nuoseklus nuo 2015 m., o 2025 m. duomenys patvirtina šią ilgalaikę tendenciją. Tai rodo, kad iki tol dominavusios rūšys praranda savo pozicijas, nors jų aptikimo dažnumas išlieka aukštas. Tuo tarpu *Ptilium crista-castrensis* 2025 m. padengimas yra mažesnis nei 2020 m., tačiau vis dar didesnis nei tyrimų pradžioje. Tai rodo, kad rūšis patiria svyravimus, bet išlieka pakankamai atspari ir geba išlaikyti stabilų paplitimą. Labiausiai išsiskiria *Plagiomnium affine*, kurios padengimas ir aptikimo dažnumas 2025 m. ženkliai padidėjo, palyginti su ankstesniais metais. Tai rodo, kad ši rūšis gali būti viena iš laimėtojų kintančiomis sąlygomis ir užima vis didesnę samanų ardo dalį. Kitos rūšys, tokios kaip *Sciuro-hypnum oedipodium* ir *Dicranum polysetum*, taip pat rodo didesnį aptikimo dažnumą, nors jų padengimas išlieka nedidelis, tačiau stabilus. 2025 m. tyrimų rezultatai parodo, jog samanų ardas pasižymi mišria dinamika: bendras padengimas didėja, tačiau dominuojančių rūšių gausumas mažėja, o mažiau gausios rūšys rodo plitimo požymius. Tai leidžia teigti, kad samanų bendrijos struktūra kinta, o rūšys reaguoja į aplinkos pokyčius nevienodai. 2025 m. rezultatai išsiskiria tuo, kad jie žymi ne tik svyravimus, bet ir galimą ilgalaikės struktūrinės kaitos pradžią samanų arde.

Vertinant vietovės augalijos biologinę įvairovę, matyti, kad Aukštaitija išsiskiria didžiausiu registruotų bendru rūšių skaičiumi (5.3.3 pav.) ir salyginai aukšta Shanon gama biologinės įvairovės indekso verte (5.1.6 pav). Indekso vertė per visą tyrimų istoriją kito 2,7-3,0 ribose ir paskutiniu metu kilo iki maksimaliai aukštos (3,0). Shanon biologinės įvairovės indeksas parodo ne vien rūšių skaičių bet ir jų paplitimo tolygumą. Iprastai spygliuočių miškuose, kur medžių arde dominuoja mažai rūšių, jis retai pasiekia tokias aukštas vertes. Jei vietovėje įsivyraus eglės, o beržai ir pušys retės, tikėtina, indekso vertė gali mažėti. Antra vertus, įvairiaamžiškumo ir mozaikinės stuktūros didėjimas lemia rūšių skaičiaus augimą, kas mažina atskirų rūšių įsidominavimą žemesniuose arduose ir taip didina indekso vertę. Aukštaitijos poligone bendra augalijos bioįvairovė sąlyginai yra didelė ir paskutiniu metu didėja.



5.1.6 pav. *Aukštaitijos, Žemaitoijo ir Dzūkijos tiriamųjų poligonų bendros gama bioįvairovės kaita 2003 – 2025 metais.*

Aptartus augalijos pokyčius Versminio upelio baseino teritorijoje iš esmės lemia pagrindinių medynų edifikatorių, dominuojančių medžių, paprastosios eglės, paprastosios pušies ir karpotojo bei plaukuotojo beržų gausumas ir būklė. Dalyje aikštelių žuvus daliai I ardo eglių ir beržų, atsirado daugiau atviresnių plotų, kas iššaukia staigų žolių ir krūmokšnių ardo suvešėjimą, rūšinės įvairovės augimą. Čia prognozuojamas krūmų ardo augimas, eglių pomiškio formavimasis. Įdomu kad sąlyginai vėl padidėjo pušies kaip edifikatoriaus svarba. Tačiau itin žemas pušies gausumas medžių II ir krūmų bei žolių arduose indikuoja, jog nesant didelio mąsto pažaidų, pušys poligone savaime neatsikurs. Likusiose aikštelėse, kur neregistruota ženklaus medžių ardo pokyčio, procesai daug lėtesni. Čia buvusi pušyno bendrija keičiasi į mišrų eglyną, mažiau šviesos pasiekia žemutinius ardus, kinta ir paklotės, dirvožemio cheminė sudėtis. Matyt tai lemia sumažėjusį žolių ardo projekcinį padengimą. Čia pamažu įsidominuoja augavietėje tipingos daugiametės žolių rūšys, o jų gausa ir įvairovė svyruoja mažai.

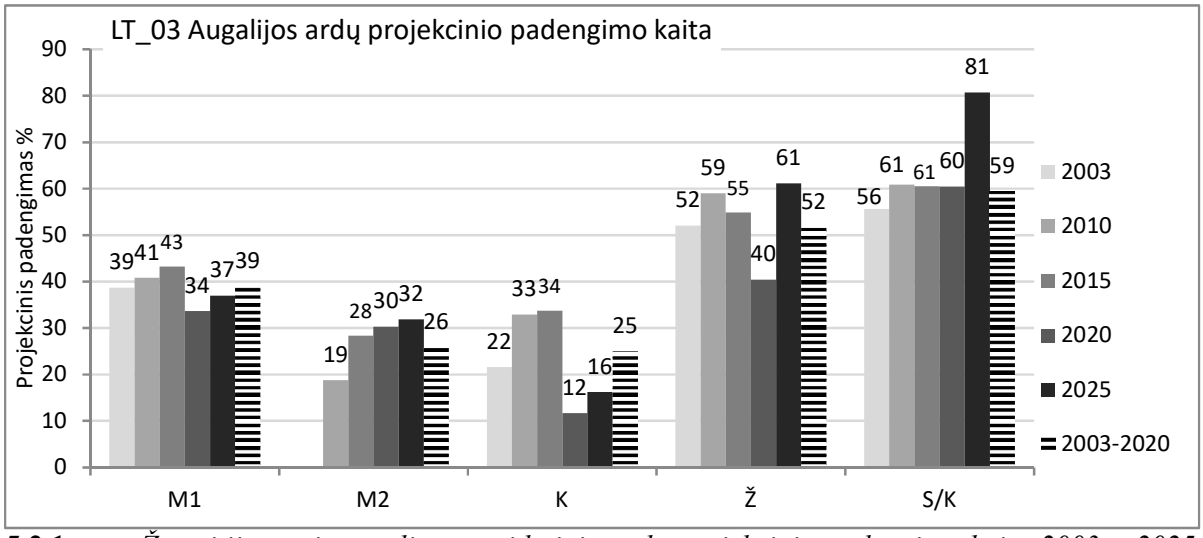
Bendrai paėmus ženkliai augo vietovės augalijos rūšinė įvairovė. Tai galėjo lemti rezervatinio režimo Ažvinčių sengirės gamtiniame rezervate sąlygotas visiškas ūkinės veiklos sustabdymas, ko pasėkoje savaime žūstant seniems medžiams formuojasi miško aikštelės, negyvos medienos sankaupos, didėja medyno mozaikiškumas, įvairiaamžiškumas. Tai savo ruožtu didina mikrobuveinių įvairovę. Antra vertus, nežymūs pokyčiai, ypač vertinant samanų rūšinę įvairovę, galimi ir dėl tyrimus vykdančios institucijos botanikų kaitos.

Apibendrinant galima teigti, kad Aukštaitijos KMS šiuo metu vyksta aktyvus miško ekosistemos persitvarkymo etapas: klimato sąlygoti trikdžiai ir natūrali sukcesija didina medyno struktūrinę įvairovę, mikrobuveinių skaičių ir bendrą augalijos rūšinę įvairovę, tačiau ilgalaikėje perspektyvoje gali lemti pušynams būdingų šviesamėgių rūšių mažėjimą ir perėjimą prie brandesnių, labiau eglių dominuojamų hemiborealinių miško bendrijų.

Tuo pačiu metu dalyje stabilesnių medyno vietų tęsiasi natūrali sukcesija – buvusi pušyno bendrija palaipsniui transformuojasi į mišrų eglyną. Didėjantis eglių vaidmuo mažina šviesos patekimą į apatinius ardus, keičia paklotės savybes ir gali riboti šviesamėgių bei oligotrofinių rūšių išlikimą. Nevykstantis pušų atsikūrimas apatiniuose arduose rodo, kad be didesnio masto trikdžių pušies, kaip pagrindinio edifikatoriaus, vaidmuo ateityje palaipsniui nyks.

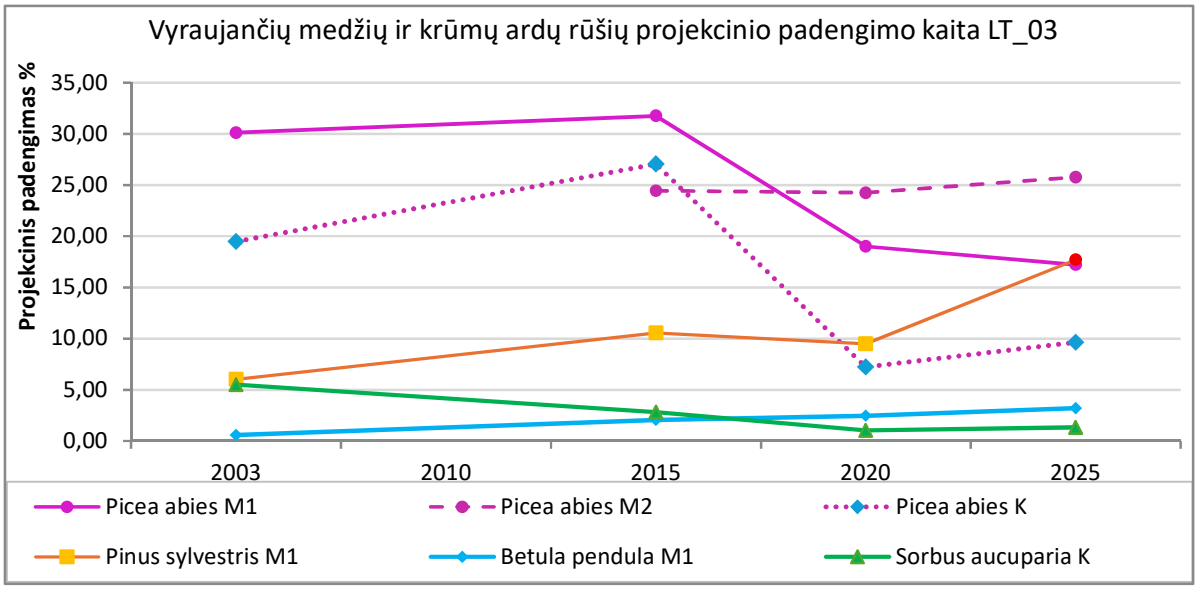
5.2. Žemaitijos KMS, Juodupio baseino miško ekosistemos

Žemaitijos tyrimų poligone, vertinant atskirų ardų lygmeniu, didžiausiu projekciniu padengimu, kaip ir Aukštaitijos poligone, išsiskiria samanų ir medžių ardai (I+II), dengiantys arti 60% viso tiriamųjų laukelių ploto (5.2.1 pav.; 5.3 priedas).



5.2.1 pav. *Žemaitijos tyrimų poligono, vidutinio ardų projekcinio padengimo kaita 2003 – 2025 metais.*

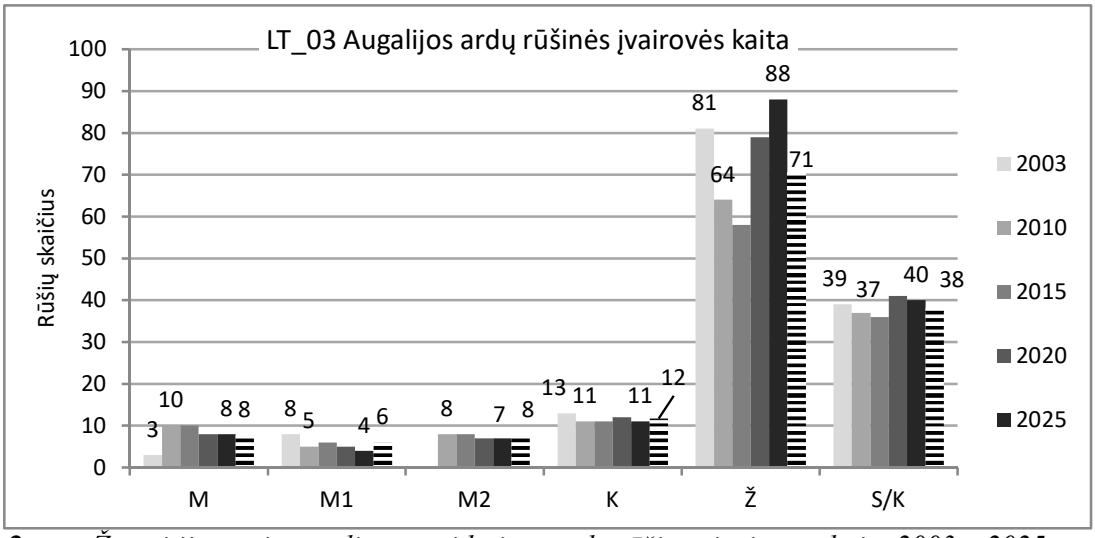
Medžių arde, lyginant su 2003 - 2020 metų duomenimis, nežymiai augo abiejų ardų projekcinis padengimas, ir antrame arde šiuo metų yra didžiausias per visą stebėjimų laikotarpį (5.2.1 pav.). Tačiau žiūrint atskirai į dominuojančių medžių rūšių vidutinio projekcinio padengimo kaitą (5.2.2 pav.) matyti, ženkliai sumažėjo I ardo eglių ir išaugo pušų projekcinis padengimas.



5.2.2 pav. *Vyraujančių medžių ir krūmų ardų rūšių projekcinio padengimo kaita LT03 poligone.*

Praktiškai kaip ir Aukštaitijos atveju, žuvus daliai eglių (tą indikuoja ir 10 % sumažėjęs aptikimo dažnumas) atsidengė pušų laja, galbūt sumažėjų jų defoliacija, ko pasėkoje jos gavo ženkliai didesnes projekcinio padengimo vertes. Dėl minėtų pokyčių išties pasikeitė eglių ir pušų tarpusavio santykis, tačiau bendras pušų projekcinis padengimas praktiškai taip ženkliai nepakito ir duomenys nėra tikslūs dėl metodinio vizualaus vertinimo subjektyvumo. Įdomu, kad priešingai I ardui, žemesniuose arduose eglių gausa pamažu augo. Tai galėjo sąlygoti ir nežymų krūmų ardo projekcinio padengimo augimą. Vis tik, krūmų ardas išlieka ženkliai skurdesnis nei stebėjimų vidurkis.

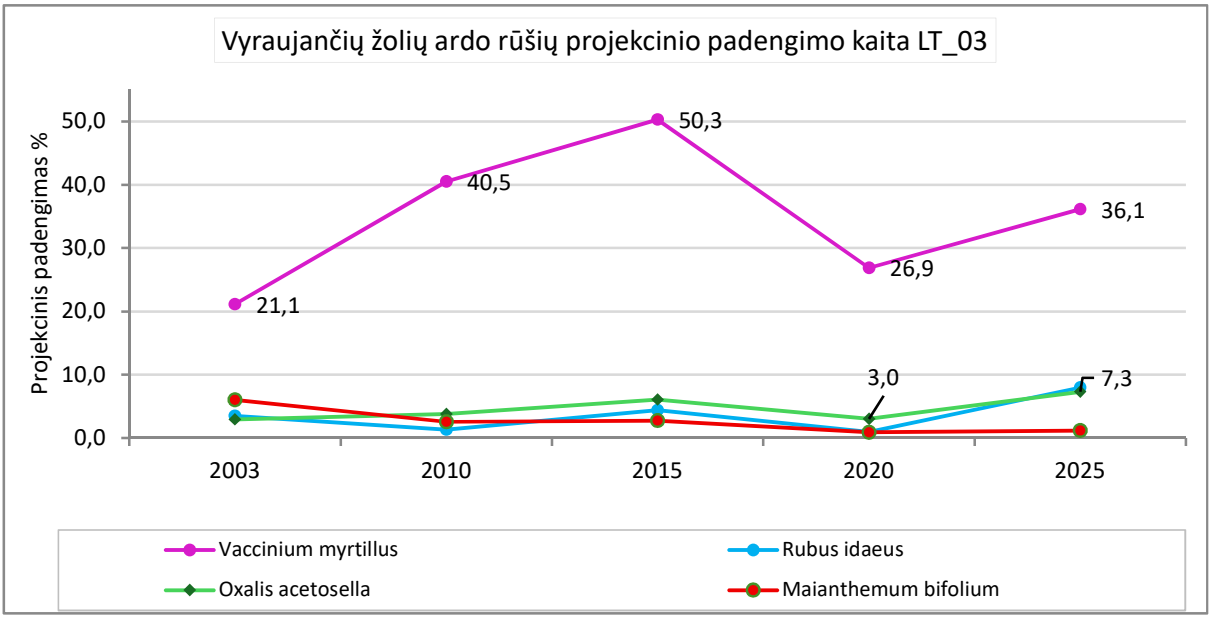
Priešingai žolių ardo projekcinis padengimas, panašiai kaip ir Aukštaitijoje, augo labai ženkliai ir šiuo metu yra didžiausias per visą tyrimų laikotarpį (61 %). Tai matomai sąlygojo staigus žolinės augmenijos suvešėjimas po dalies eglių žūties. Rūšinė žolių ardo sudėtis taip pat yra rekordiškai didelė, ir 17 rūšių viršija stebėjimų vidurkį (5.2.3 pav.). Tikėtinai, kaip ir Aukštaitijos atveju, tai sąlygoja atviresnių aikštelių formavimasis, medyno mozaikiškumo didėjimas.



5.2.3 pav. *Žemaitijos tyrimų poligono, vidutinės ardų rūšinės įvairovės kaita 2003 – 2025 m.*

Vertinant gausiausių žolių ardo rūšių projekcinio padengimo kaitą, matyti (5.2.4 pav.), kad gausiausios ardo rūšies, mėlynės, gausumas augo net 10 % iki 36 %. Likusių gausiausių žolių ardo rūšių, paprastojo kiškiakopūsčio ir paprastosios avietės projekcinis padengimas augo beveik dvigubai. Avietė įprastai suklesti žuvusio medyno vietose. Tuo tarpu kiškiakopūstis yra tipiška eglynų rūšis, galinti augti tiek stiprioje eglių paunksmėje, tiek išlikti ir atviresnėse vietose po aukštaūgėmis žolėmis. Įdomu, kad ketvirtos pagal gausumą ardo rūšies - dvilapės medutės projekcinis padengimas išlieka ženkliai sumažėjęs, kaip ir intensyvių stebėjimų stacionare Žemaitija_100 (žr. 4.3 skyrius), nors jos ekologinė niša ir labai artima kiškiakopūsčio. Galbūt auganti dirvožemio drėgmė ir maisto medžiagų kiekis sudaro geresnes sąlygas kiškiakopūsčiams. Eglės sėjinuklai žolių arde dabar dengia 3,3 % ploto ir aptinkami 89 % laukelių (5.3c priedas). Turint omenyje, kad eglė taip pat dominuoja II medžių ir krūmų arduose, galima daryti aiškią išvadą kad ji ir toliau liks kertinė, edifikatorinė rūšis. To pasėkoje

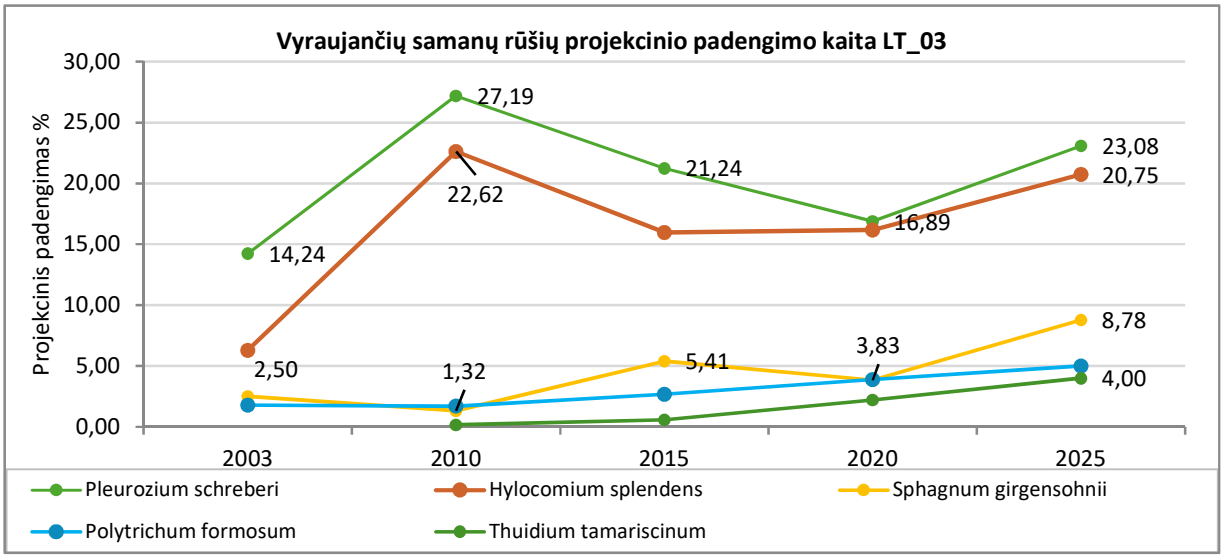
nesant didesnio mąsto pažaidų, žolių ardas ateityje trauksis. Stebėtina, kad beveik padvigubėjo paprastojo ąžuolo sėjinukų dažnumas poligone, ir paskutiniu metu jie registruoti net 78 % tiriamųjų aikštelių (5.3 priedas). Daliai jų pavykus įsitvirtinti, tikėtina ateityje gali formuotis mišrus ąžuolo su egle medynas. Jau dabar registruojami pavieniai gyvybingi ąžuolai II medžių arde, užtikrinantys sėklų sklaidą teritorijoje ir ateityje.



5.2.4 pav. *Vyraujančių žolių ir krūmokšnių ardo rūšių projekcinio padengimo kaita LT03 poligone.*

Samanų augmenija teritorijoje yra gerai išplėtota, sudarydama reikšmingą šio miško sluoksnio komponentą, pasižymintį dideliu padengimu ir rūšine įvairove. 2025 m. duomenys rodo, kad samanų bendrija išlieka struktūriškai stabili. Tyrimai parodė projekcinio padengimo didėjimą beveik per visą tyrimų laikotarpį (5.2.1 pav.). 2025 m. padengimas pasiekė aukščiausią reikšmę – 80,7 %, gerokai viršydamas tiek 2003 m. (55,6 %), tiek 2010–2020 m. svyravimus, kurie išliko apie 60 %. Samanų rūšių skaičius išliko gana stabilus: 2025 m. registruotos 40 rūšių, o tai beveik atitinka 2020 m. (41 rūšis) ir yra daugiau nei 2015 m. (36 rūšys). Lyginant su 2003 m. (39 rūšys), matyti, kad rūšinė įvairovė iš esmės nekinta, tačiau pastaraisiais metais išlieka šiek tiek aukštesnė (5.2.3 pav.). Vertinant atskirų rūšių projekcinio padengimo tendencijas matyti (5.2.5 pav.; 5.3 priedas), kad 2025 m. daugumos rūšių padengimas yra didesnis nei tyrimų pradžioje, nors ne visos rūšys išlaiko nuoseklų augimą. *Pleurozium schreberi* 2025 m. padengimas (23,08 %) yra didesnis nei 2003 m., tačiau mažesnis nei 2010 ir 2015 m., kai rūšis buvo pasiekusi didžiausias reikšmes. Tai rodo, kad ši rūšis išlieka viena iš svarbiausių samanų arde, tačiau jos gausumas svyruoja ir nėra stabiliai didėjantis. *Hylocomium splendens* 2025 m. taip pat pasižymi didesniu padengimu nei tyrimų pradžioje, tačiau nepasiekia 2010 m. piko, nors

aptikimo dažnumas artėja prie maksimalaus. Abi rūšys išlieka plačiai paplitusios, o jų gausumo svyravimai leidžia manyti, kad jos jautriai reaguoja į mikroklimato ar medžių-krūmų ardo struktūros pokyčius. Ryškiausi pokyčiai matomi tarp rūšių, kurios 2025 m. rodo spartų augimą. *Sphagnum girgensohnii* padengimas 2025 m. yra didžiausias per visą tyrimų laikotarpį (8,78 %), o aptikimo dažnumas taip pat nuosekliai didėja. Tai gali rodyti drėgnesnių mikrobuveinių plėtrą arba mažesnę konkurenciją iš kitų samanų. Panaši tendencija matoma ir *Polytrichum formosum*, kurios padengimas ir aptikimo dažnumas 2025 m. yra didžiausi per visą laikotarpį. Šių rūšių gausėjimas gali atspindėti didesnį šviesos kiekį ar pakitusį drėgmės režimą, kurie sudaro palankesnes sąlygas jų plitimui.



5.2.5 pav. *Vyraujančių žolių ir krūmokšnių ardo rūšių projekcinio padengimo kaita LT03 poligone.*

Kitos rūšys, tokios kaip *Dicranum majus*, *Thuidium tamariscinum* ir *Ptilium crista-castrensis*, rodo mišrią dinamiką. *Dicranum majus* 2025 m. padengimas yra didesnis nei 2010–2020 m., o aptikimo dažnumas taip pat auga, kas rodo laipsnišką rūšies atsistatymą. *Thuidium tamariscinum* 2025 m. padengimas yra vienas didžiausių, nors rūšis anksčiau buvo reta, todėl galima manyti, kad ji plečiasi palankėjant mikroklimato sąlygoms. *Ptilium crista-castrensis* 2025 m. padengimas šiek tiek mažesnis nei 2020 m., tačiau aptikimo dažnumas didėja, todėl rūšis išlieka plačiai paplitusi, nors jos gausumas svyruoja. *Plagiomnium affine* 2025 m. padengimas yra mažesnis nei 2015 m., tačiau aptikimo dažnumas didžiausias per visą laikotarpį, kas rodo, kad rūšis plečiasi į daugiau buveinių, nors jos gausumas jose nėra didelis.

Apibendrinant galima teigti, kad 2025 m. samanų ardas pasižymi tiek didžiausiu projekciniu padengimu, tiek stabilia rūšine sudėtimi, o šie rodikliai rodo sustiprėjusį samanų vaidmenį miško paklotėje. Lyginant su ankstesniais metais, samanų ardas aiškiai plečiasi, o jo įvairovė išlieka aukšta, kas gali atspindėti palankesnes mikrobuveines, mažesnį trikdymą ar natūralų bendrijos atsistatymą.

Bendrai paėmus, nepaisant dalies I ardo eglių žūties, eglė su pušimi išlieka kertinė rūšis apsprendžianti žemesniųjų augalijos ardų struktūrą. Įdomu, kad eglėms nepalankūs periodai, iššaukiantys dalies medžių žūtį, dažnai teigiamai paveikia miško struktūrą (5.2.6 pav), krūmų, žolių ir samanų ardų būklę ir didina bendrą augalijos bioįvairovę.

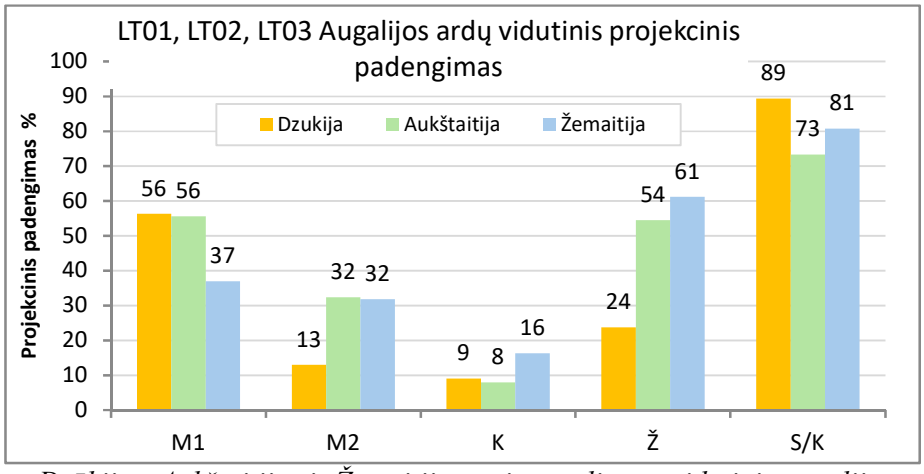
5.2.6 pav. Įvairiaamžio, mozaikiško medyno formavimasis Žemaitijos tyrimų poligone.

Apibendrinant galima teigti, kad Žemaitijos KMS miško ekosistema šiuo metu yra aktyvios struktūrinės kaitos fazėje, kai dalinė eglių žūtis ir didėjantis medyno mozaikiškumas laikinai skatina apatinių ardų produktyvumą bei biologinę įvairovę. Tačiau dėl sėkmingo eglės atsikūrimo ir stabilaus samanų sluoksnio ši ekosistema išlaiko aiškią brandžių hemiborealinių eglynų vystymosi kryptį, ateityje galimai pereinant į mišresnę eglės–pušies–ąžuolo bendriją.

Svarbus Žemaitijos KMS ypatumas yra intensyvus eglės atsikūrimas visuose apatiniuose arduose. Didelis eglės sėjinukų aptikimo dažnumas rodo, kad nesant didelio masto pažaidų ateityje tikėtinas pakartotinis lajų tankėjimas ir palaipsnis žolinio ardo projekcinio padengimo mažėjimas. Tuo pačiu metu didėjantis paprastojo ąžuolo atsikūrimas gali rodyti ilgalaikę medyno rūšinės sudėties kaitą link mišresnių, klimato kaitos sąlygomis potencialiai atsparesnių bendrijų.

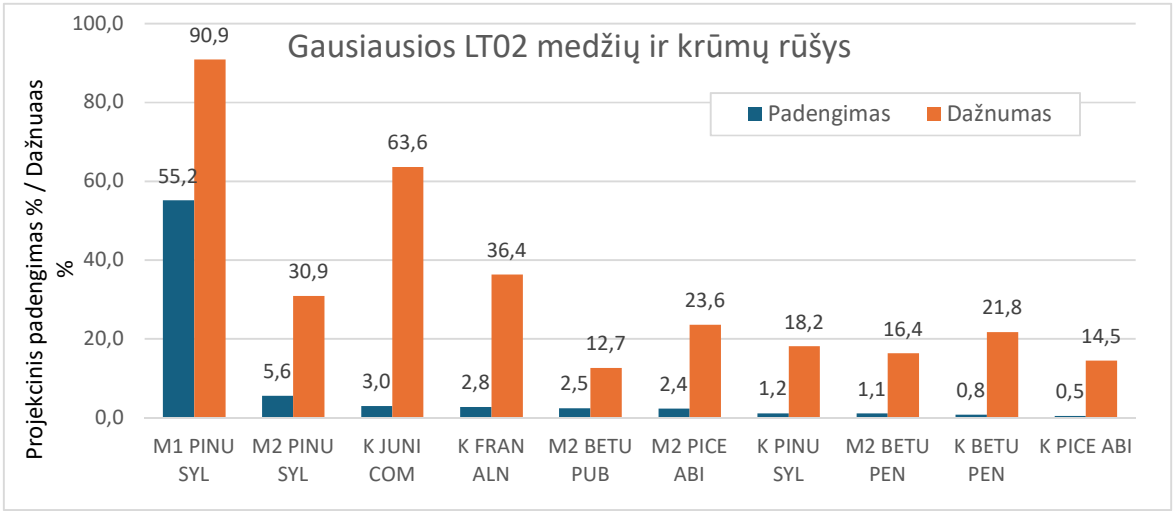
5.3. Dzūkijos KMS, Duburių upelio baseino miško ekosistemos

Dzūkijos integruoto monitoringo stoties tyrimų poligone 2025 metais medžių ardas bendrai paėmus dengė analogiškai kaip ir Žemaitijoje 69 % aikštelių ploto (5.3.1 pav). Tačiau skirtingai nei kitose vietovėse, medžių arde aiškiai dominuoja pušys (5.3.2; 5.3.6 pav.), o II ardas sąlyginai daug skurdesnis, daugeliu atveju visai nėra pomiškio. Įdomu jog eglės, nors bendrai paėmus užima vos 3,4 % laukelių ploto, tačiau antrame medžių arde registruotos beveik ketvirtadalyje (23,6 %) laukelių.

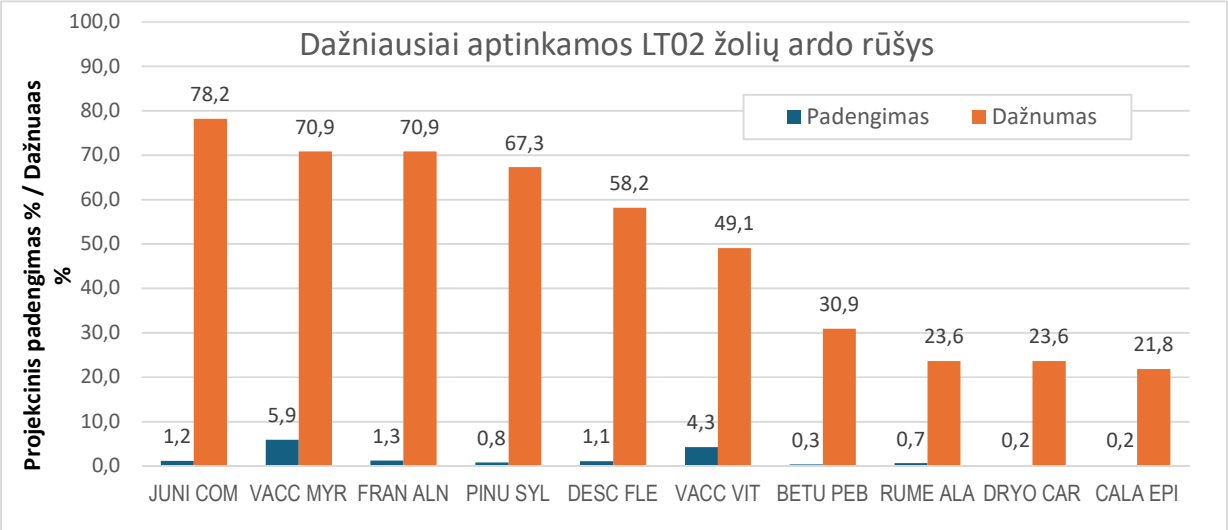


5.3.1 pav. *Dzūkijos, Aukštaitijos ir Žemaitijos tyrimų poligonų vidutinis augalijos ardų projekcinis padengimas 2025 m.*

Krūmų ardas sąlyginai negausus, jame dominuoja paprastais kadagys su šaltekšniu (5.3.2 pav.). Žolių ardas išskirtinai negausus (24%), bendras žolių dengiamas plotas daugiau nei dvigubai mažesnis nei Aukštaitijos ir Žemaitijos KMS. Tačiau rūšinė įvairovė, net 103 žoliniai augalai, ženkliai didesnė nei Žemaitijoje (5.3.3 pav).



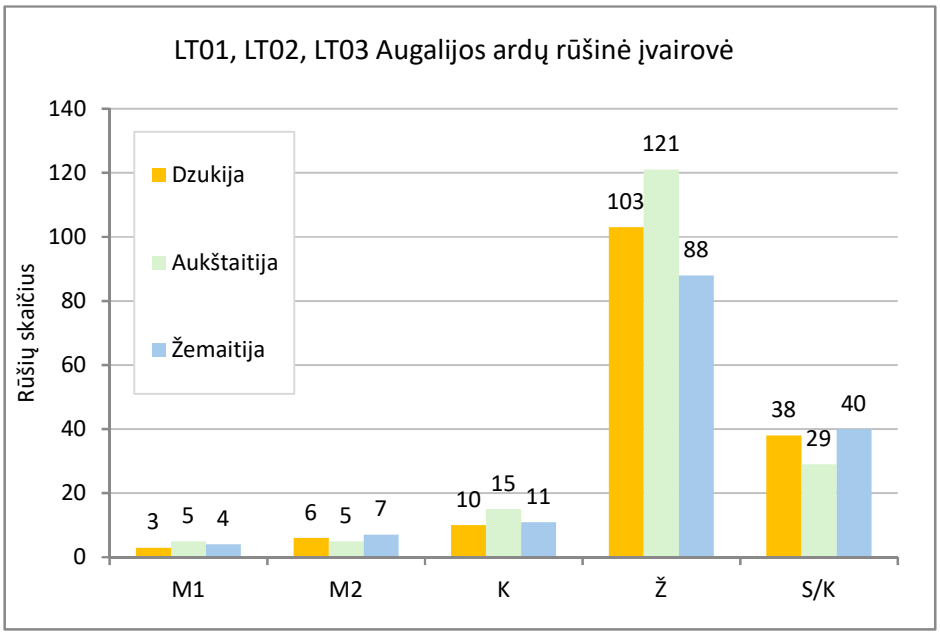
5.3.2 pav. *Dzūkijos tyrimų poligonų gausiausių medžių ir krūmų ardų rūšių gausumas ir aptikimo dažnumas 2025 metais.*



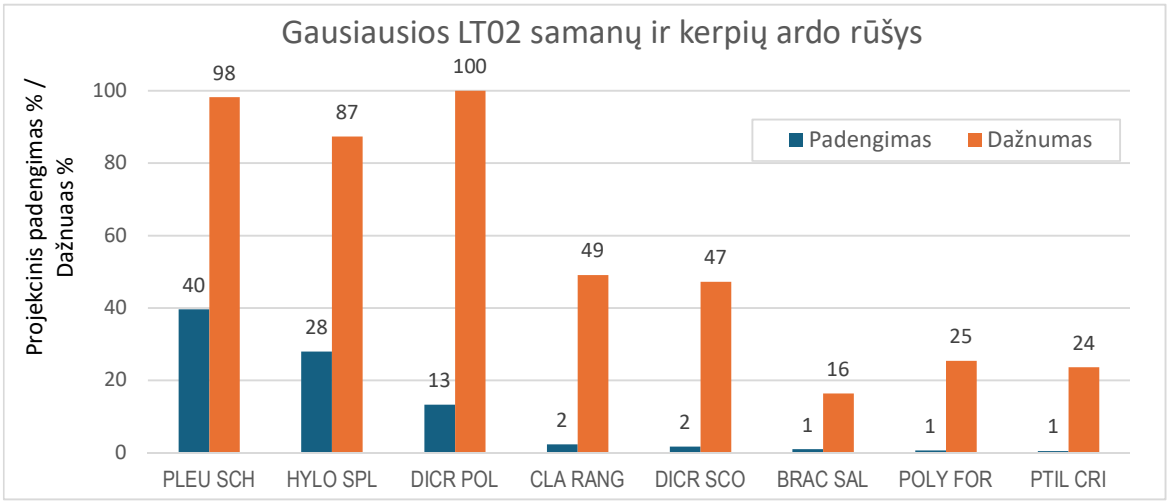
5.3.3 pav. *Dzūkijos, Aukštaitijos ir Žemaitijos tyrimų poligonų, augalijos ardų bendra rūšinė įvairovė 2025 metais.*

Atskirai analizuojant žolių ardo struktūrą, matyti (5.3.4 pav.; 5.2 priedas) kad daugelis rūšių, nors ir labai dažnos (t.y. aptinkamos didelėje dalyje laukelių), tačiau yra labai negausios – užima sąlyginai mažą plotą. Gausiausia iš visų ardo rūšių kaip ir kituose tyrimų vietovėse yra mėlynė, šiuo metu užimanti 5,9 % teritorijos, nors aptinkama net 71% laukelių.Gausiausia iš visų ardo rūšių kaip ir kituose tyrimų vietovėse yra mėlynė, šiuo metu užimanti 5,9 % teritorijos, nors aptinkama net 71% laukelių. Antra pagal gausumą, taip pat tipinis pušynų krūmokšnis – bruknė. Įdomu kad iš 6 dažniausiai vietovėje aptinkamų žolių ardo rūšių, net 5 sumedėję augalai: krūmokšniai mėlynė su brukne, bei kadagių, šaltekšnių ir pušų daigiai. Tai kad kadagys ir šaltekšnis aiškiai dažniausios ir krūmų ardo rūšys, rodo ne tik jų gerą dabartinę būklę, bet ir geras perspektyvas artimoje ateityje.

Samanų ir kerpių ardas dengia net 89 % tiriamojo ploto ir yra ženkliai gausiausias tiek lyginant su kitais ardais, tiek ir su samanų ardais kitose KMS (5.3.1; 5.3.6 pav.). Vyrauja tipinės sausų, rūgščių ir nederlingų buveinių rūšys. Iš viso identifikuotos 38 samanų-kerpių rūšys. Dominuojančios rūšys yra *Pleurozium schreberi* ir *Hylocomium splendens*, kurios sudaro pagrindinį samanų dangos foną ir pasižymi dideliu dažnumu bei gausa (5.3.5 pav). Taip pat reikšmingą dalį sudaro *Dicranum polysetum* ir *Dicranum scoparium*, dažnai formuojančios tankius sąžalynus. Be samanų, priešingai Aukštaitijos ir Žemaitijos poligonams, svarbią dangos dalį sudaro kerpės (*Cladonia* sp.), kurios būdingos sausoms, smėlingoms pušynų buveinėms. Mažesniu dažnumu aptinkamos tokios rūšys kaip *Hypnum cupressiforme*, *Plagiomnium affine*, *Polytrichum* sp., kurios papildo bendrą samanų dangos struktūrą ir didina jos rūšinę įvairovę.



5.3.4 pav. *Dzūkijos tyrimų poligonų dažniausių žolių ir krūmokšnių ardo rūšių gausumas ir aptikimo dažnumas 2025 metais.*



5.3.5 pav. *Dzūkijos tyrimų poligonų dažniausių samanų ir kerpių ardo rūšių gausumas ir aptikimo dažnumas 2025 metais.*

Didelis samanų ir kerpių paplitimas rodo stabilią, mažai derlingą ekosistemą su lėta organinės medžiagos apytaka. Vyraujančios rūšys gerai prisitaikiusios prie sausros ir maistinių medžiagų trūkumo. Galimos tokios samanų ir kerpių dangos susiformavimo priežastys yra ilgalaikis pušyno dominavimas, retas dirvožemio trikdymas ir natūralios smėlynų sąlygos. Jei aplinkos sąlygos nesikeis, tikėtina, kad samanų–kerpių danga išliks stabili.

5.3.6 pav. Pušynas su gausia samanų – kerpių ardo danga Dzūkijos tyrimų poligone.

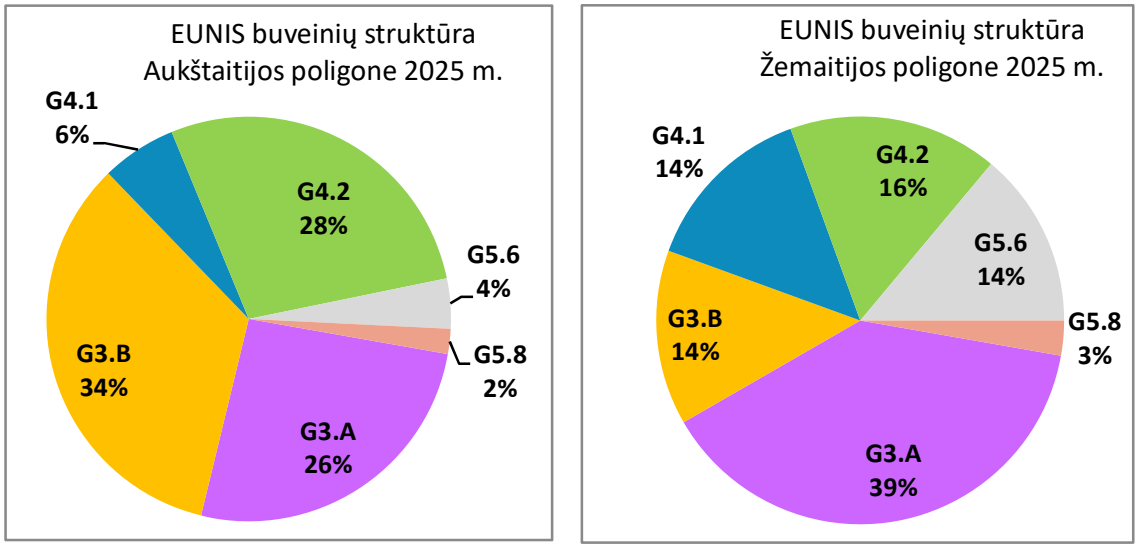
Apibendrinant galima teigti, kad Dzūkijos KMS šiuo metu išlaiko tipišką oligotrofinio pušyno struktūrą ir pasižymi didžiausiu samanų bei kerpių ardo stabilumu iš visų tirtų KMS. Vis dėlto ilgalaikėje perspektyvoje klimato šiltėjimas, azoto kaupimasis ir natūrali sukcesija gali skatinti laipsnišką produktyvesnių augalijos komponentų plitimą bei mažinti atviriems kerpiniams pušynams būdingų rūšių reikšmę.

Didelis samanų ir kerpių padengimas rodo santykinai aukštą šios ekosistemos stabilumą ir nedidelį trikdymo lygį. Tačiau didėjantis mėlynės, samanų bei sumedėjusių rūšių vaidmuo gali rodyti lėtą ilgalaikę augavietės kaitą – palaipsnį perėjimą nuo atviro kerpinio pušyno link uždaresnio brukninio–mėlyninio tipo pušyno.

5.4. EUNIS augalijos buveinių klasifikacija

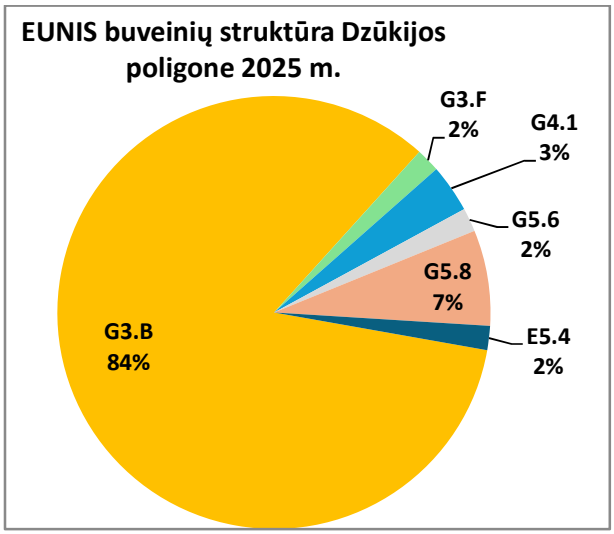
Kiekvienoje skritulinėje aikštelėje pagal dominuojančias medžių ir žemesniųjų ardų rūšis nustatyta buveinė pagal EUNIS klasifikaciją (EUROPEAN ENVIRONMENTAL AGENCY., 2019). Siekiant naujai identifikuotus duomenis palyginti su ankstesnių inventorizacijų rezultatais taikyta senoji EUNIS buveinių nomenklatūra (Davies et al., 2004). Įvertinus tiriamųjų laukelių buveinę, taikant pateiktą EUNIS klasifikaciją, 2025 metais išskirtos 8 tipų buveinės: G3.A – vakarų taiga, eglynas, G3.B – vakarų taiga, pušynas, G3.F – ūkinė spygliuočių plantacija, G4.2 – Mišrus vakarų taigos medynas su beržais, G4.1 – mišrūs pelkėti miškai, G4.F – mišri ūkinė plantacija, G5. 6 – natūralūs ar pusiau natūralūs ankstyvos regeneracinės stadijos miškai, G5.8 – šviežiai žuvę medynai. Aukštaitijos tyrimų poligone dominuoja vakarų taiga su pušimis, vakarų taiga su egle ir mišrūs vakarų taigos medynai su beržu (5.4.1 pav.). Ženkli dalis tiriamųjų laukelių vietovėje pakito iš G3.A į G3.B (5.4 priedas), kas praktiškai reiškia, jog pasikeitė pušų ir eglių projekcinio padengimo santykis ir ženklioje dalyje laukelių, žuvus pirmo medžių ardo eglėms, pušys dabar dengia didesnį laukelio plotą nei eglės. Medžių ardo duomenys iškreipia realų visos vietovės vaizdą, nes tiriamosios aikštelės daugeliu atveju išskirtos apie stambų centrinį medį, kuris įprastai yra pušis, ir daugeliu atveju žuvus aplinkiniams medžiams stambūs centriniai medžiai išlieka. Tad žvelgiant plačiau tiriamosios aikštelės ribų ir remiantis žolių ir samanų ardų rūšinė sudėtimi praktiškai dažniausiai dominuoja tipingos eglynų rūšys arba pereinamojo tipo augalija. 2025 metais Aukštaitijos poligone registruotos 6 % aikštelės su šviežiai žuvusiu (G5.8) arba ankstyvos regeneracinės stadijos (G5.6) medynu.

Žemaitijos tyrimų poligone (5.4.2 pav.) aiškiai dominuoja (39 %) vakarų taigos su egle buveinė (G3.A), bet analogiškai kaip ir Aukštaitijoje, žuvus daliai pirmo ardo eglių ir beržų, pastaraisiais metais padaugėjo aikštelių kur medžių arde dominuoja pušys. Nepaisant to, žemesniuose arduose vis vien dominuoja tipingos eglynų rūšys. Įdomu, kad labai tolygiai pasiskirsto G3.B; G4.1; G4.2; G5.6 buveinės, registruotos 14-16 % aikštelių. Toks sąlyginai tolygus buveinių pasiskirstymas indikuoja stipriai mozaikinę medyno struktūrą tiek augaviečių, tiek amžinės struktūros atžvilgiais. Šviežiai žuvę ar ankstyvos atsikūrimo stadijos medynai registruoti net 17 % aikštelių, tai sąlyginai yra labai daug. Tai indikuoja, kad miškas kinta ne tolygiai, retinantis pavieniams medžiam ir išliekant nuolatinei viršutinių medžių dangai, bet ir aikštelėmis, žūvant didesnėms medžių grupėms.



5.4.1-5.4.2 pav. *Tiriamųjų laukelių pasiskirstymas pagal EUNIS buveinę, Aukštaitijos (a.) ir Žemaitijos (b.) poligonuose 2025 metais.*

Dzūkijos tyrimų poligone (5.4.3 pav.) absoliučiai dominuoja vakarų taigos su pušimi (G3.B) buveinė, indentifikuota 84 % aikštelių. Tai rodo, kad augavietės čia ženkliai skurdesnės ir pušys yra pagrindiniai buveinės edifikatoriai. Skirtingai nei kitose tyrimų vietovėse, ženkli dalis stebimo Duburių upelio baseino ploto patenka į ūkinius miškus. To pasėkoje dalis medynų gana šviežiai iškirsta, paliekant tik pavienius bioįvairovės medžius, paklotę suariant ir atsodinant monokultūriniu pušynu. Tai atspindi identifikuotos G5.8; G5.6; G3F buveinės, bendrai paėmus užimančios 11 % aikštelių teritorijos. Didesnių savaime žuvusių medynų plotų neregistruota. Viena tiriamoji aikštelė Dzūkijos poligone yra užaugančios pievos teritorijoje, identifikuota buveinė E5.4 **(**drėgnos nitrofilinės aukštažolės miško pakraščių pievos), bet jos duomenys į bendrą analizę neįtraukti.



5.4.3 pav. *Tiriamųjų laukelių pasiskirstymas pagal EUNIS buveinę Dzūkijos KMS poligone 2025 metais.*

Siekiant kokybiškai palyginti buveinių kaitos tendencijas ateityje, reikia naudoti vieningą atnaujintą buveinių klasifikaciją ir inventorizacijos metodiką. Remiantis ja, pagal visų ankstesnių metų botaninius aprašus buveines reikėtų perinventorizuoti vieningai. Labai svarbu standartizuoti, koks prioritetas buveinės inventorizacijos metu skiriamas medžių ir žemesniesiems augalijos ardams. Šiuo metu daugelyje tiriamųjų aikštelių Aukštaitijos ir Žemaitijos poligonuose aiškiai vyksta medynų sukcesija: iš šviesių nederlingų rūšine įvairove skurdesnių pušynų į unksmingesnius, derlingesnius eglynus. Daugeliu atveju eglės aiškiai yra pagrindiniai buveinių formuotojai, apsprendžiantys žemesnių ardų augaliją. Tačiau, dėl mažo tiriamųjų aikštelių (įprastai išskirtų apie stambias pušis) ploto - pušų projekcinis padengimas išlieka labai didelis ir vertinant buveines pagal dominuojančių medžių lajos plotą gaunami klaidinantys rezultatai.

Apibendrinanta EUNIS buveinių analizė patvirtina skirtingas hemiborealinių miškų vystymosi kryptis: Aukštaitijoje vyksta trikdžių paspartinta mišraus miško formavimosi stadija, Žemaitijoje – struktūriškai įvairaus eglyno transformacija ir atsikūrimas, o Dzūkijoje – santykinai stabilaus oligotrofinio pušyno išlikimas. Ateities buveinių kaitos vertinimui būtina taikyti vieningą klasifikavimo metodiką, integruojančią ne tik medžių lajų projekcinį padengimą, bet ir žemesniųjų ardų rūšinę sudėtį, nes būtent ji geriau atspindi ilgalaikę miško ekosistemos sukcesijos kryptį.

5.5. Žolinės augalijos kaitos KMS baseinuose apibendrinimas

Ilgalaikiai žolinės augalijos tyrimai Aukštaitijos, Žemaitijos ir Dzūkijos kompleksinio monitoringo stočių baseinuose parodė, kad apatinių miško ardų rūšinės sudėties, projekcinio padengimo ir biologinės įvairovės pokyčius daugiausia lemia medžių ardo struktūros kaita, natūrali sukcesija ir pastaraisiais metais sustiprėję klimato kaitos sąlygoti trikdžiai. Medžių rūšių sudėties pokyčiai, lajų išretėjimas, pomiškio formavimasis ir negyvos medienos kiekio didėjimas keičia šviesos, drėgmės ir maisto medžiagų režimą, todėl tampa pagrindiniais žemesniųjų augalijos ardų vystymąsi reguliuojančiais veiksniais.

Aukštaitijos KMS Versminio upelio baseine nustatyta intensyviausia augalijos struktūrinė transformacija. Dalies brandžių eglių ir beržų žūtis padidino medyno mozaikiškumą, sudarė naujas mikrobuveines ir paskatino žolių bei krūmokšnių ardo plėtrą. Žolinio ardo projekcinis padengimas ir rūšinė įvairovė pasiekė didžiausias reikšmes per visą stebėjimų laikotarpį. Kartu samanų ardas išlieka stabilus, tačiau jo rūšinė struktūra keičiasi – mažėja kai kurių anksčiau dominavusių borealinių rūšių reikšmė ir didėja prie naujų mikroklimatinių sąlygų prisitaikančių rūšių dalis. Tai rodo aktyvų pereinamąjį etapą nuo buvusių pušynų link struktūriškai įvairesnių mišrių medynų.

Žemaitijos KMS žolinės augalijos pokyčiai vyksta produktyvesnėse ir drėgnesnėse augavietėse. Dalinė pirmojo ardo eglių žūtis taip pat padidino šviesos prieinamumą ir paskatino žolių bei krūmokšnių ardo suvešėjimą, tačiau stiprus eglės atsikūrimas apatiniuose arduose rodo išliekančią eglynų sukcesijos kryptį. Ypač gerai išsivystęs samanų ardas, kurio projekcinis padengimas 2025 m. pasiekė didžiausias reikšmes, rodo stabilias mikroklimatines sąlygas ir didelį šių bendrijų atsparumą. Didėjantis ąžuolo atsikūrimas gali indikuoti ilgalaikį perėjimą link mišresnių ir klimato kaitai atsparesnių medynų.

Dzūkijos KMS Duburių upelio baseinas išsiskiria didžiausiu struktūriniu stabilumu ir išlikusia oligotrofinių pušynų būkle. Dominuojantis pušies medžių ardas palaiko mažo derlingumo, sausoms augavietėms būdingas sąlygas, todėl žolinės augalijos projekcinis padengimas išlieka mažiausias tarp KMS. Tačiau rūšinė įvairovė yra didelė, o samanų ir kerpių ardas dengia beveik visą miško paklotę, atspindėdamas stabilias pušynų sąlygas. Kartu stebimas palaipsnis mėlynių, samanų ir sumedėjusių rūšių gausėjimas rodo lėtą augavietės transformaciją link produktyvesnių pušynų bendrijų.

EUNIS buveinių analizė patvirtino nustatytas sukcesijos kryptis: Aukštaitijos ir Žemaitijos KMS vyksta pereinamieji procesai tarp vakarų taigos pušynų, eglynų ir mišrių medynų, kuriuos sustiprina klimato sukeltos pažaidos ir natūrali medynų dinamika. Dzūkijos KMS išlieka stabiliausia vakarų taigos pušynų sistema, kurioje buveinių pokyčius daugiausia lemia lėta natūrali sukcesija.

Apibendrinant galima teigti, kad KMS baseinuose žolinės augalijos ir kitų apatinių ardų biologinė įvairovė nemažėja, tačiau vyksta aiški jų struktūrinė transformacija. Klimato kaitos sąlygomis pagrindiniu pokyčių reguliatoriumi tampa medžių ardo būklė ir jo gebėjimas palaikyti stabilų mikroklimatą. Didėjantis medynų mozaikiškumas trumpuoju laikotarpiu skatina rūšių įvairovę, tačiau ilgalaikėje perspektyvoje gali keisti tipinių borealinių bendrijų sudėtį ir skatinti naujų hemiborealinių miškų struktūrų formavimąsi.

IŠVADOS

1. 2025 m. Versminio, Juodupio ir Duburių upelių baseinuose atlikti žolinės augalijos tyrimai 141 pastovioje tyrimų aikštelėje parodė, kad hemiborealinių miško ekosistemų apatinių ardų struktūrą ir rūšinę sudėtį pirmiausia reguliuoja pagrindinių medyno edifikatorinių rūšių kaita. Aukštaitijos ir Žemaitijos KMS dalies pirmojo ardo eglių žūtis padidino medynų mozaikiškumą ir laikinai pagerino šviesos sąlygas žemesniesiems ardams, tačiau pušies atsikūrimo nebuvimas ir gausus eglės plitimas apatiniuose arduose rodo, kad šiose ekosistemose išlieka ilgalaikė sukcesinė kryptis link eglynų ar mišrių eglynų formavimosi. Dzūkijos KMS pagrindiniu edifikatoriumi išlieka pušis, kurios dominavimą palaiko mažas augaviečių derlingumas ir drėgmės trūkumas.

2. Žolių ir krūmokšnių ardo pokyčiai parodė, kad medyno struktūros persitvarkymas trumpuoju laikotarpiu didina biologinę įvairovę. Aukštaitijoje ir Žemaitijoje dėl atsiveriančių aikštelių didėjo žolių ardo projekcinis padengimas ir rūšių skaičius, tačiau palankios sąlygos susidarė ne tik pionierinėms rūšims, bet ir tipiniams miško dominantams – mėlynei bei paprastajam kiškiakopūsčiui. Didžiausias bendras augalų rūšių skaičius nustatytas Aukštaitijos KMS (153 rūšys), kiek mažesnis Dzūkijos (143 rūšys) ir Žemaitijos KMS (132 rūšys). Tačiau didžiausia funkcinė rūšių pusiausvyra nustatyta Žemaitijoje, kur dėl tolygesnio rūšių pasiskirstymo Shannon biologinės įvairovės indeksas buvo didžiausias (3,1), o Dzūkijoje, nepaisant didelio rūšių skaičiaus, dėl atskirų rūšių mažo gausumo jis buvo žemiausias (2,5).
3. Samanų ir kerpių ardų tyrimai atskleidė skirtingas regionines reakcijas į aplinkos pokyčius. Aukštaitijos KMS samanų bendras padengimas išlieka stabilus, tačiau vyksta bendrijos struktūrinė kaita – mažėja kai kurių anksčiau dominavusių borealinių rūšių (*Hylocomium splendens*, *Pleurozium schreberi*) reikšmė ir didėja kitų rūšių vaidmuo. Žemaitijos KMS samanų ardas pasižymi didžiausia rūšine įvairove ir didėjančiu projekciniu padengimu, kas rodo palankias drėgmės ir mikroklimato sąlygas. Dzūkijos KMS išlieka stabilus sausų oligotrofinių pušynų samanų–kerpių kompleksas, kuriame svarbų vaidmenį išlaiko sausrai atsparios samanos ir *Cladonia* genties kerpės.
4. EUNIS buveinių analizė patvirtino, kad KMS baseinuose vyksta skirtingų krypčių sukcesiniai procesai. Aukštaitijos ir Žemaitijos KMS šiuo metu yra pereinamojoje stadijoje, kurioje klimato kaitos sąlygotos pažaidos ir natūrali medynų raida didina struktūrinį heterogeniškumą bei mikrobuveinių įvairovę. Dzūkijos KMS išlieka santykinai stabilus oligotrofinio pušyno modelis, tačiau maisto medžiagų ir drėgmės režimo pokyčiai ateityje gali spartinti kitų medžių rūšių, ypač eglės, įsitvirtinimą.
5. Apibendrinant galima teigti, kad KMS miško ekosistemose žolinės augalijos pokyčiai atspindi ne biologinės įvairovės mažėjimą, bet vykstančią ekosistemų struktūrinę transformaciją. Klimato kaita ir atmosferinių iškritų pokyčiai tiesiogiai bei netiesiogiai veikia apatinius augalijos ardus pirmiausia per pagrindinių edifikatorinių medžių rūšių būklę, lajų struktūrą, mikroklimatą ir sukcesijos kryptį. Todėl ilgalaikėje perspektyvoje miško ekosistemų stabilumą daugiausia lems paprastosios eglės ir paprastosios pušies gebėjimas prisitaikyti prie kintančių aplinkos sąlygų.
6. Siekiant atskirti natūralios medynų sukcesijos, klimato kaitos ir tolimųjų oro pernašų sąlygotos taršos poveikį augalijos pokyčiams, būtinas ilgalaikio kompleksinio monitoringo tęstinumas. Tik integruojant augalijos, medžių būklės, atmosferinių iškritų, dirvožemio, mikroklimato ir kitų ekosistemos komponentų duomenis galima patikimai įvertinti priežastinius ryšius bei prognozuoti hemiborealinių miškų raidos kryptis globalios kaitos sąlygomis.

Galimos grėsmės žolinės augalijos ir miško ekosistemų stabilumui KMS baseinuose

Ilgalaikiai KMS baseinų ir intensyvaus monitoringo stacionarų tyrimai rodo, kad pagrindinės grėsmės žolinės augalijos ir žemesniųjų ardų stabilumui ateityje bus susijusios ne su tiesioginiu rūšių nykimu, bet su pagrindinių medyno edifikatorių būklės pokyčiais ir jų sukelta visos ekosistemos struktūrine transformacija. Medžių ardo pokyčiai, keičiantys šviesos režimą, mikroklimatą, drėgmės balansą ir organinės medžiagos apytaką, tampa pagrindiniu veiksniu, lemiančiu apatinių ardų raidą.

Aukštaitijos KMS didžiausia grėsmė siejama su klimato ekstremumų poveikiu paprastajai eglei ir vykstančia medyno struktūros kaita. Pastaraisiais metais registruota brandžių eglių žūtis, paskatinta sausrų, karščio bangų ir žievėgraužio tipografo plitimo, didina medyno fragmentaciją ir keičia mikroklimatines sąlygas. Nors trumpuoju laikotarpiu atsiveriančios aikštelės didina žolių ardo rūšinę įvairovę, ilgalaikėje perspektyvoje galimas stabilias borealines bendrijas formuojančių rūšių mažėjimas bei spartesnis augalijos persitvarkymas. Silpnas pušies atsikūrimas rodo papildomą riziką prarasti dabartinę mišrių pušynų–eglynų struktūrą.

Žemaitijos KMS pagrindinė rizika susijusi su eglynų stabilumu klimato kaitos sąlygomis. Nors šiuo metu stiprus eglės atsikūrimas palaiko eglynų sukcesijos kryptį, didėjantis ekstremalių sausrų, audrų ir kenkėjų poveikis gali lemti naujas eglių žūties bangas. Tokiu atveju galimas spartus medyno struktūros pasikeitimas, lajų atvėrimas ir trumpalaikis konkurencingų žolinių rūšių plitimas. Ilgalaikėje perspektyvoje didžiausia grėsmė būtų ne rūšių skaičiaus mažėjimas, bet brandiems drėgniems eglynams būdingų specializuotų rūšių dalies sumažėjimas.

Dzūkijos KMS pagrindinės grėsmės skiriasi nuo kitų stočių ir yra susijusios su oligotrofinių pušynų stabilumo išlaikymu. Mažas dirvožemio derlingumas ir drėgmės trūkumas šiuo metu palaiko pušies dominavimą bei samanų–kerpių bendrijas, tačiau klimato šiltėjimas, azoto junginių kaupimasis ir galimi drėgmės režimo pokyčiai gali spartinti augaviečių derlingėjimą. Tai skatintų mėlynių, samanų ir kitų produktyvesnių rūšių plitimą, kartu mažinant atviriems kerpiniams pušynams būdingų rūšių reikšmę. Papildoma rizika yra ūkinės veiklos poveikis dalyje baseino, keičiantis natūralią medyno struktūrą ir mikrobuveinių tęstinumą.

Visose KMS bendras ilgalaikis rizikos veiksnys yra galimas biologinės įvairovės homogenizavimas. Didėjantis medynų produktyvumas, azoto poveikis ir klimato kaita gali skatinti plačios ekologinės amplitudės rūšių plitimą, o jautresnių, siauresnėms ekologinėms nišoms prisitaikiusių rūšių vaidmuo gali mažėti. Tokiu atveju bendras rūšių skaičius gali išlikti aukštas, tačiau mažėtų ekosistemų unikalumas ir funkcinė įvairovė.

Todėl pagrindinė ateities grėsmė KMS miško ekosistemoms yra ne tiesioginis žolinės augalijos degradavimas, bet galimas natūralios sukcesijos krypties pasikeitimas dėl klimato kaitos poveikio pagrindinėms medžių rūšims. Paprastosios eglės ir paprastosios pušies atsakas į sausras, temperatūros ekstremumus ir biotinius veiksnius taps pagrindiniu veiksniu, lemiančiu apatinių augalijos ardų ir visos hemiborealinių miškų ekosistemos ateities raidą.

Žolinės augalijos ir miško buveinių kaitos prognozės KMS baseinuose

Remiantis ilgalaikiais KMS tyrimų rezultatais galima prognozuoti, kad ateityje žolinės augalijos ir kitų apatinių ardų kaita bus labiausiai susijusi su klimato kaitos poveikiu pagrindinėms medyno edifikatorinėms rūšims bei jų nulemta sukcesijos kryptimi. Tiesioginis meteorologinių veiksnių ir atmosferinių iškritų poveikis žolinei augalijai dažniausiai bus modifikuojamas per medžių būklę, lajų struktūrą, mikroklimatą ir dirvožemio sąlygų pokyčius.

Aukštaitijos KMS tikėtina tolesnė mišrių medynų struktūrinė transformacija. Vietose, kur dėl sausrų, karščio bangų ir kenkėjų poveikio žus dalis brandžių eglių, trumpuoju laikotarpiu didės medyno mozaikiškumas, žolių bei krūmokšnių ardo projekcinis padengimas ir rūšinė įvairovė. Tačiau dėl silpno pušies atsikūrimo ir stipresnės eglės regeneracijos ilgalaikėje perspektyvoje tikėtinas tolesnis perėjimas nuo pušies dominuojamų bendrijų link mišrių eglynų, jei klimato sąlygos neviršys eglės tolerancijos ribų.

Žemaitijos KMS, esant palankesniam drėgmės režimui ir didesniam augaviečių derlingumui, tikėtinas santykinai didesnis miško ekosistemos stabilumas. Eglė artimiausiu metu turėtų išlikti pagrindine edifikatorine rūšimi, palaikančia brandiems eglynams būdingą mikroklimatą ir žemesniųjų ardų struktūrą. Tačiau dažnėjant ekstremalioms sausroms ir biotiniams pažeidimams galimos periodinės eglių žūties bangos, kurios skatins medyno įvairiaamžiškumą ir mišrių, galimai su didesniu lapuočių (ypač ąžuolo) vaidmeniu, bendrijų formavimąsi.

Dzūkijos KMS artimiausiais dešimtmečiais tikėtinas ilgiausias dabartinės pušynų struktūros išlikimas. Mažas dirvožemio derlingumas ir ribotas drėgmės prieinamumas toliau palaikys paprastosios pušies dominavimą bei samanų–kerpių bendrijas. Vis dėlto klimato šiltėjimas, ilgesnis vegetacijos laikotarpis ir maisto medžiagų kaupimasis gali palaipsniui skatinti kerpinių pušynų transformaciją į produktyvesnes bruknines–mėlynines bendrijas, mažėjant atvirų oligotrofinių buveinių požymiams.

Samanų ir kerpių bendrijų ateities pokyčiai tikėtina priklausys nuo mikroklimato stabilumo. Didėjant medynų struktūrinei įvairovei ir negyvos medienos kiekiui gali plėstis epiksilinių samanų bei specializuotų mikrobuveinių rūšių grupės. Tačiau dėl augaviečių derlingėjimo, azoto poveikio ir užpavėsinimo ilgainiui gali mažėti šviesamėgių, sausoms oligotrofinėms sąlygoms prisitaikiusių samanų bei kerpių rūšių dalis.

Bendrai prognozuojama, kad KMS baseinuose artimiausiais dešimtmečiais vyks ne biologinės įvairovės mažėjimas, bet jos persiskirstymas ir funkcinė transformacija. Didės struktūriškai sudėtingų, mišresnių ir įvairiaamžių medynų reikšmė, tačiau kartu gali mažėti siaurai specializuotų buveinių dalis. Ateities miško ekosistemų stabilumą daugiausia lems pagrindinių edifikatorinių rūšių gebėjimas prisitaikyti prie klimato ekstremumų ir išlaikyti mikroklimato reguliavimo funkciją.

Remiantis ilgalaikiais KMS baseinų ir intensyvaus monitoringo stacionarų tyrimų rezultatais prognozuojama, kad ateityje žolinės augalijos ir kitų apatinių ardų kaita labiausiai priklausys nuo pagrindinių medynų edifikatorinių rūšių – paprastosios eglės ir paprastosios pušies – atsako į klimato kaitą ir aplinkos pokyčius. Aukštaitijos ir Žemaitijos KMS tikėtina tęsis medynų struktūrinė transformacija, kai dėl eglių žūties suformuotos aikštelės trumpuoju laikotarpiu didins žolių, krūmokšnių ir samanų įvairovę, tačiau ilgalaikėje perspektyvoje sukcesijos kryptį lems eglės atsikūrimo intensyvumas bei jos atsparumas sausroms ir biotiniams pažeidimams. Dzūkijos KMS dėl oligotrofinių augaviečių sąlygų dar kurį laiką turėtų išlikti pušynų dominavimas ir stabilios samanų–kerpių bendrijos, tačiau klimato šiltėjimas, azoto kaupimasis ir augaviečių derlingėjimas gali skatinti jų palaipsnę transformaciją į produktyvesnes mėlynines–bruknines bendrijas. Bendras rūšių skaičius ateityje gali išlikti stabilus ar net didėti dėl didėjančio medynų mozaikiškumo, tačiau pagrindinė rizika bus rūšinės sudėties ir funkcinių grupių kaita – specializuotų borealinių rūšių mažėjimas ir platesnės ekologinės amplitudės rūšių plitimas.

5.1 Priedas. Aukštaitijos tyrimų poligono LT_01, 2025 metų rūšių sąvadas, A-D dalys.

LT01_2025 / Ardas	Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	Padengimas	Dažnumas
M (medžiai bendras, >5m)	Ardo projekcinis padengimas %	65	68	0	60	75	60	78	68	58	70	68	76	78	70	83	70	74	80	82	70	60	70	20	67	65	50	55	78	76	80	70	77	70	58	68	74	73	70	78	74	85	84	72	45	77	68	60	70	78	78	**68.06**	
M1 (medžiai viršutinis)		50	60	0	50	72	55	70	65	54	70	68	70	50	64	65	65	68	68	66	0	50	70	10	35	63	37	55	70	50	70	60	70	68	0	65	60	68	58	65	67	68	65	66	40	65	60	0	66	66	66	**55.66**	
M2 (medžiai žemutinis)		45	20	0	11	15	5	20	6	18	3	0	20	65	21	65	30	22	60	55	70	45	10	10	46	4	25	10	44	40	60	43	40	38	58	38	40	18	59	16	30	55	30	30	8	56	30	60	17	50	55	**32.32**	
K (krūmai, 0,5-5m)		8	8	6	16	4	1	5	5	1	10	1	4	12	3	16	5	2	0	0	18	10	12	28	0	3	2	0	10	0	50	8	10	3	1	6	0	5	0	35	16	2	2	2	20	4	25	12	3	1	0	**7.90**	
Ž (žolės, krūmokšniai)		57	82	95	70	45	76	75	74	75	68	59	21	60	67	60	66	95	3	7	80	60	97	95	25	73	40	28	20	4	15	91	73	50	15	87	48	21	6	9	70	27	60	71	60	27	86	50	97	70	14	**54.48**	
S/K (samanos / kerpės)		60	70	55	85	85	95	95	80	90	80	95	90	36	90	55	80	50	98	99	35	30	45	40	75	96	95	85	97	98	5	40	70	90	98	84	75	98	4	60	60	96	95	95	77	80	60	85	30	85	94	**73.30**	
M1 rūšių sk.		**1**	**1**	**0**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**2**	**1**	**1**	**1**	**1**	**0**	**2**	**2**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**0**	**2**	**2**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**0**	**1**	**2**	**1**	**1.04**	**100**
Alnus glutinosa	**M1**																					28																																**0.56**	**2**
Betula pendula	**M1**													50								45																													30		**2.50**	**6**
Betula pubescens	**M1**																																						58														**1.16**	**2**
Picea abies	**M1**									58		68				38						15	62	10						50		60	70			50	37			65			65		40								**13.76**	**28**
Pinus sylvestris	**M1**	50	60		50	72	55	70	65		70		70		64	58	65	68	68	66					35	63	37	55	70		70			68		50	47	68			67	68		68		65	60		66	55	66	**40.58**	**66**
M2 rūšių sk.		**2**	**1**	**0**	**2**	**1**	**1**	**1**	**2**	**1**	**0**	**0**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**2**	**1**	**1**	**1**	**1**	**2**	**1**	**0**	**1**	**1**	**1**	**2**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**2**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1.06**	**100**
Acer platanoides	**M2**																															5																				**0.10**	**2**
Alnus glutinosa	**M2**																																						4														**0.08**	**2**
Betula pendula	**M2**	2			6				2												68						3																										**1.62**	**10**
Picea abies	**M2**	44	20		6	15	5	20	4	18			20	65	21	40	30	22	60	55	5	45	10	10	46	2	25		44	40	44		40	38	58	38	37	18	55	16	30	55	30	30	8	56	30	60	17	50	50	**28.64**	**90**
Tilia cordata	**M2**																															40																				**0.80**	**2**
K rūšių sk.		**4**	**3**	**1**	**3**	**1**	**1**	**1**	**7**	**1**	**3**	**1**	**1**	**2**	**1**	**2**	**2**	**1**	**0**	**0**	**1**	**6**	**3**	**3**	**0**	**2**	**1**	**0**	**1**	**0**	**4**	**4**	**6**	**2**	**1**	**2**	**0**	**1**	**0**	**2**	**4**	**2**	**1**	**2**	**5**	**1**	**3**	**2**	**3**	**1**	**0**	**1.96**	**100**
Acer platanoides	**K**																						1										1																				**0.04**	**4**
Betula pendula	**K**		2		7				2			1																																		11				3				**0.52**	**12**
Betula pubescens	**K**								1																																				1								**0.04**	**4**
Corylus avellana	**K**	4							1		1					6							10	20							20	3	1							34	9								20	12				**2.82**	**26**
Frangula alnus	**K**																					1	1									1	1	1								1								1				**0.14**	**14**
Fraxinus excelsior	**K**																					1																																**0.02**	**2**
Lonicera xylosteum	**K**																					2																																**0.04**	**2**
Malus domestica	**K**								1																																												**0.02**	**2**
Picea abies	**K**	6			8	4		5	4	1	9		4	12	3	10	5	2			18	80		8		3	2		10		40	1	5	2	1	6		5		1		1		1	8	4	8			1		**5.56**	**66**
Populus tremula	**K**																																												1								**0.02**	**2**
Ribes nigrum	**K**																					1																																**0.02**	**2**
Salix caprea	**K**						1																																														**0.02**	**2**
Sambucus racemosa	**K**	1	5	6					2		1																						1								6		2					1					**0.50**	**18**
Sorbus aucuparia	**K**	1	2		1				1					1			1					1	1			1				1			1	1							1	1		1	1		1		1				**0.40**	**38**
Ulmus galbra	**K**																															1																				**0.02**	**2**
Ž rūšių sk.	**Ž**	**21**	**20**	**23**	**23**	**16**	**13**	**14**	**20**	**11**	**16**	**17**	**17**	**32**	**20**	**30**	**24**	**20**	**3**	**5**	**22**	**43**	**35**	**28**	**24**	**9**	**24**	**22**	**11**	**9**	**15**	**41**	**27**	**22**	**16**	**23**	**9**	**11**	**6**	**13**	**29**	**14**	**24**	**25**	**24**	**12**	**30**	**24**	**20**	**16**	**16**	**19.78**	**100**
Acer platanoides	**Ž**																							1					1				1																				**0.06**	**6**
Actaea spicata	**Ž**																																								1										**0.02**	**2**
Aegopodium podagraria	**Ž**																						1									5																				**0.12**	**4**
Agrostis capillaris	**Ž**					1																																						1								**0.04**	**4**
Alnus glutinosa	**Ž**																																						1														**0.02**	**2**
Amelanchier spicata	**Ž**																																																1				**0.02**	**2**
Anemone nemorosa	**Ž**																							2	1							3	1																				**0.14**	**8**
Arrhenatherum elatius	**Ž**												1	1																																								**0.04**	**4**
Athyrium filix-femina	**Ž**				1											1						1	1	1				1							1	1										4							**0.24**	**18**
Betula pendula	**Ž**				1	1			1			1		1													1							1											3				2			**0.24**	**18**
Betula pubescens	**Ž**		1						1				1														1	1		1															1		1						**0.16**	**16**
Calamagostris arudinacea	**Ž**	1.6	3	15	10	1	1	1	7	1	1	5		3	1	2	2	7			65	1		1	1	1	5		1	1	1	3	1	1	1	2	1	1		1	1	1	1	5	5	1	3	2	2	15	1	**3.73**	**88**
Calamagostris canescens	**Ž**																					1																																**0.02**	**2**
Calamagrostis epigejos	**Ž**					1																																														**0.02**	**2**

LT01_2025 / B	Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	Padengimas / dažnumas	
Calluna vulgaris	Ž					1						1															1			1																					0.08	8
Campanula persicifolia	Ž													1																																							0.02	2
Cardamine sp.	Ž																					1																															0.02	2
Carex acutiformis	Ž																					1																															0.02	2
Carex cespitosa	Ž																						1																															0.02	2
Carex digitata	Ž											1		1								2	1							1	1											2						1					0.20	16
Carex Leporina	Ž			1																	1																																	0.04	4
Chamerion angustifolium	Ž	1	1	1		1									1	1												1					1													1			2					0.22	20
Chimaphila umbellata	Ž																																				1																0.02	2
Chrysosplenium alternifo	Ž																					2																																	0.04	2
Circea alpina	Ž	1												1		1	1					3	15	4	1						10	3				1			1	1		8				6					1.14	30
Cirsium oleraceum	Ž																					1									2																					0.06	4
Cystopteris fragilis	Ž																					1																																	0.02	2
Convallaria majalis	Ž	1	1.5	1	1		2	2	1	1	1	1	1	2	1	4	1	1	1	1	1	1		1	1	2	1	1	1	1			1	2	1	1	1	1			1		1	1	2	1	3	1	1	1	1	1.09	86
Corylus avellana	Ž	1			1										1	1	1					1		1	1					1	3	2							1	2			1	1		2	1		1	1	0.48	38
Crepis paludosa	Ž																						3								2																					0.10	4
Daphne mezereum	Ž																														2																				0.04	2
Deschampsia flexuosa	Ž				2					1					1		1			1	1								1																	1			1				0.20	18
Dryopteris carthusiana	Ž	1	1	1	1.5			1	1			1	1	1	1	1	1	1			1	1			1		1	1			1	1	1	1	1	1					1	1	1	1	1		1		3	1	1	0.69	64
Dryopteris carthusiana cc	Ž				1											1	1	1				1			2			1							1						1	3		1	1			1	3				0.38	28
Dryopteris cristata	Ž																1																																				0.02	2
Dryopteris expansa	Ž																						4	2							1	1													1								0.18	10
Dryopteris filix-mas	Ž				1											1	1				1				1			1			1				1	2					1						1					0.24	22
Elymus caninus	Ž																																																			0.02	2
Epilobium montanum	Ž								1																																											0.02	2
Equisetum pratense	Ž																						1								1																					0.04	4
Euonymus europaeus	Ž																						1	1																													0.04	4
Euonymus verrucosus	Ž													1																																						0.02	2
Festuca ovina	Ž			1																						1																										0.04	4
Fragaria vesca	Ž		1								1			3		1					8	2		1	1			1						1		8						1			2				1	2			0.68	30
Frangula alnus	Ž	0.5					1	1				2			1		1					1	3		1			1		1	1	1	1		1	1			1	1	1	1	1			1	1					0.55	50
Fraxinus excelsior	Ž																														1																				0.02	2
Galeopsis sp.	Ž	1	1	16	1				1		12			1				1										1				1					1						1	1			2	1	1	1	1	0.90	36
Galium album	Ž													1																																						0.02	2
Galium palustre	Ž																						1																													0.02	2
Galium uliginosum	Ž																					1																															0.02	2
Geranium robertianum	Ž																					1																															0.02	2
Geum rivale	Ž																					1	1								1																					0.06	6
Gymnocarpium dryopteris	Ž															1								9																							7		1					0.36	8
Goodyera repens	Ž												1												1			1						1												1						1	0.16	16
Hepatica nobilis	Ž																														1																				0.04	4
Hieraciinae sp.	Ž														1																																					0.02	2
Hieracium murorum	Ž															1																														1						0.04	4
Impatiens noli-tangere	Ž																					8	15	27							2	3																			1.14	12
Impatiens parviflora	Ž										2																																									0.04	2
Lamiastrus galeobdolon	Ž																					1	5								6									2												0.28	8
Lathyrus nigra	Ž																				1																																0.02	2
Lathyrus sylvestris	Ž			1																																															0.02	2
Lathyrus vernus	Ž													1																	1																				0.04	4

LT01_2025 / C	Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	Padengimas / dažnumas	
Lemna minor	Ž																																						2												0.04	2
Lycopodium annotinum	Ž		1		6					1	1					1							2	6	3							1		2						2			16	4			1					0.94	28
Lycopodium clavatum	Ž					1																																														0.02	2
Linnaea borealis	Ž															1											7														3						2		1			0.28	10
Lysimachia vulgaris	Ž																					1	3																														0.08	4
Lonicera xylosteum	Ž													2								1		1																	2												0.12	8
Luzula pilosa	Ž	1	1	1	1	1	1	1	1		1	1	1	1	1	1	1	1		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1			1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.92	92
Maianthemum bifolium	Ž		1			1	1					1	1		3	3	1					3	1	1	7					1	2	1	1	1	1				1	10		3	1	3		3	1	8		1	1.24	54
Melampyrum pratense	Ž			1	1	2	4	1	1	10		9	1	1												9	4		1					1			1						1		2	1			10		1.24	40
Melica nutans	Ž																														1																				0.04	4
Mercurialis perennis	Ž																					3	36								10																						0.98	6
Mycelis muralis	Ž	1	1	2	1	1	1	1	2		1	1	1	1	1	2	1	2				1	1	2	1		1	1			1	3	1	1	12					1	1	2	1	1		1	2	2	2	1	1.18	74
Milium effusum	Ž										1										1		1	1							1	1																	1				0.14	14
Moehringia trinervia	Ž	1	1		1				1					1	1	1	1	1			1	1		1	1	1	1						1	1		1					1		1	1	1		1		1		1	0.50	50
Monotropa hypopitys	Ž																			1									1																		1					0.06	6
Oxalis acetosella	Ž	11	38	15	10		1	18	18		1		3	10	18	22	35	38				12	25	38	8		1				5	36	40	6	8	43			1	6	47	5	40	46	9		40	18	47	6	4	14.58	74
Padus avium	Ž													1									1								1																				0.06	6
Paris quadrifolia	Ž																						2								1										1		1								0.10	8
Peucedanum oreoselinun	Ž			1																																															0.02	2
Picea abies	Ž	4	1		1		1	1	4	1	3	5	1	1	2	1	2	1			3	2	1	1	1		2	1	1		4	3	1	1		2		2	1	2	1		1	2	2		6			1	1	1.42	76
Pinus sylvestris	Ž					1						1																1																							0.06	6
Poa palustris	Ž																						1																													0.02	2
Poa trivialis	Ž																														1												1								0.04	4
Polygonatum odoratum	Ž			1										1									1													1																0.08	8
Populus tremula	Ž											1		1		1		1																																			0.08	8
Potentilla erecta	Ž																										1																									0.02	2
Pteridium aquilinum	Ž						35	62		15				18	50	9	19	56						67			5			1	1		5	25				1			3		1	9	1			2	89			9.48	42
Quercus robur	Ž										1	1				1																																			0.06	6
Quercus rubra	Ž																																																		1	0.02	2
Ranunculus repens	Ž																					2																															0.04	2
Ribes nigrum	Ž																					3																															0.06	2
Rosa sp.	Ž																																			1																0.02	2
Rubus idaeus	Ž	20	33	25	4	1		2	6		25	1	1	2	3	2	10	5			6	2	2	2	2	1	1	5			1	2	8	1		2					3	1	5	5	2		12	2	5	8	1	4.38	76
Rubus saxatilis	Ž		1	1	1									4		3	2	3			1	2	1	2	2		2				2	2	1	1	6					2	1	2	5	1	1	14	4	3			1.40	54
Rumex acetosella	Ž					1																																						1							0.04	4
Salix caprea	Ž											1															1	1													1											0.08	8
Sambucus racemosa	Ž	1		5					1		1				1		1	1										1					1			1					1		1		1			1	1			0.38	30
Scorzonera humilis	Ž																																																1			1		0.04	4
Solanum dulcamara	Ž																					1																															0.02	2
Solidago virgaurea	Ž		1	1												1									1										1							1										0.12	12
Sorbus aucuparia	Ž	1	1	3	4			1	1	1		1	1	1	1	1	1	1	1		1	5	2	2	1	1	1	1	1		2	1	2	1	1	2	1	1	1	1	2	1	1	1		1	10	1	1	1	1	1.36	88
Stellaria longifolia	Ž			1	1																						1																						2				0.10	8
Stellaria media	Ž	1							1							1					1															7																	0.22	10
Stellaria nemorum	Ž																					1	1								4																					0.12	6
Thelypteris palustris	Ž																					2																															0.04	2
Tilia cordata	Ž																														2																		1			0.06	4
Trientalis europaea	Ž	1	3	2	2		3	2	4	1			2	1	2	2	1	2			1	1	1	3	1		3	1	1	1	1		2	1	1		1	1		1	2	1	3	2	2	1	2	2	2	4		1.40	80
Ulmus glabra	Ž																														1																				0.02	2
Urtica dioica	Ž	1		1													1				1	1	2					1							4														1				0.26	18

LT01_2025 / D	Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	Padengimas / dažnumas	
Vaccinium myrtillus	Ž	8	14	25	40	38	64	33	38	60	36	28	7	5	33	20	6	6	3	5	2	5	2	1	12	58	12	20	19	4	7	1	9	17	5	3	46	20		2	6	12	8	9	24	26	10	2	8	22	8	16.98	98
Vaccinium vitis-idaea	Ž	1				1	1		1	1	1		1	1	1						1						1		1		1			1			1	1					1						1		0.36	36
Veronica chamaedrys	Ž													1							1																															0.04	4
Vicia sylvatica	Ž																										1																									0.02	2
Viola epipsila	Ž																						10																													0.20	2
Viola mirabilis	Ž																	1														2																					0.06	4
Viola palustris	Ž																					6																															0.12	2
Viola sp.	Ž																				1	1		1								1	1	1										1			1						0.16	16
S/K rūšių sk.	S/K	9	7	7	9	7	5	4	7	5	6	8	8	9	6	8	9	9	5	6	7	8	9	13	8	6	8	9	4	6	4	9	10	6	9	7	6	3	4	8	7	5	7	7	6	6	5	8	7	5	6	73.30	100
Anomodon longifolius	S/K		1																																																		0.02	2
Atrichum undulatum	S/K											1		1				1			1						1									1																	0.12	12
Brachythecium rutabulun	S/K																							1																													0.02	2
Brachythecium salebrosu	S/K	1			5						1															1		1																									0.18	10
Brchythecium rivulare	S/K													1			1																																			0.04	4
Bryum sp.	S/K																							1										1																			0.04	4
Cirriphyllum piliferum	S/K																					3	1	8								1																					0.26	8
Climacium dendroides	S/K																																						1														0.02	2
Dicranum majus	S/K			1	1										1					5								1		2					1																		0.24	14
Dicranum montanum	S/K								1				1														1																									0.06	6
Dicranum polysetum	S/K	1	1	1	1	15	10	2	2		1	1	1	2	15	1	1	3			3		1	1	5	5	2	4	5	3			5	2	4	2	1			1	1	1	1	2	1	1		3	1	2	1	2.32	82
Dicranum scorparium	S/K	1				5			8	1			1	3		2	1	1	5			1	1	1	1	1	1	2				3	1	1	1		1		1	2	1		2	1	1	1	1	1	1	1	1	1.14	68
Herzogiella seligeri	S/K																							1																													0.02	2
Hylocomium splendens	S/K	10	20	25	15	10	35	55	15	30	20	30	50	5	60	10	15	13	40	30	5	2	3	5	20	70	15	10	20	15	1	30	40	40	45	45	20	5		5	28	20	65	40	20	15	30	40	10	60	25	24.74	98
Hypnum cupressiforme	S/K				1												1			1					1						1																						0.10	10
Lophocoela heterophylla	S/K																							1																													0.02	2
Plagiochila asplenioides	S/K													1																		2	2							5													0.20	8
Plagiomnium affine	S/K	1	1	1										7		10	5	2			3	17	20	20	1							3	8			1				30	1		3	1			15	3	3				3.12	44
Plagiomnium undulatum	S/K				1						1											3						2																										0.14	8
Plagiothecium laetum	S/K	1																																				1					1										0.06	6
Pleurozium schreberi	S/K	30	20	15	25	15	30	20	25	25	15	15	20	15	10	30	40	15	20	5	10	3	5	5	10	10	10	10	10	10	2	6	10	30	10	15	10	4		20	2	5	20	20	15	10	12	5	5	10	38	14.44	98
Pohlia nutans	S/K					1						1																																									0.04	4
Polytrichum formosum	S/K					5						2	1			1				1			1				1	5		1			3		1													2					0.48	24
Ptilium crista-castrensis	S/K	20	25	10	35	35	20	20	25	35	45	40	30		5	2	10	7	33	60				2	40	10	65	50	62	70		1	3	18	40	15	45	90			30	70	5	30	40	55		40	2	10	30	25.60	84
Rhytdiiadelphus triquetru	S/K		0																																																		0.48	6
Rhodobryum roseum	S/K																	1			1	1	15	3									1			1				1													0.48	16
Sciuro-hypnum oedipodi	S/K		6	3	10		1		1	1		1	1	3	1	2	7	10	1		15	3	0	5	1						2	4	10		1	6	1		2	1	10	1	1		1	1	6	1	8		2	2.60	72
Sphagnum capillifolium	S/K	1																																																			0.02	2
Thuidium tamariscinum	S/K																															2																					0.04	2
Ž+S/K rūšių sk.		33	0	33	35	26	21	21	30	19	25	28	28	44	29	41	36	32	11	14	32	54	47	44	35	18	35	34	18	18	22	53	40	31	28	33	18	17	13	24	39	22	34	35	33	21	38	35	30	24	25	0.04	6

5.2 Priedas. Dzūkijos tyrimų poligono LT_02, 2025 metų rūšių sąvadas, A-D dalys.

LT02_2025 / A		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	50	51	52	54	55	56	57	58	Paden gimas	Dažnumas
M (medžiai bendras, >5m)		83	70	76	80	75	77	78	80	83	80	58	62	38	68	77	83	60	70	25	85	77	68	67	68	84	77	37	64	65	68	70	70	69	75	40	78	72	70	70	70	80	60	47	64	70	20	20	75	58	60	48	82	65	60	67	66	
M1 (medžiai viršutinis)		80	60	70	68	75	76	60	75	78	80	55	58	38	63	77	79	55	63	0	70	77	68	66	68	45	77	37	50	63	60	70	68	69	70	40	78	65	57	67	45	0	0	0	60	69	20	20	70	58	57	48	0	56	60	60	56	
M2 (medžiai žemutinis)		5	18	7	22	0	4	20	10	7	0	5	12	0	5	0	4	11	10	25	22	0	0	4	2	28	0	0	11	5	8	0	6	0	5	0	0	18	20	5	25	80	60	47	81	3	0	0	5	0	10	0	82	11	2	7	13	
K (krūmai, 0,5-5m)		3	15	18	3	2	3	7	1	26	0	6	2	17	7	2	26	1	14	37	0	5	1	15	5	5	6	4	38	22	1	2	2	1	0	15	0	4	0	1	9	2	25	55	3	1	6	5	6	0	2	14	1	25	25	2	9	
Ž (žolės, krūmokšniai)		6	23	25	4	18	5	50	26	24	2	20	5	40	15	46	35	15	5	98	3	2	15	16	6	38	6	7	55	36	7	15	7	14	4	44	45	80	11	13	40	8	90	96	4	11	23	12	50	9	17	12	2	10	26	10	24	
S/K (samanos / kerpės)		96	98	98	98	94	98	99	90	90	98	90	85	50	80	99	92	99	99	57	80	95	95	90	93	80	95	68	63	97	85	95	90	94	96	98	98	95	100	100	95	95	60	30	90	98	90	95	100	98	95	80	98	98	98	80	89	
M1 rūšių sk.		1	1	1	1	1	1	2	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	100
Betula pendula	**M1**									5																																																	0	2
Picea abies	**M1**							14																																																0	2
Pinus sylvestris	**M1**	80	60	70	68	75	58	50	75	78	75	55	58	38	63	77	79	55	63		70	77	60	66	68	45	70	37	50	55	60	70	68	69	64	40	78	65	57	67	45				60	69	20	20	70	58	57	48		56	60	60	55	91
M2		1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	0	1	0	1	1	2	2	1	0	0	1	1	1	0	0	2	1	1	0	1	0	1	0	0	2	1	1	2	2	2	1	1	1	0	0	1	0	2	0	1	1	1	2	1	100
Acer platanoides	**M2**																			6																																							0	2
Betula pendula	**M2**																4		4					4	2								6										25										5			11	2		1	16
Betula pubescens	**M2**																																					8		5	20		50	47								5					3	3	13
Picea abies	**M2**		18		22		4			7								11		21								10		8											5		12			3			5								5	2	24
Pinus sylvestris	**M2**	5		7				12	10			5	12		5				12		22					28				5						5			10	20			60			8									82				6	31
Quercus robur	**M2**																												3																												0	2
K		2	4	4	2	1	2	2	1	2	0	1	1	3	3	3	1	1	2	5	0	1	1	2	2	2	1	2	4	2	0	1	2	1	0	2	0	3	0	1	2	3	2	2	2	1	1	2	1	0	1	2	1	4	3	2	2	10
Alnus glutinosa	**K**																			1																																							0	2
Betula pendula	**K**	1		1				2						17	3	1										1							1			11																				6		1	1	1	22
Betula pubescens	**K**															1				5																							2	1		1	1												0	11
Frangula alnus	**K**		6							10				1	3	1				18				11	1			3	15	1						4		2				1	20	45			6	4						1		1	3	36
Juniperus communis	**K**	2	5	14	2	2	2			6		6	2		1		26		7			5	1	5	4	4	6	1	14	22		2	1	1				2			7	1			2	1		1	6		2		1	1	1		3	64
Picea abies	**K**		3	2	1			8												2									6										1					5															1	15
Pinus sylvestris	**K**			1					1					1				1	7																							1												8		23	24	1	1	18
Quercus robur	**K**																												1																												0	2
Sambucus racemosa	**K**																			3																																							0	2
Sorbus aucuparia	**K**		1				1																																																				0	4
Ž		15	15	17	10	10	10	14	5	15	6	10	9	8	16	13	13	7	7	38	8	10	12	15	9	8	5	11	28	15	10	8	6	7	6	22	9	22	9	7	13	12	33	23	7	8	14	10	9	13	10	9	6	13	14	12	12	103
Agrostis capillaris (tenuis)	**Ž**															1													1							1		1																				0	7
Agrostis sp.	**Ž**																			4																										1	1														0	5
Ajuga reptans	**Ž**																			1																																								0	2
Amelanchier spicata	**Ž**																																1																										0	2
Anthoxanthum odoratum	**Ž**	1	1													1							2						1	2						1		1	1																				1	0	18
Athyrium filix-femina	**Ž**																			1																									2																0	4
Betula pendula	**Ž**			1				1						1		1	1	1				1		1									1	1		2										1		1		1	2		1	1		0	31
Betula pubescens	**Ž**	1																		1																					1												1					1	0	11
Calamagostris arudinaceae	**Ž**														1																																									1	8		1	1		0	9
Calamagrostis epigejos	**Ž**						1						1	1			1			1				1												1			1						1									1				1	0	22
Caltha palustris	**Ž**																																																									0	2
Campanula sp.	**Ž**																					1																																					0	2

LT02_2025 / B		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	50	51	52	54	55	56	57	58	Padengimas / dažnumas	
Carex canescens	Ž																			1																							1	1														0.05	5
Carex cespitosa	Ž																																										1															0.02	2
Carex echinata	Ž																			1																																								0.02	2
Carex elongata	Ž																																									2															0.04	2
Carex ericetorum	Ž																											1								1																			1				0.05	5
Carex Leporina	Ž																																										1															0.02	2
Carex riparia	Ž																																										5															0.09	2
Carex sp.	Ž																			1																																								0.02	2
Chamerion angustifolium	Ž																													1																													0.02	2
Chimaphila umbellata	Ž		1			1							1											1						1	1											1															0.13	13
Circea alpina	Ž																																										2															0.04	2
Cirsium arvense	Ž																			1																																								0.02	2
Convallaria majalis	Ž				1																1																																							0.04	4
Corylus avellana	Ž	1																																																											0.02	2
Corynephorus canescens	Ž																																																											0.05	5
Danthonia decumbens	Ž																												1									1																							0.05	5
Deschampsia flexuosa	Ž	1	2	1				1		6		1		3	4	3	1				2	1	1	1				4		4	1	1			1	3		1	3	1	1		5		1	1		1		2	1		1		2	1.13	58
Dryopteris carthusiana	Ž		1	1	1			1								1	1			1						1										1						1				1								1			0.24	24
Epilobium palustre	Ž																																											1															0.02	2
Equisetum palustre	Ž																																										1															0.02	2
Equisetum sylvaticum	Ž																												1																													0.02	2
Fallopia dumetorum	Ž																			1																																								0.02	2
Festuca ovina	Ž											1	1		3									1							1					1							1															0.16	13
Fragaria vesca	Ž																			2									3																													0.09	4
Frangula alnus	Ž	1	6	1	1		1	1		13	1	1		1	1	1	1		1	1	1	1	1	2	1			1	5	1		1				2	1	3	1			1	2	4			1	2	1	1		1		1	1	1	1.25	71
Galeopsis sp.	Ž																												1																													0.02	2
Galium palustre	Ž																																										1															0.02	2
Galium uliginosum	Ž																																										1															0.02	2
Geranium robertianum	Ž																			1																																								0.02	2
Geum rivale	Ž																			1																																								0.02	2
Geum sp.	Ž																																										1															0.02	2
Goodyera repens	Ž	1			1		1	1			1	1													1					1																					1								0.16	16
Hieracium murorum	Ž		1	1									1		1								1	1						1						1																						0.16	16
Hieracium pilosella	Ž					1									1														1							1																						0.15	13
Hieracium umbellatum	Ž					1																																																						0.02	2
Hypericum maculatum	Ž																			1																																								0.02	2
Hypochaeris radicata	Ž														1															1																					1								0.05	5
Holcus mollis	Ž																																			2																						0.04	2
Impatiens noli-tangere	Ž																			2																												4												0.11	4
Juncus effusus	Ž																			1																																									0.02	2
Juniperus communis	Ž			2		1	1	1		1	1	1	1	1	1		1	1	1		1	1	1	1	4	1	6	1	2	3	1	1		3	3	1	1	1	1		2	1			3	1	1		3	1	1		1	1	1	1	1.16	78
Knautia arvensis	Ž														1														1																													0.04	4
Lychnis flos-cuculi	Ž																																											1															0.02	2

LT02_2025 / C		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	50	51	52	54	55	56	57	58	Padengimas / dažnumas	
Lycopodium annotinum	Ž			2																									1								18			1																	0.4	7
Lycopodium clavatum	Ž							1																					1	2																											1		0.1	7
Lycopus europaeus	Ž																																											1	1																0.0	4
Lysimachia vulgaris	Ž																			2									4								1						1	2															0.2	9
Lythrum salicaria	Ž																			1																							1	1															0.1	5
Lolium giganteum	Ž																			1																																							0.0	2
Luzula pilosa	Ž		1	1				1		1	1									1																		1												1								0.1	15
Maianthemum bifolium	Ž						1													1							1		1													1																0.1	11
Melampyrum pratense	Ž																		1															1								2							1						1	11	1	0.3	13
Mycelis muralis	Ž	1																		1				1																																			0.1	7
Milium effusum	Ž																			1																																							0.0	2
Moehringia trinervia	Ž																												1																													0.0	2
Monotropa hypopitys	Ž																																		1																							0.0	2
Oxalis acetosella	Ž	1	1	1	2					3						3				35									30									7					2															1.5	18
Paris quadrifolia	Ž																																										1															0.0	2
Peucedanum palustre	Ž																																										1	1															0.0	4
Picea abies	Ž			2	1			3									1								1										1		1															1			1	1	0.2	18
Pinus sylvestris	Ž	1		1		1	1	1	3	1		1	1		1			1	3	1	1	1	1	1	1	1		1		1	1	1	1	1		3	1			1	1			1	1	1		1		1	1	1	2		0.8	67
Poa pratensis	Ž																												1																										1		0.0	4
Poa sp.	Ž																			1																								1	1															0.1	5
Polygonum sp.	Ž																																											1														0.0	2
Potentilla erecta	Ž																												1									1																			0.0	4
Potentilla palustris	Ž																																											1														0.0	2
Prunus serotina	Ž									1																1		1																															0.1	5
Pteridium aquilinum	Ž		5			1				4		11		37			6			15																				68																			2.7	15
Quercus robur	Ž	1			1																1				1						1					1						1															0.1	13
Ranunculus repens	Ž																			1																								1	1															0.1	5
Rubus caesius	Ž																																					20																	1		0.4	4
Rubus idaeus	Ž	1								2										64			1						8							7		3				1				1	1									1.6	18
Rumex acetosella	Ž					1				1					1	1								1				2	3						1			7							5	6		5							2	0.7	24
Rumex sp.	Ž																																								1															0.0	2
Rumex thyrsiflorus	Ž																																			1																				0.0	2
Salix cinerea	Ž																																											1														0.0	2
Sambucus racemosa	Ž																																																			1					0.0	2
Scutellaria galericulata	Ž																			1																																							0.1	5
Senecio sylvaticus	Ž														1							1	1	1				1								1				1								6	2		1			1			0.3	20
Solanum dulcamara	Ž																												1																1													0.0	4
Solidago virgaurea	Ž																																									1															0.0	2
Sorbus aucuparia	Ž	1	1	1			1								1	1														1								1				1	1										1				0.2	20
Stellaria holostea	Ž																			1																																							0.0	2
Stellaria media	Ž																			1																									3															0.1	4
Thelypteris palustris	Ž																																											35	83														2.1	4
Trientalis europaea	Ž		2	6						5						2	1						8				1		2	1						1		3																			0.6	20
Urtica dioica	Ž																			5																									44	7														1.0	5
Vaccinium myrtillus	Ž	2	6	2	1		1	40	12	5		11	3		4	20	14	7	4			1	5	12	1	11			7	4		12					1	20	1	10	32	1	1		1	5	5	1	45		6			3	5	5	5.9	71
Vaccinium vitis-idaea	Ž		1	6		15		8	14	2							12	8								27			2	18	6	1	7	9		22	40			2	4	5				5			1	1	10		1	4	6		4.3	49
Viola epipsila	Ž																			3									1													8	2														0.3	7
Viola sp.	Ž																												1																											0.0	2

LT02_2025 / D		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	50	51	52	54	55	56	57	58	Padengimas / dažnumas	
S/K		3	7	3	6	4	6	6	3	5	5	4	4	3	4	5	4	8	6	8	5	5	7	6	3	9	4	10	6	6	6	4	5	4	5	12	6	6	4	6	5	4	12	7	7	5	10	6	4	5	5	11	7	8	6	7	5.9	38
Atrichum undulatum	S/K																			5										1																													0.1	2
Aulacomnium palustre	S/K																																																									0.0	2
Brachythecium albicans	S/K																																										1															0.0	2
Brachythecium salebrosum	S/K						1										1												2							1	1				1		32	15			1										1.0	16
Brachythecium sp.	S/K																			30																																							0.5	2
Bryum sp.	S/K										1																									1																						0.1	5
Calliergon cordifolium	S/K																																											3	7														0.2	4
Calliergonella cuspidata	S/K																																											1														0.0	2
Ceratodon purpureus	S/K																									1		1								1																					5		1			0.2	9
Cetraria islandica	S/K																																																									3					0.1	2
Cladonia chlorophaea	S/K																																			1																					3					0.1	4
Cladonia cornuta	S/K																																																									5					0.1	2
Cladonia fimbriata	S/K																											1																														1					0.0	4
Cladonia furcata	S/K																																			1			10								1	1								1	1		1	0.3	13
Cladonia glauca	S/K																						1					1																																	0.0	4
Cladonia rangiferina	S/K					4		1					5					2					1	1		1		1				1	1		2	1	1		30	5		1			5	1	5		5	2	1	10	20	5	1	15	2.3	49
Climacium dendroides	S/K																																										1	5															0.1	4
Corynephorus canescens	S/K																											1																															0.0	2
Dicranum majus	S/K																																												20		1													0.4	4
Dicranum montanum	S/K																									1																																	0.0	2
Dicranum polysetum	S/K	6	1	8	3	30	15	5	25	5	1	20	15	16	6	3	2	2	10	2	5	20	25	10	3	1	15	2	2	6	20	25	6	10	30	35	10	7	15	15	10	10	1	1	5	10	25	70	15	30	30	10	15	20	20	20	13.3	100
Dicranum scorparium	S/K				1											1				1	1	1	1	1		1		60	1		1	1	1		1	5	2	1		1	1		1			1	1	8					1	1		1	1.8	47
Hedwigia ciliata	S/K						1											1																																								15				0.3	5
Hylocomium splendens	S/K	35	92	75	60	15	51	40	15	15	60	10	15	10	1	65	82	75	57	1	10	1	9	5	45	10	45		1	58	30		1	50	6		57	55		60	55	58	3		1	83	10		25	15	25		5	10	20	15	28.0	87
Hypnum cupressiforme	S/K									1									1																	1																							0.1	5
Plagiomnium affine	S/K				1													1		8									1									1						8	2														0.4	13
Plagiothecium laetum	S/K																																											1														0.0	2
Pleurozium schreberi	S/K	55	2	15	28	45	30	51	50	63	24	60	40	50	73	30	15	15	30	1	63	70	60	75	45	69	35	3	57	32	35	70	82	34	60	45	30	30	45	30	30	25	5		55	3	45	15	53	48	40	2	55	62	55	40	39.6	98
Pohlia nutans	S/K																						1			1		1																															0.1	5
Polytrichum formosum	S/K											1							1							1				1	1			1		8							1		1							1	1	15			1	1	0.6	25
Polytrichum juniperinum	S/K		1					1										1		10																					1						3														0.3	11
Polytrichum piliferum	S/K																											1																															0.0	2
Ptilidium pulcherrimum	S/K		1															1	1																																								1			0.1	13
Ptilium crista-castrensis	S/K		1		5		2	1		6	5				1	1						1					2			1						1												1										0.5	24
Rhytdiiadelphus triquetrus	S/K																																										5															0.1	2
Siuro-hypnum oedipodium	S/K		1																		1			1						1					1																						1		0.1	11
Thuidium tamariscinum	S/K																																										1															0.0	2
Trapeliopsis granulosa	S/K																																																						15				0.3	2
Rūšių sk. (Ž+S/L)		18	22	20	16	14	16	20	8	20	11	14	13	11	20	18	17	15	13	46	13	15	19	21	12	17	9	21	34	21	16	12	11	11	11	34	15	28	13	13	18	16	45	30	14	13	24	16	13	18	15	20	13	21	20	19	18	141

5.3 priedas. Žemaitijos tyrimų poligono LT_03, 2025 metų rūšių sąvadas, A-D dalys.

LT03_2025 / A	Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	Padengimas	Dažnumas
M (medžiai bendras, >5m)	Ardo projekcinis padengimas %		70	20	65	4	67	6	60	75	60	70	70	77	4	50	56	60	65	66	48	86	82	70	78	67	65	25	58	57	70	62	80	18	86	75	65	30	57.42	
M1 (medžiai viršutinis)			55	0	56	0	58	0	38	45	40	60	30	70	0	0	54	55	46	58	48	12	64	63	40	40	50	0	45	0	53	56	0	0	60	75	60	0	36.97	
M2 (medžiai žemutinis)			25	20	35	4	32	6	38	38	57	4	45	22	0	50	6	7	38	30	0	77	55	38	55	45	40	25	25	57	45	20	80	18	64	8	7	30	31.83	
K (krūmai, 0,5-5m)			2	3	48	5	1	40	14	0	72	4	1	1	18	25	50	6	18	0	42	10	7	1	0	22	0	10	0	10	5	6	5	68	8	60	17	5	16.22	
Ž (žolės, krūmokšniai)			93	98	47	98	76	57	82	40	70	56	77	81	94	57	63	68	62	69	58	16	16	35	19	43	76	85	53	41	80	58	52	55	28	60	50	87	61.11	
S/K (samanos / kerpės)			98	32	55	80	100	60	55	95	58	96	98	100	53	98	98	98	70	98	80	80	35	100	70	70	98	45	90	80	90	98	80	95	95	100	98	60	80.72	
M-I		**0**	**3**	**0**	**1**	**0**	**2**	**0**	**1**	**2**	**1**	**1**	**1**	**2**	**0**	**0**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**2**	**2**	**2**	**0**	**1**	**0**	**2**	**2**	**0**	**0**	**1**	**1**	**1**	**0**	**1.00**	**100**
Betula pendula	M1		5							15													60		35														**3.19**	**11**
Betula pubescens	M1				30																																		**0.83**	**3**
Picea abies	M1		45				20		38	40			30	24			54	55			45	12		63	12	5	15				15	12			60	75			**17.22**	**50**
Pinus sylvestris	M1		40				54				40	60		53					46	58						38	48		45		45	50					60		**17.69**	**36**
M-II		**0**	**1**	**1**	**3**	**1**	**1**	**2**	**4**	**1**	**2**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**2**	**0**	**3**	**2**	**1**	**2**	**1**	**2**	**1**	**1**	**2**	**2**	**1**	**3**	**4**	**4**	**1**	**1**	**1**	**1.61**	**7**
Betula pendula	M2							3															4										12	4					**0.64**	**11**
Betula pubescens	M2								4		55										11		50				4			5	3			4	3				**3.86**	**25**
Picea abies	M2		25		20	4	32	3	24	38	5	4	45	22	4	50		7	38	22		40	55	38	45	45	28	25	23	55	45	20	64	10	47	8	7	30	**25.78**	**92**
Populus tremula	M2																																	3					**0.08**	**3**
Quercus robur	M2			20					2																9								15		20				**1.83**	**14**
Salix caprea	M2				5																														2				**0.19**	**6**
Sorbus aucuparia	M2				10				3								6					2																	**0.58**	**11**
K		**0**	**1**	**1**	**1**	**2**	**1**	**5**	**6**	**0**	**5**	**2**	**1**	**3**	**2**	**4**	**2**	**3**	**2**	**0**	**6**	**2**	**1**	**1**	**0**	**3**	**0**	**5**	**1**	**3**	**3**	**1**	**1**	**3**	**2**	**2**	**2**	**2**	**2.19**	**11**
Betula pendula	K							4								1			1		1							4											**0.31**	**14**
Betula pubescens	K										3			1																3	2			14					**0.64**	**14**
Corylus avellana	K				48				4								30				4																		**2.39**	**11**
Frangula alnus	K							1	1		28			1							1										1			1				**0.94**	**19**
Picea abies	K		2					28	2		18	4			18	22		5	15		30	8	7	1		20		3	20	8	2	6		38	8	60	17	5	**9.64**	**67**
Populus tremula	K																	1																					**0.03**	**3**
Quercus robur	K							1	1		2					2					1					2										3			**0.33**	**19**
Salix caprea	K					1																						1											**0.06**	**6**
Salix cinerea	K										20																	1											**0.58**	**6**
Sambucus racemosa	K			3					3																														**0.17**	**6**
Sorbus aucuparia	K					5	1	4	3			1	1	1	1	2	12	1			3	1				1		1		1			5		1		1	2	**1.33**	**56**
ž		**3**	**16**	**19**	**27**	**19**	**11**	**16**	**18**	**8**	**38**	**8**	**15**	**12**	**16**	**16**	**22**	**18**	**20**	**7**	**27**	**12**	**13**	**11**	**21**	**13**	**9**	**20**	**12**	**16**	**14**	**9**	**18**	**15**	**27**	**12**	**14**	**22**	**16.42**	**89**
Acer platanoides	Ž				1																																		**0.03**	**3**
Agrostis capillaris	Ž																		1		1				1										1			1	**0.14**	**14**
Agrostis stolonifera	Ž			1																																			**0.03**	**3**
Alnus glutinosa	Ž										1																												**0.03**	**3**
Anemone nemorosa	Ž																																		1				**0.03**	**3**
Arrhenatherum elatius	Ž				1																																		**0.03**	**3**
Athyrium filix-femina	Ž										2										2							1							1				**0.17**	**11**
Betula pendula	Ž						1									1		1	1									1										1	**0.17**	**17**
Betula pubescens	Ž						1				2		1	1							1	1	1	1			1			1	1			6					**0.50**	**33**

LT03_2025 / B	Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	Padengimas	
Carex canescens	Ž										2																						1						**0.08**	**6**
Carex digitata	Ž	1																																					**0.00**	**0**
Carex echinata	Ž										3										2													1					**0.17**	**8**
Carex paniculata	Ž										3																												**0.08**	**3**
Carex pilulifera	Ž		1			1							1					1	1				1		1			1	1				1	1			1	**0.33**	**33**
Calamagrostis arundinacea	Ž		1	1		8		3	16						2	1	3	1			2							65		1		8						**3.11**	**36**
Calamagrostis epigejos	Ž										4																												**0.11**	**3**
Calamagrostis SP.	Ž													2																									**0.06**	**3**
Calluna vulgaris	Ž																										1				2			1					**0.11**	**8**
Carex elongata	Ž										1																												**0.03**	**3**
Cerastium holosteum	Ž																																					1	**0.03**	**3**
Chamerion angustifolium	Ž							1	1																														**0.06**	**6**
Circea alpina	Ž																				3																		**0.08**	**3**
Cirsium palustre	Ž										1																												**0.03**	**3**
Comarum palustre	Ž										1																												**0.03**	**3**
Corylus avellana	Ž		1		3						1						2								1														**0.22**	**14**
Deschampsia flexuosa	Ž		1	1		1		2	1	2			2		1	1	1	4	3		2	1	1	1	1	1	1		7	2	1	2	1	1	1	1	4	12	**1.67**	**81**
Dryopteris carthusiana	Ž							1			1					1	1		1		1	1						1		1			1				1		**0.31**	**31**
Dryopteris carthusiana complex	Ž																					2												1					**0.08**	**6**
Dryopteris cristata	Ž															1																							**0.03**	**3**
Dryopteris dilatata	Ž							4							1						6													1					**0.33**	**11**
Dryopteris expansa	Ž								1																														**0.03**	**3**
Dryopteris filix-mas	Ž				1																																	**0.03**	**3**
Epilobium montanum	Ž				1																																	**0.03**	**3**
Epilobium palustre	Ž										2																												**0.06**	**3**
Equisetum palustre	Ž										1																								1				**0.06**	**6**
Equisetum sylvaticum	Ž																				6														1				**0.19**	**6**
Fragaria vesca	Ž				9	2											2																						**0.36**	**8**
Frangula alnus	Ž							1	1		10			1			2				1								1	1			1				1	**0.56**	**28**
Galeopsis tetrahit	Ž					2																																	**0.06**	**3**
Galeopsis sp.	Ž			7															1														1				1	**0.28**	**11**
Galium palustre	Ž										1																												**0.03**	**3**
Geum urbanum	Ž				1																																	**0.03**	**3**
Gymnocarpium dryopteris	Ž				1																														1			**0.06**	**6**
Juncus effusus	Ž										1																												**0.03**	**3**
Lycopodium annotinum	Ž										4										3														1				**0.22**	**8**
Lysimachia thyrsiflora	Ž										3																												**0.08**	**3**
Lysimachia vulgaris	Ž																				2																		**0.06**	**3**
Lycopus europaeus	Ž										1																												**0.03**	**3**
Luzula pilosa	Ž		1	1	1	1		1	1		1		1		1		1	1	2		1	1	1		2	1		1		1	1	1	1		1		1	1	**0.75**	**69**

LT03_2025 / C	Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	Paden gimas	
Maianthemum bifolium	Ž		1	5	1	5			3	1			1	1	1	1	9	1			1		1	1	3			1		1			1		1	1	1	1	**1.19**	**64**
Melampyrum pratense	Ž		3	1	1		1		2	3		1					1	1	4				1	1	2	1			2		1	5	1	1	2	1	1	1	**1.06**	**64**
Melica nutans	Ž				1																																		**0.03**	**3**
Mycelis muralis	Ž			2	2	1											1		1						1				1										**0.25**	**19**
Moehringia trinervia	Ž			1	1	1											1								1														**0.14**	**14**
Orthilia secunda	Ž										1																												**0.03**	**3**
Oxalis acetosella	Ž		3	55	12	40		3	3		2		6		25	1	16	4	3		6	1			1	2		5	4				22		9			40	**7.31**	**61**
Picea abies	Ž		3		1	1	3	12			5	1	3	2	1	5	1	10	3	1	5	1		1	1	3	1	2	2	1	2	2	1	5	1	30	2	7	**3.31**	**89**
Pinus sylvestris	Ž						1																						1		1			1					**0.11**	**11**
Poa palustris	Ž										1																												**0.03**	**3**
Poa sp.	Ž																								1														**0.03**	**3**
Poa trivialis	Ž																				1																		**0.03**	**3**
Populus tremula	Ž		2		1				1									3										1			1						1	**0.28**	**19**
Prunus avium	Ž																1																						**0.03**	**3**
Pteridium aquilinum	Ž					2			40						45									1	1	20		14		1	11		1				3		**3.86**	**31**
Quercus robur	Ž		1		1	1	1		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1		1	1		1		1		1	1	1	1	1	1		**0.78**	**78**
Ranunculus repens	Ž										1																												**0.03**	**3**
Ribes rubrum	Ž																1																						**0.03**	**3**
Rubus caesius	Ž																																	1					**0.03**	**3**
Rubus chamaemorus	Ž													1						1																			**0.06**	**6**
Rubus idaeus	Ž			55		96		5	9		1		1		60	1	6	8	15		6				1			4	13				1		1	1	1	2	**7.97**	**56**
Salix caprea	Ž																											1								1			**0.06**	**6**
Salix cinerea	Ž										3																												**0.08**	**3**
Sambucus racemosa	Ž			1																																		1	**0.06**	**6**
Scirpus sylvaticus	Ž										6																												**0.17**	**3**
Solanum dulcamara	Ž										1																												**0.03**	**3**
Solidago virgaurea	Ž			1	1														1																			**0.08**	**8**
Sorbus aucuparia	Ž		1	2	2	1	1	1	1			1	2	2	1	1	3	1	1		2	1	1	1	1	2		1	1	1			2		1	1	1	2	**1.08**	**81**
Stellaria longifolia	Ž										1																												**0.03**	**3**
Stellaria media	Ž			1											1																								**0.06**	**6**
Trientalis europaea	Ž			3		4		2	5	1	1		2		7	1	2	3	1		1	1	1	1	1	2		2		1			4	1	1		5		**1.47**	**67**
Urtica dioica	Ž				1																																1	**0.06**	**6**
Vaccinium myrtillus	Ž		85	5	5	20	73	34	35	33	10	56	70	78	20	50	30	40	40	69	23	10	12	33	2	20	74	4	28	33	72	52	5	46	15	45	44	30	**36.14**	**100**
Vaccinium uliginosum	Ž																										2.5												**0.07**	**3**
Vaccinium vitis-idaea	Ž		1				4	1			2	1	1	1		1		1	1	2	1		1			1	1			1	1	1		1	1	1		1	**0.75**	**61**
Veronica chamaedrys	Ž				1																																1	**0.06**	**6**
Veronica officinalis	Ž				1																				1			1											**0.08**	**8**
Viburnum opulus	Ž																																		1				**0.03**	**3**
Viola epipsila	Ž										1										1																		**0.06**	**6**
Viola sp.	Ž				1																														1				**0.06**	**6**

2.

LT03_2025 / D	Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	Paden gimas	
S/K		**0**	**7**	**8**	**11**	**6**	**7**	**11**	**11**	**8**	**18**	**7**	**10**	**9**	**10**	**9**	**8**	**10**	**8**	**6**	**13**	**12**	**13**	**9**	**9**	**12**	**13**	**11**	**11**	**9**	**10**	**12**	**13**	**13**	**15**	**8**	**15**	**10**	**10.33**	**40**
Atrichum undulatum	S/K					1									1				1		1	2	1			1		5	2		1	1	1	1	2				**0.58**	**39**
Aulacomnium palustre	S/K										1																												**0.03**	**3**
Brachythecium rivulare	S/K																																				1		**0.03**	**3**
Brachythecium rutabulum	S/K							1														1																	**0.06**	**6**
Calypogeia muelleriana	S/K																										1												**0.03**	**3**
Calliergon cordifolium	S/K										2																												**0.06**	**3**
Calliergonella cuspidata	S/K										4																												**0.11**	**3**
Climacium dendroides	S/K										1																												**0.03**	**3**
Dicranella heteromalla	S/K																																					1	**0.03**	**3**
Dicranum majus	S/K						4	2	1		1		1		1	1	1	1	1	18		6		3		2	2		3	10		35		40	10	2	10	8	**4.53**	**64**
Dicranum montanum	S/K											1															1				1								**0.08**	**8**
Dicranum polysetum	S/K		1		1			1	1		1		1	1		1				2			5	2	5	2	6	8		10	15	10	5	2	3	5	3	5	**2.67**	**67**
Dicranum scoparium	S/K		1	1	1	1		1	1	2	1	2	1	1	1	3		3			1		10	5	10			1	2		3		15	3			1		**1.97**	**67**
Dicranella varia	S/K																																1		1				**0.06**	**6**
Eurhynchium angustirete	S/K				40				1		1				1		1								30														**2.06**	**17**
Hylocomium splendens	S/K		70	2	2	1	2	20	2	35	1	52	69	5	25	70	40	1	15		1	2	25	70	5	40	20	5	10	30	20	5	5	5	5	60	4	23	**20.75**	**97**
Hypnum cupresiforme	S/K			1	1					1		1							1				2	2					1	1	1		1	1			1		**0.42**	**36**
Plagiomnium affine	S/K		1	5	5	4			1	1	3		1			1	1	1			1	1	15		5			2		1		8	25	8	6	3	1	6	**2.94**	**67**
Plagiochila asplenioides	S/K																				1		1						1				1		1		4	2	**0.31**	**19**
Plagiothecium curvifolium	S/K								1	1																1			1								1		**0.14**	**14**
Plagiomnium cuspidatum	S/K										1																												**0.03**	**3**
Plagiomnium ellipticum	S/K														10																								**0.28**	**3**
Plagiothecium laetum	S/K							1														1	1			1	1	1		1		1	1						**0.25**	**25**
Pleurozium schreberi	S/K		20	2	1	64	60	29	50	50	1	35	20	45	10	8	40	52	40	8	2	3	5	10	2	10	10	15	50	15	57	5	10	5	20	15	50	12	**23.08**	**100**
Pohlia nutans	S/K																														1								**0.03**	**3**
Polytrichum formosum	S/K		1	1	1		1	1	1		2	1	2	1	1	2		40	2	1	1	1	10	1		3	5	10	25	10	2	5	15	8	4	5	7	10	**5.00**	**89**
Ptilium crista-castrensis	S/K		5					1		1		4	5	1	1	15		1	10					20		5			5		1	15		15	6	2	5		**3.28**	**53**
Rhytidiadelphus triquetrus	S/K										2						1				1																		**0.11**	**8**
Rhodobryum roseum	S/K				1																																		**0.03**	**3**
Sciuro-hypnum oedipodium	S/K			20	1	10		1	2		8		1		1		10	1			1		8		1	1		1	1			1	8		1		12	5	**2.64**	**58**
Sciuro-hypnum reflexum	S/K				1																																		**0.03**	**3**
Sciuro-hypnum starkei	S/K			5						1						1	1		1		1	1	1		3	1								1	4					**0.58**	**33**
Sphagnum cuspidatum	S/K																										10												**0.28**	**3**
Sphagnum divinum	S/K										1			10						23							1													**0.97**	**11**
Sphagnum girgensohnii	S/K						30				2			40				1		52	10	25		5			50			20		30		30	4	15	2		**8.78**	**42**
Sphagnum palustre	S/K						2														20																		**0.61**	**6**
Sphagnum russowii	S/K																										1												**0.03**	**3**
Sphagnum squarrosum	S/K										10																												**0.28**	**3**
Tetraphis pellucida	S/K																					1					1									1			**0.08**	**8**
Thuidium tamariscinum	S/K						2	1	1				1	10				1			44	40	2		4	1		1	2			10	1	10	10		2	1	**4.00**	**53**
		3	23	27	38	25	18	27	29	16	56	15	25	21	26	25	30	28	28	13	40	24	26	20	30	25	22	31	23	25	24	21	31	28	42	20	29	32	**26.75**	129

3.

5.4 priedas. EUNIS buveinės LT01 - LT03 tiriamosiose aikštelėse 2023-2025 m.

Nr. /	Aukštaitija				Žemaitija					Dzūkija		
Buveinė	2003	2010	2020	2025	2003	2010	2015	2020	2025	2025A	nr.	2025B
1	G3.A	G3.A	G3.A	G3.A	G4.F	G4.F	G4.F			G3.B	51	G3.B
2	G3.A	G3.A	G4.2	G3.B	G4.2	G4.2	G4.2	G4.2	G3.A	G3.B	52	G3.B
3	G3.A	G3.A	G3.A	G5. 8	G3.A	G3.A	G3.A	G3.A	G4.2	G3.B	53	
4	G3.A	G3.A	G3.B	G4.2	G4.2	G4.2	G4.2	G4.2	G4.2	G3.B	54	G5.8
5	G3.A	G3.A	G3.B	G3.B	G3.A	G3.A	G3.A	G3.A	G5.8	G3.B	55	G3.B
6	G3.A	G3.A	G3.B	G3.B	G3.A	G3.A	G3.A	G3.B	G3.B	G3.B	56	G3.B
7	G3.B	G3.B	G3.B	G3.B	G3.A	G3.A	G3.A	G3.A	G5.6	G3.B	57	G3.B
8	G3.A	G3.A	G4.2	G3.B	G3.A	G3.A	G3.A	G4.2	G4.2	G3.B	58	G3.B
9	G3.A	G3.A	G3.A	G3.A	G5.6	G5.6	G5.6	G3.A	G3.A	G3.B		
10	G3.A	G3.A	G3.A	G3.B	G4.1	G4.1	G4.1	G4.1	G4.1	G3.B		
11	G3.B	G3.B	G3.A	G3.B	G4.2	G4.2	G4.2	G4.2	G3.B	G3.B		
12	G3.B	G3.B	G4.2	G3.B	G3.A	G3.A	G3.A	G3.A	G3.A	G3.B		
13	G4.2	G4.2	G4.2	G4.2	G4.2	G4.2	G4.2	G4.2	G4.1	G3.B		
14	G3.A	G3.A	G3.B	G3.B	G3.A	G3.A	G3.A	G4.2	G5.6	G3.B		
15	G3.A	G3.A	G3.A	G3.A	G3.A	G3.A	G3.A	G3.A	G5.6	G3.B		
16	G3.A	G3.A	G3.A	G3.B	G4.2	G4.2	G4.2	G3.A	G3.A	G3.B		
17	G4.2	G4.2	G3.A	G3.B	G3.A	G3.A	G3.A	G3.A	G3.A	G3.B		
18	G3.A	G3.A	G3.A	G3.A	G3.A	G3.A	G3.A	G3.A	G3.A	G3.B		
19	G3.A	G3.A	G3.A	G3.A	G4.1	G4.1	G4.1	G4.1	G4.1	G5.6		
20	G5.8	G5.6	G4.F	G5.6	G3.A	G3.A	G3.A	G3.A	G3.A			
21	G4.2	G4.2	G4.2	G4.1	G3.A	G3.A	G3.A	G4.1	G4.1	G3.B		
22	G4.2	G4.2	G4.2	G4.1	G5.6	G5.6	G5.6	G4.2	G4.2	G3.B		
23	G4.2	G4.2	G3.A	G5.6	G3.A	G3.A	G3.A	G3.A	G3.A	G3.B		
24	G3.A	G3.A	G3.A	G3.A	G5.6	G5.6	G5.6	G5.6	G4.2	G3.B		
25	G3.A	G3.A	G4.2	G4.2	G3.A	G3.A	G3.A	G3.A	G3.A	G3.B		
26	G3.A	G3.A	G3.A	G4.2	G3.A	G3.A	G3.A	G3.A	G4.1	G3.B		
27	G3.A	G3.A	G3.A	G3.B	G3.A	G3.A	G3.A	G4.2	G5.6	G3.B		
28	G3.A	G3.A	G3.B	G3.B	G3.A	G3.A	G3.A	G3.A	G3.B	G5.8		
29	G3.F	G3.F	G3.F	G3.A	G5.6	G5.6	G5.6	G3.A	G3.A	G3.B		
30	G3.A	G3.A	G4.2	G3.B	G3.A	G3.A	G3.A	G3.A	G3.A	G3.B		
31	G4.2	G4.2	G4.2	G3.A	G3.A	G3.A	G3.A	G3.A	G3.B	G3.B		
32	G4.2	G4.2	G4.2	G3.A	G5.6	G5.6	G5.6	G4.2	G4.2	G3.B		
33	G3.B	G3.B	G3.B	G4.2	G3.A	G3.A	G3.A		G5.6	G3.B		
34	G3.A	G3.A	G3.A	G3.A	G3.A	G3.A	G3.A	G3.A	G3.A	G3.B		
35	G3.A	G3.A	G3.A	G3.A	G3.A	G3.A	G3.A	G3.A	G3.A	G3.B		
36	G3.A	G3.A	G3.A	G4.2	G3.A	G3.A	G3.A	G3.B	G3.B	G5.8		
37	G3.A	G3.A	G4.2	G3.B	G3.A	G3.A	G3.A	G3.A	G3.A	G3.B		
38	G4.1	G4.1	G4.1	G4.1						G3.B		
39	G3.A	G3.A	G3.A	G3.A						G3.B		
40	G3.A	G3.A	G3.B	G3.B						G3.B		
41	G3.A	G3.A	G3.A	G3.B						G3.B		
42	G3.A	G3.A	G4.2	G3.A						G3.F		
43	G3.A	G3.A	G3.A	G4.2						G4.1		
44	G3.A	G3.A	G4.2	G4.2						G4.1		
45	G3.A	G3.A	G4.2	G4.2						G3.B		
46	G3.A	G3.A	G4.2	G4.2						G3.B		
47	G4.2	G4.2	G3.A	G4.2						G3.B		
48	G3.A	G3.A	G3.B	G4.2						G5.8		
49	G3.A	G3.A	G4.2	G4.2						E5.4		
50	G3.A	G3.A	G3.A	G4.2						G3.B		

LITERATŪRA

1. Davies, C.E., Moss, D. & Hill, M.O. (2004) EUNIS Habitat Classification Revised 2004. Paris: European Topic Centre on Nature Protection and Biodiversity.
2. European Environmental agency, 2019: **EUNIS habitat classification 2007 (Revised descriptions 2012) amended 2019** https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/eunis-habitat-classification
3. Finnish Environment Institute, 2013: Manual for Integrated Monitoring. 7 Methodology and Reporting of Subprogrammes. 7.19 Optional subprogramme VS: Vegetation structure and species cover. https://www.syke.fi/en-US/Research__Development/Nature/Monitoring/Integrated_Monitoring/Manual_for_Integrated_Monitoring/7_Methodology_and_Reporting_of_Subprogrammes/719_Optional_subprogramme_VS_Vegetation_(16701)
4. Gilliam F.S. 2007. The ecological significance of the herbaceous layer in temperate forest ecosystems. *BioScience*, 57, 845–858. DOI: **10.1641/B571007**
5. De Frenne P. et al. 2013. Microclimate moderates plant responses to macroclimate warming. *PNAS*, 110, 18561–18565. DOI: **10.1073/pnas.1311190110**
6. Dirnböck T. et al. 2014. Forest floor vegetation response to nitrogen deposition in Europe. *Global Change Biology*, 20, 429–440. DOI: **10.1111/gcb.12440**
7. Verheyen K. et al. 2017. Combining biodiversity resurveys across regions to advance global change research. *BioScience*, 67, 73–83. DOI: **10.1093/biosci/biw150**
8. Landuyt D. et al. 2019. The functional role of temperate forest understorey vegetation in a changing world. *Global Change Biology*, 25, 3625–3641. DOI: **10.1111/gcb.14756**
9. Zellweger F. et al. 2020. Forest microclimate dynamics drive plant responses to warming. *Science*, 368, 772–775. DOI: **10.1126/science.aba6880**
10. De Frenne P. et al. 2021. Forest microclimates and climate change: importance, drivers and future research agenda. *Global Change Biology*, 27, 2279–2297. DOI: **10.1111/gcb.15569**
11. Staude I.R. et al. 2020. Replacements of small-ranged species by widespread species scale up to diversity loss in Europe's temperate forest biome. *Nature Ecology & Evolution*, 4, 802–808. DOI: **10.1038/s41559-020-1176-8**
12. CANULLO R., STARLINGER F., GRANKE O., FISHER R., AAMLID D., 2016: Part VI.1: Assessment of Ground Vegetation. In: UNECE ICP Forests Programme Coordinating Centre (ed.): Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests. Thünen Institute of Forest Ecosystems, Eberswalde. Interneto svetainė: <https://www.icp-forests.org/pdf/manual/2016/ICP_Manual_2016_01_part07-1.pdf> [žiūrėta 2021-02-04]
13. EKRT L., HOLUBOVA R., TRAVNIČEK P., SUDA J., 2010: Species boundaries and frequency of hybridization in the *Dryopteris carthusiana* (Dryopteridaceae) complex: A taxonomic puzzle resolved using genome size data. American Journal of Botany 97(7):1208-1219
14. EUROPEAN ENVIRONMENTAL AGENCY, 2019: EUNIS habitat classification 2007 (Revised descriptions 2012) amended 2019. Interneto svetainė: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/eunis-habitat-classification> [žiūrėta 2020-06-05]
15. FINNISH ENVIRONMENT INSTITUTE. 2013a. Manual for integrated monitoring. Methodology and reporting of suprogrammes. Suprogramme VG: vegetatios (intensive plot). Interneto svetainė: <http://www.syke.fi/en-US/Research__Development/Ecosystem_services/Monitoring/

Integrated_Monitoring/Manual_for_Integrated_Monitoring/7_Methodology_and_Reporting_of_Subprogrammes/717_Subprogramme_VG_Vegetation_intensive(16711)> [žiūrėta 2018-03-01]

16. FINNISH ENVIRONMENT INSTITUTE, 2013b. Manual for integrated monitoring. Methodology and reporting of suprogrammes. 7.19 Optional subprogramme VS: Vegetation structure and species cover.
17. GUDŽINSKAS Z., 1999: Lietuvos induočiai augalai.– Vilnius.JUKONIENĖ I. 2003. Lietuvos kiminai ir žaliosios samanos. Vilnius.
18. LEKAVIČIUS A., 1989: Vadovas augalams pažinti. – Vilnius.
19. MAGURRAN A. E., 2004: Measuring biological diversity. – Cornwall.
20. NATKEVIČAITĖ-IVANAUSKIENĖ M., (red.), 1971. Lietuvos TSR flora, 4 tomas. Vilnius.
21. NATKEVIČAITĖ-IVANAUSKIENĖ M., (red.), 1976. Lietuvos TSR flora, 5 tomas. Vilnius.
22. NATKEVIČAITĖ-IVANAUSKIENĖ M., (red.). 1961. Lietuvos TSR flora, 3 tomas. Vilnius.
23. NATKEVIČAITĖ-IVANAUSKIENĖ M., (red.). 1963. Lietuvos TSR flora, 2 tomas. Vilnius.
24. NAUJALIS J., KALINAUSKAITĖ N., GRINEVIČIENĖ M. 1995. Vadovas Lietuvos kerpsamanėms pažinti. Vilnius.
25. ROTHMALER W. (Begr.), JÄGER E. J., WERNER K., 2000: Exkursionsflora von Deutschland; Bd. 3: Gefäßpflanzen. Atlasband. – Berlin.
26. VILKONIS K. K., 2001: Lietuvos žaliasis rūbas. – Šiauliai.

Interneto svetainė: https://www.syke.fi/en-US/Research__Development/Nature/Monitoring/Integrated_Monitoring/Manual_for_Integrated_Monitoring/7_Methodology_and_Reporting_of_Subprogrammes/719_Optional_subprogramme_VS_Vegetation_(16701) [žiūrėta 2021-02-06]

VI. CHEMINIŲ KOMPONENČIŲ KONCENTRACIJOS KRITULIUOS, LAPIJOJE IR NUOKRITOSE BEI JŲ TRANSFORMACIJOS IR SRAUTAI Į DIRVOŽEMĮ

Atmosferos iškritos yra pagrindinis vandens ir jame ištirpusių komponenčių srautas, kuriuo cheminiai komponentai, įskaitant esmines maistines medžiagas ir antropogeninius teršalus, patenka į miškų ekosistemas. Kritulių cheminė sudėtis atspindi tiek natūralius procesus, tiek išmetamuosius teršalus iš žemės ūkio, pramonės ir miesto šaltinių, todėl ji yra pagrindinis biogeocheminių ciklų miškų aplinkoje sąlygojantis veiksnys. ICP KM programos rėmuose ilgalaikiai kritulių cheminės sudėties ir iškritų srautų stebėjimai suteikė svarbę informaciją apie atmosferos veiksnių ir ekosistemų reakcijų sąveikas, nuo kurių priklauso ir bendras miško ekosistemų tvarumas.

Tokios maistinės medžiagos kaip azotas (N), siera (S), kalcis (Ca), magnis (Mg) ir kalis (K) dažniausiai nusėda su krituliais ir gali reikšmingai paveikti dirvožemio derlingumą ir miškų produktyvumą. Vidutinis azoto kiekis gali paskatinti medžių augimą sistemose, kuriose trūksta maistinių medžiagų; tačiau per didelis azoto kiekis yra plačiai susijęs su dirvožemio rūgštėjimu, maistinių medžiagų disbalansu ir biologinės įvairovės nykimu (Bobbink ir kt., 2010; Dirnböck ir kt., 2014). Visų pirma, padidėjęs azoto kiekis gali padidinti nitratų išplovimą, bazinių katijonų išeikvojimą ir mikorizinių ryšių sutrikimą, o tai galiausiai paveikia medžių gyvybingumą ir ekosistemos stabilumą.

Sieros iškritos, istoriškai pagrindinis Europos miškų rūgštėjimo veiksnys, po išmetamųjų teršalų kiekio sumažinimo gerokai sumažėjo, tačiau jo poveikis daugelyje dirvožemių išlieka (Forsius ir kt., 2021). Rūgštinančių komponenčių srautai prisidėjo prie ilgalaikių dirvožemio cheminės sudėties pokyčių, įskaitant sumažėjusį pH ir toksiškų aliuminio jonų mobilizaciją, kurie neigiamai veikia šaknų sistemą ir maistinių medžiagų įsisavinimą. Nors daugelyje regionų pastebėtos atsigavimo tendencijos, sąveika su nuolatiniu azoto nusėdimu ir klimato kaita toliau daro įtaką dirvožemio procesams ir miškų bendrajai būklei.

Atmosferos iškritų ir klimato kintamumo bendras poveikis vaidina lemiamą vaidmenį miškų būklės kaitai. Ilgalaikis stebėjimas rodo, kad iškritų modeliai yra erdviškai nevienalyčiai ir jiems didelę įtaką daro vietiniai išmetamųjų teršalų šaltiniai bei klimato veiksniai, tokie kaip kritulių kiekis ir intensyvumas (Forsius ir kt., 2017). Todėl kritulių režimų pokyčiai dėl klimato kaitos gali pakeisti tiek maistinių medžiagų, tiek teršalų patekimo į miško dirvožemį dydį ir laiką.

Nusėdimo poveikis neapsiriboja medžių augimu ir paveikia žemės paviršiaus augmeniją bei rūšių įvairovę. Padidėjęs azoto nusėdimas susijęs su pomiškio augalų bendrijų pokyčiais, dėl kurių dažnai padidėja nitrofilinių rūšių dominavimas ir sumažėja būdingų oligotrofinių rūšių

skaičius (Dirnböck ir kt., 2014; Verheyen ir kt., 2012). Tokie pokyčiai prisideda prie biotinės homogenizacijos ir sumažina ekosistemų atsparumą. Priešingai, sieros nusėdimo sumažėjimas susijęs su daliniu jautrių rūšių atsistatymu, nors visiškas ekosistemos atsistatymas dažnai vėluoja.

Hemiborealiniuose miškuose, ypač augančiuose oligotrofiniuose dirvožemiuose, maistinių medžiagų patekimo ir dirvožemio buferinio pajėgumo pusiausvyra yra labai svarbi norint išlaikyti ekosistemos tvarumą. Paprastosios pušies dominuojamos sistemos yra ypač jautrios maistinių medžiagų prieinamumo pokyčiams, nes mažas derlingumas riboja jų gebėjimą kompensuoti maistinių medžiagų disbalansą. Todėl iškritų sukelti dirvožemio cheminės sudėties pokyčiai gali turėti ilgalaikių pasekmių miškų produktyvumui, rūšių sudėčiai ir atsparumui.

Todėl ICP KM duomenys suteikia esminių ilgalaikių šių procesų įrodymų, pabrėžiančių integruoto stebėjimo svarbą siekiant suprasti bendrą oro taršos ir klimato kaitos poveikį. Tokios žinios yra labai svarbios vertinant miškų būklę, prognozuojant būsimas ekosistemų reakcijas ir kuriant tvaraus miškų valdymo strategijas kintančiomis aplinkos sąlygomis.

Papildomai, reikšmingą įtaką pagrindinių teršiančių ir maistinių mineralinių elementų srautams ekosistemoje bei jų balansui turi šių medžiagų nuplovimas nuo augalinių paviršių, nusėdimas ant jų, išplovimas iš vidinių organų ir išgaravimas atgal į atmosferą, lakių junginių pavidalų. Todėl Kompleksiško monitoringo programoje yra tiriami polajiniai krituliai kartu su lapijos ir nuokritos cheminės sudėties kaita. Toks kompleksiškumo principas įgalina ateityje, sukaupus pakankama duomenų kiekį, visapusiškai vertinti šių medžiagų balansą ekosistemoje bei prognozuoti jų galimą kaitą bei poveikį pačiai ekosistemai.

Mineralinės mitybos elementams dar kitaip vadinamiems peleniniams elementams priskiriama per 20 cheminių elementų, tarp kurių yra ir azotas. Pastarasis nors yra nei peleninis, nei mineralinis elementas, tačiau patenka į augalus panašiais būdais. Dėl to, kad augalai be šių elementų negali vykdyti savo gyvybinių funkcijų, jie negali būti augaluose pakeičiami kitais ir dėl to, kad šie elementai įjungiami į organinius junginius, dalyvauja metabolizmo procese arba yra svarbūs cheminių reakcijų eigai, jie vadinami pagrindiniais augalų mineralinės mitybos elementais. Jų koncentracijos lapijoje bei nuokritose yra didžiausios nei kituose augalo dalyse, dėl ko gerai atspindi medžių gyvybinį potencialą. Dėl šios priežasties, nuo jų kiekio kaitos, pokyčių tarp lapijos ir nuokritų bei pagrindinių jų kaitos tendencijų galima spręsti apie medyno būklę, jo atsparumą nepalankiems aplinkos veiksniams, o atskirais atvejais, ir apie visos ekosistemos būklę bei jos užterštumą kenksmingomis medžiagomis. Dėl tokių rezultatų svarbos, naujoje Valstybinės aplinkos monitoringo programoje, priimtoje 2023-2029 m., lapijos ir nuokritų cheminės analizės numatytos vykdyti kasmet. 2025 m. atlikta jau 21-toji lapijos ir jos nuokritų pagrindinių cheminių elementų analizė.

6.1. Pagrindinių cheminių komponenčių koncentracijos krituliuose, jų srautai su krituliais bei jų transformacijos praėjus pro lajas, patenkant į dirvožemį (Fizikos instituto ataskaita)

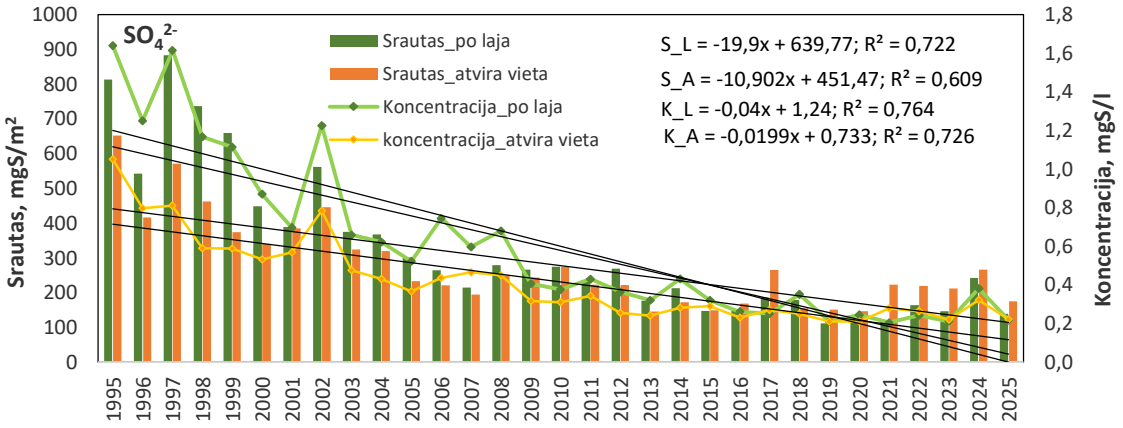
6.1.1. Aukštaitijos KMS baseinas

1995 – 2020 metų pagrindinių cheminių priemaišų tyrimų duomenys (26 – 28 pav.) krituliuose po miško laja ir miške atviroje vietoje Aukštaitijos KM stotyje rodo, kad didžiausi sieros ir azoto junginių (NO_3 ir NH_4) srautai į miško paklotę buvo nustatyti 1995 – 1998 m. laikotarpiu. Vėliau jie gerokai sumažėjo ir pastaruoju metu sieros srautas yra apie šešis kartus, o azoto junginių – apie tris kartus mažesni palyginti su metiniais srautais 1995 –1998 m. Kaip ir Aukštaitijos KM stotyje, Žemaitijoje didžiausi sieros ir amonio azoto junginių srautai į miško paklotę buvo nustatyti 1995 – 1998 m. (29 – 31 pav.). Pastaraisiais metais sieros ir azoto junginių srautas į miško paklotę yra atitinkamai trylika ir keturis kartus mažesni nei 1995–1998 metais.

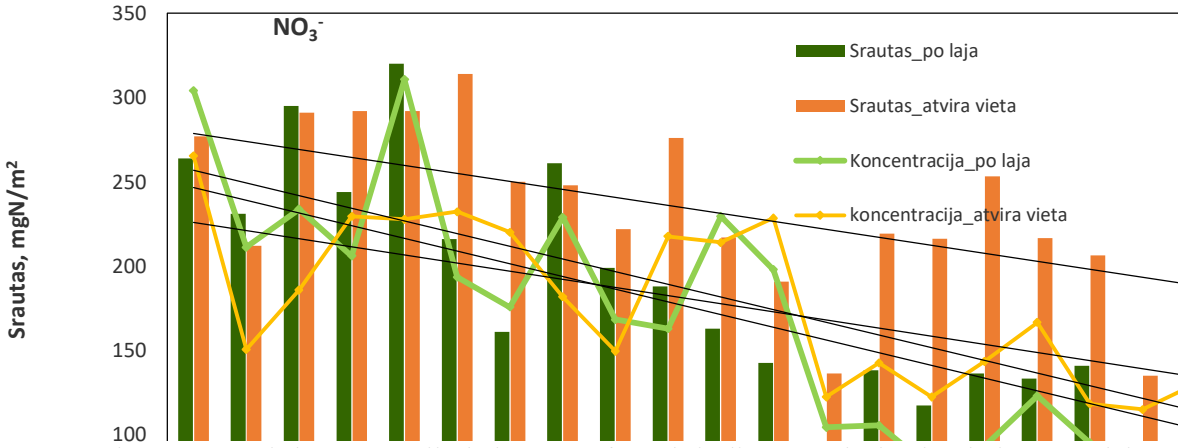
Jei tyrimų pradžioje S koncentracija krituliuose po laja ir S rautas reikšmingai viršijo S koncentraciją ir srautą krituliuose atviroje vietoje, tai paskutiniaisiais metais koncentracijos šiuose substratuose susilygino, o srautas S atviroje vietoje pradėjo viršyti srautą po laja. Tai sumažėjusios S koncentracijos ore ir S nuplovimo nuo lapijos paviršiaus rezultatas.

Tyrimų pradžioje nitratų koncentracija krituliuose po laja ir jų rautas reikšmingai nesiskyrė nuo nitratų koncentracijos ir jų srauto krituliuose atviroje vietoje, tai paskutiniaisiais metais koncentracijos šio junginio atviroje vietoje ir jų srautas su krituliais kelis kart pradėjo viršyti nitratų koncentracijas ir srautą po lajiniuose krituliuose. Tai paaiškina kodėl medžių produktyvumas pastaruoju laikotarpiu yra reikšmingai padidėjęs lyginant su jų intensyvumų tyrimo pradžioje. Sausra ir padidėjusi temperatūra skatina azoto įsisavinimą iš kritulių didindama medžių produktyvumą ir gerindama jų būklę.

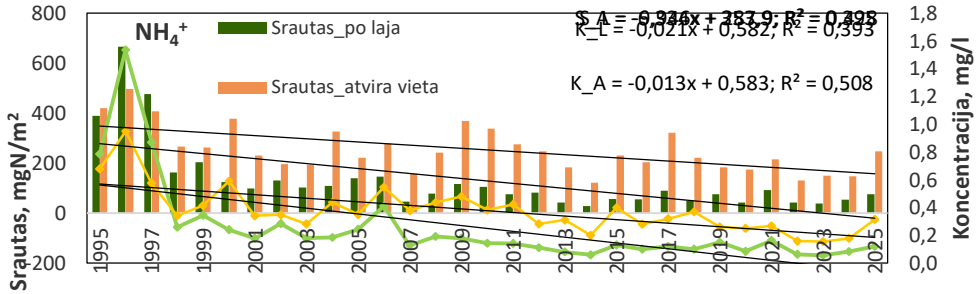
Amonio koncentracijos ir srautas po laja kito analogiškai jų koncentracijoms ir srautui atviroje vietoje. Paskutiniuoju laikotarpiu amonio koncentracijos atviros vietos krituliuose ir jo srautas iki 3 kartų viršija amonio koncentracijas ir srautą po medžių lajomis. Tokia amonio koncentracijų kaita informuoja, kad didelė dali amonio yra absorbuojama lapijos, kas matyt, prisideda prie didėjančio miškų produktyvumo ir gerėjančios lajų būklės.



6.1 pav. Sulfatų srautų ir koncentracijų kaita atmosferos krituliuose atviroje vietoje ir po medžių lajomis Aukštaitijos KMS.



6.2 pav. Nitratų srautų ir koncentracijų kaita atmosferos krituliuose atviroje vietoje ir po medžių lajomis Aukštaitijos KMS.

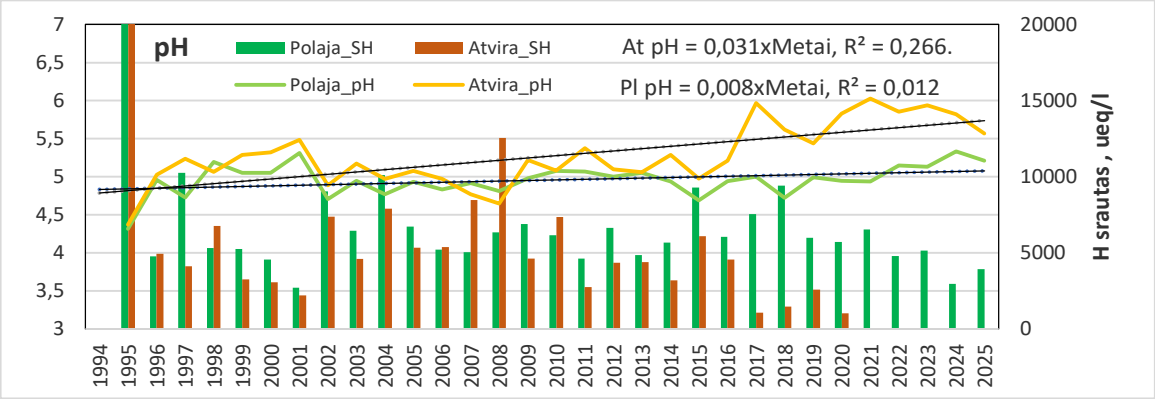


6.3 pav. Amonio srautų ir koncentracijų kaita atmosferos krituliuose atviroje vietoje ir po medžių lajomis Aukštaitijos KMS.

2011-2025 m. laikotarpio išskirtinis rezultatas: keičiasi tirtų cheminių komponenčių koncentracijų ir srautų santykis. Jei tyrimų pradžioje palajiniuose krituliuose SO_4^{2-}, NH_4^+ ir NO_3^- koncentracijos ir srautai į miško paklotę viršijo šių komponenčių koncentracijas ir srautus atviroje vietoje, indikuodami intensyvų nuplovimą, tai jau paskutiniuoju laikotarpiu registruojamas atvirkštinis procesas: polajiniuose krituliuose šių komponenčių koncentracijos ir srautai į dirvožemį yra mažesni. Tai reikšmingas pokytis miško ekosistemoje.

Tokia rūgštinančių komponenčių kaita sąlygojo kritulių rūgštingumo mažėjimą, ypač atviroje vietoje. Kritulių pH didėjo reikšmingai po 0,031 vnt. per metus. Polajimiuose krituliuose rūgštingumo mažėjimas vyko beveik 10 kartus silpniau ir nebuvo reikšmingas.

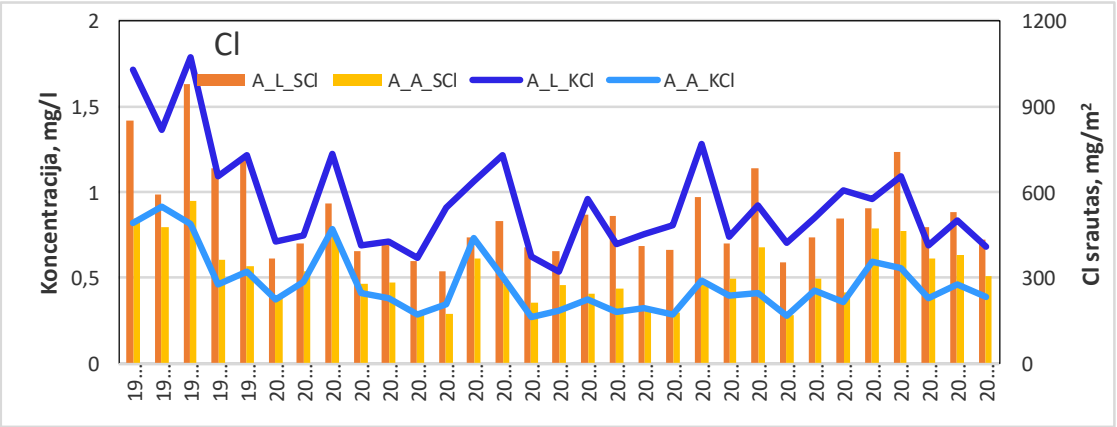
2017-2024 m. pirmą kartą registruojamas kritulių rūgštingumo rodiklio priartėjimas ar net viršijimas 6 ribą- 2021 m.. T.y. per pirmą tiriamąjį laikotarpį (iki 2010) pH vertė išliko stabili, kai tuo tarpu per antrąjį tiriamąjį laikotarpį (2011-2025 m.) pH vertė padidėjo vienetu, t.y. krituliu rūgštingumas ženkliai sumažėjo ir priartėjo prie neutralaus ribos. Tačiau paskutiniaisiais metais šis rodiklis sumažėjo net 0,5 pH iki 5,5, kas sietina su karu Ukrainoje. Tai išskirtinis pokytis Aukštaitijos KMS miško ekosistemoje.



6.4 pav. Kritulių pH ir H jonų srauto kaita su krituliais atviroje (atvira) vietoje ir po medžių lajomis (polaja) Aukštaitijos KMS.

Rūgštingumo mažėjimą galėjo slopinti ir didėjantis Cl kiekis polajiniuose krituliuose, ypač nuo 2010 m. Atviroje vietoje Cl koncentracijos krituliuose nuo 2010 m. didėja neženkliai. Paaiškinti Cl koncentracijų augimą polajiniuose krituliuose vien tik nuplovimu nuo lapijos paviršiaus, matyt, kad neužtenka.

Paskutiniuoju 2020-2025 m. laikotarpiu esminių skirtumų Cl koncentracijų ir jo srautų kaitoje nenustatyta. Tolimesni tyrimai reikalingi šiam procesui paaiškinti.



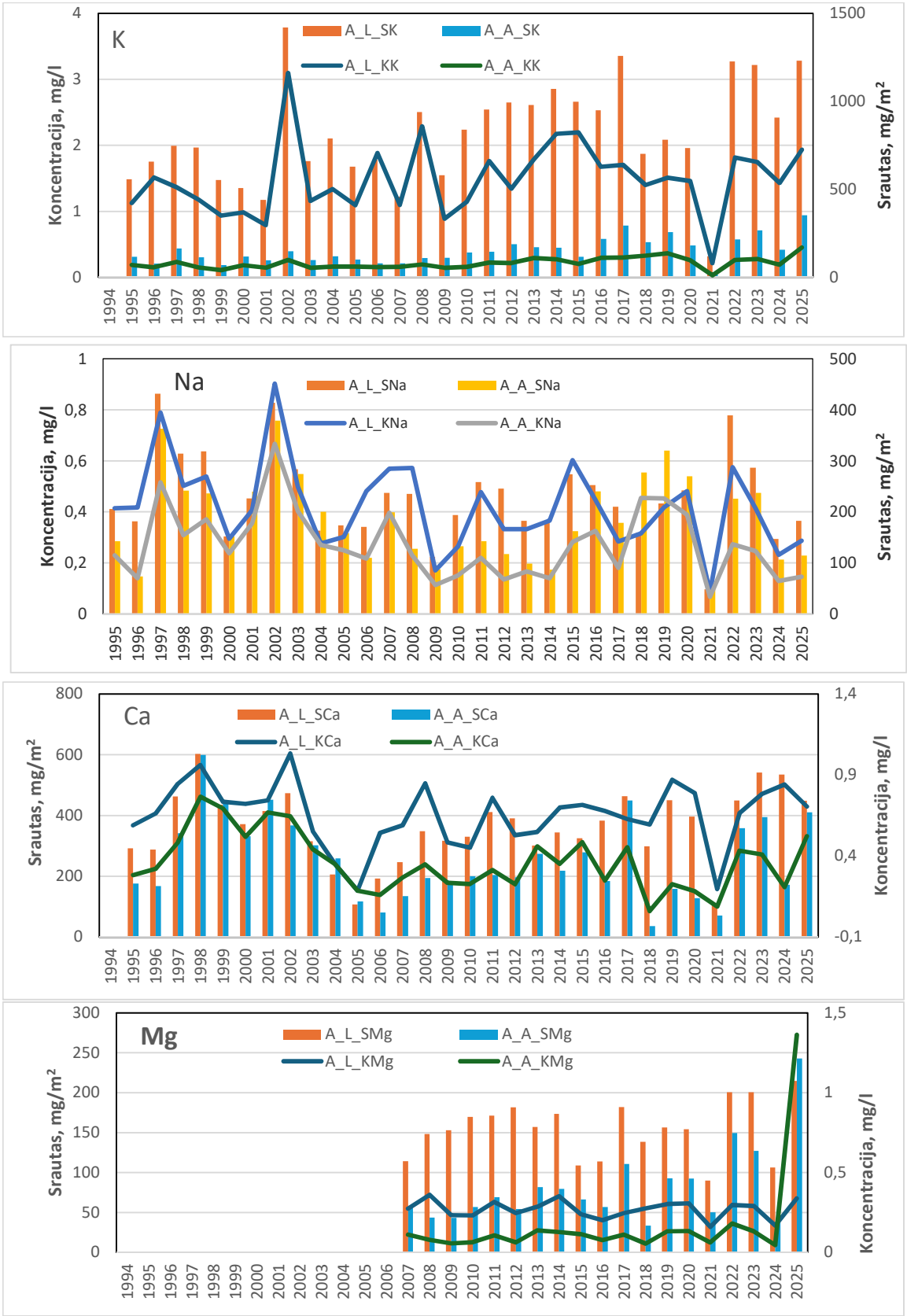
6.5 pav. Cl koncentracijos **k**rituliuose ir srauto su krituliais kaita atviroje (atvira) vietoje ir po medžių lajomis (polaja) Aukštaitijos KMS.

Analogiškai kinta ir Na koncentracijos atviros vietos ir polajiniuose krituliuose. Išskirtinis bruožas – reikšmingas Na koncentracijų augimas atviros vietos krituliuose, kuris nuo 2017 m. susilygino su atviros vietos koncentracijomis. Tai didėjantis Baltijos jūros vandens poveikis miško ekosistemoms, kuris prisideda ir aiškinant Cl koncentracijų augimą. Paskutiniuoju laikotarpiu, padidėjus Baltijos jūros įtakai, Na koncentracijos ir jo srautai polajiniuose krituliuose vėl pradėjo viršyti šio elemento koncentracijas ir srautus atviroje vietoje. ***Nepaisant šio fakto, daugiamečių duomenų sekoje reikšmingų pokyčių nenustatyta, nors reikšmingai sumažėjusios koncentracijos ir Na srautai buvo registruojami paskutiniaisiais 2024- ir 2025 m.***

Šarminių katijonų kaitoje išsiskiria K koncentracijos ir jų srautai su krituliais. Krituliai praeidami pro lapiją išplauna iš spyglių senėjančių audinių K, taip iki 5 kartų padidindami jo koncentraciją polajiniuose krituliuose. 2011-2025 m. duomenų sekoje reikšmingų K pokyčių nenustatyta. Išsiskiria tik 2021 m., kai šarminių katijonų koncentracijos ir srautai į miško paklotę buvo iki kelių kartų mažesnį nei įprasta šiuo laikotarpiu.

Panašios tendencijos nustatytos ir Ca koncentracijų kaitoje. Polajiniuose krituliuose šio elemento koncentracijos taip pat didėja, tik ne taip intensyviai, kaip K ir ypač nuo 2005 m. Laikotarpiu, kuris išsiskirė kritulių trūkumu, Ca išplovimas iš lapijos didėjo ir 2018-2020 m. polajiniuose krituliuose Ca siekė iki 3-4 kartų daugiau lyginant su atviros vietos krituliais. 2021-2025 m. stebimas Ca koncentracijų didėjimas tiek atviros, tiek ir polajiniuose krituliuose.

Mg krituliuose tirtas tik nuo 2007 m. Turimi duomenys rodo taip pat nors ir neženklų Mg koncentracijų augimą atviros vietos krituliuose, kuris lemia taip pat neženklų Mg koncentracijų augimą polajiniuose krituliuose. Šio elemento išplovimo intensyvumas yra mažiausias ir siekia tik iki 3 kartų. Ypač didelės Mg koncentracijos krituliuose ir ypač dideli jo srautai į miško paklote 2025 m. sunkiai paaiškinami. Ar tai galimo klaidos, parodys ateities tyrimai.



6.6 pav. K, Na, Ca ir Mg koncentracijos **k**rituliuose ir srauto su krituliais kaita atviroje (atvira) vietoje ir po medžių lajomis (po laja) Aukštaitijos KMS.

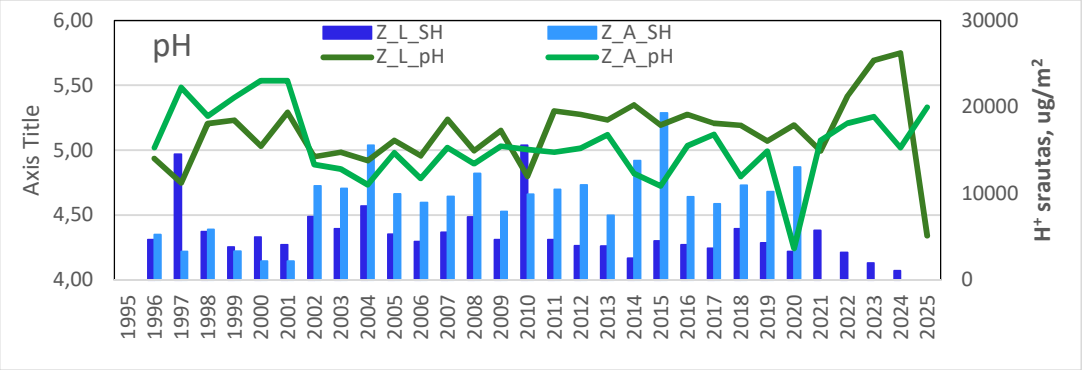
Apibendrinant gautus rezultatus galima būtų teigti, kad miško ekosistemos reikšmingai išsivalo nuo sieros komponenčių taršos, didėjantis šarminių katijonų srautas prisideda prie didėjančio miškų produktyvumo ir atsparumo klimato kaitai, o Cl koncentracijų augimą reiktų vertinti kaip neigiamą veiksnį stabdantį kritulių rūgštingumo mažėjimą.

Aukštaitijos KMS 2011-2025 m. išskirtinis rezultatas: keičiasi tirtų cheminių junginių koncentracijų ir srautų santykis. Jei tyrimų pradžioje palajiniuose krituliuose SO_4^{2-}, NH_4^+ ir NO_3^- koncentracijos ir srautai į miško paklotę viršijo šių komponenčių koncentracijas ir srautus atviroje vietoje, indikuodami intensyvų nuplovimą, tai jau paskutiniuoju laikotarpiu registruojamas atvirkštinis procesas: polajiniuose krituliuose šių komponenčių koncentracijos ir srautai į dirvožemį yra mažesni. Tai reikšmingas pokytis miško ekosistemoje. Bazinių katijonų kaitoje stebimas dar nereikšmingas bet jų koncentracijų ir srautų augimas.

Karo Ukrainoje pasekmė: S srauto su krituliais ir kritulių rūgštingumo padidėjimas. Patikrinti S koncentracijas ir Na cl

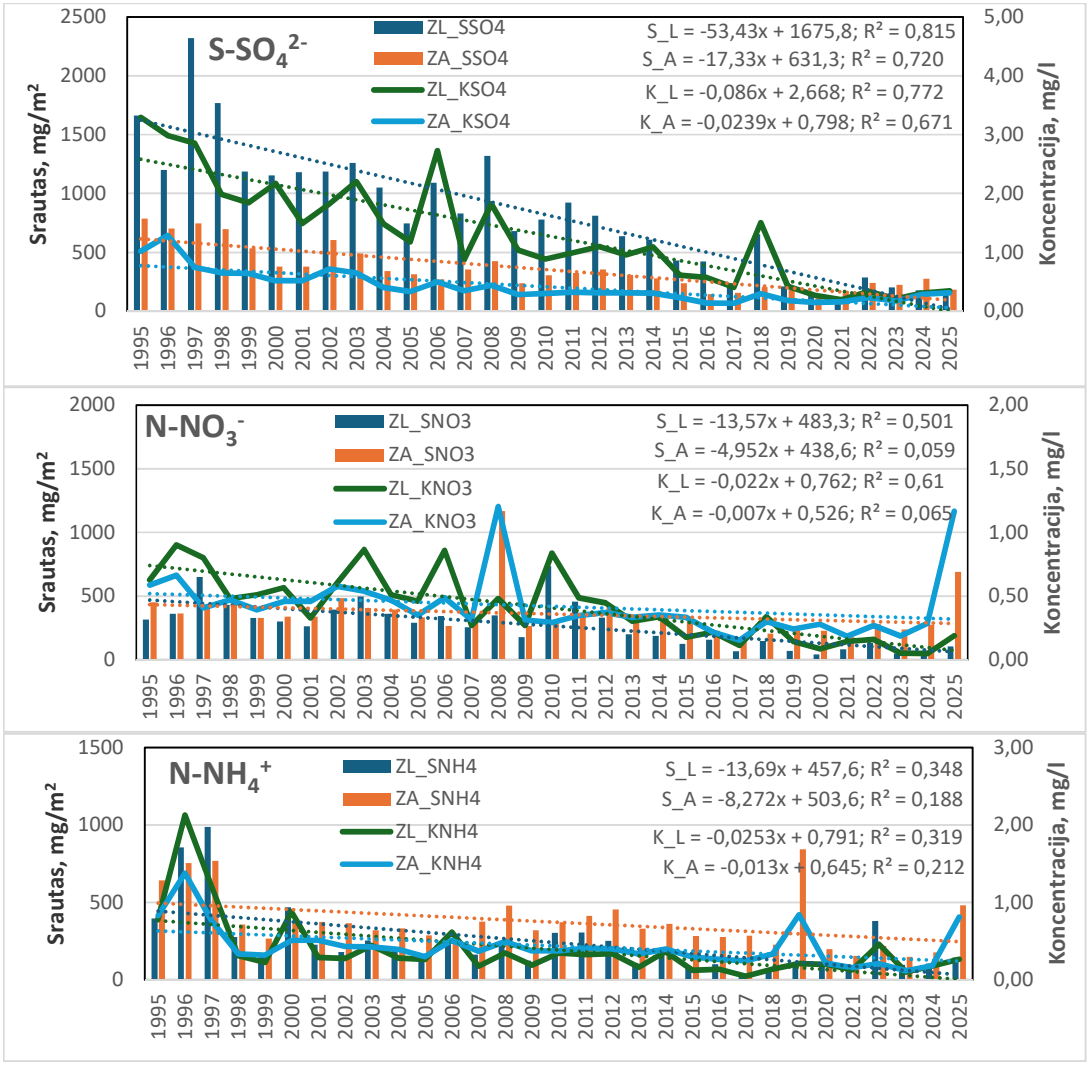
6.1.2. Žemaitijos KMS

Kritulių rūgštingumo tyrimai parodė, kad Žemaitijos KMS polajinių kritulių rūgštingumas yra mažesnis negu atviros vietos kritulių. Per visą tiriamąjį laikotarpį pH vertė iš esmės nesikeitė ir polajinių kritulių svyravo apie 5,3, o atviros vietos apie 5.



6.7 pav. Kritulių rūgštingumas atviroje (A) vietoje ir po medžių lajomis (L) Žemaitijos KMS.

S komponenčių krituliuose ir srautų mažėjimas, kaip ir Aukštaitijos KMS, intensyviausias. Reikšmingiausiai mažėja S koncentracijos polajiniuose krituliuose. Per tiriamąjį laikotarpį šio elemento koncentracijos sumažėjo daugiau kaip nuo 3 mg/l iki 0,3 mg/l, t.y. beveik 10 kartų. Tokiam sumažėjimui įtakos turėjo reikšningas sulfatų ir SO2 koncentracijų sumažėjimas ore, o tuo pačiu ir mažėjantis nuplovimas nuo lapijos paviršiaus. 2021-2025 m. laikotarpiu S komponenčių koncentracija ir jų srautai į miško paklotę išlieka minimaliame lygmenyje lyginant su 2015-2020 m. laikotarpiu.



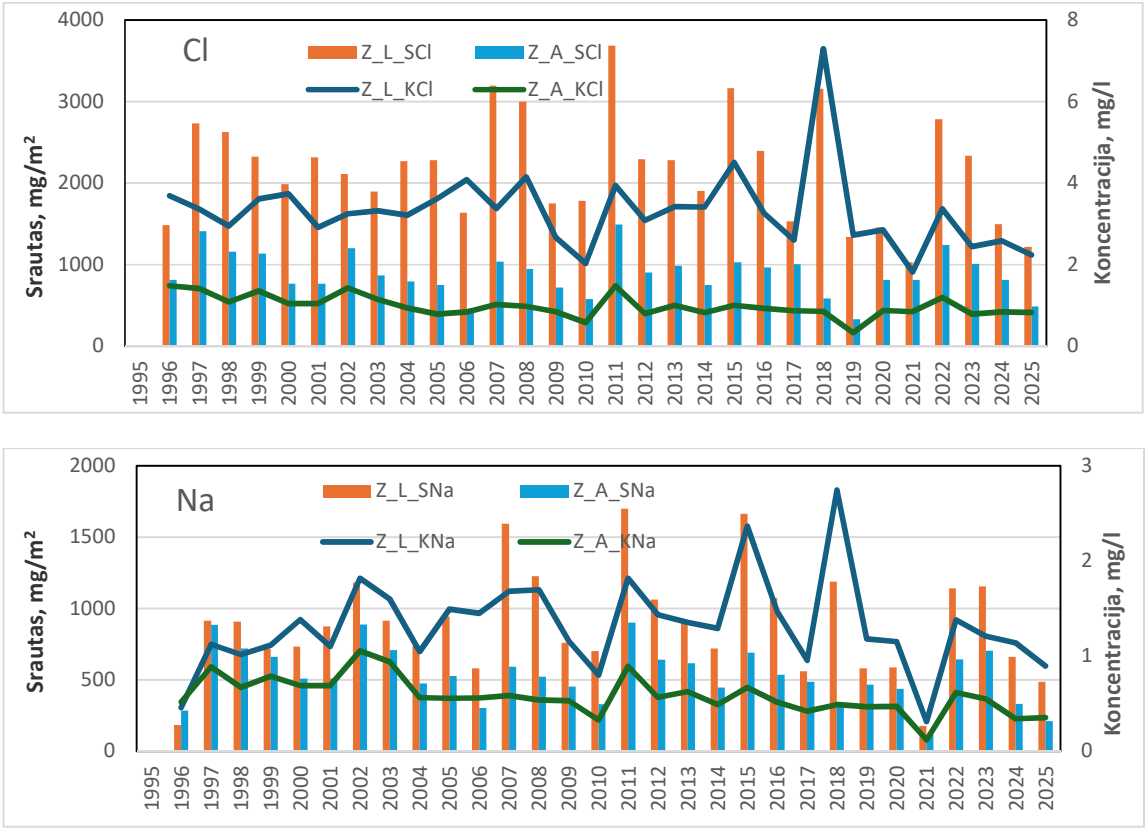
6.8 pav. Pagrindinių rūgštinančių komponenčių koncentracijų krituliuose ir jų srautų su krituliais kaita atviroje (atvira) vietoje ir po medžių lajomis (polaja) Žemaitijos KMS.

Paskutiniaisiais metais S koncentracijos krituliuose atviros vietos ir polajiniuose susilygino, informuodami, kad oro baseinas išsivalė nuo S komponenčių ir pastarojo laikotarpio minimalūs polajiniai srautai, praktiškai nedidėja dėl sausų S iškritų minimalaus nusėdimo ant augalų paviršiaus.

Žemaitijos KMS, skirtingai negu Aukštaitijos KMS, nitratų koncentracija krituliuose po laja ir jų rautas reikšmingai nesiskiria nuo nitratų koncentracijos ir jų srauto krituliuose atviroje vietoje. Nitratų mažėjimas polajiniuose krituliuose intensyvesnis negu atviros vietos krituliuose, tačiau šis mažėjimo skirtumas nesiekia 2 kartų. Reikšmingą įtaką tendencijų vertinimui turi nitratų koncentracijos 2008 m. ir jų srautai. Paskutiniuoju laikotarpiu išsiskyrė 2022 - 2025 m., kai nitratų koncentracijos pradėjo didėti atviros vietos krituliuose.

Amonio koncentracijos ir srautas po laja kito taip pat analogiškai jų koncentracijoms ir srautui atviroje vietoje. Paskutiniuoju laikotarpiu amonio koncentracijos atviros vietos krituliuose ir jo srautas virš 5 kartų viršija amonio koncentracijas ir srautą po medžių lajomis ir turi tendenciją mažėti. Tokia amonio koncentracijų kaita informuoja, kad didelė dalis amonio yra absorbuojama lapijos, kas matyt, prisideda prie didėjančio miškų produktyvumo ir gerėjančios lajų būklės. Mažėjimo intensyvumą slopina, 2019 m., dėl nežinomų dar priežasčių, reikšmingai padidėjusios amonio koncentracijos atviros vietos krituliuose ir jų srautas su krituliais. Išimti sudaro tik 2019 ir 2025 m., kai atviros vietos krituliuose išaugo amonio koncentracijos, o su jomis ir N rautai padidėjo ir prilygo 2000jų m. koncentracijoms ir srautams.

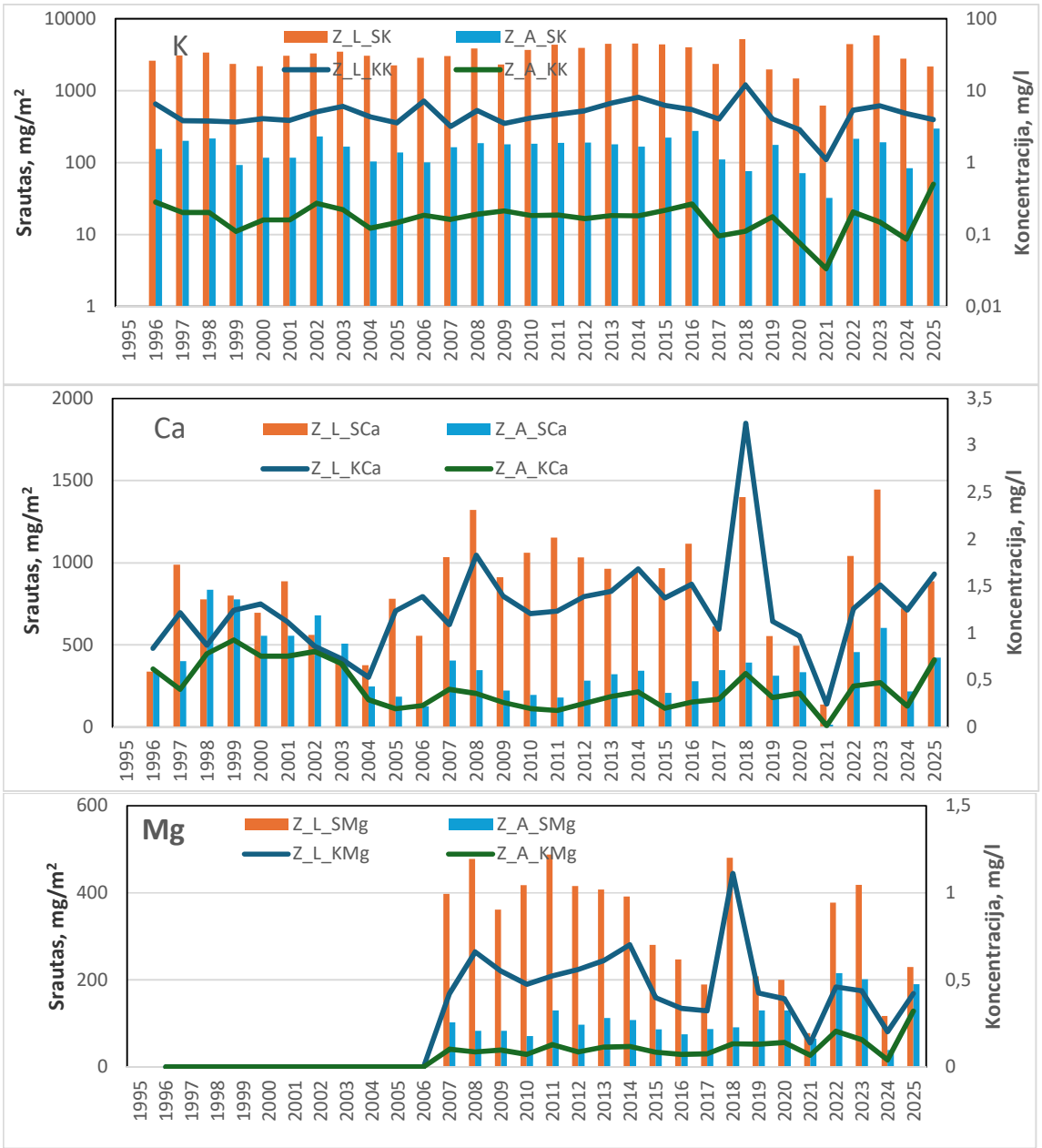
Cl ir Na koncentracijų kaitoje esminių pokyčių per visą tiriamąjį laikotarpį nenustatyta. Cl kaitoje išsiskiria 2018. Po šių metų Cl koncentracija polajiniuose krituliuose pradėjo mažėti ir ypač 2022-2025 m. laikotarpiu. Ši kaita reikšmingai sumažino ir Cl srautą į miško paklotę.



6.9 pav. Na ir Cl koncentracijų krituliuose ir jų srautų su krituliais kaita atviroje (atvira) vietoje ir po medžių lajomis (polaja) Žemaitijos KMS.

Analogiškai kito ir N koncentracijos, indikuodamos tą patį taršos šaltinį, t.y. Baltijos jūrą. Paskutiniuoju laikotarpiu (2022-2025 m.) registruojamas ženklus Na koncentracijų mažėjimas tiek atviros vietos, tiek ir polajiniuose krituliuose.

Šarminių katijonų kaitoje išsiskiria K koncentracijos ir jų srautai su krituliais. K koncentracija ir srautas polajiniuose krituliuose viršija K koncentracijas ir srautą atviros vietos krituliuose daugiau negu 20 kartų ir šis išplovimo intensyvumas keičiantis klimatui nuolat didėja, nors K koncentracijos atviros vietos krituliuose turi tendenciją mažėti, skirtingai negu Aukštaitijos KMS, kur šio elemento koncentracijos atviros vietos krituliuose didėja.



6.10 pav. Šarminių katijonų K, Ca ir Mg koncentracijų krituliuose ir jų srautų su krituliais kaita atviroje (atvira) vietoje ir po medžių lajomis (po laja) Žemaitijos KMS.

Panašios tendencijos nustatytos ir Ca koncentracijų kaitoje. Polajiniuose krituliuose šio elemento koncentracijos taip pat didėja, tik ne taip intensyviai, kaip K, tačiau atviros vietos krituliuose Ca koncentracijos mažėja, dėl ko gali pradėti didėti ir kritulių rūgštingumas ne tik atviroje vietoje, bet ir atviroje vietoje.

Mg krituliuose tirtas tik nuo 2007 m. Turimi duomenys rodo nors ir neženklų Mg koncentracijų augimą atviros vietos krituliuose, kuris lemia taip pat neženklų Mg koncentracijų augimą polajiniuose krituliuose. Šio elemento išplovimo intensyvumas nėra mažiausias kaip Aukštaitijos KMS ir siekia net 4-5 kartus.

Apibendrinant gautus rezultatus Žemaitijos KMS galima būtų taip pat teigti, kad miško ekosistemos reikšmingai išsivalo nuo sieros komponenčių taršos, didėjantis šarminių katijonų srautas prisideda prie didėjančio miškų produktyvumo ir atsparumo klimato kaitai, tačiau tik dėl intensyvesnio šarminių katijonų išplovimo ir audinių. Žemaitijos KMS mažėja K, Na ir K koncentracijos bei srautai su krituliais atviroje vietoje. Cl koncentracijų augimą reiktų vertinti kaip neigiamą veiksnį didinantį krituliu rūgštingumą. Paskutiniaisiais metais(2022-2025 m.) registruojamas Na, Ca ir Mg koncentracijų ir srautų mažėjimas į miško paklotę Žemaitijos KMS

6.1.3. Aukštaitijos ir Žemaitijos KMS kritulių cheminės sudėties pokyčių palyginimas ir ekosisteminis įvertinimas

Ilgalaikiai kritulių cheminės sudėties tyrimai Aukštaitijos ir Žemaitijos kompleksinio monitoringo stotyse atskleidė esminę atmosferos–miško ekosistemų sąveikos transformaciją per pastaruosius tris dešimtmečius. Abiejose stotyse svarbiausias pokytis buvo reikšmingas sieros junginių koncentracijų ir jų srautų mažėjimas, rodantis miško ekosistemų išsivalymą nuo ilgalaikės rūgštinančios taršos poveikio. Sumažėjus SO_2 koncentracijoms ore, silpnėjo sausųjų sieros iškritų kaupimasis lajų paviršiuje, todėl polajinių ir atviros vietos kritulių sieros koncentracijos pastaraisiais metais beveik susilygino. Tai rodo, kad sieros junginių nuplovimas nuo lajų, kuris tyrimų pradžioje buvo vienas pagrindinių rūgštinančios apkrovos šaltinių, praktiškai prarado ekologinę reikšmę.

Sieros srauto mažėjimo mastas abiejose stotyse buvo labai didelis, tačiau intensyvesnis Žemaitijos KMS, kur polajinių kritulių S koncentracijos sumažėjo beveik 10 kartų, o sieros srautai į miško paklotę – iki 13 kartų. Aukštaitijoje šis mažėjimas buvo kiek mažesnis – apie 6 kartus, tačiau kartu buvo registruotas ryškesnis kritulių cheminės reakcijos pokytis: atviros vietos kritulių pH reikšmingai didėjo ir 2017–2024 m. priartėjo prie neutralios ribos. Žemaitijoje, nepaisant

didelio sieros apkrovos sumažėjimo, pH reikšmės išliko santykinai stabilios (apie 5,0–5,3), kas rodo stipresnį kitų rūgštingumą reguliuojančių veiksnių poveikį.

Vienas reikšmingiausių naujojo laikotarpio (2011–2025 m.) požymių yra pakitęs lajų vaidmuo reguliuojant atmosferinių junginių patekimą į miško ekosistemą. Tyrimų pradžioje abiejose stotyse polajiniai krituliai pasižymėjo didesnėmis SO_4^{2-}, NO_3^- ir NH_4^+ koncentracijomis, nes medžių lajos kaupė sausąsias iškritas ir jos buvo nuplaunamos į dirvožemį. Pastaruoju laikotarpiu šis procesas iš esmės pasikeitė: ypač Aukštaitijos KMS rūgštinančių junginių koncentracijos ir srautai polajiniuose krituliuose tapo mažesni negu atviroje vietoje. Tai rodo, kad medžių lajos iš pasyvaus atmosferinių priemaišų kaupimo paviršiaus tapo aktyviu biologiniu filtru.

Azoto junginių dinamika atskleidė skirtingą stočių funkcionavimą. Aukštaitijos KMS tiek nitratinio, tiek amonio azoto sumažėjimas polajiniuose krituliuose rodo intensyvų šių junginių sulaikymą ir galimą panaudojimą medžių fiziologiniuose procesuose. Tai gali būti vienas iš veiksnių, prisidedančių prie didėjančio medynų produktyvumo, biomasės kaupimo ir gerėjančios lajų būklės. Žemaitijoje šis procesas ryškiausias amonio azoto atveju, kurio koncentracijos atviroje vietoje paskutiniaisiais metais daugiau kaip penkis kartus viršijo koncentracijas po lajomis. Nitratų atveju skirtumai tarp atviros vietos ir polajinių kritulių buvo mažesni, rodydami didesnę atmosferinių procesų ir vakarinių oro masių įtaką.

Didžiausi skirtumai tarp stočių nustatyti bazinių katijonų cikle. Aukštaitijos KMS stebimas bendras šarminių katijonų koncentracijų ir srautų didėjimas, kuris gali prisidėti prie dirvožemio buferinių savybių atsistatymo, rūgštėjimo mažėjimo ir medžių atsparumo klimato kaitai didėjimo. Žemaitijos KMS bazinių katijonų srautai į miško paklotę vis labiau priklauso nuo vidinių ekosistemos procesų – elementų išplovimo iš lajų. Ypač tai būdinga kaliui (K^+), kurio koncentracijos polajiniuose krituliuose daugiau kaip 20 kartų viršija koncentracijas atviroje vietoje. Tai rodo intensyvią biologinę apykaitą, bet kartu gali būti ir padidėjusio fiziologinio medžių jautrumo indikatorius.

Jūrinės kilmės elementų (Na^+ ir Cl^-) dinamika taip pat išryškino regioninius skirtumus. Žemaitijos KMS šių elementų kaita labiau priklausė nuo Baltijos jūros aerozolių poveikio, tačiau paskutiniaisiais metais (2022–2025 m.) registruotas jų koncentracijų mažėjimas. Aukštaitijoje, priešingai, po 2010 m. nustatytas Na^+ ir Cl^- koncentracijų augimas rodo stiprėjančią vakarinių oro masių įtaką net rytinės Lietuvos miškams. Cl^- koncentracijų didėjimas abiejose stotyse gali būti vertinamas kaip potencialus veiksnys, ribojantis tolimesnį kritulių rūgštingumo mažėjimą.

Apibendrinant galima teigti, kad Aukštaitijos ir Žemaitijos KMS miško ekosistemos iš rūgštinančios atmosferinės apkrovos fazės perėjo į naują biogeocheminio reguliavimo etapą. Aukštaitijos KMS pokyčiai labiau atspindi ekosistemos atsistatymo procesą – mažėjančią taršą,

didėjantį pH, augantį bazinių katijonų vaidmenį ir efektyvesnį azoto panaudojimą. Žemaitijos KMS pasižymi intensyvesne vidine elementų apykaita, kurioje medžių lajos palaiko maisto elementų srautus, tačiau didėjantis K^+, Ca^{2+} ir Mg^{2+} išplovimas gali būti susijęs ne tik su produktyvumo palaikymu, bet ir su didesniu klimato kaitos sukeliamu fiziologiniu stresu.

Todėl ateityje pagrindinė grėsmė šioms miško ekosistemoms bus ne klasikinė rūgštinė tarša, o klimato kaitos, azoto ciklo pokyčių ir mineralinės mitybos balanso sąveika. Aukštaitijos miškai šiuo metu demonstruoja didesnį atsistatymo potencialą, o Žemaitijos eglynų ekosistemos, nepaisant pagerėjusios atmosferinės aplinkos, gali išlikti jautresnės dėl intensyvesnės elementų apykaitos ir didėjančių klimato ekstremumų poveikio.

Išvados

1. Ilgalaikiai 1995–2025 m. kritulių cheminės sudėties tyrimai Aukštaitijos ir Žemaitijos KMS baseinuose parodė esminius atmosferinės taršos ir miško ekosistemų biogeocheminių procesų pokyčius. Abiejose stotyse nustatytas reikšmingas sieros junginių koncentracijų ir jų srautų į miško paklotę mažėjimas, rodantis miško ekosistemų išsivalymą nuo ilgalaikės rūgštinančios taršos poveikio.
2. Nepaisant bendros rūgštinančios apkrovos mažėjimo tendencijos, Žemaitijos KMS baseine SO_4^{2-}, NO_3^- ir NH_4^+ koncentracijos krituliuose bei jų srautai į miško paklotę išlieka reikšmingai didesni negu Aukštaitijos KMS baseine. Tai siejama su geografine padėtimi ir intensyvesne tolimųjų oro teršalų pernaša iš Vidurio ir Vakarų Europos, dėl kurios vakarų Lietuvos miško ekosistemos ilgą laiką patyrė didesnę atmosferinių rūgštinančių junginių apkrovą.
3. Per tris dešimtmečius reikšmingai pasikeitė medžių lajų vaidmuo reguliuojant cheminių elementų patekimą į miško ekosistemas. Tyrimų pradžioje lajos veikė kaip atmosferinių teršalų kaupimo paviršius, nuo kurio SO_4^{2-}, NO_3^- ir NH_4^+ junginiai buvo intensyviai nuplaunami į dirvožemį. Pastaruoju laikotarpiu, ypač 2011–2025 m., registruojamas priešingas procesas – rūgštinančių junginių koncentracijos ir srautai polajiniuose krituliuose mažėja, rodydami aktyvesnį lajų vaidmenį sulaikant ir reguliuojant atmosferinių junginių apykaitą.
4. Sumažėjus sieros apkrovai, pagrindiniu ekosistemų funkcionavimą reguliuojančiu veiksniu tampa azoto junginių apykaita. NO_3^- ir ypač NH_4^+ koncentracijų sumažėjimas polajiniuose krituliuose rodo intensyvėjantį azoto įsisavinimą medžių lajose. Šis procesas, kartu su ilgėjančiu vegetacijos periodu ir šiltėjančiu klimatu, galėjo prisidėti prie medynų produktyvumo didėjimo ir lajų būklės gerėjimo.

5. Bazinių katijonų (Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^{+} ir Na^{+}) dinamika rodo didėjančią jų svarbą miško ekosistemų atsparumui. Aukštaitijos KMS nustatytas šių elementų koncentracijų ir srautų didėjimas gali prisidėti prie dirvožemio rūgštėjimo mažėjimo ir medžių fiziologinio atsparumo didėjimo. Žemaitijos KMS šių elementų patekimą į miško paklotę vis labiau lemia intensyvus išplovimas iš lajų audinių, ypač K^{+}, kurio srautai daug kartų viršija atmosferinę depoziciją.
6. Kritulių rūgštingumo dinamika rodo skirtingą ekosistemų atsistatymo eigą. Aukštaitijos KMS atviros vietos kritulių pH reikšmingai didėjo ir pastaraisiais metais priartėjo prie neutralios ribos, o Žemaitijos KMS, nepaisant stipresnio sieros apkrovos sumažėjimo, pH išliko stabilesnis dėl didesnės atmosferinių pernašų, jūrinės kilmės aerozolių ir joninės sudėties įtakos.
7. Paskutiniaisiais tyrimų metais nustatytas sieros junginių srautų padidėjimas ir kritulių rūgštingumo augimas (pH mažėjimas) gali būti susijęs su regioniniais atmosferos cheminės sudėties pokyčiais, įskaitant galimą karo Ukrainoje laikotarpiu pakitusių emisijų ir oro teršalų pernašos poveikį. Šis pokytis rodo, kad net ir sumažėjus ilgalaikei pramoninei taršai miško ekosistemos išlieka jautrios staigiems regioniniams atmosferos sudėties pokyčiams.
8. Apibendrinant galima teigti, kad Lietuvos kompleksinio monitoringo miško ekosistemos perėjo iš rūgštinančios atmosferinės apkrovos laikotarpio į naują etapą, kuriame pagrindinę reikšmę įgauna klimato kaitos, azoto ciklo ir mineralinės mitybos balanso sąveika. Ateities grėsmės bus labiau susijusios ne su klasikine rūgščiąja tarša, bet su ekosistemų gebėjimu išlaikyti maisto elementų balansą intensyvėjančių klimato pokyčių sąlygomis.

Rūgštinančių komponenčių koncentracijos krituliuose ir jų srautai į miško paklotę Žemaitijos KMS baseine yra reikšmingai didesni negu Aukštaitijos KMS baseine, dėl tolimųjų oro teršalų pernašų iš Vidurio ir Vakarų Europos. **Karo Ukrainoje pasekmė: S srauto su krituliais ir kritulių rūgštingumo padidėjimas Aukštaitijos KMS.**

Galimos grėsmės

Nepaisant reikšmingo sieros junginių koncentracijų ir jų srautų sumažėjimo, atmosferinės taršos poveikis miško ekosistemoms nėra visiškai eliminuotas. Paskutiniaisiais tyrimų metais nustatytas sieros junginių srautų padidėjimas ir kritulių rūgštingumo augimas rodo, kad ekosistemos išlieka jautrios regioniniams atmosferos cheminės sudėties pokyčiams. Galimas emisijų padidėjimas dėl energetikos, pramonės ar karinių konfliktų poveikio, įskaitant karo Ukrainoje laikotarpiu registruotus atmosferinės sudėties pokyčius, gali padidinti rūgštinančių junginių apkrovą miško ekosistemoms.

Nors bendros azoto junginių iškritos sumažėjo, azoto ciklo pokyčiai išlieka viena svarbiausių potencialių grėsmių. Intensyvesnis NO_3^- ir NH_4^+ sulaikymas medžių lajose rodo aktyvesnį biologinį azoto panaudojimą, tačiau ilgalaikiai azoto apykaitos pokyčiai gali keisti anglies ir azoto balansą, skatinti rūšinės sudėties pokyčius bei mažinti oligotrofinėms sąlygoms prisitaikiusių organizmų konkurencingumą, ypač šioms iškritoms pradėjus didėti.

Didėjantis medžių produktyvumas mažėjančios atmosferinės taršos ir šiltėjančio klimato sąlygomis gali didinti poreikį baziniams elementams (Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^+). Todėl viena iš svarbių rizikų yra galimas mineralinės mitybos disbalansas, kai intensyvesnis augimas ir elementų įtraukimas į biomasę nėra kompensuojamas pakankamu jų atsistatymu dirvožemyje.

Žemaitijos KMS ypatingą dėmesį reikėtų skirti intensyvėjančiam bazinių katijonų išplovimui iš lajų. Labai dideli K^+, taip pat Ca^{2+} ir Mg^{2+} srautai polajiniuose krituliuose gali būti ne tik aktyvios elementų apykaitos požymis, bet ir indikatorius, rodantis padidėjusį medžių fiziologinį jautrumą aplinkos stresoriams, ypač klimato ekstremumų sąlygomis.

Didėjančios arba išliekančios padidėjusios Cl^- koncentracijos vertintinos kaip papildomas rizikos veiksnys. Chlorido jonai gali mažinti bazinių katijonų neutralizuojantį poveikį, stabdyti kritulių rūgštingumo mažėjimą ir keisti jonų balansą miško ekosistemose. Šis poveikis ypač aktualus regionuose, kuriuose stipresnė jūrinės kilmės aerozolių ar tolimųjų oro masių pernašos įtaka.

Klimato kaitos veiksniai gali sustiprinti kritulių cheminės sudėties pokyčių poveikį. Didėjanti temperatūra, ilgesni sausros periodai ir netolygus kritulių pasiskirstymas gali keisti elementų išplovimo iš lajų intensyvumą, jų judrumą dirvožemyje bei prieinamumą augalams. Tokios sąlygos gali padidinti jautresnių medžių rūšių, ypač eglių, pažeidžiamumą.

Dėl didesnės tolimųjų oro teršalų pernašos iš Vidurio ir Vakarų Europos Žemaitijos KMS baseinas išlieka labiau pažeidžiamas atmosferinės apkrovos svyravimams. Nors sieros tarša reikšmingai sumažėjo, didesnės rūgštinančių komponentų koncentracijos ir jų srautai, palyginti su Aukštaitijos KMS, gali didinti kompleksinį poveikį kartu su klimato kaitos sukeliamais stresoriais.

Tikėtinos prognozės

Atsižvelgiant į 1995–2025 m. nustatytas kritulių cheminės sudėties tendencijas, tikėtina, kad artimiausiais dešimtmečiais sieros junginių poveikis Lietuvos miško ekosistemoms išliks mažas. SO_4^{2-} koncentracijos ir jų srautai į miško paklotę pasiekė minimalų lygmenį, todėl klasikinio dirvožemių rūgštėjimo dėl sieros depozicijos rizika turėtų išlikti nedidelė. Tačiau pastarųjų metų sieros srautų padidėjimas rodo, kad regioniniai emisijų pokyčiai ir tolimosios oro masių pernašos gali laikinai pakeisti šią tendenciją.

Toliau mažėjant atmosferinei rūgštinančiai apkrovai, pagrindiniu miško ekosistemų funkcionavimą reguliuojančiu veiksniu taps vidinė maisto elementų apykaita. Tikėtina, kad didės medžių lajų, kaip aktyvaus biogeocheminio filtro, reikšmė – jos vis intensyviau reguliuos azoto junginių patekimą į dirvožemį, o dalis NO_3^- ir NH_4^+ bus panaudojama tiesiogiai fiziologiniuose procesuose.

Aukštaitijos KMS miško ekosistemoje prognozuojamas tolesnis santykinai stabilus atsistatymo procesas. Mažėjanti rūgštinančių junginių apkrova, didėjantis kritulių pH ir augantis bazinių katijonų vaidmuo turėtų palaikyti dirvožemio buferinių savybių gerėjimą, medžių produktyvumą bei atsparumą klimato kaitos poveikiui. Šios sąlygos gali skatinti tolesnį pušynų stabilumą ir anglies kaupimo potencialo didėjimą.

Žemaitijos KMS ekosistemose prognozuojama sudėtingesnė raida. Nors atmosferinė tarša reikšmingai sumažėjo, medynų funkcionavimas vis labiau priklausys nuo vidinių elementų ciklų. Didelis K^+, Ca^{2+} ir Mg^{2+} išplovimas iš lajų trumpuoju laikotarpiu gali palaikyti produktyvumą, tačiau ilgalaikėje perspektyvoje, dažnėjant sausroms ir temperatūros ekstremumams, gali didėti maisto medžiagų balanso sutrikimų rizika, ypač eglynų ekosistemose.

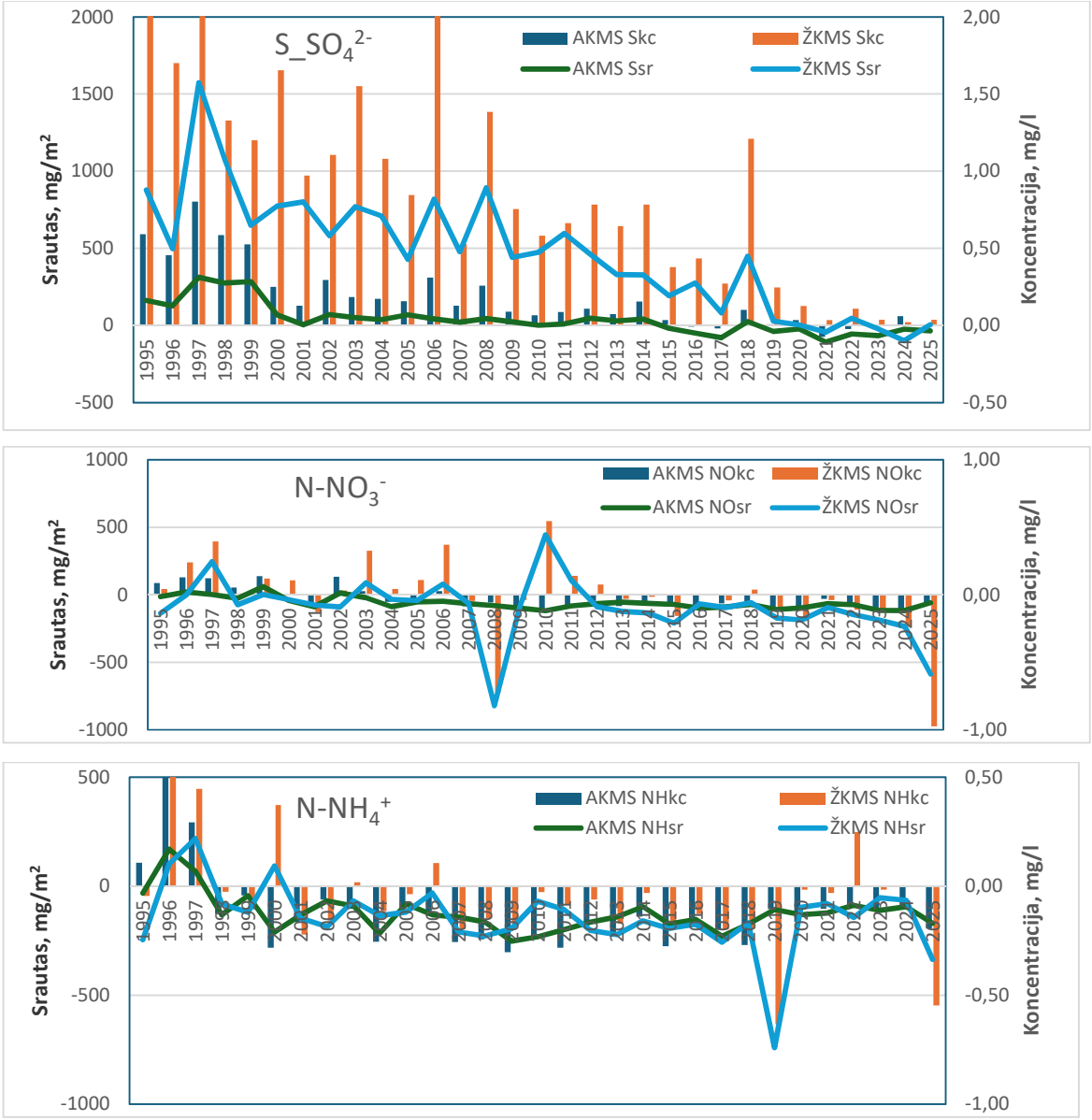
Azoto junginių vaidmuo ateityje išliks dvipusis. Mažos ir vidutinės NO_3^- bei NH_4^+ apkrovos, kartu su ilgėjančiu vegetacijos periodu, gali skatinti medžių augimą, tačiau klimato šiltėjimas gali pakeisti azoto panaudojimo efektyvumą ir sukelti anglies, azoto bei bazinių elementų santykio pokyčius dirvožemyje ir augalijoje.

Didėjanti klimato kaitos įtaka gali tapti svarbesniu veiksniu nei tiesioginė atmosferinė tarša. Ateityje kritulių cheminės sudėties poveikis miško ekosistemoms priklausys ne tik nuo patenkančių junginių kiekio, bet ir nuo hidrologinio režimo – sausrų dažnumo, intensyvių kritulių epizodų bei vegetacijos laikotarpio trukmės.

Bendra prognozė rodo, kad Lietuvos KMS miško ekosistemos pereina į naują vystymosi etapą, kuriame pagrindinis stabilumą lemiantis mechanizmas bus ne atsparumas rūgštinei taršai, bet gebėjimas išlaikyti subalansuotą maisto medžiagų ciklą sparčiai kintančio klimato sąlygomis.

6.1.4. Medžių lajų poveikis tirtų komponenčių kaitai ir meteorologinių veiksnių reikšmė jų intensyvumui

Aukštaitijos KMS kritulių užterštumas dėl S komponenčių nuplovimo nuo augalų paviršiaus pastaruoju laikotarpiu yra artimas nuliui, kai tuo tarpu Žemaitijos KMS nuplovimas šių komponenčių padidina S koncentraciją polajiniuose krituliuose iki 0,2-0,3 mg/l.



6.11 pav. Medžių lajų poveikis rūgštinančių komponenčių koncentracijoms krituliuose ir jų srautams su krituliais į dirvožemį Aukštaitijos ir Žemaitijos KMS. Teigiama reikšmė – didėjimas: lajų nuplovimas ar elementų išplovimas iš lapijos audinių, neigiama reikšmė – mažėjimas: komponenčių absorbcija lajoje.

Tokią S koncentracijų išplovimo iš lapijos intensyvumo ir S srauto su polajiniais krituliais kaitą per 32 m. laikotarpį reikšmingai sąlygojo atviros vietos kritulių kiekis, taip pat SO_2 ir SO_4^{2-} koncentracijos ore ir reikšmingiausiai - S koncentracijos atviros vietos krituliuose ir jos bendrieji srautai su krituliais. Žemaitijos KMS baseine S komponenčių transformaciją krituliams praėjus pro medžių lapiją reikšmingai sąlygojo kritulių kiekis, bet tik S koncentracijos kaitą, SO_2 ir SO_4^{2-} koncentracijos ore ir ir jų srautai su atviros vietos krituliais. Jeigu kritulių poveikis buvo neigiamas, jiems gausėjant S išplovimo intensyvumas iš lapijos audinių mažėjo, tai S komponentės aplinkoje tiesiogiai sąlygojo S kaitą polajiniuose krituliuose, t.y. aplinkos užterštumui S komponentėmis mažėjant mažėjo ir S nuplovimas nuo lapijos paviršiaus. Tokia S kiekio patenkančia su polajiniais krituliais į dirvožemį sąlygotas tolimųjų oro teršalų pernašų iš Vakarų Europos valstybių tiek Žemaitijos, tiek ir Aukštaitijos KMS baseinuose..

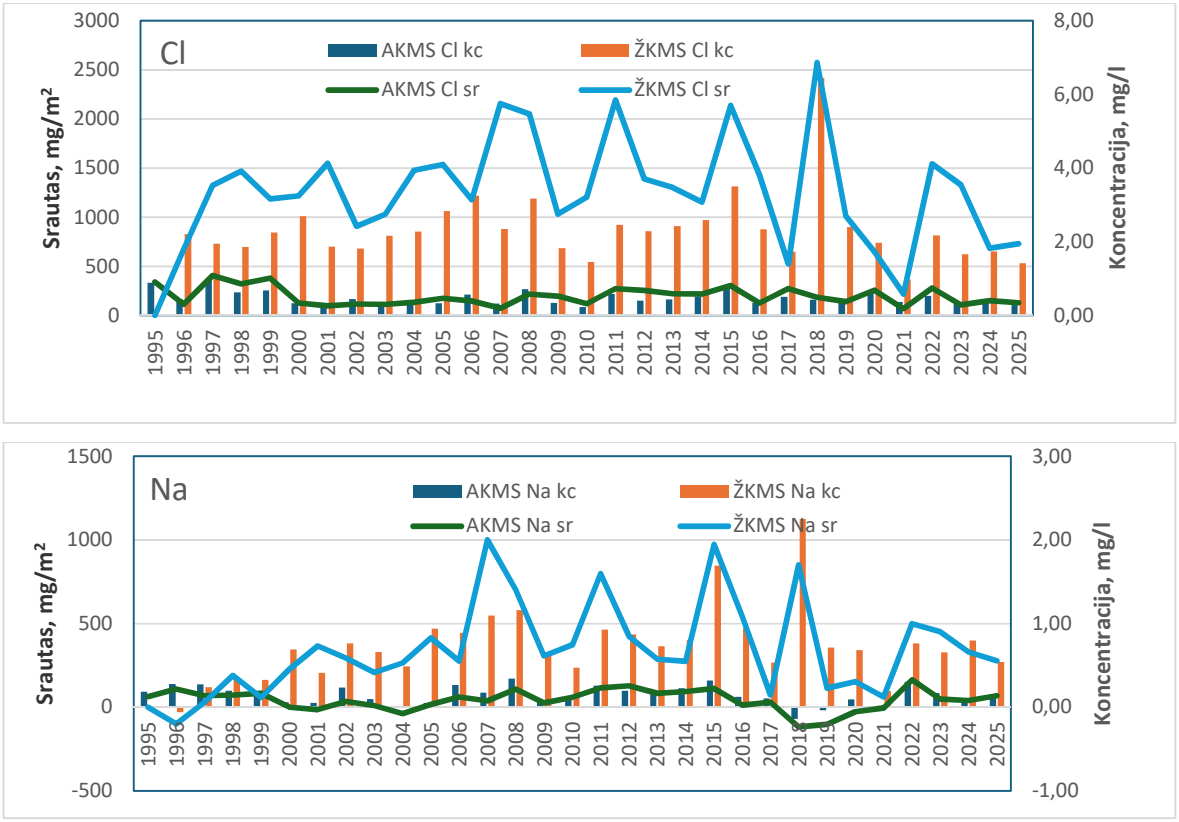
Nitratų NO_3^- kaitoje stebimos dvi skirtingos tendencijos. Tyrimų pradžioje dėl intensyvesnės taršos šiais junginiais, Žemaitijos KMS baseine nuplovimas nuo augalijos paviršiaus iki 2011-2012 m. viršijo sugėrimą šių junginių per žioteles. Aukštaitijos KMS ši tendencija tęsėsi tik iki 2002 m. Nuo šių pažymėtų metų sugėrimas nitratų pradėjo viršyti nuplovimą ir paskutiniaisiais metais abiejose KM stotyse šis procesas susilygino.

Tokia nitratų koncentracijų ir srautų kaitą praeinant krituliams per medžių lapiją Aukštaitijos KMS reikšmingai sąlygojo atviros vietos kritulių kiekis, nitratų koncentracijos ore, jų srautas su krituliais ir ypač nitratų koncentracijos krituliuose. Matyt, dėl koncentracijų ir srautų kolinearumo šiems procesams reikšmingi išliko ir tokie veiksniai kaip S ir amonio koncentracijos ore, krituliuose ir jų srautai. Išimtis tik amonio srautas, kurio poveikis nitratų transformacijoms praeinant pro augalijos paviršių buvo nereikšmingas. Kaip ir S atveju kritulių poveikis buvo neigiamas, o nitratų koncentracijų aplinkoje ir jų srautų – teigiamas.

Žemaitijos KMS baseine nitratų transformacijas praėjus pro medžių lapiją skirtingai negu Aukštaitijos KMS baseine reikšmingai lėmė oro temperatūra, šylant klimatui mažėja nitratų sugėrimas. Nitratų koncentracijos ore kaip ir krituliuose reikšmingos buvo tik nitratų koncentracijų kaitai praėjus krituliams pro lajas, o jų srautas su atviros vietos krituliais buvo nereikšmingas.

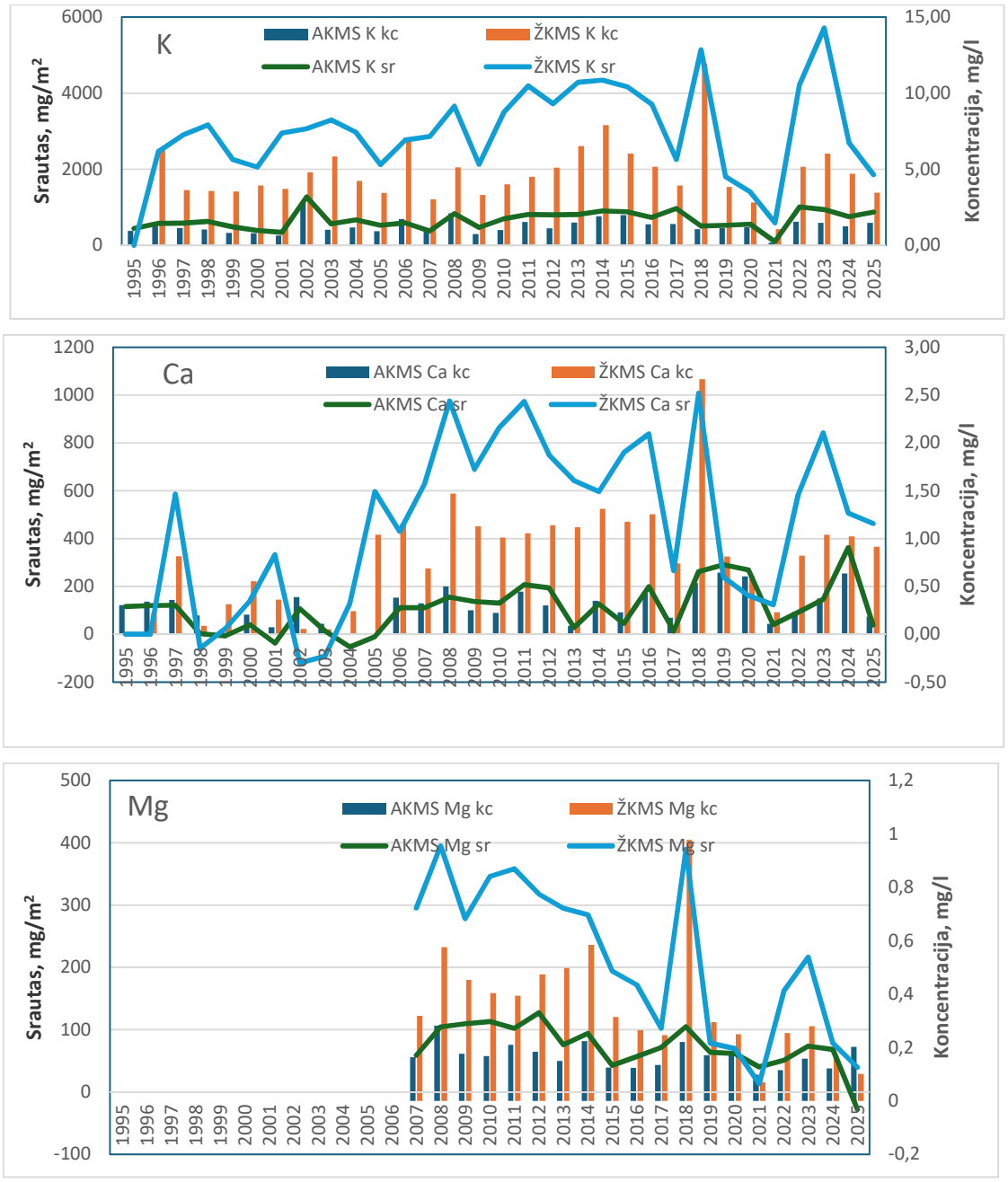
NH_4^+ koncentracijų ir srautų kaitoje praeinant pro medžių lapija esminių skirtumų tarp KM stočių nenustatyta. Pagrindinė tendenciją: iki 2000 m. nuplovimas nuo augalijos paviršiaus reikšmingai viršijo amonio sugerties proceso intensyvumą. Vėliau iki 2006 m. nuplovimas ir sugėrimas buvo lygūs abiejose stotyse. Nuo šio laikotarpio sugerties intensyvumas reikšmingai viršijo nuplovimą dėl ko mažėjo šios komponentės koncentracijos polajiniuose krituliuose bei jos srautai į dirvožemį su polajiniais krituliais.

Tokia amonio kaitą krituliuose praėjus pro lapiją KM stočių baseinuose lėmė oro temperatūra ir kritulių kiekis bei amonio koncentracijos krituliuose ir jų o srautas su krituliais atviroje vietoje. Meteorologiniams parametrams didėjant amonio sugėrimas mažėja, o amonio koncentracijoms aplinkoje mažėjant sugerties intensyvumas taip pat mažėja. Amonio koncentracijos ore tiesioginę įtaką amonio koncentracijų ir srautų transformacijoms praėjus pro lajas turi tik Žemaitijos KMS.



6.12 pav. Medžių lajų poveikis Na ir Cl koncentracijoms krituliuose ir jų srautams su krituliais į dirvožemį Aukštaitijos ir Žemaitijos KMS.

Na ir Cl koncentracijų ir srautų transformacijos praėjus pro medžių lajas rodo šių cheminių elementų kolinearumą arba jų vieną šaltinį – Baltijos jūrą ypač Žemaitijos KMS baseine. Būtent šiame KM baseine ir Na ir Cl koncentracijos ypač didėja nuo nuplovimo nuo augalijos paviršiaus, kas rodytų, kad su oro masėmis ant augalijos paviršiaus nuo Baltijos jūros patenka sausosios iškritos, kurios su vis gausėjančiais krituliais nuplaunamos ir patenka į dirvožemį. Tokiu būdu krituliai mažina Na ir Cl išplovimą iš lapijos audinių, o šių elementų srautams nei temperatūra, nei kritulių kiekis nėra reikšmingi. Galima teigti kad šylantis klimatas didina smulkiųjų aerozolių pernašą nuo Baltijos jūros į šalies gilumą. Aukštaitijos KMS baseine šis procesas priešingas, nuplovimas nuo augalijos paviršiaus mažėja.



6.13 pav. Medžių lajų poveikis šarminių katijonų K, Ca ir Mg koncentracijoms krituliuose ir jų srautams su krituliais į dirvožemį Aukštaitijos ir Žemaitijos KMS.

Medžių lajų poveikis šarminių katijonų K, Ca ir Mg koncentracijoms krituliuose ir jų srautams su krituliais į dirvožemį Žemaitijos KMS baseine reikšmingesnis negu Aukštaitijos KMS baseine. K Žemaitijos KMS baseine, kur vyrauja eglės su didesnių lapijos ploto indeksu K koncentracijos polajiniuose krituliuose didėja nuo 3 mg/l tyrimų pradžioje iki beveik 6 mg/l, t.y po 0,12 mg/l kasmet. Aukštaitijos KMS, kur vyrauja pušynai su ažūrinėmis lajomis šis intensyvumas 10 kartus silpnesnis ir nereikšmingas.

Panaši kaita ir Ca koncentracijų ir srautų atveju. Žemaitijos KMS baseine jo didėjimo intensyvumas iki 5 kartus intensyvesnis negu Aukštaitijos KMS. Mažiausiai reikšminga Mg išplovimo iš lapijos organų kaita, o ir jų skirtumai tarp stočių taip pat mažiausi.

Tokiai šarminių katijonų koncentracijų kaitai žymiai silpnesnį poveikį kaip rūgštinančioms komponentėms turi meteorologiniai veiksniai. Kritulių kiekis mažina šių elementų koncentracijas krituliuose (reikšmingai tik K), o šylantis oras didina šias koncentracijas (reikšmingai tik Ca). Mg atveju, krituliai mažina šio elemento koncentracijas, o temperatūra didina. Tirtų šarminių katijonų srautams po medžių laja nereikšmingas išlieka kritulių kiekio poveikis.

Apibendrinant galima teigti, kad klimato kaitos ir mažėjančios atmosferinės taršos sąlygomis medžių lajos tampa vienu svarbiausių miško ekosistemos biogeocheminių reguliatorių. Rūgštinančių junginių srautų mažėjimas rodo atmosferinės apkrovos mažėjimą, o didėjanti azoto absorbcija ir bazinių katijonų apykaita atspindi aktyvėjantį biologinį elementų reguliavimą. Aukštaitijos KMS šie procesai rodo stabilesnę atsikuriančią sistemą, o Žemaitijos KMS – intensyvesnę, bet jautresnę elementų apykaitą dėl tankesnių eglynų lajų, didesnio LAI ir stipresnio klimato bei jūrinių oro masių poveikio.

*6.1.4. Rezultatų k*onceptualus naujumas ir jo reikšmė miškų stabilunui

Ilgalaikiai Aukštaitijos ir Žemaitijos KMS tyrimai atskleidė ne tik atmosferinės taršos mažėjimą, bet ir esminį miško lajų funkcinio vaidmens persitvarkymą. Pagrindinis konceptualus rezultatas yra nustatytas perėjimas nuo **taršos kontroliuojamos atmosferos–lajos sąveikos** prie **biologiškai reguliuojamos atmosferos–lajos–dirvožemio sistemos**. Didelės atmosferinės apkrovos laikotarpiu lajos daugiausia veikė kaip sieros ir azoto sausųjų iškritų kaupimo bei nuplovimo paviršius, o sumažėjus teršalų koncentracijoms jų vaidmenyje pradėjo dominuoti biologinė jonų sugertis, išplovimas iš augalų audinių ir vidinis maisto elementų perskirstymas. Toks lajų traktavimas kaip aktyvaus biogeocheminio aparato, o ne vien pasyvaus atmosferinių iškritų absorbento, atitinka šiuolaikinę miško lajų biogeochemijos sampratą (Guerrieri et al., 2021).

Vienas reikšmingiausių rezultatų yra ilgalaikėje duomenų sekoje nustatyta **rūgštinančių junginių transformacijos krypties kaita**. Tyrimų pradžioje SO_4^{2-}, NO_3^- ir NH_4^+ nuplovimas nuo lajų viršijo jų sulaikymą, todėl polajiniai srautai buvo didesni už srautus atviroje vietoje. Vėliau, ypač Aukštaitijos KMS, nitratų ir amonio sugertis lajose pradėjo viršyti jų nuplovimą. Šis pokytis rodo, kad mažos taršos sąlygomis polajinių ir atviros vietos kritulių skirtumas jau apibūdina ne vien N iškritas, bet ir medžių fiziologinį aktyvumą, kai medžių lajos gali absorbuoti, transformuoti ir net mikrobiologiškai perdirbti reikšmingą atmosferinio azoto dalį, todėl vien polajinių kritulių srautai gali neatspindėti bendrą N patekimą į paklotę (Guerrieri et al., 2021; 2024).

Hemiborealiniam regionui ypač svarbus nustatytas **laiko neatitikimas tarp Aukštaitijos ir Žemaitijos KMS azoto ciklo persitvarkymo**. Aukštaitijoje nitratų sugertis pradėjo viršyti jų nuplovimą jau apie 2002 m., o Žemaitijoje – tik apie 2011–2012 m. Tai rodo, kad perėjimo nuo teršalų akumuliavimo prie biologinio reguliavimo momentą lemia ne vien bendras emisijų mažėjimas, bet ir regioninė atmosferinė apkrova, tolimosios pernašos, medynų rūšinė sudėtis, lajų tankumas bei klimato sąlygos. Žemaitijos KMS ilgesnis nuplovimo dominavimo laikotarpis dera su didesne rūgštinančių junginių apkrova vakarų Lietuvoje ir tankesnių eglynų gebėjimu efektyviau sulaikyti sausąsias iškritas. Naujausi tyrimai taip pat rodo, kad bendrąją depoziciją labai stipriai reguliuoja lajų uždarumas ir struktūra, kartais net labiau negu pati medžių rūšis (Vos et al., 2025).

Kitas regioniniu mastu reikšmingas naujumas yra tai, kad, beveik išnykus sieros nuplovimui Aukštaitijos KMS, Žemaitijos KMS vis dar išlieka nedidelis, bet išmatuojamas papildomas S kiekis polajiniuose krituliuose. Tai rodo, kad net esant labai mažoms sieros koncentracijoms atmosferoje tankios spygliuočių lajos gali išlaikyti gebėjimą sulaikyti dujines ir aerozolines sieros formas. Naujas Švedijos spygliuočių miškų tyrimas taip pat parodė, kad mažos taršos sąlygomis sieros bendrosios depozicijos vertinimui būtina atsižvelgti į lajų mainus, nes dalis sieros gali būti absorbuojama lajose, o dalis – nuplaunama nuo jų paviršiaus (Pihl Karlsson et al., 2024). Todėl Aukštaitijos ir Žemaitijos duomenys papildo Šiaurės Europos tyrimus parodydami, kaip šis procesas keičiasi skirtingos struktūros hemiborealiniuose pušynuose ir eglynuose.

Svarbus konceptualus rezultatas yra ir **skirtinga išorinės bei vidinės kilmės elementų kontrolė**. Sieros, nitratų ir amonio transformacijas pirmiausia reguliavo jų koncentracijos atmosferoje ir atviros vietos krituliuose, o K^+, Ca^{2+} ir Mg^{2+} srautus daugiausia formavo vidiniai lajų procesai. Ypač ryškus K^+ koncentracijų didėjimas Žemaitijos KMS polajiniuose krituliuose rodo, kad mažėjant išorinei taršai kritulių chemijoje vis labiau atsispindi ne atmosferos, bet pačių medžių fiziologinė būklė. Naujausi Europos tyrimai patvirtina, kad miško lajos gali maždaug padvigubinti bazinių katijonų patekimą į miško paklotę, o jų srautai labai priklauso nuo lajų uždarumo ir sausųjų iškritų sulaikymo (Vos et al., 2025). Lietuvos pušynų ir eglynų tyrimai taip pat parodė polajinių kritulių praturtinimą K^+ ir kitais jonais, tačiau Aukštaitijos ir Žemaitijos KMS duomenų vertę didina išskirtinai ilga stebėjimų trukmė ir galimybė atskleisti proceso krypties pokyčius (Černiauskas et al., 2024).

Žemaitijos KMS nustatytas iki dešimties kartų intensyvesnis K^+ koncentracijų didėjimas negu Aukštaitijos KMS leidžia kelti hipotezę apie **lajų struktūros ir fiziologinio streso sąveiką**. Tankesnės eglių lajos ir didesnis lapijos ploto indeksas padidina atmosferinių dalelių sulaikymą, tačiau kartu didina jonų išplovimo iš spyglių paviršiaus ir audinių tikimybę. Dėl to bazinių katijonų srautai gali būti interpretuojami dvejopai: kaip aktyvios maisto medžiagų apytakos ir ekosistemos

produktyvumo požymis, bet kartu ir kaip galimas membranų pažeidimo, spyglių senėjimo ar klimatinio streso indikatorius. Šis dvilypis vertinimas yra ypač aktualus hemiborealiniams eglynams, esantiems netoli pietinės jų optimalaus paplitimo ir klimatinio stabilumo ribos.

Nauju integraciniu rezultatu laikytina ir nustatyta **meteorologinių veiksnių priklausomybė nuo junginio kilmės ir transformacijos mechanizmo**. Kritulių kiekis mažino daugelio jonų koncentracijas dėl praskiedimo ir trumpesnio sausųjų iškritų kaupimosi laiko, tačiau jo poveikis metiniams srautams dažnai buvo silpnas. Temperatūros augimas Žemaitijos KMS mažino nitratų sulaikymą lajose ir didino kai kurių bazinių katijonų, ypač Ca^{2+} ir Mg^{2+}, išplovimą. Tai leidžia teigti, kad klimato šiltėjimas gali ne tik keisti atmosferinių medžiagų pernašą, bet ir tiesiogiai modifikuoti lajų jonų mainus. Vadinasi, tokia pati atmosferinė apkrova šiltesniais ir sausesniais metais gali sukelti kitokį elementų pasiskirstymą tarp lajų ir dirvožemio negu vėsesniais bei drėgnesniais laikotarpiais.

Na^+ ir Cl^- kolineari kaita Žemaitijos KMS pagrindžia jūrinės kilmės aerozolių reikšmę, tačiau jų nuplovimo kitimas kartu su klimato rodikliais leidžia plačiau vertinti šiuos elementus kaip **atmosferos cirkuliacijos ir jūrinės įtakos indikatorius**. Hemiborealiniame Baltijos regione tai ypač aktualu, nes jūrinės ir žemyninės oro masės čia persidengia, o miško lajos integruoja tiek šlapiąją, tiek sausąją aerozolių depoziciją. Aukštaitijos ir Žemaitijos skirtumai rodo galimą geografinį jūrinio signalo slinkimą į šalies gilumą, tačiau šiai hipotezei patvirtinti reikėtų oro masių trajektorijų, vėjo krypčių ir jūros druskų santykių analizės.

Bendra konceptuali šių tyrimų išvada yra ta, kad **polajinių kritulių chemija mažos atmosferinės taršos sąlygomis tampa integruotu medžių lajų funkcinės būklės rodikliu**. Didelės taršos laikotarpiu polajiniai srautai daugiausia rodė teršalų kiekį atmosferoje, o dabar jie vis labiau atspindi azoto sugertį, katijonų išplovimą, lajų struktūrą, medžių rūšinę sudėtį ir meteorologinį stresą. Todėl ilgalaikis atviros vietos ir polajinių kritulių palyginimas gali būti naudojamas ne tik atmosferinės depozicijos, bet ir ankstyvųjų miško fiziologinės destabilizacijos signalų vertinimui.

Hemiborealiniams miškams ypač reikšminga tai, kad Aukštaitijos ir Žemaitijos KMS reprezentuoja du skirtingus biogeocheminio atsako tipus: santykinai stabilią, mažesnio lajų paviršiaus pušynų sistemą ir intensyvesne lajų apykaita bei didesniu klimato jautrumu pasižyminčią eglynų sistemą. Šis palyginimas leidžia geriau suprasti, kaip tos pačios regioninės taršos mažėjimo ir klimato šiltėjimo tendencijos gali suformuoti skirtingą elementų apykaitą priklausomai nuo medynų struktūros. Dėl 32 metų stebėjimų trukmės gauti rezultatai gali būti laikomi vienu iš išsamesnių ilgalaikio atmosferinės taršos mažėjimo, klimato kaitos ir lajų biogeochemijos sąveikos įvertinimų Baltijos hemiborealinių miškų regione.

IŠVADOS

1. Per 1995–2025 m. laikotarpį Aukštaitijos ir Žemaitijos KMS baseinuose nustatytas esminis medžių lajų vaidmens pokytis reguliuojant cheminių elementų srautus į miško paklotę. Tyrimų pradžioje medžių lajos daugiausia veikė kaip atmosferinių teršalų kaupimo ir nuplovimo paviršius, o sumažėjus atmosferinei taršai jų biologinė funkcija reguliuojant elementų apykaitą tapo reikšmingesnė.
2. Sieros junginių transformacijos labiausiai atspindėjo atmosferos išsivalymo procesą. Aukštaitijos KMS sieros junginių nuplovimas nuo lajų paviršiaus pastaraisiais metais praktiškai sumažėjo iki nulio, o Žemaitijos KMS dėl didesnės tolimųjų oro teršalų pernašos iš Vidurio ir Vakarų Europos bei tankesnių eglynų lajų išliko nedidelis papildomas sieros srautas su polajiniais krituliais. Abiejose stotyse pagrindiniu sieros transformaciją lemiančiu veiksniu išliko atmosferinė SO_2, SO_4^{2-} koncentracija ir jų srautai su atviros vietos krituliais.
3. Azoto junginių kaita parodė esminį perėjimą nuo jų nuplovimo nuo lajų paviršiaus prie aktyvios biologinės sugerties. Tyrimų pradžioje NO_3^- ir NH_4^+ junginių nuplovimas viršijo jų įsisavinimą, tačiau nuo 2002 m. Aukštaitijos KMS ir nuo 2011–2012 m. Žemaitijos KMS nitratų sugėrimas pradėjo dominuoti. Amonio atveju šis pokytis abiejose stotyse išryškėjo po 2006 m., reikšmingai sumažindamas azoto srautus į dirvožemį.
4. Didėjanti NO_3^- ir NH_4^+ absorbcija medžių lajose rodo, kad mažėjant atmosferinei taršai miško ekosistemos efektyviau panaudoja atmosferinės kilmės azotą. Šis procesas galėjo prisidėti prie pastaraisiais dešimtmečiais stebimo medžių produktyvumo didėjimo ir lajų būklės gerėjimo, tačiau jo intensyvumas priklauso nuo klimato sąlygų ir medynų struktūros.
5. Meteorologinių veiksnių poveikis rūgštinančių komponenčių transformacijoms tapo reikšmingu reguliavimo veiksniu. Kritulių kiekio didėjimas mažino S, NO_3^- ir NH_4^+ koncentracijas polajiniuose krituliuose dėl praskiedimo ir mažesnio sausųjų iškritų kaupimosi, o oro temperatūros augimas, ypač Žemaitijos KMS, keitė azoto junginių sulaikymo intensyvumą.
6. Na^+ ir Cl^- koncentracijų bei srautų transformacijos patvirtino didėjančią jūrinės kilmės aerozolių reikšmę, ypač Žemaitijos KMS baseine. Šių elementų kaupimasis ant lajų paviršiaus ir jų nuplovimas į miško paklotę rodo Baltijos jūros oro masių poveikį miško ekosistemų cheminiam režimui.
7. Didžiausi stočių skirtumai nustatyti šarminių katijonų (K^+, Ca^{2+} ir Mg^{2+}) apykaitoje. Žemaitijos KMS dėl vyraujančių eglynų, tankesnių lajų ir didesnio lapijos ploto indekso šių elementų išplovimas iš augalų audinių buvo daug intensyvesnis negu Aukštaitijos KMS pušynuose. Ypač ryškus K^+ išplovimas rodo aktyvią vidinę elementų apykaitą medynuose.

8. Klimato šiltėjimas stiprina biologinių procesų reikšmę elementų cikluose. Didėjanti oro temperatūra skatina bazinių katijonų, ypač Ca^{2+} ir Mg^{2+}, išplovimą iš lajų audinių, tuo tarpu kritulių kiekio poveikis dažniausiai pasireiškia koncentracijų mažėjimu dėl praskiedimo efekto.
9. Aukštaitijos ir Žemaitijos KMS skirtumai rodo du skirtingus ekosistemų atsako mechanizmus. Aukštaitijos pušynuose, sumažėjus atmosferinei apkrovai, formuojasi stabilesnis elementų reguliavimo režimas, o Žemaitijos eglynuose vyksta intensyvesnė elementų apykaita, kurią lemia didesnis lajų paviršius, stipresnė atmosferinė pernaša ir jautresnė medynų struktūra.

Apibendrinant galima teigti, kad mažėjančios atmosferinės taršos ir klimato kaitos sąlygomis medžių lajos tampa pagrindiniu atmosferos–augalijos–dirvožemio sąveikos reguliatoriumi, lemiančiu rūgštinančių junginių neutralizavimą, azoto panaudojimą ir bazinių elementų ciklo stabilumą miško ekosistemose.

Galimos grėsmės

1. **Medžių lajų reguliacinės funkcijos silpnėjimas dėl klimato ekstremumų.** Mažėjant atmosferinei taršai medžių lajos tapo pagrindiniu azoto ir kitų elementų srautų reguliatoriumi, tačiau šis procesas tiesiogiai priklauso nuo medžių fiziologinės būklės. Dažnėjančios sausros, aukštos temperatūros ir vandens deficitas gali mažinti žiotelių aktyvumą, sutrikdyti NO_3^- ir NH_4^+ įsisavinimą per lajas ir sumažinti medžių gebėjimą reguliuoti azoto patekimą į dirvožemį.
2. **Padidėjusios elementų apykaitos sukeltas maisto medžiagų disbalansas.** Didėjantis K^+, Ca^{2+} ir Mg^{2+} išplovimas iš lajų, ypač Žemaitijos KMS eglynuose, gali rodyti intensyvėjančią fiziologinę apykaitą, tačiau ilgalaikėje perspektyvoje toks procesas gali lemti maisto elementų persiskirstymą ir didinti priklausomybę nuo dirvožemio atsargų. Ši grėsmė gali stiprėti, jei elementų netekimas iš lajų nebus kompensuojamas jų įsisavinimu per šaknų sistemą.
3. **Eglynų jautrumo didėjimas dėl intensyvesnių lajų procesų.** Žemaitijos KMS didesnis lapijos ploto indeksas ir tankesnės eglių lajos lemia intensyvesnį cheminių elementų sulaikymą ir transformaciją. Tačiau ta pati savybė gali didinti jautrumą aplinkos stresoriams, nes didesnis aktyvus lajų paviršius reiškia stipresnę priklausomybę nuo vandens režimo ir atmosferinių sąlygų.
4. **Azoto ciklo persitvarkymo rizika.** Didėjanti NO_3^- ir NH_4^+ absorbcija lajose šiuo metu gali būti vertinama kaip teigiamas procesas, prisidedantis prie produktyvumo augimo. Tačiau klimato kaitos sąlygomis pasikeitęs azoto pasiskirstymas tarp lajų, dirvožemio ir mikroorganizmų gali pakeisti ilgalaikį C balansą, organinės medžiagos skaidymosi procesus ir rūšinę augalijos struktūrą.

5. **Klimato šiltėjimo skatinamas bazinių elementų išplovimas.** Nustatytas teigiamas temperatūros poveikis kai kurių bazinių katijonų, ypač Ca^{2+} ir Mg^{2+}, koncentracijoms polajiniuose krituliuose rodo, kad toliau šylant klimatui gali intensyvėti elementų praradimas iš asimiliacinių organų. Tai gali tapti papildomu stresoriumi medžiams ekstremalių sausrų ar karščio laikotarpiais.
6. **Jūrinių aerozolių ir Cl^- poveikio stiprėjimas.** Didėjanti Na^+ ir Cl^- pernaša, ypač vakariniame regione, gali keisti joninę pusiausvyrą krituliuose ir dirvožemyje. Cl^- koncentracijų didėjimas gali mažinti bazinių katijonų neutralizuojantį poveikį ir riboti tolesnį rūgštėjimo mažėjimą.
7. **Didėjanti priklausomybė nuo biologinio reguliavimo.** Sumažėjus išorinei atmosferinei apkrovai, miško ekosistemos stabilumas vis labiau priklauso nuo pačių medžių fiziologinės būklės. Todėl bet koks veiksnys, mažinantis lajų gyvybingumą (sausros, kenkėjai, ligos ar defoliacija), gali turėti didesnį poveikį visam elementų ciklui nei ankstesniais didelės taršos laikotarpiais.

Prognozės

1. Mažėjant atmosferinei taršai, medžių lajų reikšmė reguliuojant cheminių elementų srautus miško ekosistemose toliau didės. Lajos iš buvusio pasyvaus atmosferinių teršalų kaupimo paviršiaus taps pagrindiniu biologiniu filtru, reguliuojančiu azoto junginių patekimą į dirvožemį ir palaikančiu vidinį maisto medžiagų ciklą.
2. Sieros junginių vaidmuo miško ekosistemų funkcionavime ir toliau mažės. Kadangi Aukštaitijos KMS sieros nuplovimas nuo lajų paviršiaus jau praktiškai sumažėjo iki nulio, o Žemaitijos KMS išliko tik minimalus papildomas srautas, tikėtina, kad sieros depozicija ateityje nebebus pagrindinis miško būklę reguliuojantis veiksnys. Didesnę reikšmę įgis azoto, bazinių katijonų ir klimato veiksnių sąveika.
3. Azoto junginių apykaita taps labiau priklausoma nuo medžių fiziologinio aktyvumo. Ilgėjantis vegetacijos laikotarpis ir kylanti temperatūra gali skatinti NO_3^- ir NH_4^+ panaudojimą lajose, todėl dalis atmosferinio azoto bus įtraukiama į produktyvumo palaikymo procesus dar prieš jam patenkant į dirvožemį. Tai gali palaikyti didesnį medynų augimo potencialą mažos atmosferinės taršos sąlygomis.
4. Didėjant klimato ekstremalumui, lajų gebėjimas reguliuoti azoto srautus gali tapti vienu svarbiausių miško atsparumo rodiklių. Medynai, gebantys efektyviau panaudoti atmosferinį azotą ir išlaikyti stabilų elementų balansą, turėtų pasižymėti didesniu prisitaikymo potencialu prie besikeičiančių aplinkos sąlygų.
5. Aukštaitijos KMS pušynuose prognozuojama stabilesnė elementų apykaita dėl mažesnio lajų tankumo, mažesnio elementų išplovimo intensyvumo ir efektyvesnio azoto

panaudojimo. Tokia sistema turėtų išlikti santykinai atsparesnė klimato kaitos poveikiui, ypač esant vidutinio intensyvumo sausroms ir temperatūros augimui.

6. K, Ca ir Mg kaitoje stebimas ypač intensyvus šių elementų išplovimas iš lapijos indikuodamas, kad šių elementų kiekiai lapijoje turėtų didėti, o nuokritose mažėti. Tai reikšmingas procesas praturtinantis dirvožemį pagrindiniais maistiniais komponentais.
7. Žemaitijos KMS eglynuose tikėtinas intensyvesnis biogeocheminių procesų persitvarkymas. Didesnis lapijos ploto indeksas ir aktyvesnė elementų apykaita gali trumpuoju laikotarpiu palaikyti produktyvumą, tačiau medynų stabilumas vis labiau priklausys nuo vandens režimo ir gebėjimo kompensuoti didesnius K^+, Ca^{2+} ir Mg^{2+} srautus per lajas.
8. Klimato šiltėjimas gali didinti bazinių katijonų mobilumą augaluose. Todėl tikėtina, kad šiltesniais ir ilgesniais vegetacijos laikotarpiais K^+, Ca^{2+} ir Mg^{2+} ciklai taps aktyvesni, o jų reikšmė medžių fiziologinei būklei ir atsparumui stresui didės.
9. Didėjanti vakarinių oro masių įtaka gali stiprinti jūrinės kilmės aerozolių poveikį Lietuvos miško ekosistemoms. Todėl Na^+ ir Cl^- dinamika ateityje gali tapti svarbiu klimato kaitos sukeltų atmosferos cirkuliacijos pokyčių indikatoriumi.
10. Ateities miško ekosistemų būklę vis mažiau lems tiesioginė atmosferinė tarša ir vis daugiau – gebėjimas palaikyti subalansuotą atmosferos–lajos–dirvožemio elementų apykaitą. Todėl lajų funkcinė būklė gali tapti vienu jautriausių ankstyvųjų miško ekosistemų stabilumo indikatorių.

6.2. Pagrindinių maistinių elementų koncentracijos lapijoje ir jų kaita 2005-2025 m. laikotarpiu

Medžių žaliosios lapijos cheminė sudėtis yra vienas svarbiausių miško ekosistemų mineralinės mitybos būklės ir biogeocheminių procesų indikatorių. Spygliuose ir lapuose sukauptų elementų koncentracijos atspindi kompleksinę sąveiką tarp atmosferos iškritų, dirvožemio cheminių savybių, lajų tiesioginės elementų absorbcijos bei klimato sąlygų poveikio medžių fiziologijai. Todėl lapijos cheminės sudėties tyrimai plačiai naudojami vertinant ilgalaikius aplinkos pokyčius, maisto medžiagų balansą ir miško ekosistemų atsparumą stresui (Jonard et al., 2015; Talkner et al., 2015; Schmitz et al., 2019).

Per pastaruosius dešimtmečius Europos miško ekosistemos patyrė reikšmingus atmosferinės apkrovos pokyčius. Sumažėjus sieros ir azoto junginių emisijoms, silpnėja tiesioginis rūgštinančios depozicijos poveikis, tačiau kartu keičiasi ilgalaikiai maisto elementų ciklai. Mažėjantis sieros ir azoto patekimas, ankstesnio rūgštėjimo sukeltas bazinių katijonų išplovimas bei spartėjanti klimato kaita gali keisti pagrindinių elementų – N, P, K, Ca ir Mg – santykį medžių audiniuose (Jonard et al., 2015; Schmitz et al., 2019).

Šiuolaikiniai tyrimai rodo, kad vertinant miškų būklę vis svarbesnis tampa ne tik atskirų elementų kiekis lapijoje, bet ir jų tarpusavio santykiai. Azoto koncentracijų pokyčiai kartu su fosforo, kalio, kalcio ar magnio prieinamumu gali lemti maisto medžiagų disbalansą, kuris riboja medžių gebėjimą panaudoti palankesnes klimato sąlygas produktyvumui didinti. Ypač svarbus tampa N santykis, naudojamas vertinant galimą azoto arba fosforo ribojimą, taip pat bazinių katijonų koncentracijos, atspindinčios medžių atsparumą sausroms ir kitiems klimato ekstremumams (Talkner et al., 2015; Sardans et al., 2023).

Hemiborealiniuose miškuose šie procesai yra ypač aktualūs, nes klimato šiltėjimas ilgina vegetacijos periodą ir gali skatinti medžių augimą, tačiau kartu didina vandens poreikį, sausros stresą bei maisto elementų poreikį. Dėl šios priežasties spartesnis produktyvumo augimas gali sukelti vadinamąjį „maisto medžiagų praskiedimo efektą“, kai didėjant biomasei mažėja kai kurių elementų koncentracijos augalų audiniuose (Peñuelas et al., 2020).

Lapijos cheminės sudėties pokyčiai taip pat glaudžiai susiję su medžių atsparumu biotiniams ir abiotiniams stresoriams. Pakankamos K, Ca ir Mg koncentracijos svarbios osmoreguliacijai, fotosintezės procesams, membranų stabilumui ir apsaugai nuo sausros poveikio, o jų sumažėjimas gali didinti jautrumą karščio bangoms, vandens deficitui ir kenkėjų pažeidimams. Tai ypač aktualu hemiborealinių eglynų stabilumui klimato kaitos sąlygomis (Sardans et al., 2023).

Todėl ilgalaikiai Aukštaitijos ir Žemaitijos KMS žaliosios lapijos cheminės sudėties tyrimai suteikia galimybę įvertinti, kaip mažėjanti atmosferinė tarša, besikeičianti kritulių cheminė sudėtis ir klimato kaita transformuoja medžių mineralinės mitybos strategijas. Šie tyrimai leidžia nustatyti, ar didėjantis miškų produktyvumas vyksta išlaikant stabilų elementų balansą, ar formuojasi naujos rizikos, susijusios su maisto medžiagų trūkumu ir ekosistemų atsparumo mažėjimu.

Tokiu būdu pagrindinių maistinių elementų koncentracijos lapijoje, t.y. eglių ir pušų spygliuose bei beržų lapuose apsprendžią bendrą vyraujančių medžių rūšių būklę, kadangi didėjantys šių elementų kiekiai informuoja apie didesnį medžių produktyvumą ir atsparumą nepalankiems aplinkos veiksniams. Taip pat šių duomenų sekos informuoja ir apie bendrą bio- geo- ekosistemos būklę, kadangi didėjantys šių elementų kiekiai informuoja ir apie geresnę ekosistemos mitybini bazę, turtingesnį dirvožemį ir potencialą rūšių įvairovei bei gausai didėti. Tai miško ekosistemų tvaraus vystymosi pagrindas.

Darbo tikslas – pagal nustatytas pagrindinių elementų koncentracijas bei jų pokyčius medžių lapijoje bei jų nuokritose, išaiškinti į jų transformacijas ir poveikį geosisteminiams procesams, išaiškinant galimą miško ekosistemų būklės tolimesnę raidą.

Cheminių analizių metu nustatomos šios maistmedžiagių koncentracijos lapijoje ir jos nuokritose: Ca, K, Mg, Mn, N, P.

Lauko darbų metodika: Analizuojami pagrindinių medžių rūšių lapijos pavyzdžiai. Tai paprastojo beržo (*Betula pendula*) lapai, paprastosios eglės (*Picea abies Karst*.) ir paprastosios pušies (*Pinus sylvestris L.*) spygliai. Nuo 8 – 10 kiekvienos rūšies medžių, kasmet rugpjūčio mėnesio pabaigoje surenkami lapijos pavyzdžiai, kurie laboratorijos sąlygomis džiovinami 60°C temperatūroje. Iš beržo lapų ir eglės spyglių ruošiami po vieną bendrą pavydį: beržo lapai – (B), eglės spygliai – (E), o pušies spygliai atskiriami, priklausomai nuo jų amžiaus. Ruošiami 2 pavyzdžiai: 1 – pirmų metų spyglių (P1); 2 – II metų spyglių. III metų spygliai neruošiami, kadangi būtent rugpjūčio mėnesį prasideda jų masiškas kritimas.

Aplinkos apsaugos agentūros, Aplinkos tyrimų laboratorijoje: indukuotos plazmos optinės emisijos spektrometrijos metodu nustatytos Ca, Mg koncentracijos lapijoje (mg/kg); Kjeldalio metodu – bendrasis azotas (g/kg); spektrometrijos metodu – bendrasis fosforas (g/kg); liepsnos emisijos spektrometrijos metodu – natris ir kalis (mg/kg).

Tiriamus elementus pagal funkcijas augaluose galima suskirstyti į dvi grupes. Pirmą grupę sudaro pagrindinis organogeninis elementas – azotas, o taip pat ir fosforas, kalis, kalcis, magnis, geležis, manganas ir cinkas. Antrą grupę sudaro tik natris ir chloras. Vienas iš svarbiausių elementų yra azotas. Nuo jo kiekio augaluose priklauso anijonų ir katijonų santykis, o taip pat ir osmoso slėgis. Kalis ir kalcis lemia augalų ląstelių hidrataciją. Kalis protoplazmoje ir kitose ląstelių

struktūrose kaupia daugiau vandens, ją skystina, o kalcis veikia priešingai. Dėl šios priežasties jaunesniuose spygliuose kalio yra daugiau negu kalcio. Natris ir chloras, neįeidami į organines medžiagas, taip pat dalyvauja reguliuojant osmosą, tačiau neturi įtakos elektrocheminiai pusiausvyrai. Likę elementai yra susiję su oksidacinėmis-redukcinėmis reakcijomis bei elektronų pernaša. Vykstant energijos ir cheminių junginių metabolizmui, geležis dalyvauja fermentų veikloje, magnis įeina į substrato kompleksą su ATP-afe, kalis, tiesiogiai neįeidamas į fermentų funkcines grupes, keičia fermentų baltymo konformaciją, lemia jo poveikį (Šlapakauskas, 2006).

Į lapus patenkančios mineralinės medžiagos panaudojamos lapo ląstelėms augti, jų osmosinėms galiom reguliuoti. Dėl nuolatinės medžiagų patekties lapuose gali susitelkti per didelis jų kiekis ir su tuo susijęs nepageidautinai aukštas osmosinis potencialas. Dėl šios priežasties augalai sugeba šias medžiagas šalinti iš lapų per floemą, lapo plaukelius ir liaukines išaugas. Lietus ir rasa gali ir nuplauti tokias susidariusias išskyras, ir išplauti iš lapo net iki 50-60% lape esančių sausųjų organinių ir mineralinių medžiagų. Greičiausiai iš lapų išplaunami kalis, natris, magnis ir manganas, kiek silpniau azotas ir fosforas. Išplovimo intensyvumas tiesiogiai priklauso nuo kritulių kiekio. Tačiau jų rūgštingumas, didesnis šviesos kiekis bei aukštesnė temperatūrą skatina šio proceso intensyvumą. Dėl šios priežasties tirdami lapijos ir jos nuokritų cheminę sudėtį KMS programos rėmuose, mes bandysime spręsti ir šio laikmečio aktualią problemą – aplinkos rūgštingumo kaitos poveikį miško ekosistemoms šiltėjančio klimato sąlygomis.

6.2.1. Pagrindinių maistinių komponenčių sudėties lapijoje kaita Aukštaitijos kompleksiško monitoringo stotyje

Bendrojo azoto (N) koncentracijų lapuose ir spygliuose analizė parodė, kad beržų lapuose šio elemento kaupiasi iki 1,5 kartų daugiau negu spygliuose, apie 19 g/kg. Mažiausios koncentracijos nustatytos eglės įvairaus amžiaus spyglių mišinyje – vidutiniškai apie 10-11 g/kg, kiek didesnės pirmų ir antrų metų pušies spygliuose, maždaug apie 12-13 g/kg. Antrų metų pušies spygliuose šio elemento išlika truputį daugiau negu pirmų metų P spygliuose.

Per tiriamąjį laikotarpį, nuo 2005 iki 2020 m. azoto koncentracija beržų lapuose ir pušies spygliuose turi tendenciją didėti, o eglės spygliuose šio elemento koncentracija išlieka stabili. Jei po 2015 m. sausros buvo galima tikėtis, kas drėgmės trūkumas neigiamai veikia medžių būklę ir dėl to jų lapuose/spygliuose mažėja N koncentracijos, tai 2018-2019 m. sausros paneigė šį teiginį. Paskutiniaisiais metais registruojamos vienos didžiausių per visą tiriamąjį laikotarpį N koncentracijų beržų lapuose ir pušų I ir II metų spygliuose. Pastaraisiais metais net eglės spygliuose N koncentracijos taip pat padidėjo.

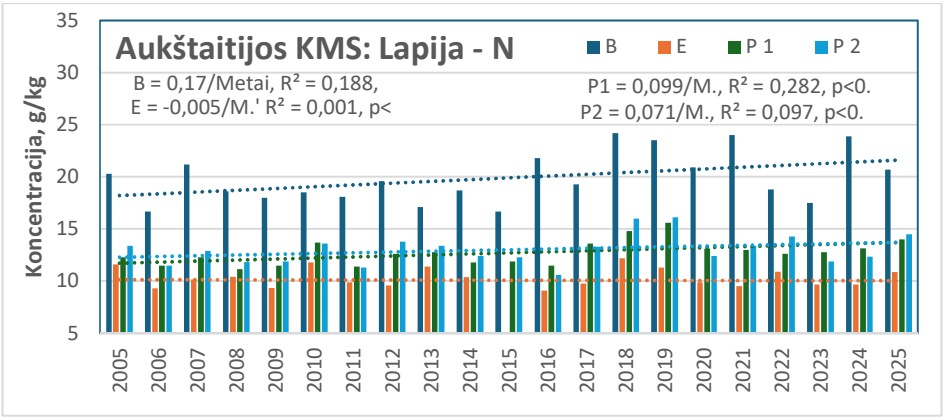
2021-2025 m. laikotarpis išsiskiria N koncentracijos stabilizacija ar nereikšmingu mažėjimu beržų lapuose. Tai blogėjančios beržų būklės rodiklis.

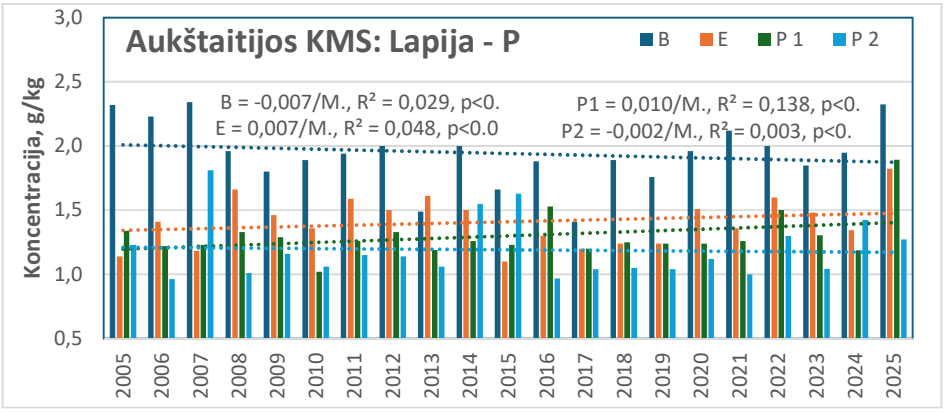
Apibendrinus gautus rezultatus nustatyta, kad per tiriamąjį laikotarpį ir paskutinįjį (2021-2025 m.) atitinkamai N koncentracijos reikšmingai didėja beržo po 0,225 g/kg per m., dabar po0,17 g/kg per m.; pušies I m. spygliuose po 0,158 g/kg per m. dabar po 0,1 g/kg per m.; nereikšmingai pušies II m. spygliuose po 0,117 g/kg per m. dabar po 0,07 g/kg per m. ir mažėja, nors taip pat nereikšmingai – eglės spygliuose po -0,023 g/kg per m. dabar po -0,005 g/kg per m. Nepaisant šio fakto, per visą tiriamąjį laikotarpį N koncentracija lapijoje vidutiniškai didėja po 0,119 g/kg per m., dabar po 0,08 g/kg per m. Tai geros miško ekosistemos būklės rodiklis (4.1 – 4.2 pav. ir 4.1 lentelė), nors augimo intensyvumas mažėja ir tik mažėjimo intensyvumas eglės spygliuose artėja prie nulio***. Tai gali būti pirmieji objektyvūs pušų ir beržų būklės blogėjimo požymiai.***

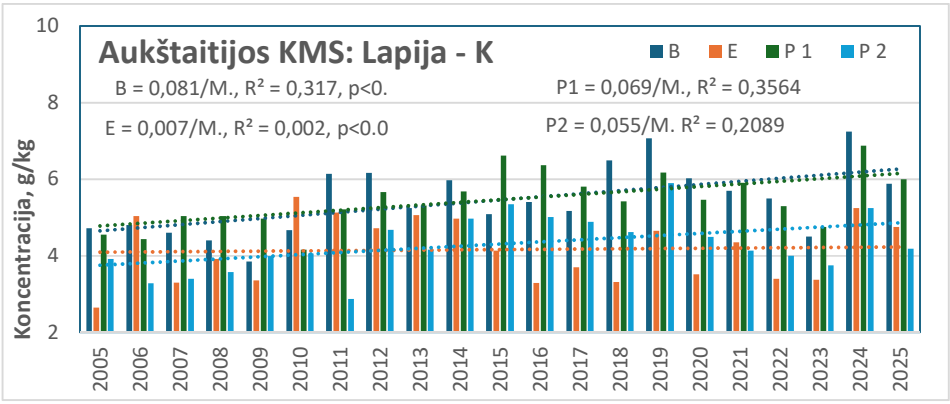
Bendrojo fosforo koncentracijų lapijoje tyrimų rezultatai analogiški bendrajam azotui (4.1 – 4.2 pav. ir 4.1 lentelė), t.y. didžiausi kiekiai nustatyti beržų lapuose – vidutiniškai apie 2 g/kg. Nors tarp P koncentracijų tirtuose spygliuose esminių skirtumų nenustatyta, tačiau stebima tendencija, kad, priešingai N koncentracijai, didesnės P koncentracijos būdingos eglės spyglių mišiniui (1,5 g/kg), kiek mažesnės - pirmų metų pušies spygliams (1,3 g/kg) ir sąlyginai mažiausios – antrų metų pušies spygliams (1,2 g/kg).

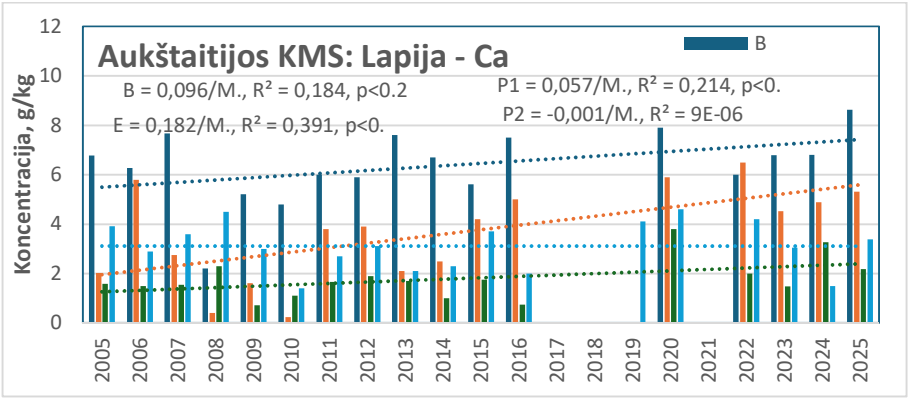
Per tiriamąjį laikotarpį ir paskutinįjį (2021-2025 m.) atitinka ***P kaitoje stebimos skirtingos tendencijos, t.y. jei 2020 m buvo nustatyta, kad visuose tirtuose lapų/spyglių pavyzdžiuose P koncentracija pakankamai reikšmingai mažėja, tai antruoju laikotarpiu jau registruojama ir šios komponentės augimo tendencija. Eglės ir pušies spygliuose P koncentracijos mažėjo po 0,06g/kg, tai dabar eglės spygliuose P didėja po 0,007, o pušies I m. spygliuose po 0,01*** g/kg per m. B lapuose P koncentracijos mažėjo i***ntensyviausiai – po 0,05 g/kg per m., tai dabar tik po -0,007*** g/kg per m. Mažėjimo tendencija išliko ir P II m. spygliuose po -0,002 g/kg per m.

Paskutiniuoju laikotarpiu (2021-2025 m.) stebima P koncentracijų augimo tendencija spygliuose, o beržų lapuose dar išlieka stabili.

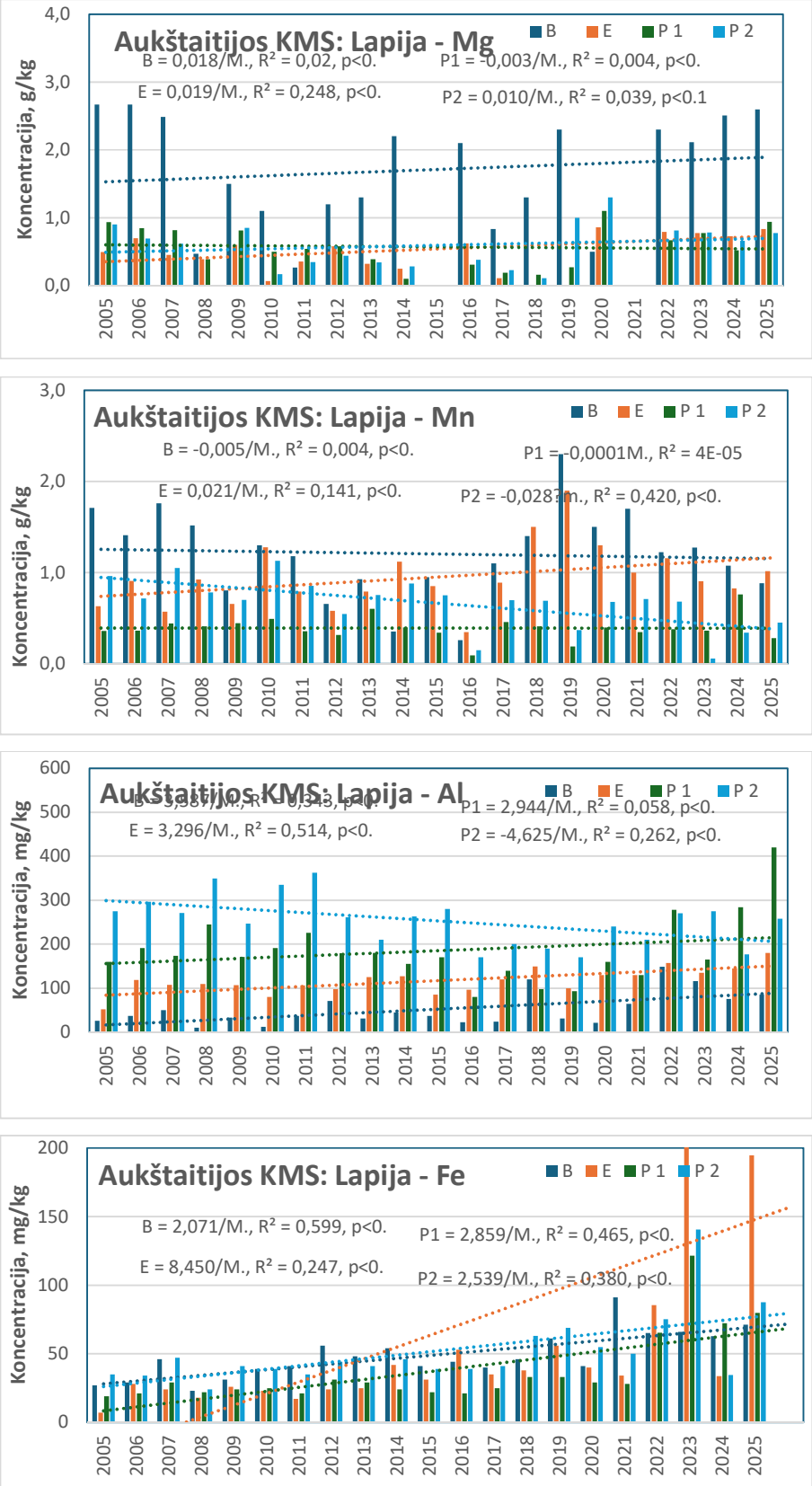




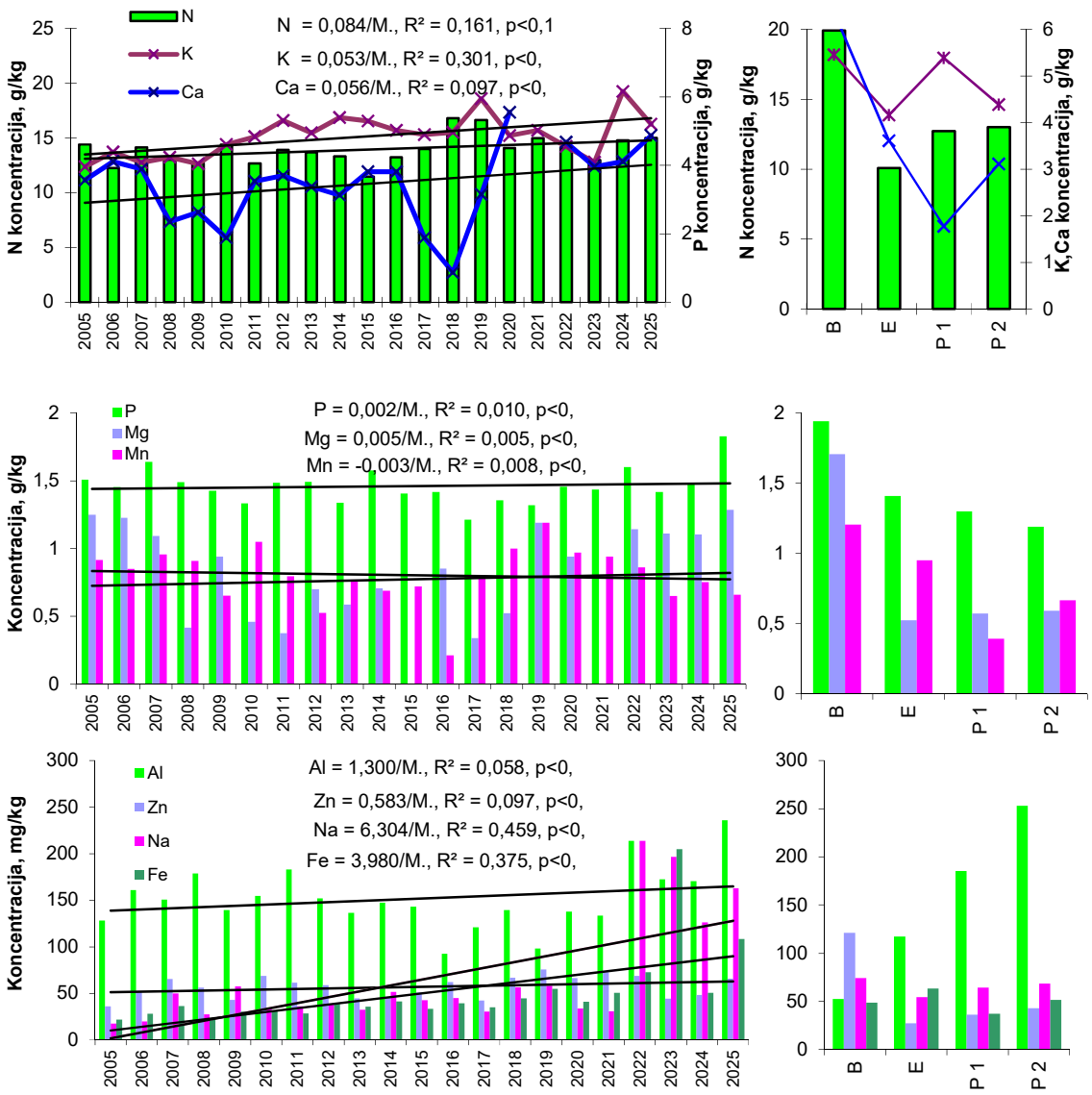




6.14 pav. Pagrindinių mikroelementų koncentracijų kaita tirtuose medžių lapijos pavyzdžiuose 2005-2025 m. laikotarpiu Aukštaitijos KMS



6.15 pav. Pagrindinių mikroelementų koncentracijų kaita tirtuose medžių lapijos pavyzdžiuose 2005-2025 m. laikotarpiu Aukštaitijos KMS



6.16 pav. Pagrindinių maistinių komponenčių koncentracija lapijoje 2005-2020 m.

6.1 Lentelė. Tirtų elementų kaitos intensyvumas tirtų medžių rūšių lapuose/spygliuose (tiesinės priklausomybės B koeficientas) per 21 m. laikotarpį Aukštaitijos KMS.

Medžio rūšis	Makro elementai							
	N	P	K	Ca	Mg	Mn	Al	Fe
	g/kg						mg/kg	
Beržas	**0,170**	-0,007	**0,081**	**0,096**	0,018	-0,005	**3,587**	**2,071**
Eglė	-0,005	0,007	0,007	**0,182**	**0,019**	0,021	**3,296**	**8,450**
Pušis I m.	**0,099**	0,010	0,049	**0,057**	-0,003	-0,001	2,944	**2,859**
Pušis II m.	0,071	-0,20	0,074	-0,001	0,010	**-0,028**	**-4,625**	**2,539**

Pasraba: reikšmingas pokytis pažymėtas raudonai (p<0,05).

Tokiu būdu 2021-2025 m. laikotarpiu stebimi du priešingi procesai – medžių lapijoje išlieka stabili ar mažėja N koncentracijos ir pradeda didėti P koncentracijos. Registruotas lapijos azoto koncentracijos sumažėjimas kartu su didėjančiu fosforo kiekiu rodo poslinkį link didėjančio azoto trūkumo, kurį atspindi mažėjantys N:P santykiai. Atsižvelgiant į tai, kad azotas yra pagrindinis limituojantis medžių būklę ir prieaugį maistinis komponentas hemiborealinėse miškų ekosistemose, šis disbalansas gali riboti medžių augimą ir fiziologinį atsparumą, ypač maistinių medžiagų reikalaujančioms rūšims, tokioms kaip beržas, o mažiau jautrios rūšys, tokios kaip paprastoji pušis, gali pasižymėti didesne tolerancija nepalankiems aplinkos veiksniams ir maistinių medžiagų trūkumui pirmiausiai.

Kalio koncentracijų tyrimai asimiliaciniuose organuose parodė, kad didėjant lapijos amžiui K koncentracija mažėja. Jaunesniuose organuose (beržų lapuose ir pirmų metų pušies spygliuose) kalio koncentracijos viršijo 6g/kg, o senesniuose (bendras eglės spyglių mišinys ir antrų metų pušies spygliai) – apie 4 g/kg. Tai paaiškinama šio elemento išplovimu iš paviršinių ląstelių gausių kritulių metu.

Per tiriamąjį laikotarpį ir paskutinįjį (2021-2025 m.) atitinka, nustatyta K koncentracijų didėjimo tendencija 2020 m. beržų lapuose po 0,13 g/kg per m., dabar po 0,08 g/kg per m., pušies spygliuose I metų po 0,104 g/kg per m., dabar po 0,07 g/kg per m. ir II metų po 0,128 g/kg per m., dabar po 0,06 g/kg per m. o eglių spygliuose šio elemento koncentracijos išlieka praktiškai stabilios ar dabar kiek ta didėja tik po 0,007 g/kg per m.

Kalcio koncentracijos spygliuose taip pat priklausė nuo spyglių amžiaus. Mažiausios nustatytos pirmų metų pušies spygliuose, kiek didesnės eglės spyglių mišinyje ir antrų metų pušies spygliuose. Beržų lapuose kalcio koncentracijos, kaip ir kitų tirtų elementų žymiai viršijo koncentracijas nustatytas spygliuose.

Iš esmės priešinga buvo Ca koncentracijų kaita medžių lapijoje. Per 15 m. tiriamąjį laikotarpį Ca koncentracija pakankamai reikšminga mažėjo beržų lapuose (po -0,259 g/kg per m.) ir pušų I metų spygliuose po 0,08 g/kg per m., o didėjo eglių spygliuose (po +0,146 g/kg per m.), tačiau šis augimas nebuvo reikšmingas. Įskaitant paskutinįjį laikotarpį (dabar) Ca koncentracijos didėja beržų lapuose po 0,1 g/kg per m., pušies I metų spygliuose po 0,06 g/kg per m. ir eglės spygliuose po 0,18 g/kg per m.. Stabilios koncentracijos nustatytos pušies II metų spygliuose.

Didžiausios magnio koncentracijos nustatytos beržų lapuose, kur jos vidutiniškai siekė 1,8 g/kg. Mažesnės koncentracijos nustatytos tirtuose spygliuose: eglės ir pušų, kurios reikšmingai nesiskyrė tarpusavyje ir svyravo apie 0,7-0,8 g/kg.

Per tiriamąjį laikotarpį stebima Mg mažėjimo tendencija ir ypač beržų lapuose (po -0,124 g/kg per m.) ir pušies I m. spygliuose (po -0,08 g/kg per m.). Šio elemento pokyčiai eglės ir pušies II metų spygliuose yra nereikšmingi. Paskutiniuoju laikotarpiu Mg koncentracijos lapijoje reikšmingai nepakito.

Mažiausios Mn koncentracijos nustatytos pirmų metų pušies spygliuose (0,4 g/kg), dvigubai didesnės eglės spyglių mišinyje (0,8 g/kg) ir antrų metų pušies spygliuose (0,9 g/kg) . Beržų lapuose Mn koncentracijos, kaip ir kitų tirtų elementų žymiai viršijo koncentracijas nustatytas spygliuose (1,3 g/kg). ***Mn kaitoje stebima mažėjimo tendencija tačiau ji nereikšminga ir tik eglių spygliuose Mn didėja (po 0,044g/kg per m.). Paskutiniuoju laikotarpiu esminių pokyčių Mn koncentracijų kaitoje nenustatyta.***

Al, Zn, Na ir Fe kaitoje galima būtų išskirti tai, kad Al daugiausiai kaupiasi antrų metų pušies spygliuose, kiek mažiau pirmų metų pušies ir eglės spygliuose bei mažiausiai beržų lapuose. Per tiriamąjį laikotarpį jo koncentracijos lapijoje vidutiniškai mažėja, o pušies I ir II metų spygliuose net reikšmingai (po -5,9 ir 8,2 mg/kg per m. atitinkamai). ***Esminiai skirtumai registruojami nuo 2020 metų kai Al koncentracija lapijoje reikšmingai pradėjo didėti.***

Iš paminėtų elementų reikšmingiausiai didėja geležies koncentracijos visuose pavyzdžiuose. Intensyviausiai eglės spygliuose (po 2,2 mg/kg per m.) kiek mažiau pušies II metų spygliuose (po 1,6 mg/kg per m.) ir beržų lapuose (po 1,34 mg/kg per m.) bei mažiausiai pušies I metų spygliuose (po 0,51 mg/kg per m.). ***Per paskutinįjį laikotarpį Fe koncentracijos lapijoje dar labaiu išaugo, o eglių spygliuose 2023 ir 2025 metais pasiekė maksimalias reikšmes. Veiksnius, kurie galėjo sąlygoti tokį Fe koncentracijų augimą (išskyrus nekokybišką cheminę analizę) šiai dienai įvardyti negalima.***

N koncentracijų lapijoje didėjimas yra geros miško ekosistemos būklės rodiklis, tačiau šio didėjimo pakankamai reikšmingas sumažėjimas paskutiniuoju laikotarpiu ***gali būti įvardijamas kaip pirmas objektyvūs pušų ir beržų būklės blogėjimo požymis.***

Apibendrinus gautus rezultatus nustatyta, kad per 21 m laikotarpį intensyviausiai didėja geležies koncentracija tirtų medžių rūšių lapijos pavyzdžiuose. Tai gerėjančios medžių būklės požymis. Paskutiniuoju laikotarpiu (2021-2025 m.) stebima P koncentracijų augimo tendencija spygliuose, o beržų lapuose dar išlieka stabili. Toks disbalancas tik patrvirtina galima grėsme ekosistemose.

Priežasčių, kurios galėjo turėti reikšmingos įtakos tirtų elementų koncentracijų kaitai reikia ieškoti šių elementų srautuose, patenkančiuose į miško ekosistemą su krituliais.

Apibendrinant galima teigti, kad Aukštaitijos KMS medžių lapijos mineralinė mityba per 2005–2025 m. iš esmės išliko teigiama, tačiau paskutiniuoju laikotarpiu išryškėjo keli nauji procesai. Sulėtėjo N ir K koncentracijų augimas, spygliuose pradėjo didėti P ir Ca koncentracijos, o Mg išliko stabilus po ankstesnio mažėjimo. Dėl lėčiau augančio N ir didėjančio P mažėjantis N santykis gali rodyti santykinio azoto ribojimo stiprėjimą. Beržas į šiuos pokyčius, tikėtina, reaguoja jautriau negu paprastoji pušis.

Nuo 2020 m. nustatytas Al koncentracijų didėjimas ir ypač spartus Fe kaupimasis reikalauja atskiro patikrinimo. Šie pokyčiai gali atspindėti naują dirvožemio cheminės aplinkos ar hidrologinio režimo etapą, tačiau kol neatmestos metodinės priežastys, jų negalima patikimai interpretuoti kaip teigiamo ar neigiamo medžių būklės rodiklio.

Tirtų elementų koncentracijų kaitos priežastys turėtų būti toliau vertinamos integruojant lapijos chemijos duomenis su atmosferos iškritomis, polajinių kritulių chemija, dirvožemio tirpalo sudėtimi, dirvožemio rūgštingumu, meteorologinėmis sąlygomis, medžių prieaugiu ir lajų būkle. Toks kompleksinis vertinimas leistų atskirti atmosferinės apkrovos, šaknų įsisavinimo, biologinio praskiedimo, lapijos išplovimo ir klimatinio streso poveikį medžių mineralinei mitybai.

6.2.2 Pagrindinių maistinių komponenčių sudėties lapijoje kaita Žemaitijos KM stotyje

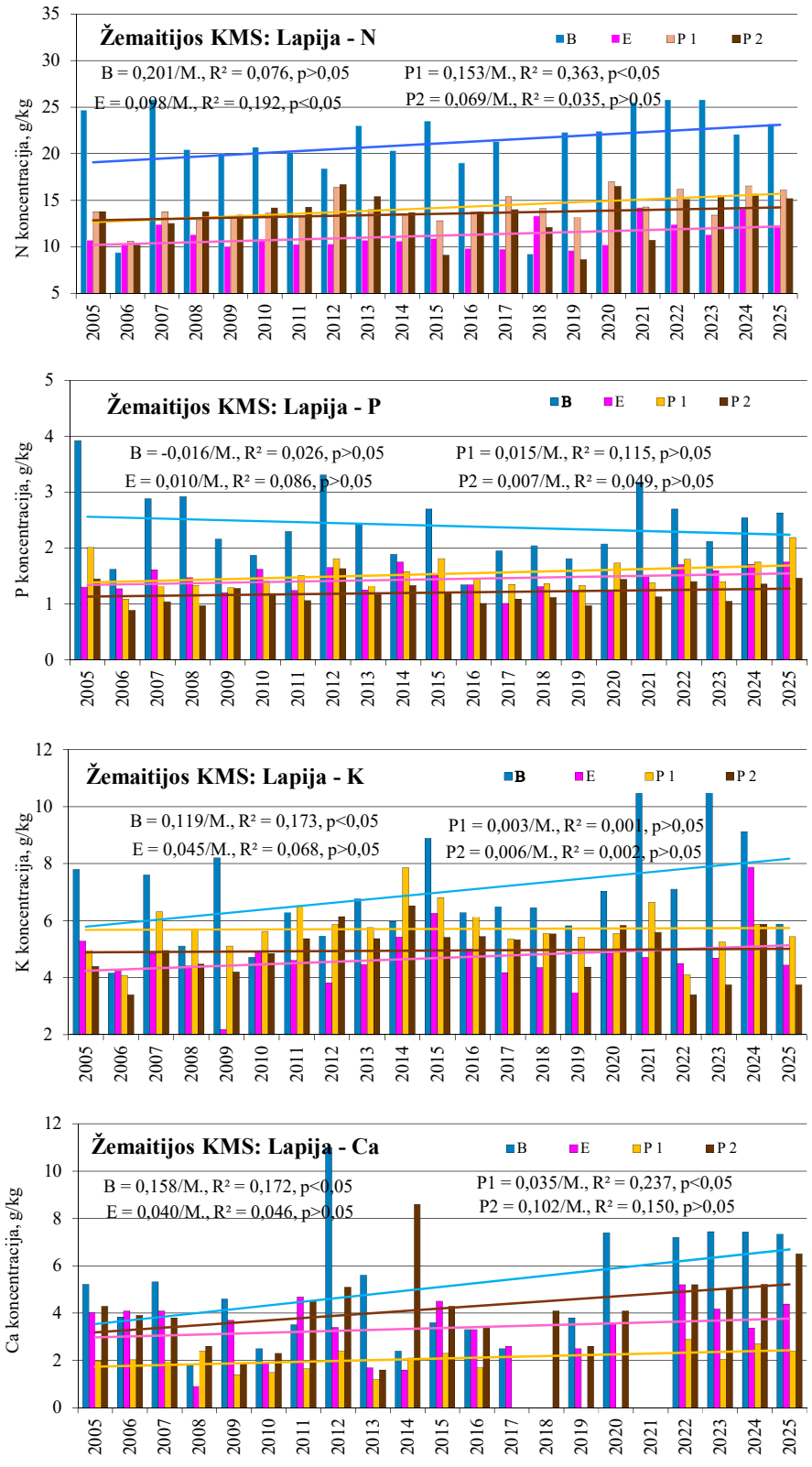
Bendrojo azoto (N) koncentracijų lapuose ir spygliuose analizė parodė, kad Žemaitijos KMS beržų lapuose šio elemento tyrimų pradžioje kaupėsi iki 1,5 karto daugiau (6.4 – 6.6 pav. ir 6.2 lentelė) negu spygliuose (Aukštaitijos KMS – apie 2 k.). Paskutiniuoju laikotarpiu šis santykis artėja prie 2.

Eglių ir skirtingo amžiaus pušies spygliuose N koncentracija tik tyrimų pradžioje praktiškai nesiskyrė, tačiau pastaruoju laikotarpiu pušies I metų spygliuose N koncentracijos beveik 2 kartus viršija N koncentracijas eglės spygliuose. ***2021-2025 m. šis skirtumas mažėja***.

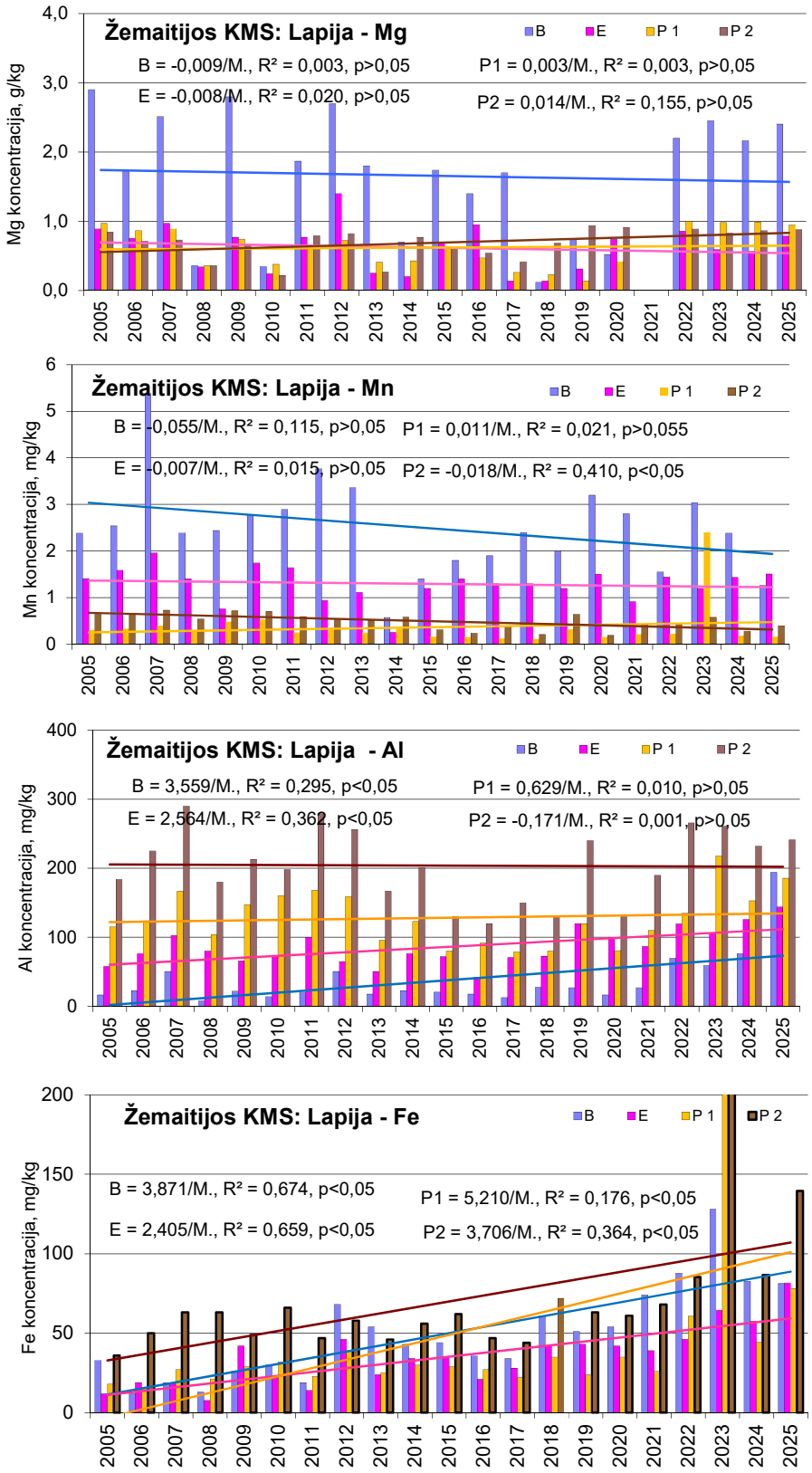
Nuo 2005 iki 2020 m. beržų lapuose stebima azoto koncentracijų mažėjimo tendencija. Mažėja nors ir nereikšmingai N koncentracija ir eglės bei pušies II metų spygliuose, tačiau reikšmingai (po 0,158 g/kg per m.) didėja N koncentracija pušies I metų spygliuose.

2021-2025 m. laikotarpiu N koncentracijos beržų lapuose mažėja, eglės spygliuose kaip ir pušies neturi aiškesnės tendencijos.

Bendrojo fosforo koncentracijų lapijoje tyrimų rezultatai parodė, kad (6.4 – 6.6 pav. ir 6.2 lentelė). didžiausi šio elemento kiekiai nustatyti beržų lapuose. Tyrimų pradžioje šio elemento buvo apie 2 kartus mažiau tirtuose spygliuose. Paskutiniuoju laikotarpiu šis santykis yra reikšmingai sumažėjęs ir 2025 m. nedaug skyrėsi nuo pušies II m. spygliuose.

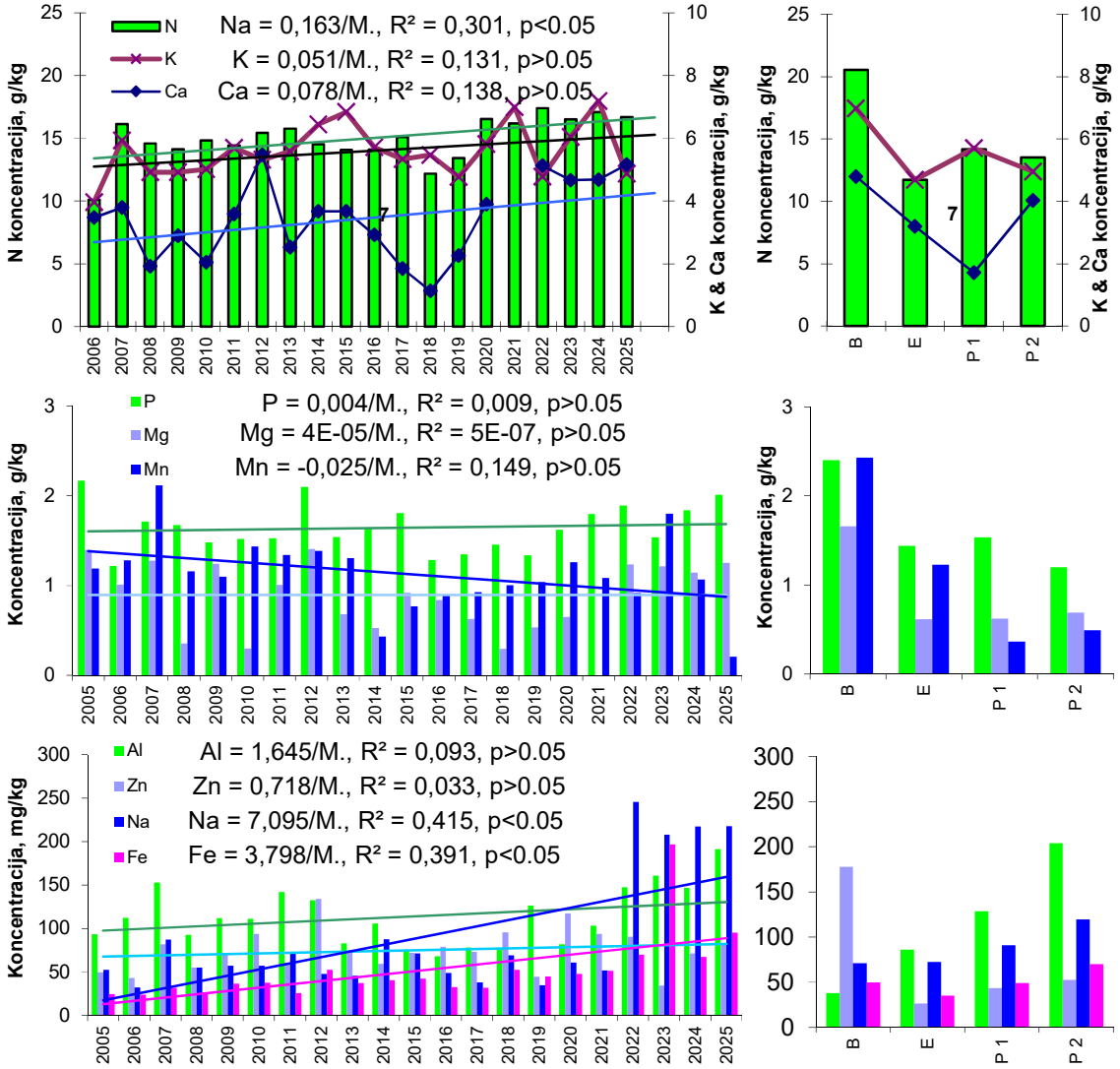


6.17 pav. Pagrindinių mikroelementų koncentracijų kaita tirtuose medžių lapijos pavyzdžiuose 2005-2025 m. laikotarpiu Žemaitijos KMS



6.18 pav. Pagrindinių mikroelementų koncentracijų kaita tirtuose medžių lapijos pavyzdžiuose 2005-2025 m. laikotarpiu Žemaitijos KMS

6.4 pav. Pagrindinių makro-elementų kiekių lapijoje kaita Žemaitijos KMS



6.19 pav. Pagrindinių komponenčių koncentracija lapijoje Žemaitijos KMS 2005-2025 m.

6.2 lentelė. Tirtų elementų kaitos intensyvumas tirtų medžių rūšių lapuose/spygliuose (tiesinės priklausomybės B koeficientas) per 15 m. laikotarpį Žemaitijos KMS.

	Makro elementai							
	N	P	K	Ca	Mg	Mn	Al	Fe
Medžio rūšis	g/kg						mg/kg	
Beržas	0,201	-0,016	**0,119**	**0,158**	-0,009	-0,055	**3,559**	**3,871**
Eglė	**0,098**	0,010	0,045	0,040	-0,008	-0,007	**2,564**	**2,405**
Pušis I m.	0,153	0,015	0,003	**0,035**	0,003	0,011	0,629	**5,210**
Pušis II m.	**0,069**	0,007	0,006	0,102	0,014	**-0,018**	**-0,181**	**3,706**

Pasraba: reikšmingas pokytis pažymėtas raudonai (p<0,05).

Mažiausiomis P koncentracijomis pasižymėjo antrų metų pušies spygliai. ***Per tiriamąjį laikotarpį, nuo 2005 iki 2020 m. bendrojo fosforo koncentracija turi tendencija mažėti. Reikšmingiausiai mažėja P koncentracija beržų lapuose (po 0,07 g/kg per m.). Kituose tirtuose lapijos pavyzdžiuose reikšmingesnių kaitos tendencijų nenustatyta. 2021-2025 m. išsiskyrė reikšmingai padidėjusiomis P koncentracijomis beržų lapuose. Šio elemento didėjo ir eglės bei pušies abiejų amžių spygliuose. Tai pasikartojantis dėsningumas kaip ir Aukštaitijos KMS. P koncentracijos lapijoje didėja. Tai N:P santykio disbalansas galintis turėti neigiamų pasekmių miško ekosistemų medžių būklei ir atsparumui nepalankiems aplinkos veiksniams.***

Kalio koncentracijų lapijoje pirmiausiai priklauso nuo spyglių amžiaus. Pirmų metų pušies spygliuose ir beržų lapuose šio elemento yra daugiau negu eglės mišriame ir pušies II metų pavyzdyje. Šis dėsningumas nepasitvirtino tik 2024 m.

Per tiriamąjį laikotarpį stebimos šio elemento kiekio vienareikšmės tendencijos – visuose pavyzdžiuose K koncentracijos didėja ir ypač intensyviai pušies spygliuose. Po sausrų poveikio šio elemento koncentracijos reikšmingai mažėjo. Palankios meteorologinės sąlygos turėjo reikšmingos įtakos šio elemento koncentracijų reikšmingam padidėjimui visuose tirtuose lapijos pavyzdžiuose. Paskutiniuoju laikotarpiu didėjimo tendencija liko tik beržų lapuose, kai tuo tarpu spygliuose K koncentracijos išlieka stabilios.

Sausrų neigiamas poveikis – K koncentracijų lapijoje mažėjimas.

Kaip ir Aukštaitijos KMS, mažiausios kalcio koncentracijos nustatytos pirmų metų pušies spygliuose, kiek didesnės eglės spyglių mišinyje ir antrų metų pušies spygliuose (6.4 – 6.6 pav. ir 6.2 lentelė). Sąlyginai didžiausios koncentracijos nustatytos beržų lapuose.

Per 2005-2025 m. laikotarpį beržų lapuose ir pušies II metų spygliuose Ca koncentracijos turi tendenciją didėti, kai likusiuose pavyzdžiuose išlieka stabilios.

Magnio ir mangano koncentracijų kaitoje buvo matomos bendrosios tendencijos (6.4 – 6.6 pav. ir 6.2 lentelė). Beržų lapuose šių elementų koncentracijos net 3-4 kartus buvo didesnės negu spygliuose. Tačiau tarp spyglių – esminių skirtumų nenustatyta. Mangano koncentracijos didžiausios taip pat beržų lapuose, dvigubai mažesnės – eglės spygliuose ir mažiausios – pušies spygliuose.

Mn ir Mg koncentracijų eglės ir pušų spygliuose kaitoje nustatytos mažėjimo tendencijos, o beržų lapuose registruojami šių elementų padidėjimo ir sumažėjimo laikotarpiai.

Al koncentracijų kaitoje išaiškinti tie patys esminiai pokyčiai kaip ir Aukštaitijos KMS (6.4 – 6.6 pav. ir 6.2 lentelė). Mažiausios koncentracijos Al buvo nustatytos beržų lapuose, 3 kartus didesnės eglės spygliuose, apie 5 kartų – I m. pušies spygliuose ir virš 8 kartų – II m. pušies spygliuose. Paskutiniuoju laikotarpiu, Al koncentracijos lapijoje reikšmingai padidėjo.

Didžiausios Fe koncentracijos nustatytos antrų metų pušies spygliuose, o likusiuose objektuose jos buvo 2-3 kartus mažesnės (6.4 – 6.6 pav. ir 6.2 lentelė). ***2020 m. Fe koncentracijos lapijoje turėjo reikšmingos tendencijos didėti, kaip ir Aukštaitijos KMS, Intensyviausiai didėjo Fe koncentracija beržų lapuose po 2,45 mg/kg per m., dabar po 3,9 mg/kg per m., eglės spygliuose - po 1,69 mg/kg per m., dabar po 2,4 mg/kg per m., pušies pirmų metų spygliuose po 0,66 mg/kg per m., dabar po 5,2 mg/kg per m. ir pušies antrų metų spygliuose po 3,7 mg/kg per m. Šiuos pokyčius reikšmingai sąlygojo paskutiniojo laikotarpio Fe koncentracijų kaitos rezultatai..***

Per tiriamąjį laikotarpį Zn koncentracijų kaitoje stebimas koncentracijų didėjimo tendencijos, o ypač reikšmingai didėja Zn koncentracija beržų lapuose. Tačiau toks intensyvus Zn koncentracijų augimas registruojamas tik iki 2012 m. Paskutiniuoju laikotarpiu šio elemento koncentracijos stabilizavosi, o 2018 m. vėl pasiekė viena didžiausių reikšmių per visą tiriamąjį laikotarpį. 2020 m. nustatyta viena didžiausių Zn koncentracijų lapijoje reikšmė. Ji pasiekė 117 mg/kg riba. Tačiau nenustatyta, kad gausesni krituliai galėtų sąlygoti šio elemento kiekius lapijoje. 2021-2025 m. laikotarpiu Zn koncentracijos išlieka stabilios.

Baltijos jūra turi esminės įtakos natrio koncentracijų kaitai vakarinėje Lietuvos dalyje, todėl šio elemento koncentracijos lapijos pavyzdžiuose Žemaitijoje viršijo koncentracijas nustatytas Aukštaitijos KMS (6.4 – 6.6 pav. ir 6.2 lentelė). Iki 2020 m. ***Žemaitijos KMS natrio koncentracijų kaitoje aiškesnių tendencijų nenustatyta. 2021-2025 m. registruojamas reikšmingas šio elemento padidėjimas visuose tirtuose lapijos pavyzdžiuose.***

Per tiriamąjį laikotarpį, nuo 2005 iki 2021m. Žemaitijos KMS vyraujančių medžių rūšių lapijos pavyzdžiuose reikšmingai didėjo P, K, Ca ir ypač Fe koncentracijos. Kiti tirti makro elementai N, Mn, Mg ir Al turėjo tendencija mažėti. Atskiruose pavyzdžiuose ši tendencija buvo mažiau ar stipriau išreikšta.

Tyrimų rezultatai rodo, kad bepasikartojančios sausros bei intensyvūs krituliai gali turėti reikšmingos įtakos mikroelementų koncentracijų kaitai, kaip ir bendrai miško ekosistemų būklei bei jos tvariai plėtrai.

Apibendrinant galima teigti, kad Žemaitijos KMS medžių mineralinės mitybos būklė per 2005–2025 m. keitėsi nevienareikšmiškai. P, K ir Ca koncentracijos ilguoju laikotarpiu daugiausia didėjo arba išliko stabilios, tačiau N, Mg ir Mn koncentracijos kai kuriose rūšyse mažėjo. Paskutiniuoju laikotarpiu bendras P koncentracijų didėjimas kartu su mažėjančiu arba stabiliu N kiekiu rodo galimą N santykio poslinkį link santykinio azoto trūkumo.

Kalio koncentracijų sumažėjimas po sausrų patvirtina, kad Žemaitijos medynų mineralinė mityba yra glaudžiai susijusi su hidrologiniu režimu. Tai ypač svarbu eglynams, kurių lajos pasižymi intensyvia K, Ca ir Mg apykaita, tačiau kurių šaknų sistema yra jautri dirvožemio drėgmės deficitui.

Reikšmingas Al, Fe ir Na koncentracijų padidėjimas 2021–2025 m. gali rodyti naujus atmosferinės depozicijos, dirvožemio cheminės aplinkos arba hidrologinio režimo pokyčius. Vis dėlto dėl panašių Fe ir Al tendencijų skirtingose stotyse pirmiausia būtina patikrinti analitinės kokybės, mėginių paviršinės taršos ir laboratorinių metodų stabilumo veiksnius.

Tolesnė lapijos cheminės sudėties analizė turėtų būti integruojama su atviros vietos ir polajinių kritulių srautais, dirvožemio bei dirvožemio tirpalo chemija, meteorologiniais rodikliais, medžių prieaugiu ir lajų būkle. Tokia kompleksinė analizė leistų atskirti atmosferinės depozicijos, dirvožemio prieinamumo, lapijos išplovimo, biologinio praskiedimo ir klimato streso poveikį Žemaitijos KMS medžių mineralinei mitybai.

6.2.3. Pagrindinių maistinių komponenčių sudėties lapijoje palyginimas tarp Dzūkijos KM ir Aukštaitijos bei Žemaitijos KM stočių

2025 m. lapijos cheminės sudėties tyrimai parodė aiškius skirtumus tarp Integruoto monitoringo stočių, medžių rūšių ir skirtingo amžiaus pušų spyglių. Nustatyti dėsningumai gerai atspindi ne tik medžių rūšių fiziologinius ypatumus, bet ir skirtingą miško ekosistemų mitybos būklę, dirvožemio savybes, atmosferinės depozicijos poveikį bei bendrą medžių gyvybingumą.

Didžiausios azoto (N) koncentracijos nustatytos eglių spygliuose – nuo 20,7 g kg^{-1} Aukštaitijoje iki 23,2 g kg^{-1} Žemaitijoje, o mažiausios – beržų lapuose Dzūkijoje (9,7 g kg^{-1}). Pušų pirmųjų metų spygliuose azoto koncentracija buvo didesnė negu antrųjų ir trečiųjų metų spygliuose, kas atitinka įprastą azoto retranslokacijos procesą senstant spygliams.

Žemaitijos KMS visų rūšių lapijoje azoto koncentracija buvo didžiausia, kas gerai sutampa su ankstesniuose skyriuose nustatyta didesne atmosferinio azoto depozicija Vakarų Lietuvoje. Mažiausiomis koncentracijomis pasižymėjo Dzūkijos KMS beržų lapai, indikuodami prasčiausias augimo sąlygas, lyginant tarp stočių.

Didžiausios fosforo (P) koncentracijos taip pat nustatytos eglių spygliuose (2,3–2,6 g kg^{-1}), o mažiausios – senesniuose pušų spygliuose (1,2–1,3 g kg^{-1}). Panašiai kaip azoto atveju, fosforo koncentracija mažėjo didėjant spyglių amžiui, rodydama aktyvią šio elemento retranslokaciją į naujai augančius audinius. Žemaitijos KMS buvo registruotos didesnės P koncentracijos lapijoje negu kitose stotyse.

Kalio (K) koncentracija didžiausia buvo pirmųjų metų pušų spygliuose (5438–6000 mg kg^{-1}) bei eglių spygliuose (5875–6500 mg kg^{-1}). Senstant pušų spygliams kalio koncentracija sistemingai mažėjo visose stotyse, nes kalis yra vienas mobiliausių augalo elementų.

Didžiausios K koncentracijos nustatytos Aukštaitijos pušų spygliuose bei Dzūkijos eglių spygliuose. Palyginus tarp stočių šios koncenynuose didesnės buvo būdingos Aukštaitijos KMS medžių lapijai, o mažiausios Dzūkijos KMS.

Ryškiausi skirtumai nustatyti kalcio (CA) koncentracijose. Aukštaitijos eglių spygliai sukaupė net 8630 mg kg^{-1} Ca, o Žemaitijos trečiųjų metų pušų spygliai – 7800 mg kg^{-1}. Dzūkijos koncentracijos buvo mažesnės beveik visose lapijos pavyzdžiuose. Didžiausiomis koncentracijomis pasižymėjo eglių spygliai visose stotyse. Kadangi kalcis praktiškai nėra retranslokuojamas, jo koncentracija nuosekliai didėjo senstant pušų spygliams. Tai labai gerai atspindi ilgalaikį šio elemento kaupimąsi bei dirvožemio bazinių katijonų prieinamumą.

Sieros (S) koncentracijos didžiausios buvo taip pat eglių spygliuose (1438–1930 mg kg^{-1}). Didžiausi jos kiekiai nustatyti Aukštaitijos KMS. Pušų spygliuose sieros koncentracija buvo mažesnė, tačiau išliko gana aukšta ir mažai kito didėjant spyglių amžiui. Tai rodo, kad, nepaisant reikšmingai sumažėjusios atmosferinės sieros depozicijos, sieros aprūpinimas medžiams išlieka pakankamas. Palyginus vidutines reikšmes nustatyta, kad didesnėmis koncentracijomis išsiskyrė Žemaitijos stebėtų medžių lapija, o mažiausiomis Dzūkijos KMS medžių lapija.

Didžiausios magnio (Mg) koncentracijos nustatytos eglių spygliuose (2260–2598 mg kg^{-1}). Pušų spygliuose Mg koncentracija mažėjo senstant spygliams. Magnio koncentracijos buvo pakankamai aukštos visose stotyse ir nerodo magnio stokos požymių.

Didžiausios mangano koncentracijos nustatytos beržų lapuose ir eglių spygliuose Žemaitijos KMS.

Žemaitijos KMS Mn koncentracijos beveik visoms rūšims buvo didžiausios. Mažiausios buvo būdingos Dzūkijos KMS medžių lapijai. Tai gali būti siejama su rūgštesniais (turtingesniais) dirvožemiais, kuriuose manganas tampa lengviau prieinamas augalams.

Aliuminio koncentracijos didžiausios buvo vyresniuose pušų spygliuose. Aukštaitijos pirmųjų metų spygliai pasižymėjo ypač aukšta Al koncentracija (420 mg kg^{-1}). Mažiausios buvo būdingos Dzūkijos KMS lapijai. Šis rodiklis dažnai laikomas dirvožemio rūgštėjimo arba smulkiųjų dalelių iškritų indikatoriumi.

Geležies koncentracija labai padidėjo senstant pušų spygliams ir ypač Dzūkijos KMS. Trečiųjų metų pušų spygliai sukaupė 2–4 kartus daugiau geležies negu pirmųjų metų spygliai. Tai rodo ilgalaikį geležies kaupimąsi spyglių paviršiuje ir audiniuose. Mažiausios koncentracijos buvo būdingos Žemaitijos KMS medžių lapijai.

Didžiausios Na ir cloridų (Cl) koncentracijos nustatytos Žemaitijos KMS. Šis dėsningumas labai gerai atitinka ankstesnius mūsų atmosferinės depozicijos tyrimus, kurie rodė stipresnę jūrinės kilmės aerozolių įtaką Vakarų Lietuvoje.

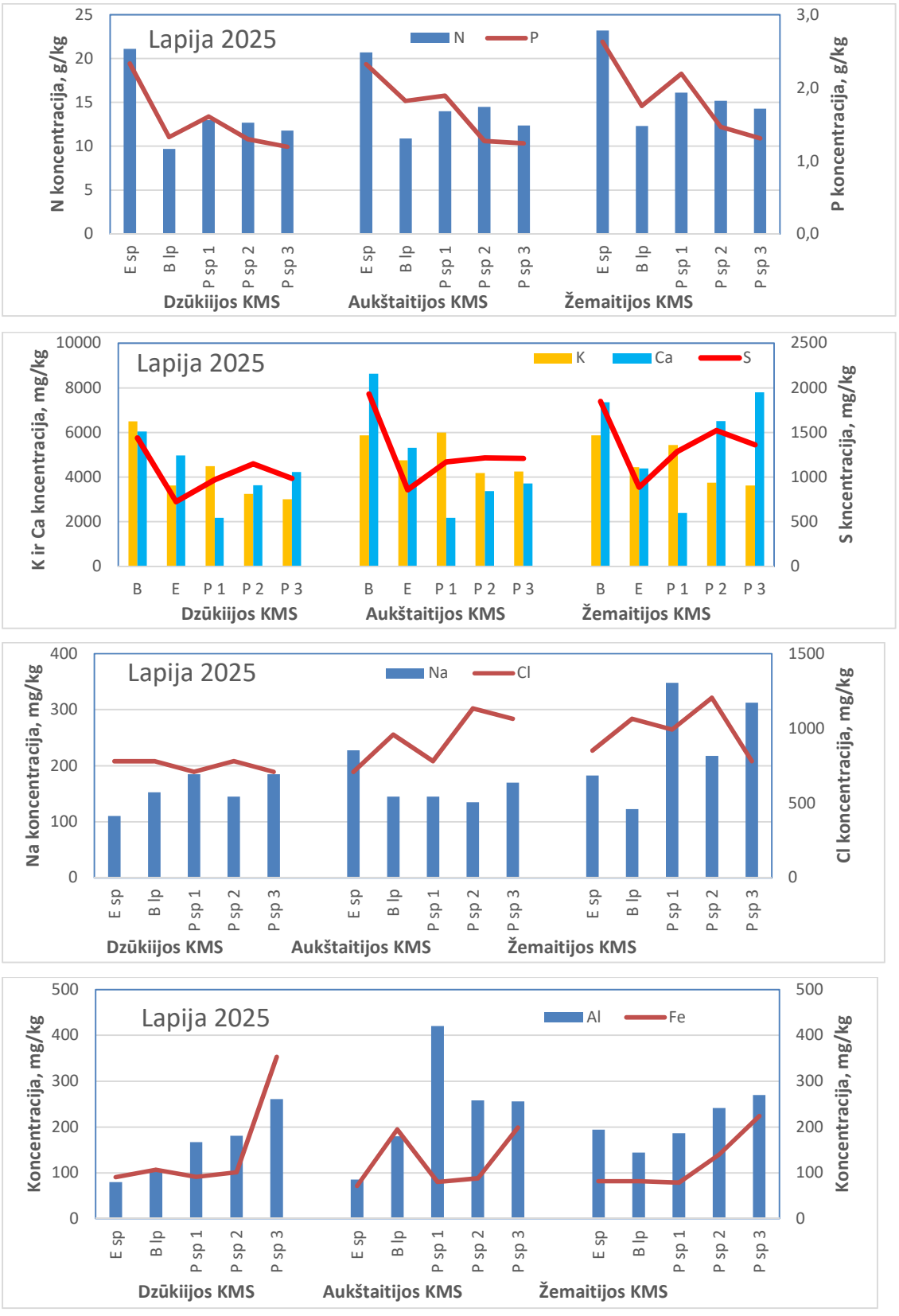
Apibendrinus gautus rezultatuys nustatyta, kad 2025 m. lapijos cheminės sudėties rezultatai labai gerai dera su kitais šios ataskaitos skyriais.

- Žemaitijos KMS pasižymėjo didžiausiomis N, Mn, Na ir Cl koncentracijomis. Tai patvirtina didesnę atmosferinės depozicijos įtaką vakariniam Lietuvos regionui. Tuo pačiu ši stotis pasižymėjo didžiausia vidutine defoliacija ir didžiausiu eglių pažeidžiamumu, rodydama, kad geras azotinis aprūpinimas negali kompensuoti klimato kaitos ir biotinių pažeidimų poveikio.
- Aukštaitijos KMS išsiskyrė didžiausiomis Ca, Mg ir S koncentracijomis eglių spygliuose bei geriausiai subalansuota makroelementų mityba. Tai gerai paaiškina aukštą medynų produktyvumą ir vieną geriausių medžių fiziologinės būklės rodiklių tarp tirtų stočių.
- Dzūkijos KMS medžių lapijoje nustatytos mažesnės Ca koncentracijos atspindi skurdesnius smėlingus dirvožemius, tačiau kartu pušynai pasižymėjo mažiausia defoliacija ir didžiausiu atsparumu klimato kaitai. Tai rodo, kad pušų ekologinis prisitaikymas prie nederlingų augaviečių kompensuoja santykinai mažesnį bazinių katijonų prieinamumą.

Visų trijų stočių duomenys leidžia daryti išvadą, kad lapijos cheminė sudėtis tiksliai atspindi ilgalaikius ekosistemų funkcionavimo skirtumus ir yra vienas jautriausių integruotų miško būklės rodiklių. Ji ne tik parodo medžių mitybos būklę, bet ir integruoja atmosferinės depozicijos, dirvožemio savybių, klimato kaitos bei medžių fiziologinės reakcijos poveikį.

Ypač svarbu tai, kad Žemaitijos KMS, kur registruota prasčiausia eglynų būklė ir didžiausias medžių mirtingumas, lapijos cheminė sudėtis neparodė esminių makroelementų stokos požymių. Tai leidžia daryti išvadą, kad dabartinį eglynų nykimą pirmiausia lemia klimato kaitos sukeltas fiziologinis stresas ir antriniai biotiniai pažeidimai, o ne mineralinės mitybos nepakankamumas.

Tuo tarpu Aukštaitijos KMS išsiskyrė geriausiai subalansuota makroelementų sudėtimi, o Dzūkijos KMS pušynai, nepaisant natūraliai skurdesnių dirvožemių, išlaikė optimalius elementų santykius ir pasižymėjo didžiausiu ekologiniu atsparumu. Šie rezultatai rodo, kad medžių atsparumą klimato kaitai labiau lemia rūšinis prisitaikymas ir augavietės ekologinės savybės negu vien absoliučios maisto medžiagų koncentracijos lapijoje.



Pav. 2025 m. pagrindinių medžių rūšių lapijos cheminės sudėties paluginimas tarp stočių

Išvados (2025 m. lapijos cheminė sudėtis)

1. 2025 m. lapijos cheminės sudėties tyrimai parodė, kad visose trijose Integruoto monitoringo stotyse medžių mityba pagrindiniais makroelementais (N, P, K, Ca, Mg ir S) buvo pakankamai gera ir nerodė ryškių mineralinės mitybos disbalanso požymių. Tai rodo palankią medžių fiziologinę būklę ir pakankamą maisto medžiagų prieinamumą.
2. Didžiausiomis azoto, fosforo, mangano, natrio ir chloridų koncentracijomis pasižymėjo Žemaitijos KMS medžių lapija, o didžiausios kalcio, magnio ir sieros koncentracijos nustatytos Aukštaitijos KMS eglių spygliuose. Dzūkijos KMS medžių lapijoje nustatytos mažesnės kalcio koncentracijos atspindėjo natūraliai skurdesnius smėlingus dirvožemius.
3. Pušų spygliuose nustatyti aiškūs su spyglių amžiumi susiję cheminės sudėties pokyčiai – kalio, magnio, azoto ir fosforo koncentracijos mažėjo, o kalcio, geležies ir aliuminio didėjo. Šie dėsningumai atspindi normalų maisto medžiagų retranslokacijos procesą bei ilgalaikį mažai judrių elementų kaupimąsi vyresniuose spygliuose.
4. Nepaisant didžiausių azoto koncentracijų Žemaitijos KMS medžių lapijoje, ši stotis pasižymėjo prasčiausia medynų būkle ir didžiausia lajų defoliacija. Tai rodo, kad dabartinėmis klimato sąlygomis medžių gyvybingumą labiau riboja sausros, klimato ekstremumai ir biotiniai pažeidimai negu mineralinės mitybos stoka.
5. Aukštaitijos KMS išsiskyrė geriausiai subalansuota makroelementų sudėtimi, o Dzūkijos KMS pušynai, nepaisant mažesnių bazinių katijonų koncentracijų, išlaikė gerą mitybos balansą ir pasižymėjo didžiausiu ekologiniu atsparumu. Tai patvirtina, kad medžių atsparumą pirmiausia lemia rūšies ekologinės savybės ir prisitaikymas prie augavietės sąlygų, o ne vien absoliučios elementų koncentracijos lapijoje.
6. 2025 m. lapijos cheminės sudėties rezultatai gerai sutapo su oro cheminių tyrimų, atmosferinės depozicijos ir medžių būklės vertinimo duomenimis, patvirtindami, kad lapijos cheminė analizė yra vienas patikimiausių integruotų miško ekosistemų būklės ir mitybos diagnostikos rodiklių. Ji leidžia kompleksiškai vertinti atmosferinės depozicijos, dirvožemio savybių ir klimato kaitos poveikį medžių fiziologinei būklei.

6.2.4. Aukštaitijos ir Žemaitijos KMS medžių lapijos cheminės sudėties pokyčių palyginimas

Ilgalaikiai 2005–2025 m. Aukštaitijos ir Žemaitijos KMS medžių lapijos cheminės sudėties tyrimai parodė, kad abiejose stotyse vyksta bendri regioninio masto mineralinės mitybos pokyčiai, tačiau jų intensyvumas, kryptis ir ekologinė reikšmė skiriasi priklausomai nuo medynų rūšinės sudėties, atmosferinės depozicijos, dirvožemio savybių ir klimato sąlygų. Aukštaitijos KMS pokyčiai daugiausia atspindi santykinai stabilesnę pušynų mitybos sistemą, o Žemaitijos KMS – dinamiškesnę ir jautresnę eglynų bei didesnės atmosferinės apkrovos veikiamą elementų apykaitą.

Didžiausios pagrindinių maistinių elementų koncentracijos abiejose stotyse nustatytos beržų lapuose. Tai rodo didesnį beržo maisto medžiagų poreikį ir intensyvesnę lapų fiziologinę apykaitą, palyginti su spygliuočiais. Tačiau būtent beržo lapijoje išryškėjo ir ryškiausi stočių skirtumai. Aukštaitijoje bendrojo azoto koncentracijos beržų lapuose per visą laikotarpį reikšmingai didėjo, nors 2021–2025 m. augimo tempas sumažėjo. Žemaitijoje, priešingai, beržų lapuose N koncentracijos turėjo ilgalaikę mažėjimo tendenciją ir paskutiniuoju laikotarpiu toliau mažėjo. Tai rodo, kad Žemaitijos KMS beržų azoto mityba silpnėja labiau negu Aukštaitijos KMS.

Pušų spygliuose azoto koncentracijų kaita buvo palankesnė abiejose stotyse. Aukštaitijoje N koncentracijos reikšmingai didėjo pirmųjų metų pušų spygliuose ir silpniau – antrųjų metų spygliuose. Žemaitijoje taip pat nustatytas reikšmingas N augimas pirmųjų metų pušų spygliuose, tačiau 2021–2025 m. aiški augimo tendencija susilpnėjo. Tai leidžia teigti, kad paprastoji pušis abiejose stotyse išlaiko santykinai stabilesnę azoto mitybą negu beržas ir eglė, tačiau paskutiniuoju laikotarpiu ir pušų azoto mitybos gerėjimas lėtėja.

Eglių spygliuose N koncentracijos abiejose stotyse buvo mažiausios arba vienos mažiausių. Aukštaitijoje jos išliko gana stabilios, su labai silpna mažėjimo tendencija, o Žemaitijoje taip pat nenustatyta aiškaus gerėjimo. Žemaitijos KMS pirmųjų metų pušų spygliuose N koncentracijos pastaruoju laikotarpiu beveik du kartus viršijo eglių spygliuose nustatytas reikšmes. Šis skirtumas rodo ne tik rūšinę mitybos strategiją, bet ir galimą blogesnį eglės gebėjimą išlaikyti azoto balansą vakarų Lietuvos klimato ir hidrologinėmis sąlygomis.

Fosforo koncentracijų kaita abiejose stotyse pasižymėjo panašiu krypties pasikeitimu. Iki 2020 m. P koncentracijos daugiausia mažėjo, ypač beržų lapuose, tačiau 2021–2025 m. pradėjo didėti eglių ir pušų spygliuose, o Žemaitijoje – ir beržų lapuose. Kadangi analogiškas procesas registruotas abiejose KMS, jis gali būti laikomas regioninio masto pokyčiu, susijusiu su fosforo prieinamumo, šaknų įsisavinimo arba jo perskirstymo augalų audiniuose kaita.

Svarbiausias bendras abiejų stočių pastarojo laikotarpio signalas yra priešinga N ir P koncentracijų dinamika. Azoto koncentracijų didėjimas lėtėja, jos stabilizuojasi arba kai kuriais atvejais mažėja, o fosforo koncentracijos pradeda augti. Dėl to mažėja N santykis. Aukštaitijoje šis pokytis ryškesnis beržų lapuose ir pušų spygliuose, o Žemaitijoje – praktiškai visose tirtose rūšyse. Tai rodo galimą perėjimą nuo ankstesnės palankesnės azoto mitybos prie santykinio azoto ribojimo fosforo atžvilgiu.

Šios kaitos reikšmingumas hemiborealiniuose miškuose yra didelis, nes azotas dažnai yra vienas pagrindinių medžių augimą ribojančių elementų. Mažėjantis N santykis nebūtinai reiškia absoliutų azoto trūkumą, tačiau gali rodyti, kad medžių gebėjimas panaudoti didėjantį fosforo prieinamumą tampa ribojamas azoto. Tokia situacija gali mažinti augimo reakciją į ilgesnį vegetacijos laikotarpį ir palankias temperatūros sąlygas. Žemaitijos KMS ši rizika yra didesnė, nes azoto mažėjimas ryškiausias beržų lapuose, o eglės pasižymi žemomis ir nestabiliomis N koncentracijomis.

Kalio koncentracijų kaita abiejose stotyse buvo palankesnė, tačiau meteorologinis jautrumas skyrėsi. Aukštaitijoje K koncentracijos ilgą laiką didėjo beržų lapuose ir pušų spygliuose, nors paskutiniuoju laikotarpiu augimo tempas sumažėjo. Žemaitijoje iki 2020 m. K taip pat didėjo visuose lapijos pavyzdžiuose, ypač pušų spygliuose, tačiau po sausrų jo koncentracijos reikšmingai mažėjo. 2021–2025 m. Žemaitijoje K didėjimas išliko tik beržų lapuose, o spygliuose koncentracijos stabilizavosi.

Šis stočių skirtumas rodo didesnį Žemaitijos KMS kalio mitybos jautrumą hidrologiniams ekstremumams. Kadangi K reguliuoja žiotelių veiklą, osmosinį slėgį ir vandens balansą, jo sumažėjimas po sausrų gali tiesiogiai silpninti medžių atsparumą pakartotiniam vandens deficitui. Tai ypač svarbu eglėms, kurių šaknų sistema seklesnė ir jautresnė dirvožemio drėgmės trūkumui. Aukštaitijos pušynuose kalio mityba išlieka stabilesnė, nors jos gerėjimo tempas taip pat mažėja.

Kalcio koncentracijų ilgalaikė kaita abiejose stotyse pastaruoju laikotarpiu tapo palankesnė. Aukštaitijoje iki 2020 m. Ca mažėjo beržų lapuose ir pirmųjų metų pušų spygliuose, tačiau 2021–2025 m. pradėjo didėti beržų, pušų pirmųjų metų ir eglių lapijoje. Žemaitijoje Ca koncentracijos per visą 2005–2025 m. laikotarpį didėjo beržų lapuose ir antrųjų metų pušų spygliuose, o kituose pavyzdžiuose išliko stabilios.

Ca stabilizacija arba augimas gali būti vertinamas kaip teigiamas mitybos požymis, nes kalcis svarbus ląstelių sienelių stabilumui, membranų funkcijai ir atsakui į aplinkos stresą. Tačiau Žemaitijoje šį rezultatą būtina vertinti kartu su intensyviu Ca išplovimu iš lajų ir mažėjančiais jo srautais su atviros vietos krituliais. Todėl didesnės Ca koncentracijos lapijoje gali atspindėti ne vien geresnį išorinį aprūpinimą, bet ir intensyvesnę vidinę elemento apytaką.

Magnio koncentracijų kaita abiejose stotyse yra mažiau palanki. Aukštaitijoje Mg reikšmingiausiai mažėjo beržų lapuose ir pirmųjų metų pušų spygliuose, o paskutiniuoju laikotarpiu stabilizavosi. Žemaitijoje Mg mažėjimas nustatytas eglių ir pušų spygliuose, o beržų lapuose kaita buvo nepastovesnė. Taigi Aukštaitijoje ryškesnis buvo ankstesnis Mg mažėjimas lapuočių ir jaunos pušų lapijos audiniuose, o Žemaitijoje – ilgalaikis spygliuočių, ypač eglių, Mg mitybos silpnėjimas.

Mg mažėjimas yra reikšmingas, nes šis elementas sudaro chlorofilo molekulės centrą ir tiesiogiai dalyvauja fotosintezėje. Ilgalaikis Mg trūkumas arba mažėjantis jo santykis su N ir K gali riboti fotosintetinį efektyvumą ir didinti jautrumą sausroms. Žemaitijos eglynams tai gali būti papildomas nepalankus veiksnys kartu su klimato šiltėjimu ir dirvožemio drėgmės režimo svyravimais.

Mangano koncentracijų kaita abiejose stotyse buvo palyginti stabili arba turėjo silpną mažėjimo tendenciją. Aukštaitijoje išimtį sudarė eglės, kurių spygliuose Mn šiek tiek didėjo. Žemaitijoje Mn mažėjo tiek eglių, tiek pušų spygliuose. Kadangi Mn prieinamumas labai priklauso nuo dirvožemio rūgštingumo ir drėgmės režimo, stočių skirtumai gali atspindėti nevienodą dirvožemio cheminių ir oksidacinių–redukcinių sąlygų kaitą.

Aliuminio koncentracijų pasiskirstymas ir pastarojo laikotarpio pokyčiai abiejose stotyse buvo labai panašūs. Daugiausia Al kaupėsi antrųjų metų pušų spygliuose, mažiau – pirmųjų metų pušų ir eglių spygliuose, o mažiausiai – beržų lapuose. Iki maždaug 2020 m. Aukštaitijoje Al daugiausia mažėjo, tačiau nuo 2020 m. abiejose stotyse pradėjo reikšmingai didėti.

Kadangi analogiškas Al padidėjimas registruotas tiek Aukštaitijoje, tiek Žemaitijoje, tai gali būti regioninio masto procesas. Galimos priežastys apima pakitusį dirvožemio rūgštingumą, hidrologinį režimą, organinių kompleksų mobilizaciją, mineralinių dalelių depoziciją arba metodinius pokyčius. Ekologiniu požiūriu patvirtintas Al prieinamumo didėjimas būtų nepalankus, nes tirpus Al gali pažeisti smulkiąsias šaknis, riboti Ca ir Mg įsisavinimą ir silpninti medžių atsparumą.

Geležies koncentracijos abiejose stotyse didėjo intensyviausiai iš visų tirtų mikroelementų, o 2021–2025 m. augimas dar labiau paspartėjo. Aukštaitijoje ryškiausias Fe didėjimas nustatytas eglių spygliuose, o Žemaitijoje – beržų lapuose, pirmųjų metų pušų ir eglių spygliuose. Žemaitijoje paskutiniojo laikotarpio Fe augimo tempai kai kuriuose pavyzdžiuose buvo didesni negu Aukštaitijoje.

Sinchroniškas Fe ir Al didėjimas abiejose stotyse yra vienas reikšmingiausių ir kartu problemiškiausių viso tyrimo rezultatų. Jis gali rodyti bendrą regioninį dirvožemio ar atmosferinės depozicijos pokytį, tačiau taip pat gali būti susijęs su mėginių paviršiniu užteršimu mineralinėmis dalelėmis arba analitinės metodikos pokyčiais. Todėl šio signalo negalima interpretuoti kaip

gerėjančios miško būklės. Priešingai, jeigu padidėjimas patvirtinamas nepriklausomais dirvožemio ir dirvožemio tirpalo duomenimis, jis gali reikšti didėjantį Fe ir Al judrumą bei naują cheminio streso šaltinį.

Natrio koncentracijos aiškiai išskyrė Žemaitijos KMS. Čia jos buvo didesnės negu Aukštaitijoje, o 2021–2025 m. reikšmingai padidėjo visuose lapijos pavyzdžiuose. Tai atitinka stipresnį Baltijos jūros ir jūrinių aerozolių poveikį vakarų Lietuvoje. Aukštaitijoje tokio ryškaus Na kaupimosi lapijoje nenustatyta. Žemaitijoje didėjantis Na gali būti tiek tiesioginės aerozolių depozicijos ant lapijos, tiek dalinio jų įsisavinimo rezultatas, tačiau didelės koncentracijos gali keisti jonų balansą ir konkuruoti su K įsisavinimu.

Bendras stočių palyginimas rodo, kad Aukštaitijos KMS medžių lapijos cheminė sudėtis pasižymi didesniu stabilumu. Čia ilgą laiką didėjo N ir K koncentracijos, o paskutiniuoju laikotarpiu pradėjo gerėti P ir Ca rodikliai. Vis dėlto N augimo lėtėjimas, ankstesnis Mg mažėjimas ir naujas Al bei Fe didėjimas rodo, kad stabilumas nėra absoliutus.

Žemaitijos KMS mineralinės mitybos sistema yra labiau kintanti ir jautresnė. Beržų lapuose mažėja N, spygliuočių lapijoje mažėja Mg ir Mn, K koncentracijos jautriai reaguoja į sausras, o paskutiniuoju laikotarpiu reikšmingai didėja Na, Al ir Fe. Nors P, K ir Ca koncentracijų augimas gali būti vertinamas kaip palankus, jis vyksta kartu su didėjančiu elementų santykių disbalansu ir intensyvia lajų apykaita.

Ekologiniu požiūriu reikšmingiausias abiejų stočių pokytis yra ne vien atskirų elementų koncentracijų didėjimas ar mažėjimas, bet visos lapijos stechiometrijos persitvarkymas. Abiejose KMS mažėjantis arba stabilus N kartu su didėjančiu P rodo galimą santykinio azoto ribojimo stiprėjimą. Kartu mažėjantis Mg, sausrų veikiamas K ir didėjantis Al gali mažinti medžių gebėjimą efektyviai panaudoti šiltėjančio klimato teikiamas augimo galimybes.

Aukštaitijos KMS pokyčiai labiau atitinka santykinai stabilios, oligotrofinėms sąlygoms prisitaikiusios pušynų ekosistemos mitybos režimą. Žemaitijos KMS rezultatai rodo intensyvesnę, tačiau labiau išbalansuotą elementų apykaitą, susijusią su eglynų dominavimu, didesniu lapijos ploto indeksu, stipresne jūrine ir tolimųjų oro masių įtaka bei didesniu jautrumu sausroms.

Todėl galima teigti, kad Aukštaitijos KMS šiuo metu pagrindinis signalas yra mineralinės mitybos gerėjimo tempo lėtėjimas, o Žemaitijos KMS – didėjantis elementų santykių nestabilumas ir klimatinis jautrumas. Šie skirtumai gali būti vienas iš mechanizmų, paaiškinančių didesnį Žemaitijos eglynų pažeidžiamumą, intensyvesnį medžių žuvimą ir silpnesnį atsaką į sumažėjusią atmosferinę taršą.

6.2.5. Pagrindinių makro elementų lapijoje kaitos reikšmingumas pagrindinių medžių rūšių stabilumui

Aukštaitijos KMS registruotas lapijos azoto koncentracijos sumažėjimas kartu su didėjančiu fosforo kiekiu rodo poslinkį link didėjančio azoto trūkumo. Šis disbalansas gali riboti medžių augimą ir fiziologinį atsparumą, ypač maistinių medžiagų reikalaujančioms rūšims, tokioms kaip beržas. K ir Ca koncentracijos lapijoje per visą tiriamąjį laikotarpį didėja, kaip ir Fe. Tai geros miškų būklės rodiklis.

Didėjanti K, Ca ir Fe koncentracija lapuose gali atspindėti padidėjusį įsisavinimą arba sumažėjusį augimo praskiedimą; tačiau kartu su mažėjančiu azoto kiekiu ši tendencija labiau rodo maistinių medžiagų stechiometrijos pokytį, kurį lemia azoto trūkumas. Nors padidėjęs kalio kiekis gali palaikyti osmosinę reguliaciją stresinėmis sąlygomis, kitų maistinių medžiagų kaupimasis negali kompensuoti sumažėjusio azoto prieinamumo ir gali atspindėti augalų mitybos disbalansą.

Pastebėtas aliuminio koncentracijos padidėjimas lapuose greičiausiai atspindi padidėjusią Al mobilizaciją rūgščioje dirvoje ir gali rodyti progresuojantį dirvožemio rūgštėjimą. Atsižvelgiant į žinomą aliuminio toksiškumą augalų šaknims ir jo trukdymą maistinių medžiagų įsisavinimui, ši tendencija rodo didėjantį fiziologinį stresą. Kartu su mažėjančia azoto koncentracija ir pakitusia maistinių medžiagų stechiometrija, padidėjęs Al kiekis rodo dirvožemio cheminių sąlygų pablogėjimą, o ne maistinių medžiagų prieinamumo pagerėjimą.

Stebėti lapų maistinių medžiagų koncentracijų pokyčiai rodo esminį medžių mitybos būklės ir maistinių medžiagų stechiometrijos pokytį tiriamomis sąlygomis, t.y. cheminių medžiagų kiekybinių santykių pasikeitimą lapijoje. Visų pirma, prasidedantis azoto (N) koncentracijų sumažėjimas ir fosforo (P), kalio (K), kalcio (Ca), geležies (Fe) ir aliuminio (Al) koncentracijų padidėjimas rodo, kad medžių mitybą vis labiau lemia nesubalansuotas maistinių medžiagų prieinamumas, o ne maistinių medžiagų ribojimas.

N koncentracijos mažėjimas rodo didėjantį N ribojimą, o tai atitinka borealiniuose ir hemiborealiniuose miškuose pastebėtus procesus, kur azoto prieinamumas dažnai riboja produktyvumą (Jonard ir kt., 2015; Zhang ir kt., 2022). Azotas sąlygoja ne tik fotosintezės bet ir viso augimo intensyvumą, todėl jo mažėjimas gali turėti tiesioginį neigiamą poveikį medžių gyvybingumui ir prieaugiui, kas buvo pateikta II skyriuje. Kartu didėjanti fosforo koncentracija nekompensuoja šio apribojimo, o prisideda prie lapų azoto ir fosforo santykio poslinkio link reikšmingesnio N ribojimo, o tai patvirtina rezultatus apie besikeičiančius maistinių medžiagų ribojimo režimus keičiantis aplinkai (Du ir kt., 2021; Sandén, 2024; Lai ir kt., 2024). Toks

stechiometrinis disbalansas vis labiau pripažįstamas kaip pagrindinis veiksnys sąlygojantis augalų produktyvumą ir atsparumą nepalankiems aplinkos veiksniams globalios kaitos sąlygomis (Reich ir kt., 2010).

Nustatyta didėjanti K, Ca ir Fe koncentracija lapuose rodo papildomus maistinių medžiagų įsisavinimo ir vidinės augalo reguliacijos pokyčius. Padidėjęs K kiekis gali rodyti padidėjusį osmosinį reguliavimą ir fiziologinį prisitaikymą prie vandens sukelto streso, nes K yra būtinas žiotelių kontrolei ir atsparumui sausrai (Wang ir kt., 2013). Padidėjusi Ca koncentracija gali atspindėti dirvožemio cheminių sąlygų pokyčius, įskaitant bazinių katijonų mobilizaciją esant pakitusiai rūgščių-šarmų būsenai, nors Ca kaupimasis taip pat gali būti sulėtėjusio augimo dėl riboto floemo judrumo (White ir Broadley, 2003; Marschner, 2012). Geležies koncentraciją stipriai kontroliuoja dirvožemio pH ir redokso (oksidacijos-redukcijos) sąlygos, todėl padidėjęs Fe kiekis lapuose gali atspindėti dirvožemio cheminės sudėties pokyčius, turinčius įtakos Fe tirpumui ir įsisavinimui (Marschner, 2012).

Tačiau toks maistinių medžiagų koncentracijos padidėjimas, pasirodo, kad neturėtų būti interpretuojamas vien tik kaip pagerėjusi mitybos būklė. Sumažėjusio augimo sąlygomis maistinių medžiagų koncentracija lapijoje gali padidėti dėl praskiedimo efekto, kai mažesnė biomasės gamyba lemia didesnę santykinai nejudančių elementų koncentraciją audiniuose (Reich ir kt., 2010). Šiame kontekste padidėjęs K, Ca ir Fe kiekis greičiausiai gali atspindi tiek pakitusią įsisavinimo dinamiką, tiek augimo apribojimą, kurį lemia azoto trūkumas, kuris pasireiškia ir laipsnišku būklės pablogėjimu ir prieaugio sumažėjimu. Ar tai naujos grėsmės pradžia parodys ateities tyrimai.

Padidėjusi aliuminio koncentracija lapuose pateikia papildomų įrodymų apie besikeičiančias dirvožemio chemines sąlygas ir didėjantį aplinkos stresą. Al tampa labiau prieinamas rūgščiame dirvožemyje ir yra plačiai pripažintas fitotoksiniu, pirmiausia veikiančiu šaknų augimą ir maistinių medžiagų įsisavinimą (Cronan ir Grigal, 1995; Kochian ir kt., 2005). Todėl padidėjusi Al koncentracija rodo padidėjusią Al mobilizaciją dirvožemio tirpale, kuri greičiausiai susijusi su dirvožemio rūgštėjimu arba maža buferine talpa (De Wit ir kt., 2010). Al toksiškumas gali slopinti būtinų maistinių medžiagų, tokių kaip Ca, Mg ir P, įsisavinimą, taip pablogindamas maistinių medžiagų disbalansą ir dar labiau ribodamas medžių augimą (Marschner, 2012).

Apibendrinant, mažėjančio azoto ir didėjančių kitų maistinių medžiagų bei aliuminio koncentracijų derinys rodo poslinkį link streso sukelto maistinių medžiagų disbalanso. Šis procesas neatspindi pagerėjusio maistinių medžiagų tiekimo, o rodo, kad maistinių medžiagų ciklą ir įsisavinimą keičia aplinkos apribojimai, dėl kurių neproporcingai kaupiasi tam tikri elementai ir didėja azoto ribojimas. Tokios sąlygos greičiausiai sumažina bendrą fiziologinį efektyvumą, nes

optimalus augalo funkcionavimas priklauso nuo subalansuoto maistinių medžiagų prieinamumo (Güsewell, 2004; Reich ir kt., 2010). Tokius rezultatus gali tik patikrinti pagal tarptautinį projektą Forest – 4.0 vykdomi ekofiziologiniai tyrimai Aukštaitijos KMS ir pradėti tyrimai Žemaitijos KMS.

Šių pokyčių pasekmės tirtoms pagrindinėms medžių rūšims skiriasi dėl skirtingų ekologinių strategijų. Lapuočiai, tokie kaip beržas (Betula spp.), pasižymintys sparčiu augimu ir dideliu maistinių medžiagų poreikiu, greičiausiai yra ypač jautrūs azoto ribojimui ir maistinių medžiagų disbalansui (Aerts ir Chapin, 2000), dėl to jų būklė ir produktyvumas yra ženkliai pablogėję. Priešingai, paprastoji pušis (Pinus sylvestris L.), prisitaikiusi prie maistinių medžiagų stokos sąlygų, gali geriau toleruoti sumažėjusį azoto prieinamumą ir pakitusią stechiometriją. Paprastoji eglė (Picea abies (L.) Karst.), turinti seklią šaknų sistemą, gali būti ypač jautri dirvožemio rūgštėjimui ir padidėjusiam aliuminio prieinamumui, todėl padidėja jautrumas kombinuotam maistinių medžiagų ir aplinkos stresui (Jonard ir kt., 2015).

Apskritai stebimi maistinių medžiagų modeliai rodo perėjimą nuo paprasto maistinių medžiagų apribojimo prie sudėtingo maistinių medžiagų disbalanso, kurį lemia tokie sąveikaujantys veiksniai kaip mažėjantis azoto prieinamumas, besikeičianti dirvožemio cheminė sudėtis ir aplinkos stresas. Šie pokyčiai greičiausiai turės svarbios įtakos medžių augimui, rūšių sąveikai ir ilgalaikiam miškų funkcionavimui maistinių medžiagų neturtingose hemiborealinėse ekosistemose.

Tik ateities tyrimai ir bendradarbiavimas kartu su tarptautiniu projektu „Forest – 4.0“ gali aukščiausiame moksliniame lygmenyje atsakyti į šiuos naujus besikeičiančios aplinkos sąlygotus iššūkius.

IŠVADOS

1. Aukštaitijos ir Žemaitijos KMS lapijos cheminės sudėties kaita rodo ne pavienius elementų svyravimus, bet ilgalaikį medžių mineralinės mitybos režimo persitvarkymą, susijusį su mažėjančia atmosferine tarša, klimato šiltėjimu ir besikeičiančiu hidrologiniu režimu.
2. Abiejose stotyse ryškėja maisto elementų disbalansas, kai azoto mitybos gerėjimas lėtėja arba silpnėja, o fosforo prieinamumo signalas stiprėja. Tai leidžia manyti, kad hemiborealiniuose miškuose didėja santykinio azoto ribojimo reikšmė, galinti mažinti medžių augimo reakciją į ilgesnį vegetacijos laikotarpį.

3. Aukštaitijos KMS medynai pasižymi stabilesne mineralinės mitybos sistema ir didesniu gebėjimu išlaikyti pagrindinių makroelementų balansą. Tai atitinka oligotrofinėms sąlygoms geriau prisitaikiusių pušynų ekologinę strategiją ir jų santykinai didesnį atsparumą aplinkos pokyčiams.
4. Žemaitijos KMS nustatyta intensyvesnė, tačiau labiau išbalansuota elementų apykaita. Ši sistema stipriau priklauso nuo dirvožemio drėgmės, atmosferinės pernašos ir vidinių lajų procesų, todėl yra jautresnė sausroms, temperatūros ekstremumams ir medynų fiziologinės būklės blogėjimui.
5. Beržas abiejose stotyse išryškėjo kaip jautriausia mineralinės mitybos pokyčių rūšis, o paprastoji pušis – kaip stabilesnę mitybos strategiją išlaikanti rūšis. Eglės cheminė lapijos sudėtis, ypač Žemaitijoje, rodo silpnesnį prisitaikymo potencialą ir didesnę priklausomybę nuo palankių drėgmės bei dirvožemio sąlygų.
6. K, Mg ir Ca kaita patvirtina, kad medžių atsparumą klimato kaitai lemia ne tik bendras maisto elementų kiekis, bet ir jų tarpusavio pusiausvyra. Ypač svarbus tampa K ir Mg prieinamumas, nes šie elementai tiesiogiai susiję su vandens režimo reguliavimu, fotosinteze ir atsparumu sausrai.
7. Sinchroniškas Al ir Fe koncentracijų didėjimas abiejų stočių lapijoje gali rodyti naują regioninį dirvožemio cheminės aplinkos, hidrologinio režimo ar atmosferinės mineralinių dalelių iškritų pokytį. Šis procesas turi būti laikomas prioritetiniu tolesnių tyrimų objektu.
8. Lapijos cheminė sudėtis mažos atmosferinės taršos sąlygomis tampa vis svarbesniu integruotu ekosistemos būklės rodikliu, nes ji atspindi ne tik išorinį elementų patekimą, bet ir šaknų įsisavinimą, vidinį perskirstymą, biologinį praskiedimą bei klimatinį stresą.
9. Stočių skirtumai rodo, kad vienodas regioninis klimato ir taršos fonas skirtingos rūšinės sudėties medynuose suformuoja nevienodą mitybos atsaką. Todėl miško ekosistemų būklė turėtų būti vertinama ne pagal pavienes elementų koncentracijas, o pagal rūšiai būdingus elementų santykius ir jų sąsajas su prieaugiu, defoliacija bei medžių mirtingumu.
10. Bendrai galima teigti, kad pagrindinė naujai ryškėjanti rizika hemiborealiniuose miškuose yra ne absoliutus vieno maisto elemento trūkumas, bet didėjantis mineralinės mitybos disbalansas, galintis riboti medžių gebėjimą prisitaikyti prie spartėjančios klimato kaitos.

Tokiu būdu KMS baseinuose miško ekosistemų maistinių komponenčių kaitą vis labiau lemia sąveikaujantys maistinių medžiagų apribojimai ir dirvožemio cheminis stresas, o ne vieno elemento trūkumas. Toks daugelio elementų disbalansas greičiausiai sumažina fiziologinį efektyvumą, riboja augimą ir keičia rūšių produktyvumą, o maistinių medžiagų reikalaujančios rūšys, tokios kaip beržas, manoma, yra jautresnės nei stresą atsparesni spygliuočiai, tokie kaip paprastoji pušis, ką patvirtina ir ankstesniuose skyriuose pateikti rezultatai.

6.3. Pagrindinių maistinių elementų koncentracijos nuokritose ir jų kaita 2005-2025 m. laikotarpiu

Nuokritos yra vienas svarbiausių miško ekosistemos vidinio biogeocheminio ciklo komponentų, jungiantis medžių fiziologinius procesus su organinės medžiagos kaupimu, skaidymu ir maisto elementų grąžinimu į dirvožemį. Lapų, spyglių, žievės, smulkiųjų šakelių ir kitų augalinių liekanų kiekis bei cheminė sudėtis lemia ne tik elementų srautus į miško paklotę, bet ir mikroorganizmų aktyvumą, organinės medžiagos mineralizacijos greitį, dirvožemio derlingumo palaikymą bei ilgalaikį anglies kaupimą miško ekosistemoje (Prescott & Vesterdal, 2021; Hagedorn et al., 2025).

Skirtingai negu žalioji lapija, kuri apibūdina aktyvią medžių mineralinės mitybos būklę, nuokritų cheminė sudėtis atspindi galutinį maisto elementų naudojimo etapą. Prieš lapams ir spygliams nukrentant, dalis judrių elementų, ypač azoto (N), fosforo (P) ir kalio (K), retranslokuojama į jaunesnius organus, medieną ar ilgalaikes medžio atsargas. Todėl jų koncentracijos nuokritose priklauso ne tik nuo elementų prieinamumo dirvožemyje, bet ir nuo medžių gebėjimo išsaugoti bei pakartotinai panaudoti ribotus maisto išteklius (See et al., 2015; Zhang et al., 2023).

Mažesnės N ar P koncentracijos nuokritose ne visada reiškia blogėjančią medžių mitybos būklę. Jos gali rodyti efektyvesnį šių elementų susigrąžinimą iš senstančios lapijos. Priešingai, didėjančios koncentracijos gali būti susijusios tiek su geresniu medžių aprūpinimu maisto medžiagomis ir intensyvesne biologine apytaka, tiek su sumažėjusiu retranslokacijos efektyvumu. Todėl nuokritų cheminės sudėties pokyčiai turi būti vertinami kartu su žaliosios lapijos koncentracijomis, nuokritų kiekiu ir bendrais elementų srautais į dirvožemį.

Ypatingą reikšmę turi N santykio kaita. Šis rodiklis padeda vertinti santykinį azoto arba fosforo ribojimą ir nustatyti, ar didėjantis miškų produktyvumas palaikomas išlaikant subalansuotą elementų apytaką. Globalios kaitos sąlygomis N ir P ciklai gali vis labiau atsiskirti, nes jų atmosferinis patekimas, biologinis įsisavinimas, retranslokacija ir mineralizacija kinta nevienodu intensyvumu. Toks N ir P ciklų atsiejimas gali keisti medžių produktyvumą, mikroorganizmų bendrijas, organinės medžiagos skaidymą ir anglies kaupimą dirvožemyje (Peñuelas et al., 2013; Sardans & Peñuelas, 2021).

Nuokritų cheminė sudėtis ir skaidymosi greitis labai priklauso nuo dominuojančių medžių rūšių. Lapuočių medžių, ypač beržų, nuokritos paprastai pasižymi didesnėmis maisto elementų koncentracijomis, mažesniu struktūriškai atsparių junginių kiekiu ir greitesniu irimu. Spygliuočių,

tokių kaip paprastoji pušis ir paprastoji eglė, nuokritos dažniausiai turi mažiau maisto medžiagų, daugiau lignino ir kitų sunkiai skaidomų junginių, todėl jų destrukcija vyksta lėčiau, o dirvožemio paviršiuje formuojasi storesnis organinis horizontas (Prescott et al., 2000; Wardle et al., 2003; Prescott & Vesterdal, 2021).

Nuokritų kokybė tiesiogiai veikia maisto medžiagų išsiskyrimą ir anglies sekvestracijos procesus. Didesnės N ir P koncentracijos bei mažesnis lignino kiekis dažniausiai spartina skaidymąsi, o maisto medžiagomis skurdžios ir struktūriškai atsparesnės nuokritos lėtina mineralizaciją ir skatina organinės medžiagos kaupimąsi. Todėl nuokritų cheminė sudėtis reguliuoja ne tik elementų grąžinimą į dirvožemį, bet ir pusiausvyrą tarp greitos maisto medžiagų apytakos bei ilgalaikio anglies išsaugojimo (Melillo et al., 1982; Cornwell et al., 2008).

Bazinių katijonų – K, kalcio (Ca) ir magnio (Mg) – koncentracijos nuokritose suteikia papildomos informacijos apie medžių fiziologinę būklę ir elementų grįžimo į dirvožemį mechanizmus. Kalis yra labai judrus augalo audiniuose, todėl jo kiekį nuokritose stipriai veikia retranslokacija ir išplovimas krituliais. Kalcis, priešingai, floemoje yra mažai judrus, kaupiasi senstančiuose lapuose, spygliuose ir struktūriniuose audiniuose, todėl nuokritos yra vienas pagrindinių jo grąžinimo į dirvožemį kelių. Magnis pagal judrumą užima tarpinę padėtį, tačiau dėl jo svarbos chlorofilo sintezei ir fotosintezei ilgalaikiai koncentracijų pokyčiai gali būti jautrus medžių mineralinės mitybos būklės indikatorius.

Borealiniuose ir hemiborealiniuose miškuose nuokritų vaidmuo ypač svarbus, nes jų produktyvumą dažnai riboja žema temperatūra, trumpas vegetacijos laikotarpis ir maisto medžiagomis skurdūs dirvožemiai. Tokiose ekosistemose didelė dalis kasmet į miško paklotę patenkančių maisto elementų yra susijusi ne su nauju atmosferiniu papildymu, bet su jų recirkuliacija per lapus, spyglius ir kitas nuokritų frakcijas (Vitousek & Sanford, 1986; Berg & McClaugherty, 2008). Dėl to nuokritų kiekis, cheminė sudėtis ir skaidymosi intensyvumas tampa pagrindiniais ekosistemų produktyvumą ir dirvožemio derlingumą palaikančiais veiksniais.

Hemiborealinis regionas yra pereinamoji zona tarp borealinių ir vidutinių platumų miškų, todėl čia susikerta skirtingos medžių rūšių mitybos ir išteklių naudojimo strategijos. Pušynams paprastai būdinga konservatyvesnė maisto medžiagų apytaka, ilgesnis elementų išlaikymas biomasėje ir lėtesnis nuokritų skaidymasis. Eglynams būdinga intensyvesnė lajų sąveika su atmosfera ir didesnis elementų išplovimas, o lapuočių medynams – greitesnė, tačiau aplinkos pokyčiams jautresnė organinės medžiagos ir maisto elementų apytaka.

Klimato kaita ir mažėjanti atmosferinė tarša keičia šiuos procesus. Mažėjanti azoto depozicija Europoje gali didinti miškų priklausomybę nuo vidinio N perdirbimo, o ilgesnis

vegetacijos laikotarpis ir didėjantis produktyvumas – bendrą maisto elementų poreikį. Tuo pačiu metu sausros, karščio bangos ir kritulių režimo svyravimai gali keisti lapijos senėjimo laiką, elementų retranslokacijos efektyvumą ir jų išplovimą iš augalinių audinių.

Vandens deficitas gali sutrumpinti aktyvų lapijos funkcionavimo laikotarpį, skatinti ankstyvą lapų ar spyglių kritimą ir padidinti maisto medžiagų netekimą su nuokritomis. Tačiau kai kuriomis sąlygomis sausra gali sumažinti tirpių elementų išplovimą krituliais ir laikinai padidinti jų koncentracijas nuokritose. Todėl meteorologinių ekstremumų poveikis nuokritų cheminei sudėčiai nėra vienakryptis ir priklauso nuo elemento judrumo, medžių rūšies, lapijos amžiaus bei sausros intensyvumo ir trukmės (Sardans et al., 2023).

Aplinkos pokyčiai gali veikti ne tik nuokritų cheminę sudėtį, bet ir jų kiekį bei frakcinę struktūrą. Temperatūros ir kritulių režimo pokyčiai, atmosferinė depozicija, sausros ir vėjai gali keisti spyglių, lapų, žievės, pumpurų, kankorėžių bei smulkiųjų šakelių dalį bendrame nuokritų sraute. Kadangi šios frakcijos pasižymi nevienodomis elementų koncentracijomis, sezoninė ir daugiametė nuokritų struktūros kaita gali reikšmingai paveikti vidutines jų cheminės sudėties reikšmes.

Todėl nuokritų koncentracijos turi būti analizuojamos kartu su jų biomase. Vien koncentracijų didėjimas neparodo, ar bendras elemento grąžinimas į dirvožemį padidėjo, o mažėjanti koncentracija nebūtinai reiškia mažesnį srautą, jeigu tuo pačiu metu didėja bendras nuokritų kiekis. Ekosisteminiu požiūriu svarbiausias rodiklis yra elemento srautas, apskaičiuojamas derinant jo koncentraciją su atitinkamos nuokritų masės dydžiu.

Ilgalaikiai 2005–2025 m. Aukštaitijos ir Žemaitijos KMS nuokritų cheminės sudėties tyrimai suteikia galimybę įvertinti, kaip mažėjanti atmosferinė tarša, klimato šiltėjimas, pasikartojančios sausros ir skirtinga medynų rūšinė struktūra keičia vidinį hemiborealinių miškų maisto medžiagų ciklą. Šie tyrimai leidžia nustatyti, ar didėjantis medynų produktyvumas palaikomas efektyvia elementų retranslokacija ir pakartotiniu panaudojimu, ar kartu formuojasi naujos maistinių medžiagų disbalanso ir elementų praradimo iš gyvųjų audinių rizikos.

Nuokritų chemijos duomenų integravimas su atmosferinės depozicijos, atviros vietos ir polajinių kritulių, žaliosios lapijos bei dirvožemio cheminės sudėties tyrimais leidžia rekonstruoti pagrindinę miško biogeocheminio ciklo grandinę:

Atmosferinis elementų patekimas → jų transformacija medžių lajose → įsisavinimas ir kaupimas žaliojoje lapijoje → kaita senėjimo metu → grąžinimas su nuokritomis → skaidymas ir mineralizacija → pakartotinis elementų įsisavinimas iš dirvožemio.

Toks integruotas požiūris yra būtinas siekiant įvertinti ilgalaikį miško produktyvumą, dirvožemio maisto medžiagų balansą, anglies kaupimo potencialą ir hemiborealinių miško ekosistemų atsparumą spartėjantiems aplinkos pokyčiams.

Todėl Integruoto monitoringo stočių veiklos vienas iš pagrindinių tikslų - stebėti gamtinės aplinkos komponentus ir medžiagų srautus jungiančius juos, kas sudarytų galimybę įvertinti įvairių medžiagų balansą stebimuose nedidelių upelių baseinuose. Nuokritų dinamika yra vienas iš cheminių elementų judėjimo tarpsnių ekosistemoje. Nuo jų kiekio bei užterštumo priklauso toksinių medžiagų absorbcijos intensyvumas, kuris sąlygoja įvairių medžiagų balansą, o tuo pačiu ir bendrą miško ekosistemos būklę bei produktyvumą.

Darbo tikslas: pagal tarptautinę integruoto monitoringo programą Lietuvos integruoto monitoringo stotyse (KMS) vykdyti bendrą nuokritų kasmetinės sezoninės dinamikos stebėjimus bei pagal nustatytas pagrindinių elementų koncentracijas nuokritose bei jų srautus miško ekosistemose, išaiškinti į ekosistemą patenkančių medžiagų/teršalų poveikį pagrindiniams geosisteminiams procesams, o taip pat, atsižvelgus į išaiškintus procesus, nustatyti galimą miško ekosistemų būklės tolimesnę raidą.

Cheminių analizių metu nustatomos šios maistmedžiagių koncentracijos lapijoje ir jos nuokritose: Ca, K, Mg, Mn, Al, Fe, N, P.

Paskutiniųjų metų meteorologinių parametrų kaita įgalino tirti išskirtinai šiltų sezonų poveikį nuokritų kiekiams bei jų cheminės sudėties kaitai.

Nuokritų tyrimo punktai Aukštaitijos (dešnėje) ir Žemaitijos KM stotyse

Lauko darbų metodika: Nuokritos renkamos kas mėnesį, džiovinamos iki orasausių, po to sveriamos ir taip apskaičiuojama jų metinis kiekis. Cheminių elementų analizei, surinktos nuokritos papildomai buvo grupuojamos pagal mėnesius bei jų pagrindines sudedamąsias. Išskirti 4 pagrindiniai laikotarpiai, kuriais nuokritos buvo sudėdamos. Tai I – laikotarpis: nuokritos surinktos pavasario mėnesį, kai nutirpsta sniegas. Dažniausiai tai būna nuokritos surinktos kovo 1 d. Vėlyvo pavasario metais – balandžio 1 d. Cheminė analizė atliekama šių nuokritų nesumuojant jas su kitomis. II – laikotarpis ankstyvo pavasario. Tai, priklausomai nuo metų, kovo – gegužės mėnesio nuokritos, kuriuose vyrauja medžių pumpurų žvynai. III – laikotarpis – vasaros mėnesiai. Dažniausiai tai birželio – rugpjūčio mėnesiai, intensyvios vegetacijos laikotarpis. IV – laikotarpis – rudens mėnesiai. Tai rugsėjis – lapkritis, maksimalus nuokritų susidarymo laikotarpis. Dėl skirtingos nuokritų sudėties šiais išskirtais laikotarpiais ir išgulėjimo sąlygų rinktuvuose, šių laikotarpių nuokritos sumuojamos, daromas jų bendras ruošinys ir pristatomas į Centrinę aplinkos tyrimų laboratoriją cheminėms analizėms atlikti.

AAA, Aplinkos tyrimų laboratorijoje: indukuotos plazmos optinės emisijos spektrometrijos metodu nustatytos Ca, Mg koncentracijos nuokritose (mg/kg); Kjeldalio metodu – bendrasis N (g/kg); spektrometrijos metodu – bendrasis P (g/kg); liepsnos emisijos spektrometrijos – Na ir K (mg/kg). Paskutiniuoju laikotarpiu cheminės analizės atliekamos VDU agrocheminių tyrimų laboratorijoje.

6.3.1. Nuokritų sezoninė dinamika KMS teritorijose

Aukštaitijos KMS nuokritų tyrimai buvo pradėti 1993 m. lapkričio mėn. Iš pateiktų duomenų matyti, kad nuokritų susidarymo intensyvumas keičiasi metų bėgyje. Žemiausias intensyvumas registruojamas ankstyvo pavasario mėnesiais. Intensyviau nuokritos susidaro birželio mėnesį, o savo maksimumą pasiekia rugsėjo - spalio mėnesiais. 50% susidariusių nuokritų sudaro spygliai, 30 % pušies žievė ir maždaug po 10% kankorėžiai ir beržų lapai.

Nustatyta, kad 2017 m. nuokritų kiekis sudarė 5143 kg/ha. Tai didžiausias nuokritų kiekis surinktas per visą tiriamąjį laikotarpį. Pagrindinė priežastis gausūs krituliai ir stiprus vėjas birželio mėn., per kurį susidarė neįprastai dideli nuokritų kiekiai viršijantys daugiametę normą keletą kartų, t.y apie 1238 kg/ha.

2018 m. nuokritų kiekis buvo pakankamai įprastas daugiamečiui paskutiniųjų metų vidurkiui ir siekė apie 4300 kg/ha. 2019 m. padidėjusį nuokritų kiekį iki 4500 kg/ha galėjo sąlygoti sausra kovo-birželio mėnesiais, dėl ko pradėjo kristi ir dalis antrų metų spyglių. Sausros registruotos 2015-2016 m. ir 2018-2019 m. atrodo, kad turėjo įtakos nuokritų kiekiams susidaryti. Šiais išskirtiniais metais mažas kritulių kiekis sąlygojo mažesnius nuokritų kiekius.

2017 m. ir 2020 m. nuokritų kiekis buvo reikšmingai didesnis nei nuokritų kiekis susidaręs sausringais metais ir viršijo net 500 g/m^2. Nuokritų kiekiai kurie viršijo šią ribą buvo nustatyti dat tik 2011 m., po gausių kritulių 2010 m. 2025 m. surinktas vienas mažiausių nuokritų kiekis per paskutinįjį 15 metų laikotarpį. Toks kiekis surinktas buvo tik 2008-2009 m.

Nuokritų ir vidutinės defoliacijos bei kritulių kiekio koreliacinė analizė parodė, kad didėjantys kritulių kiekis ir kylanti vidutinė temperatūra didina nuokritų kiekio susidarymą, tačiau ar tai priežastinis ryšys gali parodyti tik ateities tyrimai. Didžiausia tikimybė, kad aplinkoje egzistuoja ir lygiagrečiai vykstantys procesai, neturintys priežastinio ryšio, o tik sutampantis vienas su kitu, t.y. klimato pokyčiai gerina medžių lajų būklę, didina jų biomasę, tame tarpe ir spyglių, dėl ko metiniai nuokritų kiekiai taip pat didėja.

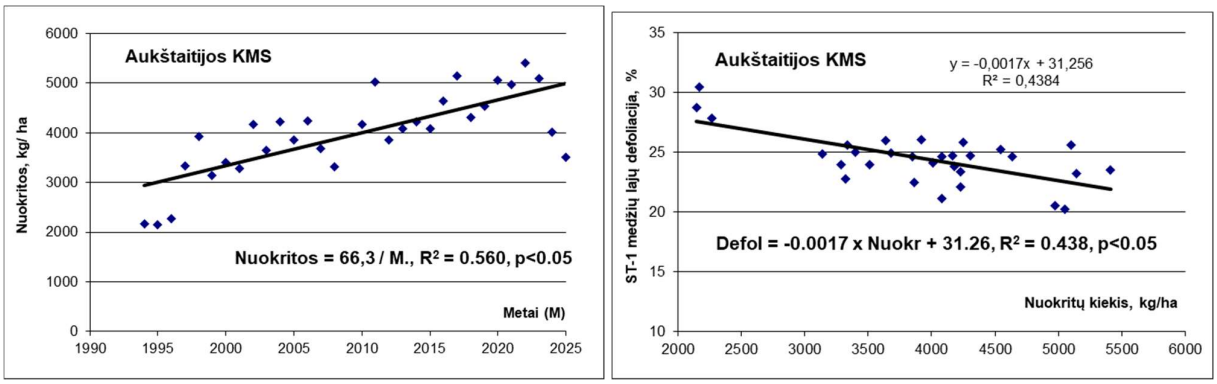
Išanalizavus nuokritų kaitą per visą tiriamąjį laikotarpį nustatyta, kad nuokritų kiekis kasmet nuolat didėja po maždaug 66 kg/ha, t.y. jei tyrimų pradžioje Aukštaitijos KMS baseine vidutiniškai susidarydavo tik apie 2500 kg/ha nuokritų, tai paskutiniuoju laikotarpiu nuokritų kiekis jau artėja prie 5000 kg/ha ribos, nepaisant fakto, kad 2025 m. nuokritų kiekis artimas mažiausioms savo reikšmėms per visą tiriamąjį laikotarpį. Tai būtų aiškinama, dėl reikšmingai sumažėjusio oro užterštumo sieros junginiais ir klimato atšilimo, palaipsniui gerėjančia medžių būkle ir spyglių masės didėjimu.

6.3 lentelė Nuokritų kiekiai Aukštaitijos KMS (1994-2025 m.)

Data	Nuokritų frakcija				Iš viso
	Spygliai	Lapai	Žievė	Kankorėžiai.	g / m^2
1994	113,2	25,9	64,1	13,6	216,8
1995	104,6	24,5	74,5	11,0	214,6
1996*	109,0	21,8	71,6	24,2	226,6
1997	150,3	23,0	103,4	57,0	333,7
1998*	188,7	37,6	124,0	42,0	392,3
1999	208,7	25,0	57,0	23,1	313,8
2000	227,9	22,0	73,8	16,5	340,2
2001	177,7	28,9	91,7	20,7	328,5
2002				27,5	416,5
2003				23,0	364,0
2004				28,8	422,9
2005				12,0	386,1
2006				17,0	424,7
2007				20,0	368,4
2008				18,0	332,1
2009				2,0	175,6
2010				19,7	417,8
2011				11,7	501,9
2012				3,4	385,2
2013				5,0	408,4
2014					422,6
2015					407.8
2016					463,4
2017				3,9	514,3
2018				10,8	430,7
2019				6,6	454,2
2020					505,33
2021					497,32
2022					541,2
2023					510,15
2024					401,08
2025					351,0
g/m2	212,8	34,6	109,7	31,9	389,1
kg/ha	2128	346	1097	319	3891
%	54.7	8.9	28.2	8.2	100

- - nuokritų pasiskirstymas į frakcijas interpoliuotas pagal vidutinius rezultatus (%)

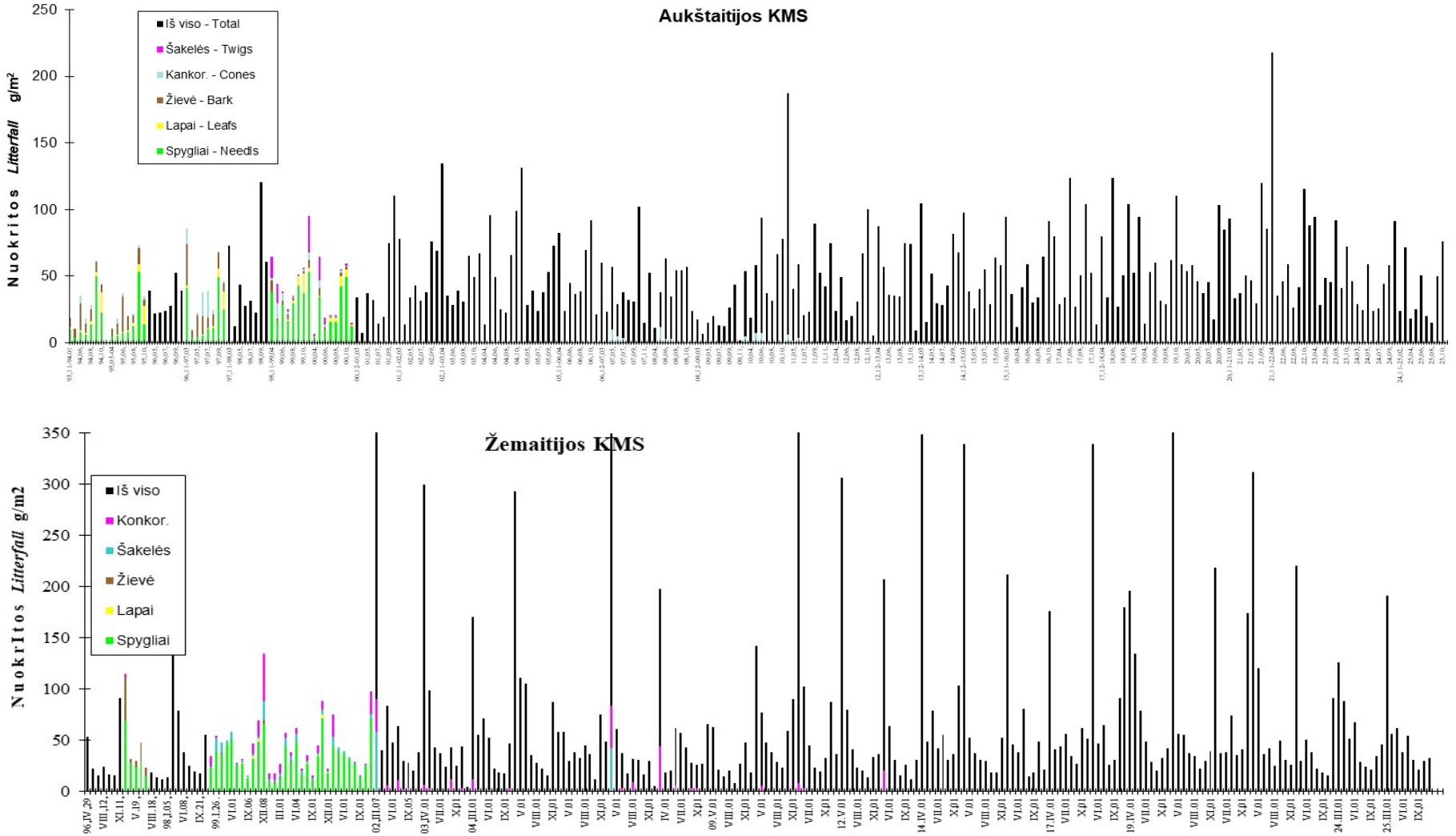
Papildomai atlikta I stacionare augančių medžių lajų defoliacijos (6.7 pav.) ir nuokritų kiekio kaitos analizė parodė, kad didėjantis nuokritų kiekis indikuoja ir didesnę spyglių masę ir mažėjančią defoliaciją, t.y. nuokritų kiekiui didėjant po 100 kg/ha medžių lajų vidutinė defoliacija mažėja maždaug po beveik 0,2 %. Įskaitant paskutinįjį 5 metų laikotarpį nustatytas dėsningumas nepasikeitė, tik sumažėjo priklausomybės reikšmingumas.



6.20 pav. Nuokritų kiekio kaita Aukštaitijos KMS ir jų priklausomybė nuo medžių lajų vidutinės defoliacijos I-jame tyrimų stacionare.
Pastaba: nuokritų rinkimo stotis įkurta ties šiaurine I tyrimo stacionaro riba.

Nustatytos 2025 m. tarpusavio priklausomybės tarp nuokritų kiekio ir metinių meteorologinių parametrų buvo labai silpnos ir nereikšmingos.

Apibendrinant galima teigti, kad Aukštaitijos KMS nuokritų kiekio didėjimas per 1993–2025 m. yra vienas svarbiausių miško ekosistemos atsistatymo ir intensyvėjančios biologinės apykaitos požymių. Mažėjant atmosferinei taršai ir gerėjant lajų būklei, didėja fotosintetiškai aktyvios biomasės kiekis, organinės medžiagos grįžimas į dirvožemį ir vidinio maisto medžiagų ciklo intensyvumas. Šis procesas rodo didėjantį pušynų produktyvumą ir prisitaikymą prie pasikeitusių aplinkos sąlygų, tačiau jo stabilumas ateityje priklausys nuo klimato ekstremumų dažnumo ir medžių gebėjimo išlaikyti teigiamą anglies bei maisto elementų balansą.



6.21 pav. Nuokritų sezoninė dinamika kompleksiško monitoringo stotyse

Žemaitijos KMS nuokritų tyrimai pradėti tik 1995m. pabaigoje. Nuokritų sezoninės dinamikos rezultatai pateikti 6.4 lentelėje. Daugiausiai nuokritų susidaro rudens-žiemos mėnesiais. Vasarą, nuokritų intensyvumas ne toks žymus, kaip Aukštaitijos KM stotyje. Priežastis ta, kad Žemaitijos nuokritų stebėjimo stotis įsteigta eglyne, o eglės spygliakritis turi tik vieną ryškų periodą.

6.4 lentelė Nuokritų kiekiai Žemaitijos KMS (1996-2025m.)

Data	Nuokritų frakcija				Iš viso
	Spygliai	Lapai	Šakelės	Kankorėžiai.	
1996*	-	-	-	-	238,4
1997	194,2	0	93,3	4,3	291,8
1998					496,5
1999	341,7	5,8	48,0	39,6	435,1
2000					411,3
2001			23,3	48,7	360,4
2002				54,7	623,0
2003				25,8	593,0
2004				18,4	436,9
2005					755,06
2006				28,0	375,5
2007			42	54,0	481,8
2008				56,0	488,3
2009				16,0	219,7
2010				7,0	498,5
2011				11	701,0
2012					553,0
2013				20	366,8
2014					743,7
2015					578,3
2016					480,2
2017					492,6
2018				82,8	778,8
2019					582,5
2020					637,5
2021					619,3
2022					642,5
2023					486,4
2024					488,3
2025					525.4
g/m^2	397,9	4,6	70,8	39,5	512,7
kg/ha	3979	46	708	395	5127
%	77,6	0,9	13,8	7,7	100

- - 1996 m. duomenys nepanaudoti nustatant vidutinius nuokritų kiekius.

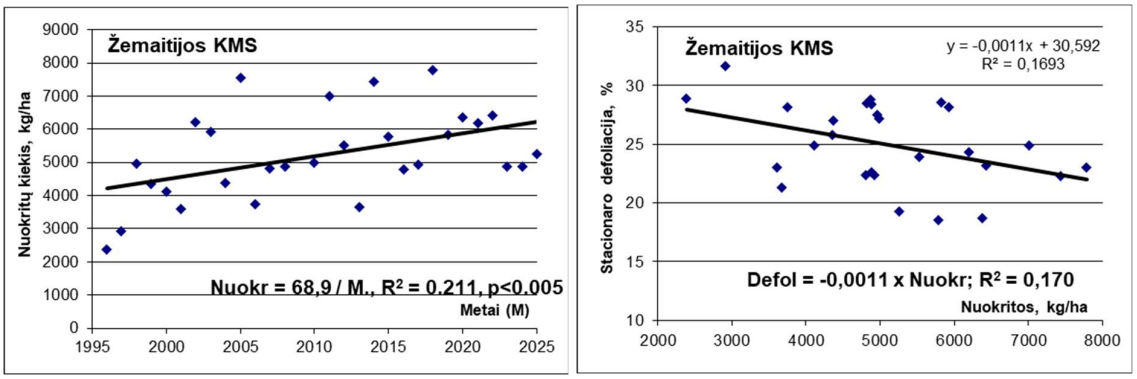
Iš esmės skiriasi ir nuokritų pasiskirstymas į frakcijas. Net 77% visų nuokritų sudaro eglės spygliai. Medžių žievės nuokritose praktiškai nerasta. Tai sąlygoja eglės žievės struktūra. Skirtingai negu pušies, eglės žievė neatsilupa didelėmis, lengvomis plokštelėmis, kurias vėjas galėtų pernešti didesnį atstumą. Eglės žievė nors ir atsinaujina, tačiau tik mažais storais žvyneliais, kurie nukrenta prie kelminės kamieno dalies.

Žemaitijos KMS nuokritose žymią dalį sudaro sausos, smulkios eglės šakelės. Jos sudaro apie 14% visų nuokritų (6.4 lentelė). Kankorėžių kiekis nuokritose priklausomai nuo metų, svyruoja nuo 0 iki 13%.

2015 – 2017 m. Žemaitijos KMS nuokritų kiekis žymiai sumažėjo lyginant su 2014 m. nors susidarė pakankamai įprastas nuokritų kiekis, artimas vidurkiui, t.y. 4956 t/ha. 2018 m. nuokritų kiekis pasiekė reikšmę artimą maksimaliai per visą tiriamąjį laikotarpį. Šiais metais susidarė net 7788 kg/ ha nuokritų. 2020 m. susidarė 637 g/m^2 nuokritų ir tai yra 26 % daugiau negu daugiametis vidurkis, tačiau skirtingai negu Aukštaitijos KMS, šiais metais nuokritų kiekis nesiekė ir reikšmių artimų maksimalioms, kokios buvo registruotos 2005, 2011, 2014 ir 2018. Minėtais metais nuokritų kiekis viršydavo 700 g/ m^2.

2025 m. Žemaitijos KMS nuokritų tyrimo stotyje susidarė 5254 kg nuokritų 1 ha. Tai kiekis artimas daugiamečiui vidurkiui.

Išanalizavus nuokritų kaitą per visą tiriamąjį laikotarpį nustatyta, kad nuokritų kiekis kasmet, kaip ir Aukštaitijos KMS, nuolat didėja po maždaug 68,9 kg/ha, t.y. jei tyrimų pradžioje Žemaitijos KMS baseine vidutiniškai susidarydavo tik apie 3000 kg/ha nuokritų, tai paskutiniuoju laikotarpiu nuokritų kiekis jau dažnai viršijo 7000 kg/ha ribą, tik paskutiniuoju laikotarpiu svyruoja apie 5000 kg/ha. Tai būtų aiškinama taip pat dėl reikšmingai sumažėjusio oro užterštumo sieros junginiais ir klimato atšilimo palaipsniui gerėjančia medžių būkle (spyglių masės didėjimu) bei bendru produktyvumo augimu.



6.22 pav. Nuokritų kiekio kaita Žemaitijos KMS ir jų priklausomybė nuo medžių lajų vidutinės defoliacijos tyrimų stacionare.

Papildomai atlikta stacionare augančių medžių lajų defoliacijos (7 pav.) ir nuokritų kiekio kaitos analizė parodė, kad didėjantis nuokritų kiekis indikuoja ir didesnę spyglių masę ir mažėjančią defoliaciją, t.y. nuokritų kiekiui didėjant po 100 kg/ha medžių lajų vidutinė defoliacija mažėja maždaug po 0,1 %. Silpnesnį koreliacinį ryšį tarp nuokritų kiekio ir medžių lajų defoliacijos galėjo sąlygoti faktas, kad tyrimai šioje stotyje vykdomi brandžiame eglyne, kuriame reikšmingą dalį nuokritų sudaro smulkios šakelės dažniausiai nulaužomos dėl sniego ar apledėjimo.

Apibendrinant galima teigti, kad Žemaitijos KMS nuokritų kaita atspindi intensyvesnį, bet kartu jautresnį medžiagų apykaitos ciklą. Didėjantis organinės medžiagos grįžimas į dirvožemį rodo aukštą šių medynų produktyvumą ir aktyvų elementų ciklą, tačiau dalis šio padidėjimo gali būti susijusi su spartėjančia lapijos kaita ir klimato sukeliamu stresu.

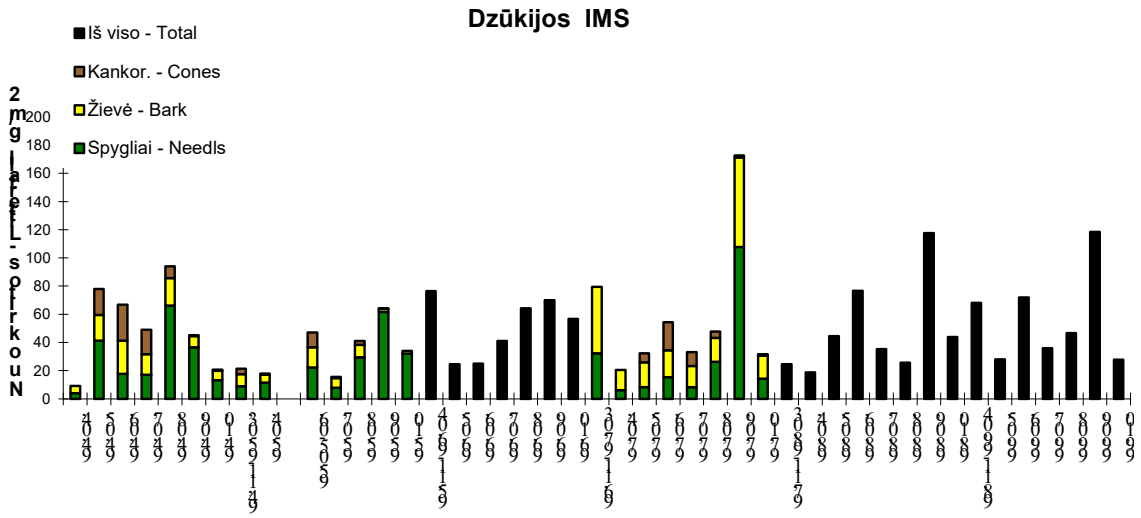
Todėl Žemaitijos KMS, priešingai nei Aukštaitijoje, nuokritų kiekio didėjimas turi dvejopą ekologinę reikšmę: jis kartu atspindi ir didelį produktyvumo potencialą, ir didėjantį jautrumą aplinkos ekstremumams. Šios dvi priešingos tendencijos gali tapti pagrindiniu veiksniu, lemiančiu eglynų stabilumą ateities klimato sąlygomis.

Dzūkijos KMS nuokritų sezoninė dinamika

2025 m. atnaujinta nuokritų rinkimo stotis Dzūkijos KMS. Pradėti rinkti nuokritos dar neleido įvertinti jų metinio kiekio 2025 m. Kitų metų ataskaitoje jau bus metiniai duomenys, kuriuos būtų galima lyginti su pirminiais duomenimis ir daryti atitinkamas išvadas.

Dzūkijos KMS, šalia augalijos tyrimo stacionaro 2025 m. įkurta nuokritų rinkimo stotis

Sezoninė nuokritų dinamika Dzūkijos KMS buvo stebima nuo 1994m. lapkričio 7d. Žemiausias nuokritų susidarymo intensyvumas užregistruotas žiemos ir kovo-balandžio mėnesiais (11 pav.), kiek didesnis birželio mėnesį bei didžiausias - rugsėjo mėnesio pabaigoje.



6.23 pav. Nuokritų sezoninė dinamika Dzūkijos KM stotyje

Ankstesnių tyrimų rezultatai rodė, kad per sezoną Dzūkijos KMS nuokritų rinkimo stotyje susidaro vidutiniškai 3.770 kg/ha nuokritų arba iki 25% daugiau negu Aukštaitijos KMS. Tai sąlygoja medynų, kuriuose registruojamos nuokritos, struktūra. Dzūkijos nuokritų rinkimo stotis įkurta jaunesniame pušyne, kuriame pušys auga žymiai tankiau negu Aukštaitijos nuokritų stotyje.

Bendri nuokritų ir jų pagrindinių frakcijų metiniai kiekiai pateikti 3 lentelėje.

3 lentelė Nuokritų kiekiai Dzūkijos KMS (1994-1999m.)

Data	Nuokritų frakcija						Iš viso
	Spygliai	Lapai	Kankor.	Žievė**	Suma	Stm. šakos	
1994	196,21	0,04	71,38	95,32	362,96	74,0	436,96
1995	173,93	0,03	19,29	111,33	304,58	40,2	344,78
1996*	185,31	0,03	42,18	130,84	358,37	-	358,37
1997	218,95	0,00	43,50	209,56	472,01	268,0	740,01
1998*	200,17	0,04	45,56	141,33	387,10	-	387,10
1999*	200,17	0,04	45,56	141,33	396,76	-	396,76
2025	2025 m. rudenį paruošti rinktuvai nukritoms rinkti žiemos laikotarpiu						
2026							
g/m2	196,65	0,03	44,76	138.85	380,3	76,44	501,88
kg/ha	1966	0,3	448	1389	3803	764	5019
%	51,71	0,01	11,77	36,51	100	-	-
%	38,57	0,01	8,79	27,25	-	25,38	100

Pastabos: * - nuokritų pasiskirstymas į frakcijas interpoliuotas pagal trijų metų rezultatus;
** - žievės frakcija sudaro žievė, smulkios šakelės bei visa likusi organika.

Pažymėtina, kad pušies spygliai Dzūkijos nuokritų rinkimo stotyje (bręstančiame pušyne), panašiai kaip ir Aukštaitijos KMS, sudaro apie pusę visų metinių nuokritų. Tik stambių šakų kiekiai Dzūkijos KMS didesni ir siekia beveik 40%. Kankorežiai sudaro apie 12%.

Apibendrinant galima teigti, kad Dzūkijos KMS nuokritų sistema reprezentuoja produktyvų, bet vandens režimui jautrų sausų hemiborealinių pušynų tipą. Ankstesniu laikotarpiu didesni nei Aukštaitijoje nuokritų kiekiai buvo susiję su tankesne medyno struktūra ir didesne lajų biomase, o ne su blogesne medžių būkle. Ateities stebėjimai leis nustatyti ar šis stabilus organinės medžiagos ciklas išliko klimato kaitos sąlygomis.

6.3.2. Nuokritų ilgalaikės kaitos palyginimas Aukštaitijos, Žemaitijos ir Dzūkijos KMS bei nustatytų skirtumų reikšmingumas

Ilgalaikiai nuokritų tyrimai Lietuvos kompleksiško monitoringo stotyse parodė, kad organinės medžiagos ir maisto elementų grįžimo į dirvožemį procesai hemiborealiniuose miškuose yra jautrus ekosistemų funkcionavimo pokyčių indikatorius. Nuokritos atspindi ne tik metinį lapijos ir kitų organų atsinaujinimą, bet ir visą medžių produktyvumo, lajų būklės, maisto medžiagų panaudojimo efektyvumo ir aplinkos streso sąveiką.

Naujausi tyrimai patvirtina, kad nuokritų srautai yra vienas svarbiausių mechanizmų, jungiančių antžeminės biomasės produktyvumą su dirvožemio anglies kaupimu ir maisto medžiagų ciklais. Šio proceso pokyčiai tiesiogiai veikia organinės medžiagos mineralizaciją, mikroorganizmų aktyvumą ir ilgalaikį ekosistemos produktyvumo palaikymą (Prescott & Vesterdal, 2021; Frisko et al., 2024).

Gauti KMS rezultatai rodo, kad mažėjant atmosferinei sieros taršai ir rūgštėjimo apkrovai keičiasi pagrindiniai nuokritų formavimąsi reguliuojantys veiksniai. XX a. pabaigoje miško ekosistemų funkcionavimą stipriai veikė atmosferinės depozicijos poveikis, o dabartiniu laikotarpiu vis didesnę reikšmę įgauna klimatiniai veiksniai – temperatūra, kritulių režimas, sausros ir medynų gebėjimas reguliuoti vidinį elementų ciklą.

Aukštaitijos KMS ilgalaikis nuokritų kiekio didėjimas kartu su mažėjančia defoliacija rodo didėjančią lajų biomasę ir intensyvėjantį organinės medžiagos ciklą. Tai atitinka naujausią sampratą, kad produktyviuose ir atsigaunančiuose miškuose didėjantys nuokritų srautai gali būti ne degradacijos, o didesnio pirminio produktyvumo ir anglies apytakos požymis.

Šis rezultatas yra ypač reikšmingas, nes daug trumpalaikių tyrimų padidėjusias nuokritas dažnai sieja su stresu. Ilgalaikė Aukštaitijos KMS duomenų seka leidžia atskirti

trumpalaikius ekstremalių metų poveikius nuo kryptingo ekosistemos atsistatymo proceso. Tokia interpretacija atitinka šiuolaikinį požiūrį, kad nuokritų dinamika turi būti vertinama kartu su lajų būkle, prieaugiu ir anglies balansu.

Dzūkijos KMS rezultatai atskleidžia kitą pušynų funkcionavimo strategiją. Didesni nuokritų kiekiai šiame regione pirmiausia susiję su tankesne medyno struktūra ir didesne antžemine biomase, o ne blogesne medžių būkle. Tai rodo, kad net tos pačios rūšies – paprastosios pušies – ekosistemose nuokritų srautai priklauso nuo medyno vystymosi stadijos ir konkurencinių procesų.

Ateityje Dzūkijos pušynų stabilumą daugiausia lems vandens režimas. Naujausi borealinių ir hemiborealinių miškų tyrimai rodo, kad klimato šiltėjimo poveikis nuokritoms nėra vienakryptis: produktyvumo didėjimas gali skatinti organinės medžiagos srautus, tačiau sausros gali mažinti lapijos ilgaamžiškumą ir keisti anglies bei maisto elementų balansą (Frisko et al., 2024; Thu et al., 2026).

Žemaitijos KMS išryškėjo kaip intensyviausios, tačiau jautriausios biogeocheminės apykaitos sistema. Didesnė eglių dalis, tankesnės lajos ir didesnis lapijos paviršiaus plotas lemia didesnį organinės medžiagos ir maisto elementų grįžimą į dirvožemį. Tačiau ši intensyvi apykaita kartu reiškia ir didesnę priklausomybę nuo palankių aplinkos sąlygų.

Eglės dominuojamose sistemose didėjantis nuokritų kiekis turi būti interpretuojamas atsargiai, nes jis gali būti susijęs tiek su didesniu produktyvumu, tiek su spartesne lapijos kaita dėl klimatinio streso. Dažnėjančios sausros gali sutrikdyti vandens balansą, skatinti ankstyvesnį spyglių senėjimą ir mažinti maisto elementų retranslokacijos efektyvumą.

Tokiu būdu trijų KMS stočių rezultatai leidžia išskirti skirtingas hemiborealinių miškų prisitaikymo strategijas:

Dzūkijos KMS – išteklius taupanti strategija, paremta dideliu pušies atsparumu skurdžioms ir sausoms augavietėms;

Aukštaitijos KMS – stabilaus produktyvumo didėjimo strategija, kai mažėjanti tarša ir klimato šiltėjimas iki šiol skatino lajų atsistatymą ir intensyvesnę organinės medžiagos apykaitą;

Žemaitijos KMS – intensyvios apykaitos strategija, pasižyminti dideliu produktyvumu, bet mažesniu atsparumo rezervu ekstremalioms klimato sąlygoms.

Šie rezultatai rodo, kad klimato kaitos poveikis hemiborealiniams miškams negali būti vertinamas vien pagal produktyvumo pokyčius. Didėjantis organinės medžiagos srautas gali turėti skirtingą ekologinę prasmę: stabiliose pušynų sistemose jis gali reikšti ekosistemos atsistatymą, o jautresniuose eglynuose – kartu ir spartėjančią biologinę apykaitą bei didėjantį pažeidžiamumą.

Todėl nuokritų tyrimai tampa vienu svarbiausių ilgalaikio monitoringo rodiklių, leidžiančių nustatyti ribą tarp produktyvumo didėjimo ir galimo ekosistemos stabilumo mažėjimo klimato kaitos sąlygomis.

Išvados

1. Ilgalaikiai nuokritų tyrimai parodė, kad hemiborealinių miškų organinės medžiagos ciklas per pastaruosius dešimtmečius iš esmės keičiasi. Mažėjant atmosferinei sieros junginių apkrovai ir šylant klimatui, nuokritų formavimąsi vis mažiau reguliuoja taršos sukeltas stresas, o vis didesnę reikšmę įgauna medynų produktyvumas, lajų biomasė, rūšinė sudėtis ir klimato ekstremumai.

2. Didėjantis nuokritų kiekis ilgalaikėje perspektyvoje negali būti vertinamas vien kaip medžių pažeidimo ar streso požymis. Stabiliose pušynų ekosistemose jis gali atspindėti didėjančią fotosintetiškai aktyvią biomasę, gerėjančią lajų būklę ir intensyvėjantį anglies bei maisto medžiagų ciklą.

3. Aukštaitijos KMS nustatyti procesai rodo brandžių pušynų atsistatymo mechanizmą po sumažėjusios atmosferinės taršos poveikio. Didėjantis organinės medžiagos grįžimas į dirvožemį kartu su gerėjančia lajų būkle rodo didesnį šių ekosistemų produktyvumą ir gebėjimą efektyviau panaudoti palankesnes klimato sąlygas.

4. Dzūkijos KMS nuokritų formavimosi ypatumai atspindi kitą pušynų prisitaikymo strategiją – didelį atsparumą skurdžioms augavietėms ir efektyvų išteklių panaudojimą. Šiose ekosistemose nuokritų kiekį daugiausia lemia medyno struktūra ir konkurenciniai procesai, tačiau ateityje pagrindiniu stabilumą ribojančiu veiksniu gali tapti vandens prieinamumas.

5. Žemaitijos KMS pasižymi intensyvesne organinės medžiagos ir maisto elementų apykaita, tačiau kartu mažesniu ekologinio stabilumo rezervu. Didesnis produktyvumas ir aktyvesnis elementų ciklas eglynuose vyksta kartu su didesniu jautrumu sausroms, hidrologinio režimo svyravimams ir biotiniams pažeidimams.

6. Skirtinga nuokritų kaitos reikšmė tarp stočių parodė, kad hemiborealinių miškų atsakas į klimato kaitą nėra vienakryptis. Tos pačios krypties pokytis – didėjantis organinės medžiagos srautas – vienose ekosistemose gali reikšti atsistatymą ir produktyvumo augimą, o kitose – spartėjančią medžiagų apykaitą ir didėjantį jautrumą aplinkos stresui.

7. Nuokritų tyrimai patvirtino glaudų ryšį tarp medžių lajų būklės, mineralinės mitybos ir dirvožemio maisto medžiagų ciklo. Todėl nuokritos turi būti vertinamos ne kaip atskiras struktūrinis rodiklis, bet kaip integruotas ekosistemos funkcionavimo indikatorius, jungiantis atmosferos, augalijos ir dirvožemio procesus.

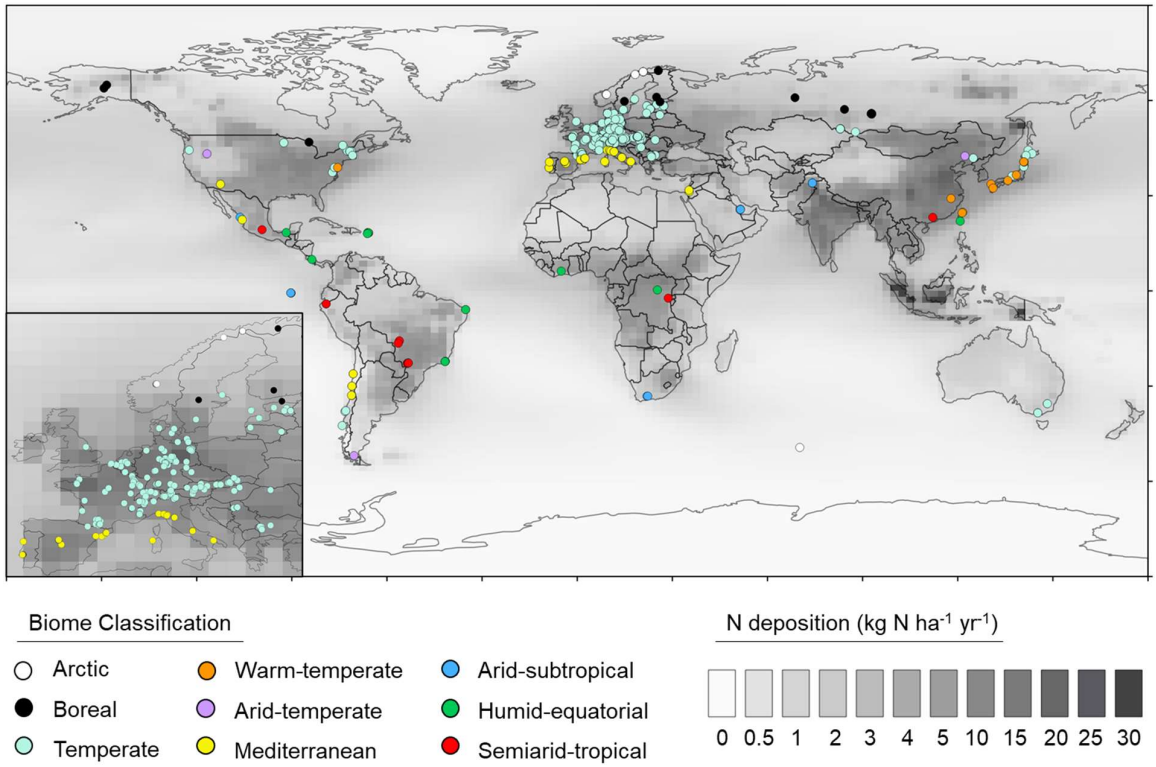
8. Trijų KMS stočių palyginimas leidžia išskirti skirtingas Lietuvos hemiborealinių miškų prisitaikymo strategijas: Dzūkijos pušynams būdinga išteklių taupymo strategija, Aukštaitijos pušynams – stabilaus produktyvumo didėjimo strategija, o Žemaitijos eglynams – intensyvios, bet jautresnės biogeocheminės apykaitos strategija.

9. Ateities klimato sąlygomis pagrindine rizika tampa ne bendras organinės medžiagos produktyvumo mažėjimas, o galimas medžiagų ciklų disbalansas, kai spartėjantis augimas ir didėjanti biomasė gali viršyti ekosistemos gebėjimą palaikyti stabilų vandens ir maisto elementų balansą.

10. Kompleksinio monitoringo rezultatai rodo, kad Lietuvos hemiborealiniai miškai šiuo metu pereina į naują vystymosi etapą – nuo atmosferinės taršos poveikio reguliuojamos būklės prie klimato kaitos, biologinių procesų ir vidinių elementų ciklų reguliuojamos sistemos.

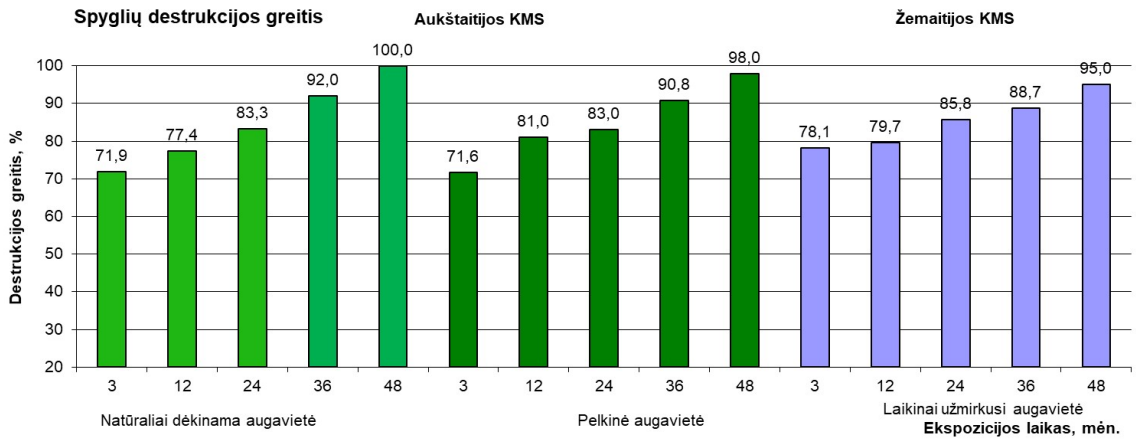
6.3.2. Nuokritų destrukcijos greitis KMS teritorijose

Nuokritų destrukcijos greičio tyrimams buvo panaudota galimybė kartu su kitais KMS programos vykdytojais iš kitų Europos valstybių sudalyvauti dviejų rūšių arbatos destrukcijų tyrimuose, kuri viena, greitai besiskaidanti atitiko mūsų beržų lapų skaidimosi greitį, antra – lėčiau besiskaidanti – atitiko spyglių destrukcijos greitį. Tyrimų tikslas buvo nustatyti N įtaką nuokritų destrukcijos greičiui. Tyrimams vadovavo dr. Ika Djukic iš Šveicarijos federalinio miškų instituto.

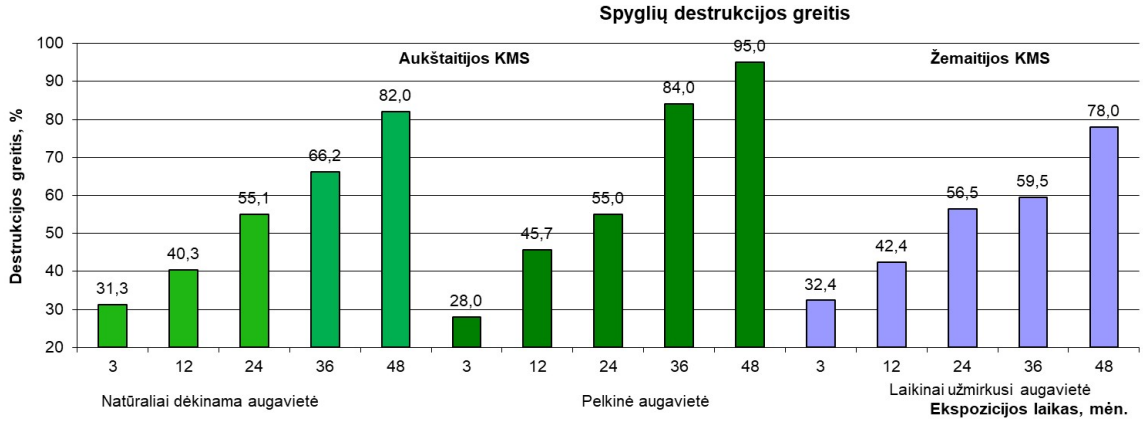


6.24 pav. Tyrimo vietų padėtis. Lietuvai atstovauja Aukštaitijos ir Žemaitijos KMS teritorijose įkurtos destrukcijos tyrimo plotai.

Tyrimai pradėti 2016 m. tęsėsi iki 2020. Aukštaitijos KMS buvo tirta sausos ir pelkinės augavietės poveikis nuokritų skaidimosi intensyvumui, o Žemaitijos KMS laikinai užmirkusios miško augavietės įtaka. Tyrimo plotai buvo susiti su šalimais įkurtais augalijos intensyvaus tyrimo stacionarais. Tyrimų medžiaga pastaruoju laikotarpiu jau yra apdorota ir pateikta spaudai: TaeOh Kwon et al., Effects of Climate and Atmospheric Nitrogen Deposition on Early to Mid-Term Stage Litter Decomposition Across Biomes. Straipsnis pateiktas publikuoti žurnale: *Frontiers in Forests and Global Change, Plant Litter Decomposition, Carbon Sequestration, and Their Patterns*.



6.25 pav. Destrukcijos greitis greitai suirančių nuokritų, kurios atitinka lapų irimo greitį.



6.26 pav. Destrukcijos greitis lėtai suirančių nuokritų, kurios atitinka spyglių irimo greitį.

Nuokritų destrukcijos intensyvumo tyrimas KMS baseino teritorijose parodė, kad greitai irstančios nuokritos, tokios kaip beržų lapai, jau per pirmus 3 mėn. suiro virš 70 % Aukštaitijos KMS tyrimo ploteliuose nepriklausomai nuo augavietėse drėgmės rėžimo ir truputį intensyviau, iki 78 % Žemaitijos KMS. Šie skirtumai buvo nereikšmingi. Tolesnė analizė parodė, kad jau po metų sausoje, natūraliai drėkinamoje augavietėje nuokritų suirimo laipsnis siekė 77 %, kai tuo tarpu pelkinėje augavietėje jis buvo artimas 78 %. Žemaitijos KMS suirimo intensyvumas buvo artimas suirimo intensyvumui nustatytam Aukštaitijos KMS pelkinėje augavietėje, t.y. 80 %. Trijų metų ekspozicija aiškesnių skirtumų neišaiškino. Aukštaitijoje nuokritų suirimo laipsnis siekė apie 83 % ir nepriklausė nuo augavietėse drėgnumo, o Žemaitijos KMS jis siekė 86 %. Po 3 jų metų ekspozicijos intensyviausiu suirimu pasižymėjo nuokritos Aukštaitijos KMS natūraliai drėkinamoje augavietėje, kur jos intensyvumas siekė 92 %, kiek mažesniu suirimo laipsniu pasižymėjo nuokritų suirimo laipsnis Aukštaitijos KMS pelkinėje augavietėje ir mažiausiai suirusios buvo nuokritos Žemaitijos KMS laikinai užmirkusioje augavietėje, kur ji siekė 89 %.

Lėtai irstančios nuokritos, tokios kaip eglių ir pušų spygliai, jau per pirmus 3 mėn. suiro tik 31 % Aukštaitijos KMS natūraliai drėkinamame ir 36 % pelkinės augavietėse tyrimo plotelyje. Žemaitijos KMS šių nuokritų suirimo laipsnis siekė 32 %. Jau po metų sausoje, natūraliai drėkinamoje augavietėje nuokritų suirimo laipsnis siekė 40 %, kai tuo tarpu pelkinėje augavietėje jis buvo artimas 46 %. Žemaitijos KMS suirimo intensyvumas buvo artimas suirimo intensyvumui nustatytam Aukštaitijos KMS natūraliai drėkinamoje augavietėje, t.y. 42 %. Trijų metų ekspozicija aiškesnių skirtumų neišaiškino. Aukštaitijoje nuokritų suirimo laipsnis siekė apie 55 % ir nepriklausė nuo augavietėse drėgnumo, o Žemaitijos KMS jis siekė 56 % ir iš esmės nesiskyrė nuo nuokritų suirimo laipsnio nustatyto Aukštaitijos KMS. Po 3 jų metų ekspozicijos intensyviausiu suirimu pasižymėjo nuokritos Aukštaitijos KMS pelkinėje augavietėje, kur jos intensyvumas siekė 84 %, kiek mažesniu suirimo laipsniu pasižymėjo nuokritų suirimo laipsnis Aukštaitijos KMS natūraliai drėkinamoje augavietėje, t.y. 66 % ir mažiausiai suirusios buvo nuokritos Žemaitijos KMS laikinai užmirkusioje augavietėje, kur ji siekė 60 %.

Apibendrinus gautus rezultatus galima teigti, kad nuokritų destrukcijos greičiui didelės įtakos turi miško augavietėse drėgnumas, jam didėjant nuokritų destrukcijos greitis didėja. Todėl šylant klimatui ir didėjant kritulių kiekiui nuokritų destrukcijos greitis taip pat turėtų didėti, dėl ko į atmosferą turėtų būt išskiriami didesni CO_2 kiekiai prisidedantys prie klimato kaitos tolesnio šiltėjimo. Tai naujos grėsmės skatinantis veiksnys.

Pakartojus tyrimus 2021 m. šalia klimato buvo analizuotas ir N iškritų poveikis nuokritų suirimo laipsniui skirtingose biomose, t.y. globaliose, regioninėse sausumos ekosistemuose su tik jai būdingu klimatu, dirvožemiu ir vyraujančia augalija bei gyvūnija. Tyrimuose dalyvavo Kompleksiško monitoringo stotyse eksponuojami nuokritų pavyzdžiai.

Nuokritų formavimasis yra pagrindinis anglies ir maistinių medžiagų ciklo procesas sausumos ekosistemose, kurį daugiausia kontroliuoja aplinkos sąlygos, substrato kiekis ir kokybė, taip pat mikrobiotos bendrijos gausa ir sudėtis. Ypač svarbus yra klimato ir atmosferos azoto (N) nusėdimo poveikis nuokritų irimui ir jo sezoniniai dinamikai natūralioje aplinkoje, nes jų poveikis gali keistis skaidymo proceso metu. Įgyvendindami „TeaComposition“ iniciatyvą, buvo įvertinta kaip makroklimatas ir atmosferos neorganinio N nusėdimas pagal dabartinius ir prognozuojamus scenarijus (RCP 2.6, RCP 8.5) gali paveikti nuokritų masės mažėjimą, išmatuotą po 3 ir 12 mėnesių. Mūsų bendras tarptautinis tyrimas rodo, kad ankstyvojo ir vidutinės trukmės masės mažėjimą pasauliniu mastu daugiausia lėmė nuokritų kokybė (paaiškinanti atitinkamai 73 % ir 62 % viso nukrypimo po 3 ir 12 mėnesių), po to – klimatas ir

N iškritos. Klimato poveikis nebuvo reikšmingas nuokritų rūšKMS, tačiau tapo vis reikšmingesnis skaidymuisi progresuojant: lėtai įrančių nuokritų destrukcijos intensyvumą paaiškino 2 %, o greitai – 4 % pokyčio po 12 inkubacijos mėnesių. Azoto iškritų slopinantis poveikis buvo būdingas lėto irimo nuokritoms ir reikšmingas tik po 12 mėnesių trunkančio irimo proceso pasauliniu mastu. Tačiau vidutinio klimato biome, kur atmosferos azoto nusėdimo greitis yra gana didelis, greito ir lėto irimo nuokritų masės mažėjimo intensyvumas po 12 mėnesių laikotarpio sumaszėjo, atitinkamai paiškindamas 9,5 % ir 1,1 % dispersijos. Tokiu būdu numatomi atmosferos azoto nusėdimo pokyčiai mūsų platumos borealinėse miško ekosistemose sumažins greitai irančių nuokritų masės nuostolius 1,4–2,2 %, o sunkiai irančių nuokritų – 0,9–1,5 %. Prognozuojamas azoto nusėdimo padidėjimas „gali slopinti klimato sukeltą nuokriitų irimo padidėjimą“, priklausomai nuo biomo ir substrato rūšies ir jo irimo stadijos.

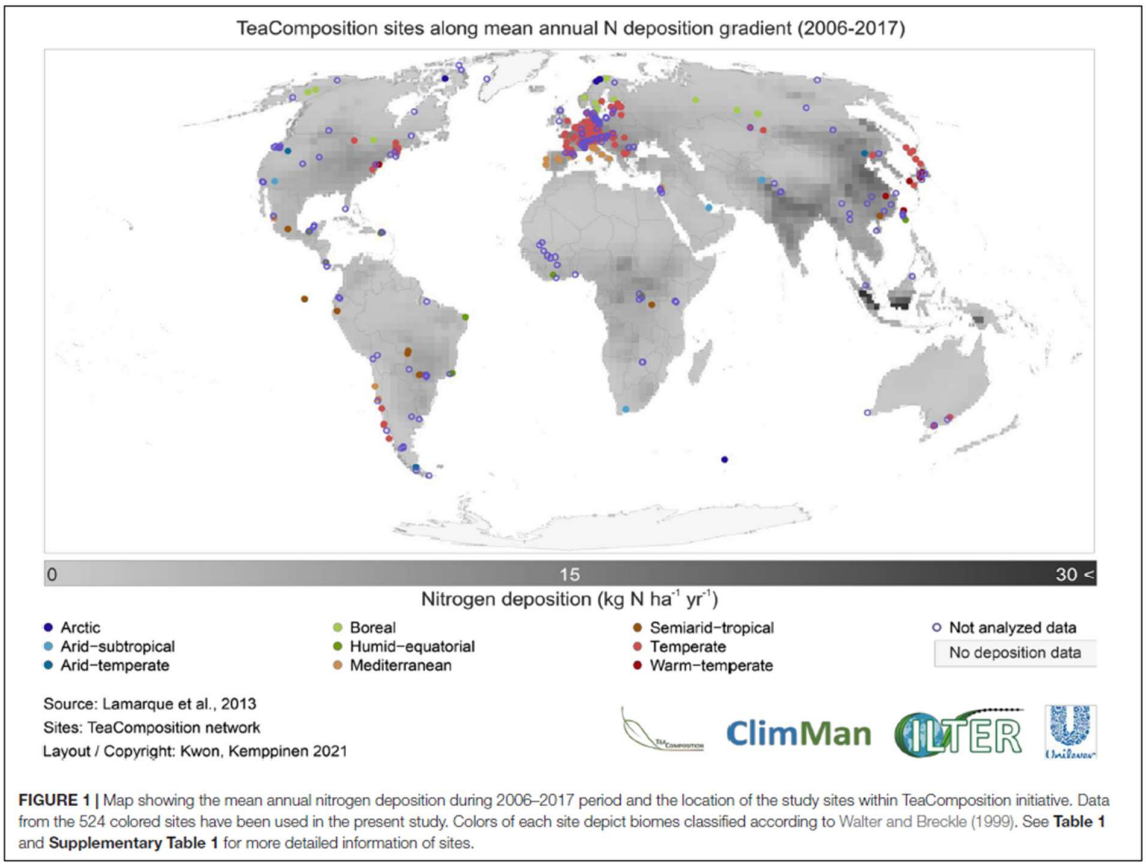


FIGURE 1 | Map showing the mean annual nitrogen deposition during 2006–2017 period and the location of the study sites within TeaComposition initiative. Data from the 524 colored sites have been used in the present study. Colors of each site depict biomes classified according to Walter and Breckle (1999). See **Table 1** and **Supplementary Table 1** for more detailed information of sites.

TaeOh Kwon et al., 2021. Effects of Climate and Atmospheric Nitrogen Deposition on Early to Mid-Term Stage Litter Decomposition Across Biomes. Frontiers in Forests and Global Change, 4: 678480. doi: 10.3389/ffgc.2021.678480.

Gauti rezultatai rodo, kad kokybė ir klimatas yra svarbiausi ankstyvosios ir vidutinės stadijos nuokritų irimo veiksniai. Be to, klimato kaita ir azoto iškritų perteklius gali paspartinti stabilesnio substrato irimą pasauliniu mastu. Tačiau regioniniu mastu būsimas azoto nusėdimas, atrodo, gali sumažinti prognozuojamą klimato kaitos poveikį. Norint tirti nuokritų irimo procesą skirtingu laiku ir skirtingose augavietėse, reikia atsižvelgti į sudėtingą skirtingų parametrų sąveiką. Norėdami geriau suprasti nuokritų irimo dinamiką, rekomenduotina gilinti pagrindines žinias apie paklotės ir miško ekosistemos sąveiką, ypač paklotės cheminės sudėties, dirvožemio fizinių ir cheminių savybių (Wang ir kt., 2019) bei biologinės įvairovės sąveikas bei kompleksišką poveikį irimo procese (Crowther ir kt., 2019).

Be to, vertinant tam tikras biomas, reikia atsižvelgti į sezoninį kritulių ir temperatūros poveikio pobūdį, o ne tik vertinant vidutines metines jų vertes (Currie ir kt., 2010). Taip pat reikia patikimesnių azoto iškritų duomenų, paisžyminčių net ir nedidelėje teritorijoje pakankamai reikšmingu erdviniu ir laiko kintamumu.

Mūsų tyrimas rodo, kad pasauliniai bendradarbiavimo tyrimai, taikant standartinius protokolus yra galingas pasaulinės sintezės metodas, kurio pagalba gauti duomenys prisidės prie nuokritų cheminės sudėties ir dirvožemio biologinės įvairovės tyrimų iniciatyvos (pvz., „Soil BON“, Guerra ir kt., 2021), kurios yra svarbios siekiant išsamiai suprasti nuokritų skaidymąsi klimato kaitos ir didėjančios atmosferos azoto taršos sąlygomis (TaeOh Kwon et al., 2021).

Ilgalaikiai arbatos pakelių įrimo intensyvumo tyrimai parodė, kad sunkiai irančios arbatos segmentai nesuyra net ir per 4 metų laikotarpį, kai tuo tarpu greitai irančios arbatos, po keturių metų laikotarpio jų segmentų jau nerandama. Gauti rezultatai patvirtina ir sausos medienos irimo greičius, pagal kuriuos, sausa mediena miške ir jau nuvirtusi ant žemės pradeda irti tik po 10 metų pertraukos.

Išvados

1. Nuokritų destrukcijos tyrimai Aukštaitijos ir Žemaitijos KMS parodė, kad organinės medžiagos irimo procesus hemiborealiniuose miškuose pirmiausia reguliuoja substrato kokybė. Lengvai skaidomos lapuočių tipo nuokritos mineralizuojasi kelis kartus greičiau negu sunkiai skaidomos spygliuočių nuokritos, todėl medynų rūšinė sudėtis tampa vienu svarbiausių veiksnių, lemiančių anglies ir maisto medžiagų ciklo greitį.
2. Greitai irstančių nuokritų destrukcija intensyviausiai vyksta pradiniame irimo etape, kai per trumpą laikotarpį prarandama didžioji dalis lengvai prieinamų organinių junginių. Vėlesnėse stadijose irimo greitis reikšmingai sulėtėja, nes likusią organinės medžiagos dalį sudaro stabilesni ir sunkiau mikroorganizmų skaidomi junginiai.

3. Spygliuočių tipo, sunkiau skaidomų nuokritų irimo procesas yra žymiai ilgesnis ir jautresnis aplinkos sąlygoms. Tai rodo, kad pušynų ir eglynų ekosistemos turi didesnį potencialą ilgiau išlaikyti anglį miško paklotėje, tačiau kartu jose lėčiau vyksta maisto elementų grąžinimas į aktyvią biologinę apytaką.
4. Augavietės drėgmės režimas yra vienas pagrindinių veiksnių, reguliuojančių nuokritų destrukcijos intensyvumą. Didesnis dirvožemio drėgnumas skatino organinės medžiagos irimą, ypač sunkiau skaidomų substratų atveju, todėl klimato kaitos sąlygomis kintantis kritulių režimas gali reikšmingai pakeisti anglies balansą miško ekosistemose.
5. Tyrimų rezultatai rodo, kad klimato šiltėjimas kartu su didėjančiu drėgmės prieinamumu gali spartinti nuokritų mineralizaciją ir maisto medžiagų apytaką. Tačiau spartesnė destrukcija kartu gali sumažinti organinės anglies kaupimąsi miško paklotėje ir padidinti CO_2 išsiskyrimą į atmosferą, sukurdama galimą teigiamą klimato kaitos grįžtamąjį ryšį.
6. Žemaitijos ir Aukštaitijos KMS skirtumai rodo, kad regioniniai klimato ir augaviečių ypatumai gali keisti destrukcijos procesų intensyvumą, tačiau ilgalaikėje perspektyvoje substrato cheminė sudėtis išlieka svarbesnis veiksnys negu vien tik augavietės sąlygos.
7. Tarptautinio „TeaComposition“ eksperimento rezultatai patvirtino, kad pasauliniu mastu nuokritų irimo intensyvumą daugiausia lemia substrato savybės, o klimato ir atmosferinės azoto depozicijos poveikis stiprėja vėlesnėse irimo stadijose. Tai rodo, kad klimato kaitos poveikis miško anglies ciklui priklausys ne tik nuo temperatūros pokyčių, bet ir nuo organinės medžiagos kokybės.
8. Atmosferinio azoto poveikis nuokritų destrukcijai nėra vienakryptis. Didėjanti azoto depozicija gali skatinti lengvai skaidomų junginių irimą, tačiau kartu slopinti stabilesnių organinių junginių skaidymąsi, todėl gali keisti anglies kaupimosi ir mineralizacijos pusiausvyrą dirvožemyje.
9. KMS rezultatai rodo, kad dėl klimato kaitos spartėjanti organinės medžiagos apytaka gali tapti nauju hemiborealinių miškų funkcionavimo iššūkiu. Didėjant produktyvumui ir nuokritų kiekiui, spartesnė jų destrukcija gali sumažinti ilgalaikį anglies kaupimo potencialą dirvožemyje.
10. Ilgalaikiai nuokritų destrukcijos tyrimai patvirtino, kad miško paklotė yra aktyvus klimato kaitos reguliavimo komponentas, o ne tik organinės medžiagos kaupimosi sluoksnis. Jos vaidmuo ateityje priklausys nuo trijų pagrindinių veiksnių sąveikos: nuokritų kiekio ir kokybės, hidroterminių sąlygų bei atmosferinės azoto apkrovos.

Literatūra

Wang, B., Blondeel, H., Baeten, L., Djukic, I., De Lombaerde, E., and Verheyen, K. (2019). Direct and understorey-mediated indirect effects of human-induced environmental changes on litter decomposition in temperate forest. Soil Biol. Biochem. 138:107579. doi: 10.1016/j.soilbio.2019.107579

Crowther, T. W., Van den Hoogen, J., Wan, J., Mayes, M. A., Keiser, A. D., Mo, L., et al. (2019). The global soil community and its influence on biogeochemistry. Science 365:550. doi: 10.1126/science.aav0550

Currie, W. S., Harmon, M. E., Burke, I. C., Hart, S. C., Parton, W. J., and Silver, W. (2010). Cross□biome transplants of plant litter show decomposition models extend to a broader climatic range but lose predictability at the decadal time scale. Glob. Chang. Biol. 16, 1744–1761. doi: 10.1111/j.1365-2486.2009.02086.x

Guerra, C. A., Bardgett, R. D., Caon, L., Crowther, T. W., Delgado-Baquerizo, M., Montanarella, L., et al. (2021). Tracking, targeting, and conserving soil biodiversity. Science 371, 239–241. doi: 10.1126/science.abd7926.

6.3.4. Pagrindinių maistinių komponenčių sudėties nuokritose kaita Aukštaitijos KM stotyje

Aukštaitijos KMS nuokritose tirtų maistinių elementų kaitai įtakos turėjo ir sezoniškumas, ir nuokritų struktūros ypatumai. Bendrojo azoto ir fosforo koncentracijų kaitoje išsiskiria laikotarpis, kada šių elementų koncentracijos nuokritose didžiausios, tai pavasario mėnesiai, kada nuokritose pradeda vyrauti ne lapija ar žievė, o pumpurų ir stabilų žvyneliai. Mažiausios N ir P koncentracijos nuokritose registruojamos rudens mėnesiais, kada krenta trečių metų pušies spygliai ir beržų lapai. Per žiemos mėnesius lietus ir sniegas, matyt, išplauna šiuos elementus iš spyglių ir lapų, dėl ko koncentracijos šių elementų nuokritose taip pat vienos iš mažiausių.

Per tiriamąjį laikotarpį iki 2020 m. ***bendrojo azoto kiekis nuokritose turėjo tendenciją didėti po 0,093 mg/g, dabar (įskaitant 2021-2025 m.) didėja jau po 0,08 mg/g per m. N didėjo praktiškai visais metų laikais. N koncentracijų kaita nuokritose yra reikšminga.***

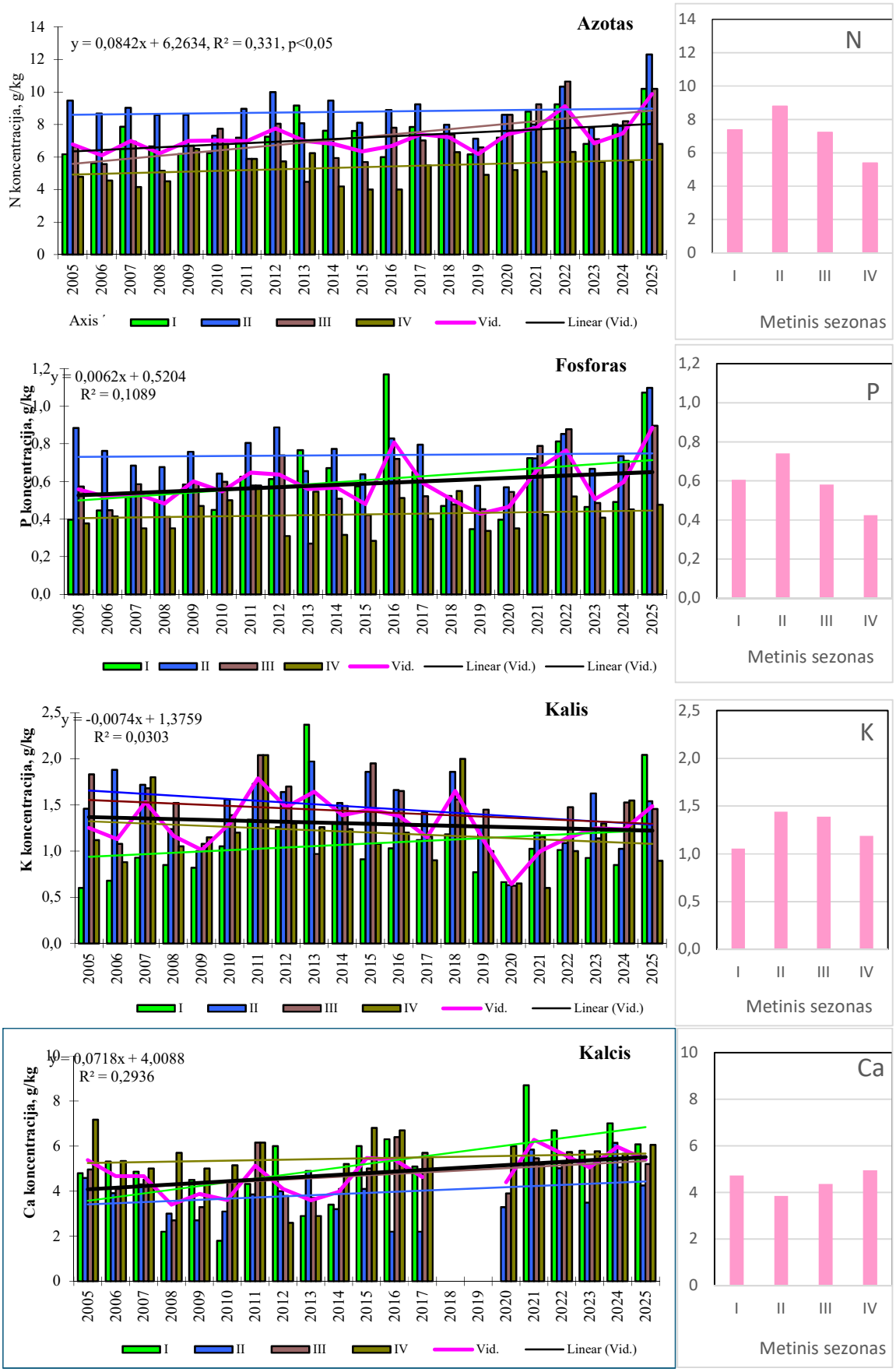
2016-2017 m. šio elemento koncentracijos nuokritose turėjo tendenciją didėti, dėl padidėjusio šio elemento kiekio lapijoje pasibaigus nepalankiam laikotarpiui, t.y. 2015 m. sausrai. 2018 m. sausra galėjo turėti reikšmingos įtakos N koncentracijoms nuokritose ženkliai sumažėti. 2019 m. tyrimų rezultatai patvirtino iškeltą hipotezę, kad sausros turi reikšmingos įtakos N koncentracijoms nuokritose mažėti ir pasiekė savo mažiausias reikšmes per visą tiriamąjį laikotarpį, t.y. vidutiniškai N koncentracija nuokritose sumažėjo iki 6,19 g/kg. 2020 m. N koncentracija nuokritose lyginant su 2019 m. padidėjo praktiškai visais sezonais ir vidutiniškai pakilo iki 7,4g/kg

2021-2025 m. N koncentracija nuokritose pasiekė savo maksimalią reikšmę (2025 m.), vidutiniškai siekdama 10g/kg ribą.

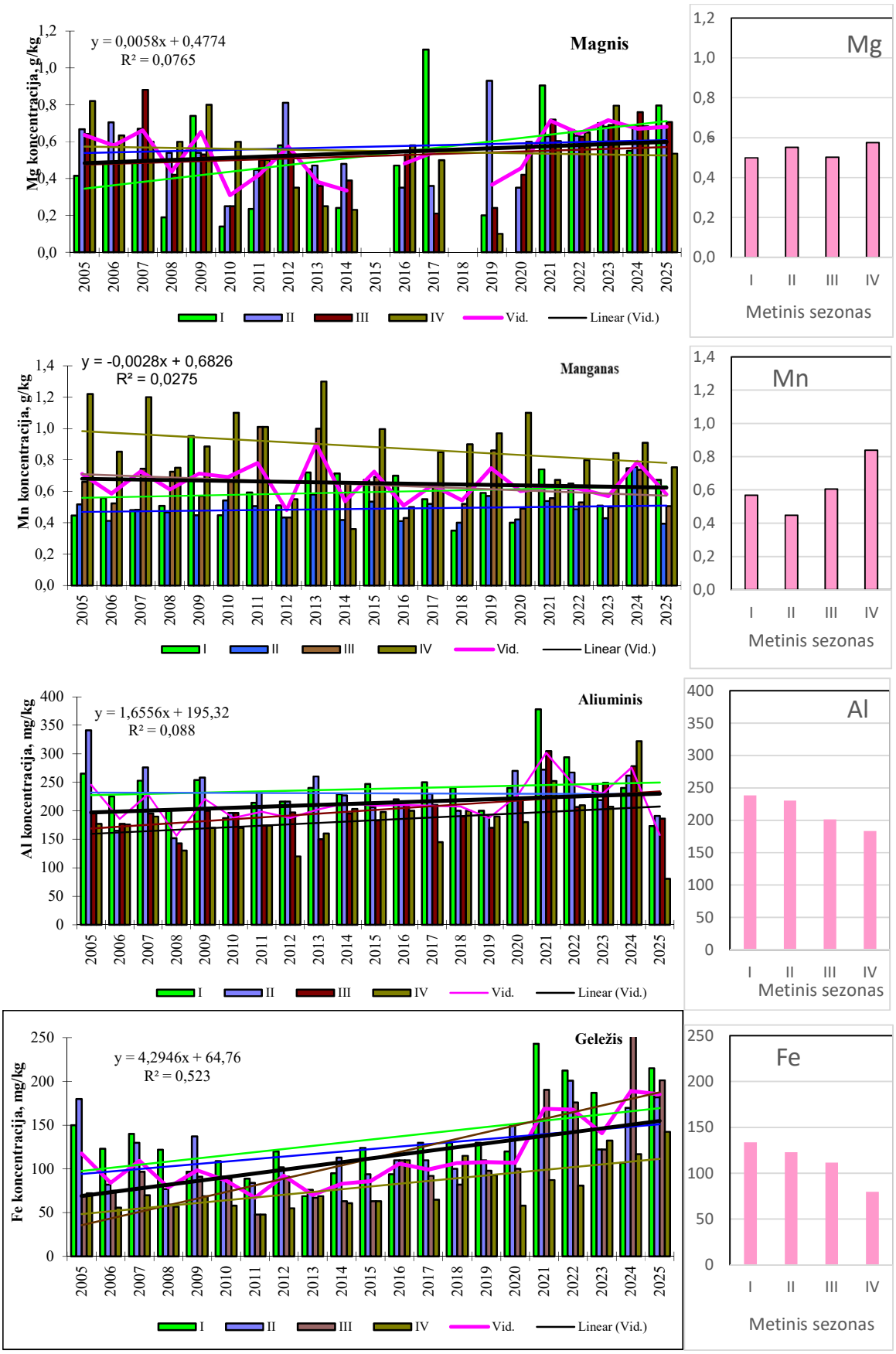
Bendrojo fosforo kiekis nuokritose per tiriamąjį laikotarpį, kaip ir lapijoje dabartiniu laikotarpiu, taip pat didėjo po 0,006 g/kg per m. Išsiskiria 2016 m., kai P koncentracijos nuokritose pasiekė savo didžiausią reikšmę per visą tiriamąjį laikotarpį ir ypač nuokritose surinktose per šaltąjį laikotarpį (I) (6.13 pav.).

2021-2025 m. pasižymėjo padidintomis P koncentracijomis nuokritose, o 2025 m. P koncentracija, kaip ir N, pasiekė didžiausią reikšmę – apie 0,9 g/kg.

6.27 pav. Pagrindinių maistinių komponenčių koncentracijų nuokritose kaita 2005-2025 m. Aukštaitijos KMS



6.28 pav. Pagrindinių makroelementų kiekių nuokritose kaita Aukštaitijos KMS



6.29 pav. Pagrindinių makroelementų kiekių nuokritose kaita Aukštaitijos KMS

6.5 lentelė. Tirtų elementų nuokritose kaitos 2005-2020 m. laikotarpiu reikšmingumas (p) ir intensyvumas (kaita per metus)

Laikotarpis	Mean	Std.Er.	Std.Dev	r(X,Y)	r^2	p	Kaita per m.
I	7,380	0,264	1,209	0.554	0.307	0.009	0.108
II	8,784	0,251	1,150	0.103	0.107	0.656	0.019
III	7,217	0,346	1,585	0.642	0.412	0.002	0.164
IV	5,376	0,202	0,928	0.306	0.093	0.178	0.046
Iš viso N	7,189	0,198	0,908	0.645	0.416	0.003	0.093
I	0,607	0,046	0,213	0.314	0.099	0.166	0.011
II	0,740	0,029	0,131	0.046	0.002	0.844	0.001
III	0,581	0,035	0,159	0.425	0.181	0.055	0.011
IV	0,425	0,019	0,088	0.145	0.021	0.532	0.002
Iš viso P	0,588	0,025	0,116	0.330	0.109	0.144	0.006
I	5,099	0,412	1,747	0.606	0.367	0.007	0.163
II	3,900	0,251	1,094	0.298	0.089	0.215	0.051
III	4,675	0,222	0,968	0.423	0.179	0.071	0.064
IV	5,451	0,260	1,133	0.119	0.014	0.627	0.021
Iš viso Ca	4,772	0,195	0,851	0.550	0.302	0.017	0.072
I	1,083	0,094	0,429	0.207	0.043	0.366	0.014
II	1,471	0,076	0,346	0.333	0.111	0.139	-0.019
III	1,425	0,075	0,344	0.233	0.054	0.309	-0.013
IV	1,201	0,083	0,383	0.199	0.039	0.388	-0.012
Iš viso K	1,286	0,060	0,260	0.174	0.030	0.451	-0.007
I	0,596	0,031	0,143	0.161	0.025	0.486	0.004
II	0,488	0,018	0,085	0.145	0.021	0.530	0.002
III	0,640	0,036	0,165	0.255	0.065	0.264	-0.007
IV	0,882	0,052	0,239	0.263	0.069	0.248	-0.010
Iš viso Mn	0,652	0,023	0,105	0.165	0.027	0.472	-0.003
I	0,520	0,063	0,266	0.453	0.205	0.059	0.018
II	0,573	0,040	0,175	0.129	0.017	0.597	0.003
III	0,522	0,043	0,187	0.168	0.028	0.493	0.005
IV	0,549	0,045	0,195	0.081	0.006	0.743	-0.002
Iš viso Mg	0,540	0,031	0,136	0.276	0.076	0.252	0.006
I	133,67	9,85	45,12	0.494	0.244	0.023	3.593
II	122,67	8,16	37,38	0.470	0.221	0.031	2.833
III	111,71	15,51	71,09	0.663	0.439	0.001	7.596
IV	79,95	6,05	27,71	0.707	0.499	0.001	3.157
Iš viso Fe	112,00	8,04	36,85	0.723	0.523	0.001	4.295
I	238,60	9,20	42,16	0.163	0.026	0.482	1.104
II	230,49	9,60	43,98	0.021	0.001	0.927	-0.150
III	201,53	8,24	37,77	0.536	0.287	0.012	3.262
IV	183,51	10,51	48,17	0.310	0.096	0.172	2.407
Iš viso Al	213,53	7,56	34,62	0.297	0.088	0.192	1.656

Ieškant veiksnius galinčius sąlygoti tokį procesą, reiktų atkreipti dėmesį į nustatytus laikotarpius, šių elementų koncentracijas krituliuose bei klimatinių rodiklių kaitą. Viena iš priežasčių galėtų būti ir bepasikartojančios sausros.

Per tiriamąjį laikotarpį iki 2020 m. vidutinė ***kalcio koncentracija nuokritose turėjo pakankamai aiškią tendenciją mažėti (po -0,115 g/kg per m.) ir ypač rudens nuokritose (po -0,254 g/kg per m.). 2021-2025 m. tyrimo rezultatai rodo padidėjusias Ca koncentracijas nuokritose dėl ko jo bendra tendencija per visą tiriamąjį laikotarpį pasikeitė. Ca koncentracijos nuokritose palaipsniui didėja po 0,07 g/kg ir artėja prie reikšmingo lygmens.***

Nuo 2013 iki 2016 m. Ca koncentracijos nuokritose išaugo nuo 3,6 g/kg iki virš 6 g/kg. ***Didžiausios Ca koncentracijos nustatytos 2015-2016 m. laikotarpiu. 2025 m. Ca koncentracijos buvo arti savo maksimalios reikšmės, t.y. apie 5 g/kg.***

Kalio koncentracijoms nuokritose išaiškinta mažėjimo tendencija (po 0,007 g/kg per m.. Intensyviausiai šio elemento mažėja vegetacijos laikotarpio nuokritose. Kritulių stoka galėjo sąlygoti K jonų mažesnį išplovimą iš negyvųjų organų, dėl ko K koncentracijos nuokritose 2018 – 2019 m. didėjo. Gausūs krituliai žiemos ir pavasario laikotarpiu galėjo turėti reikšmingos įtakos K koncentracijų sumažėjimui 2020 m., kai šio elemento vidutinė koncentracija nuokritose pasiekė 1,39 g/kg. 2021-2025 m. registruojamas palaipsnis K koncentracijų nuokritose augimas nuo maždaug 0,7 g/kg 2020 m. iki 1,5 g/kg 2025.

Per tiriamąjį laikotarpį labai panašiai kito Mn ir Mg koncentracijos nuokritose. Mg kaip ir Ca koncentracija nuokritose didėjo po 0,006 g/kg, o Mn kaip ir K mažėjo po -0,003 gt/kg Tačiau skirtingai nuo ankstesnių metalų koncentracijų kaitos, šios kaitos intensyvumas nebuvo abiems atvejais reikšmingas.

Per tiriamąjį laikotarpį Fe ir Al koncentracijos nuokritose turėjo tendencijas didėti ir ypač vasaros pabaigos ir rudens laikotarpio nuokritose. Al kaitos intensyvumas bendrai 1,66 ir buvo nereikšmingas, o Fe viršijo net 4 mg/kg ir buvo reikšmingas, dėl ypač didelių koncentracijų 2021-2025 m. laikotarpiu.

2018-2019 m. sausros turėjo reikšmingos įtakos Zn ir Na koncentracijoms nuokritose mažėti, o palankiais 2020 m. šių elementų koncentracijos nuokritose vėl padidėjo ir pasiekė 2017 m. lygmenį. 2021-2025 m. registruojamas šių elementų padidėjimas Aukštaitijos KMS nuokritose.

Apibendrinant galima teigti, kad Aukštaitijos KMS nuokritų cheminės sudėties pokyčiai rodo spartėjančią vidinę elementų apytaką. Mažėjant atmosferinės taršos poveikiui, pagrindinį vaidmenį pradeda atlikti biologiniai procesai – lajų produktyvumas, elementų retranslokacija ir klimato sąlygojamas jų išplovimas.

Paskutiniuoju laikotarpiu nustatytas N, P, Ca ir Fe koncentracijų didėjimas kartu su didėjančiu nuokritų kiekiu rodo intensyvėjantį maisto medžiagų grįžimą į dirvožemį ir didėjantį ekosistemos produktyvumą. Tačiau K ir Mn mažėjimas bei Fe ir Al kaupimasis gali būti pirmieji požymiai, kad spartėjanti biologinė apykaita keičia ilgalaikį elementų balansą.

Todėl Aukštaitijos KMS pušynų sistema šiuo metu pereina nuo taršos mažėjimo sąlygoto atsistatymo etapo į naują klimato reguliuojamą vystymosi etapą, kuriame pagrindiniu stabilumo veiksniu tampa gebėjimas palaikyti subalansuotą anglies ir mineralinių elementų ciklą.

6.3.5. Pagrindinių maistinių komponenčių sudėties nuokritose kaita Žemaitijos KM stotyje

Žemaitijos KMS nuokritų cheminė analizė parodė, kad bendrojo azoto ir fosforo koncentracijų kaitai esminės įtakos, kaip ir Aukštaitijos KMS, turėjo nuokritų sezoniškumas, tačiau skirtingai nei Aukštaitijos KMS, didžiausios bendrojo azoto ir fosforo koncentracijos stebimos pavasario (II) ir vasaros (III) mėnesiais, kiek mažesnės žiemos (I) ir mažiausios vėlyvo rudens (IV) mėnesiais (6.12 pav.).

Per tiriamąjį laikotarpį bendrojo azoto ir kalio koncentracijos nuokritose turėjo skirtingas tendencija. Nuo tyrimų pradžios iki 2012-2014 m. šių elementų koncentracijos nuokritose turėjo tendenciją didėti ir jau paminėtais metais pasiekė savo maksimalias reikšmes. Vėliau, 2016-2017 m. didelės koncentracijos dar kartą kartojosi, o paskutiniuoju laikotarpiu išliko artis savo maksimalios vertės, t.y. N – apie 10 g/kg. Tokiu būdu per visą tiriamąjį laikotarpį bendrojo azoto koncentracijos nuokritose didėjo po 0,023 g/kg per m., ir ši didėjimo tendencija, skirtingai nei iki 2020 m., išliko per visus metus.

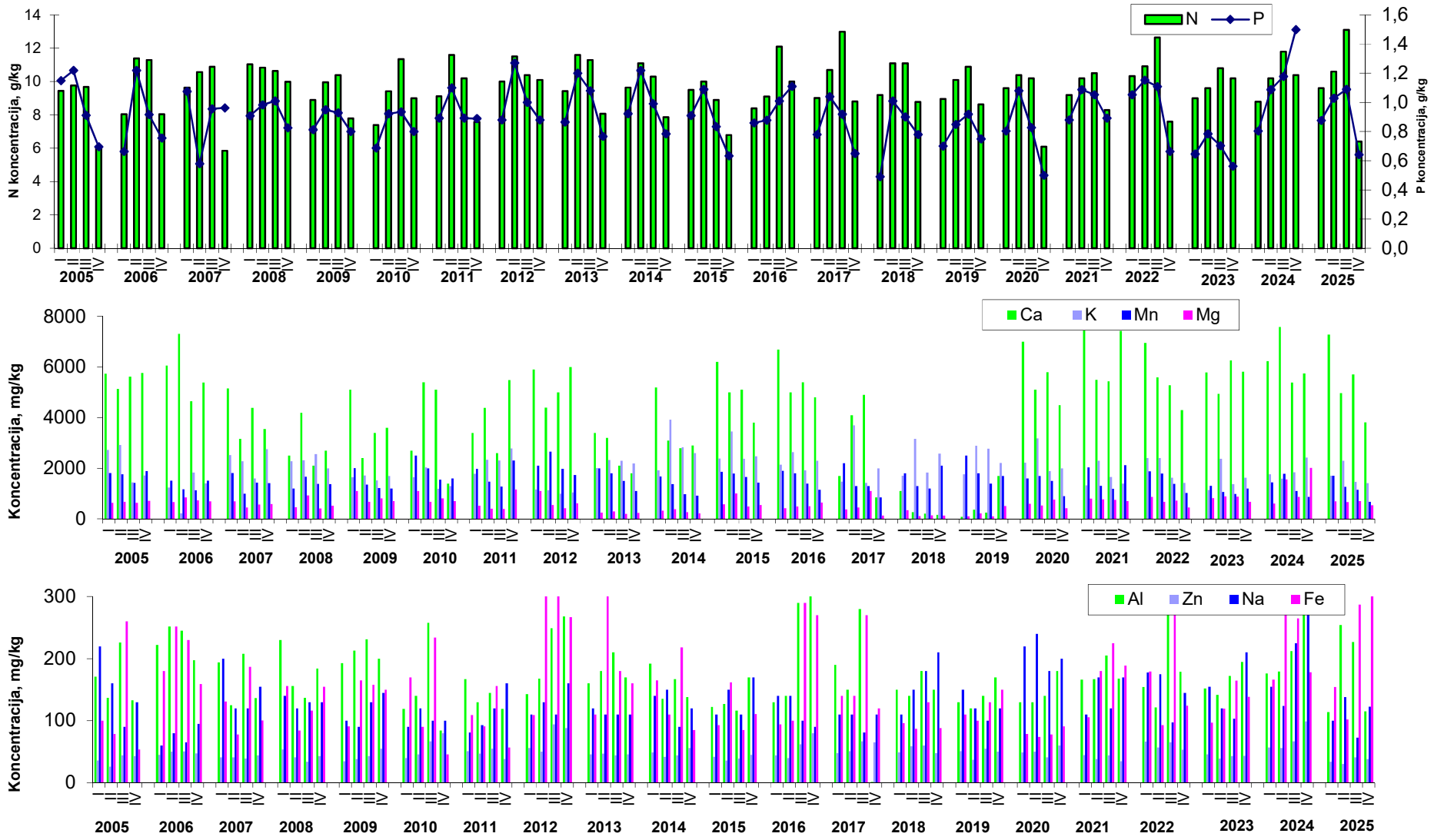
P kaitoje aiškesnės tendencijos nenustatyta. Per visą tiriamąjį laikotarpį P koncentracija nuokritose mažėja po -0,002 g/kg ir ši tendencija yra nereikšminga.

2015-2019 ir 2023 m. stebimas ženklus P koncentracijų nuokritose mažėjimas iki beveik 0,6 g/kg, o jau paskutiniaisiais metais koncentracijos vėl padidėjo ir 2024 m. pasiekė maksimalią reikšmę – apie 12 g/kg.

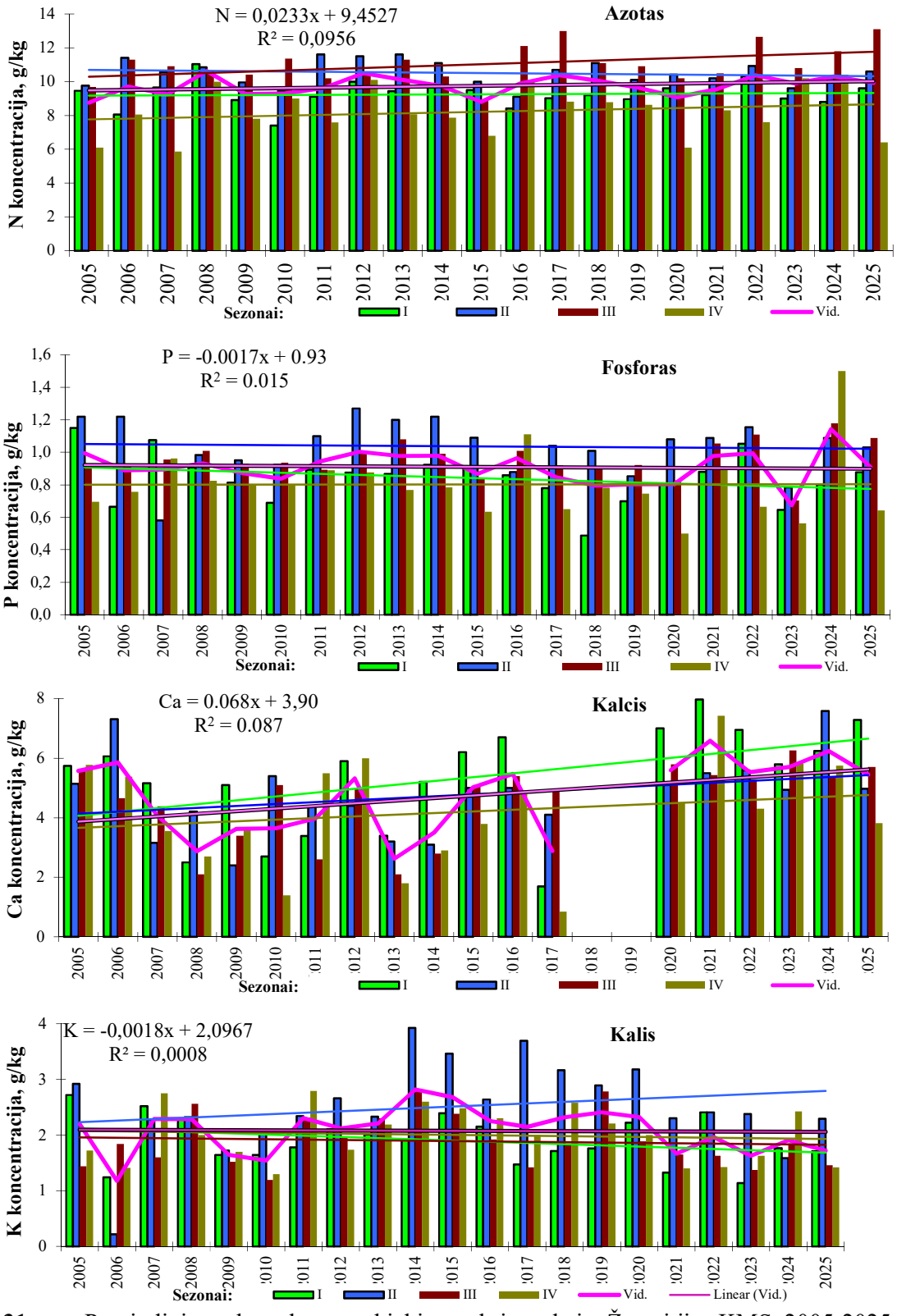
K koncentracijų daugiametėje iki 2020 m. kaitoje akivaizdi buvo šio elemento didėjimo tendencija praktiškai visus metus. Intensyviausiai didėjo šio elemento vegetacijos pradžios nuokritose, net po 0,12 g/kg per m. ir ši kaita buvo reikšminga. Po 0,03 g/kg per m. didėjo K koncentracijos ir vasaros bei rudens laikotarpiu nors ir nereikšmingai. Tokia sezoninė koncentracijų kaita sąlygojo, kad vidutiniškai K koncentracija nuokritose per šį tiriamąjį laikotarpį didėja po 0,042 g/kg per m. ir ši kaita yra beveik reikšminga (4.6 lentelė).

6.6 lentelė. Tirtų elementų nuokritose kaitos 2005-2020 m. laikotarpiu reikšmingumas (p) ir intensyvumas (kaita per metus) Žemaitijos KMS.

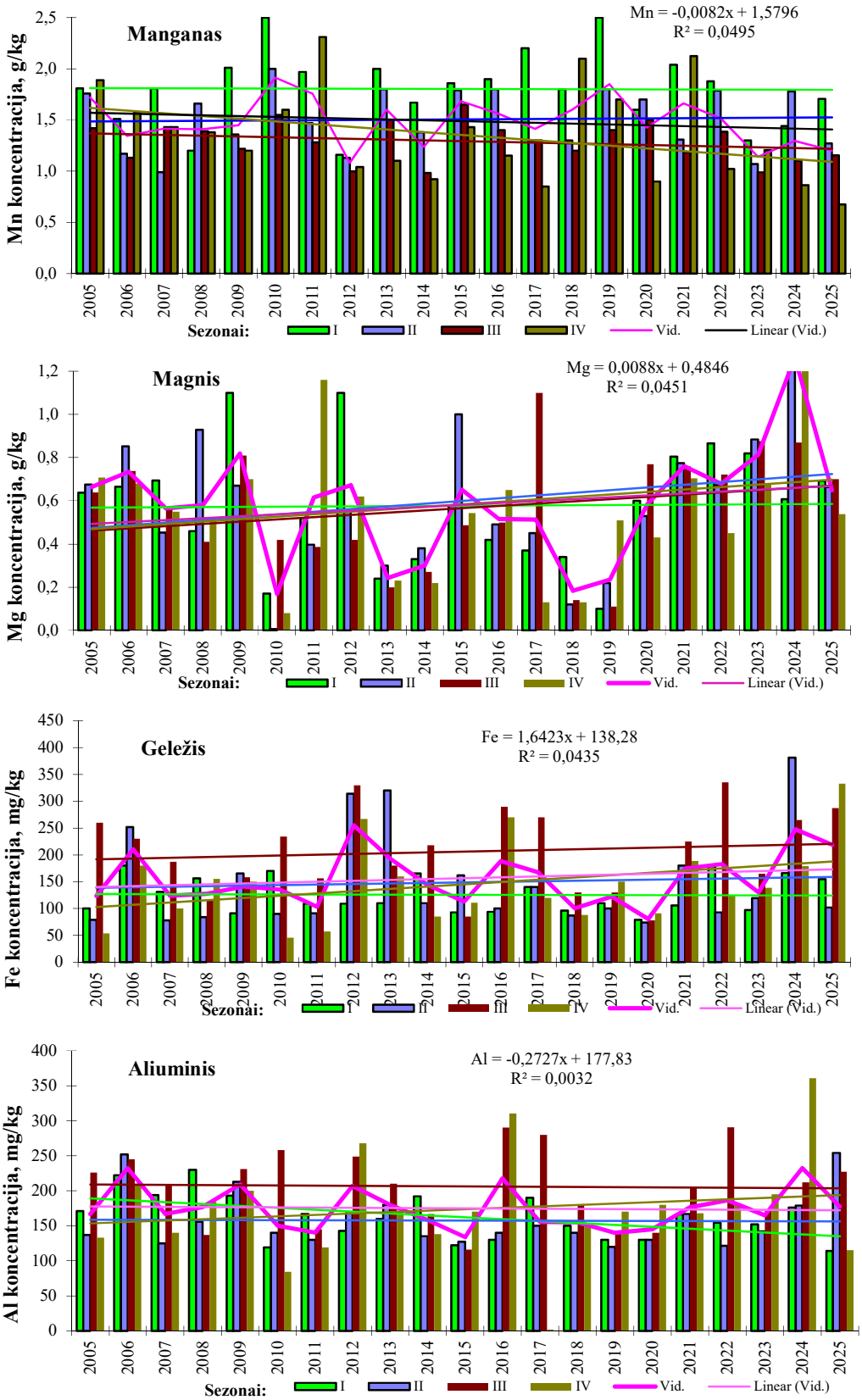
Laikotarpis	Mean	Std.Er.	Std.Dev	r(X,Y)	r^2	p	Kaita per m.
I	9,250	0,167	0,766	0,062	0,004	0,790	0,008
II	10,509	0,159	0,730	0,158	0,025	0,492	-0,019
III	11,024	0,231	1,057	0,434	0,188	0,049	0,074
IV	8,212	0,312	1,432	0,194	0,038	0,399	0,044
Iš viso N	9,738	0,129	0,564	0,309	0,095	0,172	0,027
I	0,841	0,033	0,152	0,270	0,073	0,237	-0,007
II	1,036	0,037	0,168	0,052	0,003	0,822	-0,001
III	0,960	0,024	0,108	0,189	0,037	0,413	0,003
IV	0,802	0,046	0,211	0,004	0,000	0,985	0,000
Iš viso P	0,910	0,022	0,100	0,071	0,005	0,759	-0,001
I	5,316	0,407	1,773	0,469	0,219	0,043	0,129
II	4,762	0,301	1,310	0,318	0,101	0,185	0,065
III	4,582	0,301	1,310	0,496	0,246	0,031	0,101
IV	4,193	0,399	1,740	0,203	0,041	0,404	0,055
Iš viso Ca	4,713	0,285	1,241	0,454	0,206	0,051	0,088
I	1,900	0,094	0,431	0,312	0,097	0,168	-0,022
II	2,511	0,174	0,797	0,219	0,048	0,339	0,028
III	1,892	0,103	0,471	0,086	0,007	0,712	-0,006
IV	2,003	0,106	0,485	0,095	0,009	0,683	-0,007
Iš viso K	2,046	0,093	0,407	0,078	0,006	0,749	-0,005
I	1,803	0,079	0,363	0,015	0,001	0,949	-0,001
II	1,506	0,065	0,299	0,042	0,002	0,858	0,002
III	1,293	0,042	0,193	0,244	0,060	0,285	-0,008
IV	1,355	0,101	0,463	0,353	0,124	0,117	-0,026
Iš viso Mn	1,489	0,050	0,229	0,222	0,049	0,333	-0,008
I	0,577	0,060	0,273	0,019	0,000	0,933	0,001
II	0,599	0,075	0,344	0,226	0,051	0,325	0,013
III	0,566	0,058	0,266	0,243	0,059	0,287	0,010
IV	0,583	0,091	0,415	0,171	0,029	0,458	0,011
Iš viso Mg	0,581	0,056	0,257	0,212	0,045	0,355	0,009
I	125,50	7,26	33,29	0,025	0,001	0,916	-0,132
II	148,65	19,84	90,94	0,069	0,005	0,765	1,016
III	206,11	16,63	76,22	0,117	0,014	0,614	1,437
IV	145,12	16,21	74,28	0,355	0,126	0,114	4,248
Iš viso Fe	156,35	10,66	48,85	0,209	0,044	0,364	1,642
I	162,15	7,19	32,94	0,511	0,261	0,018	-2,711
II	157,45	8,57	39,27	0,020	0,001	0,931	-0,127
III	206,12	11,54	52,88	0,032	0,001	0,890	-0,273
IV	173,60	16,47	75,48	0,166	0,028	0,472	2,021
Iš viso Al	174,83	6,48	29,70	0,057	0,003	0,806	-0,273



6.30 pav. Pagrindinių maistinių komponenčių koncentracija nuokritose kaita 2005-2025 m. Žemaitijos KMS



6.31 pav. Pagrindinių makro-elementų kiekių nuokritose kaita Žemaitijos KMS, 2005-2025 m.



6.32 pav. Pagrindinių makro-elementų kiekių nuokritose kaita Žemaitijos KMS, 2005-2025 m.

2021-2025 m. tyrimo rezultatai reikšmingai pakeitė šią nusistovėjusią tendenciją. Per visą31 m. tiriamąjį laikotarpį K koncentracijos nuokritose nors ir nereikšmingai bet pradėjo mažėti po 0,002 g/kg per m. Didėjimo tendencija išliko tik pavasario mėn. nuokritose, tačiau tik dėl didelių šio elemento koncentracijų 2014-2020 m. laikotarpiu. Paskutiniaisiais metais K koncentracijos reikšmingai mažėja ir šio laikotarpio nuokritose. Galima grėsmė ekosistemoms – reikšmingas K koncentracijų mažėjimas nuokritose 2020-2025 m. laikotarpiu.

Ankstesnių tyrimų rezultatai parodė, kad sausros ar nepakankamas kritulių kiekis atrodo, kad turi įtakos šio elemento gausai nuokritose, dėl sumažėjusio jo išplovimo iš organinio substrato. 2020 m. padidėjus kritulių kiekiui, K koncentracija nuokritose sumažėjo iki 2,32 g/kg, kaip ir buvo sumažėjusi 2017 m. iki 2,1 g/kg. Kokią įtaką turi K srautai su krituliais bus galima įvertinti gavus detalia šio elemento kaitos ore ir krituliuose ataskaitą iš Fizikos instituto mokslininkų.

Kalcio koncentracijų kaitoje sezoniškumo poveikio nustatyti nepavyko, tačiau ***per tiriamąjį laikotarpį iki 2020 m., analogiškai kaip ir Aukštaitijos KMS, nustatyta šio elemento koncentracijų reikšmingas panašaus intensyvumo mažėjimas*** visais metų laikais (po -0,18 -0,23 g/kg per m.) (6.15 pav. ir 6.6 lentelė). Vienos didžiausių šio elemento koncentracijų nustatyta buvo 2016 m. Intensyviu išplovimu 2017 m. būtų galima aiškinti Ca sumažėjimą nuokritose 2017m. Jei ***2018 m. Ca koncentracijų nustatymo patikimumas kėlė abejonių, tai 2019 m. Ca koncentracijos vėl nustatytos vienos iš mažiausių per visą tiriamąjį laikotarpį.***

Analogiškai K koncentracijų kaitos atveju, Ca koncentracijos paskutiniuoju 20020-2025 m. laikotarpiu reikšmingai padidėjo. Dabar, įskaitant ir šį laikotarpį, Ca koncentracijos nuokritose vidutiniškai didėja po 0,07 g/kg per m.ir didžiausios koncentracijos nustatytos žiemos menesių nuokritose, kurios Žemaitijos KMS baseine dėl smulkių šakučių gausos juose siekia maksimalius kiekius.

Žemaitijos KMS nuokritose iki 2020 m. mažėjo Mg tačiau didėjo Mn koncentracijos praktiškai ištisus metus. Būtent Mn koncentracija nuokritose lemia kritulių kiekis, dėl ko 2017 ir 2020 m. Mn koncentracijos nuokritose buvo mažesnės už 1,5 g/kg, o sausros metais jos viršydavo 1,6-1,8 g/kg. 2020 m. šių elementų nuokritose sumažėjo: Mg iki 1,42 g/kg, o Mn iki 1,4. Tokia priklausomybė nuo kritulių galėjo sąlygoti nereikšmingą nei sezoninę nei daugiametę kaitą.

2020-2025 m. nustatytos koncentracijos pakeitė šį dėsningumą. Kaip ir Aukštaitijos KMS nuokritose pastaruoju laiku mažėja Mn koncentracijos po 0,008 g/kg per m., o Mg didėja po 0,008 g/kg per m. Tai paskutiniųjų etų tyrimo rezultatų išdavą, kuriai reikšmingos įtakos turėjo turėti ir šių elementų srautai su krituliais.

Per tiriamąjį laikotarpį iki 2020 m. Fe ir Al koncentracijos nuokritose, turėjo tendenciją mažėti. Šių elementų mažėjimo intensyvumas buvo panašus ir sudarė po -2,0 ir 2,7 mg/kg per metus, nors ši kaita buvo nereikšminga. Paskutinysis 2020-2025 m. laikotarpis pakeitė Fe koncentracijų kaitos pobūdį, kuris tapo teigiamas, t.y. per visą tiriamąjį laikotarpį Fe koncentracijos nuokritose pradėjo didėti po 1,6 mg/kg per m. ir šis koncentracijos didėjimas tęsėsi per visą metų sezoną. Al koncentracijos dabartiniu laikotarpiu mažėja po -0,27 mg/kg per m. Šių elementų kaitą Žemaitijos KMS baseine yra nereikšminga.

Zn koncentracijos per visą tiriamąjį laikotarpį praktiškai išlieka panašiame lygmenyje, 2020 m. jo koncentracija pasiliko apie 50 mg/kg lygmenyje, kai tuo tarpu Na koncentracijoje nustatytas ryškus padidėjimas iki 210 mg/kg. Tai didžiausia reikšmė per visą tiriamąjį laikotarpį ir ji turėtų būt siejama su Baltijos jūros įtaka ir vyraujančių vėjų kryptimi. 2025 m. Xn koncentracijos reikšmingai nepakito, o Na kiek tai mažėjo ypač 2023 m.

Išskirtinis nuokritų cheminės analizės rezultatų bruožas - daugeliu atveju sausra sąlygojo tirtų elementų didėjimo procesą, dėl jų sumažėjusio išplovimo krituliais ir priešingai, gausūs krituliai išplaudavo elementus, dėl ko jų koncentracijos nuokritose turėjo tendenciją mažėti.

Apibendrinant galima teigti, kad Žemaitijos KMS nuokritų cheminė sudėtis rodo intensyvią, tačiau vis labiau persitvarkančią vidinę maisto elementų apytaką. Didėjantis N ir Ca grąžinimas su nuokritomis gali palaikyti dirvožemio biologinį aktyvumą, tačiau kartu gali rodyti mažėjantį šių elementų išsaugojimą medžių audiniuose. Paskutiniuoju laikotarpiu ryškėjantis K koncentracijų mažėjimas yra svarbiausias galimos mineralinės mitybos ir atsparumo sausroms silpnėjimo signalas.

Žemaitijos KMS elementų grįžimas į dirvožemį pasiskirsto tarp dviejų pagrindinių kelių – nuokritų ir polajinių kritulių. Dėl intensyvaus elementų išplovimo iš tankių eglių lajų dalis K, Ca, Mg ir Na patenka į dirvožemį dar prieš organų nukritimą. Todėl bendram biogeocheminiam balansui įvertinti būtina sumuoti abiejų kelių srautus, o ne remtis vien koncentracijomis nuokritose.

Bendrai Žemaitijos KMS duomenys rodo ne paprastą elementų ciklo intensyvėjimą, bet jo struktūros pasikeitimą: mažėja K reikšmė nuokritų sraute, didėja N, Ca ir Fe kiekis, o mobilių elementų koncentracijos tampa vis labiau priklausomos nuo kritulių režimo. Toks persitvarkymas gali atspindėti didėjantį eglynų fiziologinį ir hidrologinį jautrumą klimato ekstremumams.

6.3.6. Pagrindinių maistinių elementų koncentracijų nuokritose kaitos palyginimas Aukštaitijos ir Žemaitijos KMS

Ilgalaikiai nuokritų cheminės sudėties tyrimai Aukštaitijos ir Žemaitijos KMS parodė, kad abiejose stotyse maisto elementų grįžimą į dirvožemį reguliuoja tie patys pagrindiniai procesai – nuokritų sezoninė ir frakcinė sudėtis, jų išplovimas krituliais ir medžių fiziologinė reakcija į meteorologinius ekstremumus. Tačiau šių procesų santykinė reikšmė skiriasi: Aukštaitijos pušynuose vyrauja konservatyvesnė ir stabilesnė elementų apytaka, o Žemaitijos eglynų aplinkoje – intensyvesnė, kritulių režimui bei lajų būklei jautresnė apykaita. Tokie skirtumai atitinka šiuolaikinę sampratą, kad nuokritų cheminę sudėtį lemia ne tik dirvožemio aprūpinimas elementais, bet ir rūšiai būdinga išteklių naudojimo bei išsaugojimo strategija (Zhang et al., 2024; Spohn et al., 2021).

Abiejose KMS nustatytas ryškus N ir P sezoniškumas, tačiau didžiausių koncentracijų laikotarpiai šiek tiek skyrėsi. Aukštaitijoje didžiausias N ir P kiekis būdingas pavasario nuokritoms, kuriose padidėja pumpurų ir žvynelių dalis, o Žemaitijoje aukštos koncentracijos išlieka ir vasarą. Tai gali būti susiję su tankesnėmis eglių lajomis, ilgesniu sezoniniu spyglių bei smulkiųjų reprodukcinių organų kritimo laikotarpiu ir įvairesne nuokritų frakcine sudėtimi. Todėl stočių skirtumai nebūtinai reiškia skirtingą medžių aprūpinimą elementais – dalį jų paaiškina nevienoda sezoninė nuokritų struktūra.

Azoto koncentracijos nuokritose didėjo abiejose stotyse, tačiau Aukštaitijoje šis augimas buvo intensyvesnis ir statistiškai aiškesnis. Aukštaitijos KMS 2021–2025 m. N koncentracijos pasiekė didžiausias viso stebėjimo laikotarpio reikšmes, o Žemaitijoje jos taip pat išliko artimos maksimumui. Tai rodo, kad abiejose ekosistemose didėja azoto grąžinimas į dirvožemį su nuokritomis, tačiau šio proceso biologinė reikšmė gali būti skirtinga.

Aukštaitijoje N koncentracijų didėjimas nuokritose vyko kartu su ilgalaikiu N didėjimu žaliojoje pušų ir beržų lapijoje, didėjančiu nuokritų kiekiu ir gerėjančia lajų būkle. Todėl čia didesnis N srautas su nuokritomis labiau tikėtina atspindi išaugusią lajų biomasę ir aktyvesnį vidinį azoto ciklą. Žemaitijoje žaliojoje beržų lapijoje N mažėjo, o eglių spygliuose aiškios teigiamos tendencijos nenustatyta, nors N koncentracija nuokritose didėjo. Toks neatitikimas gali rodyti mažesnį azoto susigrąžinimo iš senstančių audinių efektyvumą arba spartesnį lapijos senėjimą ir atmetimą.

Didesnė maisto elemento koncentracija nuokritose ne visada reiškia geresnę medžių mitybą. Mažesnis retranslokacijos efektyvumas lemia, kad daugiau N ar P prarandama su nukritusia lapija, o mažesnė koncentracija nuokritose gali rodyti efektyvesnį elemento susigrąžinimą prieš lapų ar spyglių kritimą. Naujausi tyrimai patvirtina, kad retranslokacija yra vienas pagrindinių medžių prisitaikymo prie maisto elementų stokos mechanizmų, o nuokritų N ir P koncentracijos turi būti

vertinamos kartu su žaliosios lapijos koncentracijomis (Zhang et al., 2024). Todėl ateityje reikėtų apskaičiuoti atskirų rūšių N ir P retranslokacijos efektyvumą pagal žaliosios ir senstančios lapijos duomenis.

Fosforo kaita aiškiau išskyrė stotis. Aukštaitijoje nustatyta nuosekli, nors palyginti nedidelė P koncentracijų didėjimo tendencija, ypač išryškėjusi 2021–2025 m. Žemaitijoje ilgalaikė tendencija buvo artima stabiliai arba silpnai neigiama, tačiau paskutiniaisiais metais taip pat registruotas ryškus koncentracijų padidėjimas. Tai gali reikšti, kad Aukštaitijos pušynuose P grąžinimas į dirvožemį didėja palaipsniui, o Žemaitijoje P apytaka labiau kinta tarp metų ir stipriau priklauso nuo klimato, lapijos būklės bei nuokritų struktūros.

Žemaitijos 2024 m. nurodyta maždaug 12 g kg^{-1} P koncentracija turėtų būti patikrinta pagal pirminius laboratorinius duomenis. Tikėtina, kad turėta omenyje 1,2 g kg^{-1}, nes 12 g kg^{-1} daug kartų viršytų ankstesnį 0,6–1,0 g kg^{-1} intervalą ir būtų neįprastai didelė miško nuokritoms. Nepatikrinus šios reikšmės, jos nereikėtų naudoti ilgalaikei tendencijai ar ekologinei interpretacijai pagrįsti.

Aukštaitijos ir Žemaitijos N bei P pokyčiai rodo, kad vien nuokritų N santykio nepakanka medžių mitybos ribojimui nustatyti. Nuokritų N atspindi ne tik pradinę žaliosios lapijos stechiometriją, bet ir nevienodą N bei P retranslokaciją. Naujausi tyrimai rodo, kad maisto medžiagų retranslokacijos ir mineralizacijos keliai tarpusavyje konkuruoja: kuo daugiau elemento medis susigrąžina prieš lapijos kritimą, tuo mažiau jo iš karto patenka į dirvožemio skaidymo grandinę (Zhang et al., 2024). Todėl Aukštaitijos ir Žemaitijos skirtumams įvertinti būtina integruoti žaliosios lapijos, nuokritų ir dirvožemio tirpalo duomenis.

Ryškiausi stočių skirtumai nustatyti kalio cikle. Aukštaitijoje ilgalaikė K koncentracijų tendencija buvo silpnai mažėjanti, tačiau 2021–2025 m. jos pradėjo atsikurti. Žemaitijoje iki 2020 m. K koncentracijos didėjo, tačiau paskutiniuoju laikotarpiu ši kryptis apsivertė ir nustatytas reikšmingas jų mažėjimas. Šis pokytis Žemaitijos KMS yra ekologiniu požiūriu vienas svarbiausių.

Kalis yra labai judrus elementas, todėl jo koncentracijas nuokritose stipriai keičia išplovimas krituliais, retranslokacija ir vandens deficitas. Žemaitijoje tankios eglių lajos su polajiniais krituliais išplauna daug daugiau K negu Aukštaitijos pušynuose, todėl mažėjantis K kiekis nuokritose gali reikšti jo persiskirstymą iš kietųjų nuokritų į polajinių kritulių srautą. Tačiau naujausias eksperimentinis tyrimas su brandžiomis paprastosiomis eglėmis parodė, kad sausra reikšmingai mažina K koncentracijas nuokritose, o eglės į vandens trūkumą reaguoja ankstyvu spyglių atmetimu ir ne visada pajėgia greitai atkurti prarastą lajų biomasę (Ulbricht et al., 2025). Tai tiesiogiai sustiprina interpretaciją, kad Žemaitijoje mažėjantis K gali būti susijęs ne vien su išplovimu, bet ir su didėjančiu eglynų fiziologiniu jautrumu.

Aukštaitijos K kaita buvo stabilesnė, o jos svyravimai geriau atitiko kritulių nulemtą išplovimą. Tai dera su paprastosios pušies konservatyvesne išteklių naudojimo strategija ir didesniu atsparumu vandens deficitui. Žemaitijos eglynų K ciklas yra intensyvesnis, tačiau labiau pažeidžiamas: didelė K dalis cirkuliuoja per lajų išplovimą, o sumažėjus šaknų įsisavinimui arba sustiprėjus sausrai gali atsirasti K balanso deficitas. Kadangi K kontroliuoja žiotelių veiklą, ląstelių osmosinį potencialą ir vandens naudojimo efektyvumą, jo ciklo silpnėjimas gali sukurti teigiamą grįžtamąjį ryšį – mažesnis K kiekis didina jautrumą sausrai, o sausra dar labiau blogina K apytaką.

Kalcio koncentracijų kaitos kryptis abiejose stotyse buvo panaši. Iki 2020 m. Ca mažėjo, tačiau 2021–2025 m. abiejose KMS pradėjo didėti, todėl viso laikotarpio tendencija tapo teigiama. Tai rodo regioninio masto Ca ciklo persitvarkymą, galimai susijusį su mažėjančiu dirvožemio rūgštėjimu, didėjančiu Ca prieinamumu, pakitusia nuokritų frakcine sudėtimi arba intensyvesniu jo kaupimu vyresniuose audiniuose.

Vis dėlto Ca didėjimo reikšmė stotyse skiriasi. Aukštaitijoje jis gali būti siejamas su lajų biomasės didėjimu ir stabilesniu Ca grąžinimu į dirvožemį. Žemaitijoje Ca koncentracijas reikšmingai veikia smulkiųjų šakelių dalis žiemos nuokritose ir intensyvus Ca išplovimas iš eglių lajų. Kadangi Ca beveik nereabsorbuojamas iš senstančios lapijos, didesnis jo kiekis nuokritose daugiausia rodo kaupimąsi audiniuose ir vėlesnį grąžinimą į dirvožemį, bet ne būtinai geresnį medžių aprūpinimą. Ekosistemų elementų atsparumą išorės pokyčiams palaiko jų kaupimas ir pakartotinis perdirbimas, tačiau šis buferinis pajėgumas priklauso nuo to, ar prarasti elementai pakankamai greitai vėl tampa prieinami šaknims (Spohn et al., 2021).

Magnio ir mangano kaita pastaruoju laikotarpiu abiejose stotyse tapo panaši: Mg koncentracijos didėjo, o Mn mažėjo. Šis sinchroniškumas gali rodyti bendrą regioninę dirvožemio cheminės aplinkos arba atmosferinių srautų kaitą. Mg augimas nuokritose gali reikšti didesnį jo grąžinimą į dirvožemį, tačiau kartu su ankstesniu Mg mažėjimu žaliojoje lapijoje jis gali rodyti mažesnį elemento išsaugojimą medžių audiniuose. Žemaitijos eglynams tai svarbiau dėl didesnio Mg poreikio ir jautresnės fotosintetinės sistemos.

Mn mažėjimas abiejose stotyse gali būti siejamas su silpnėjančiu dirvožemio rūgštėjimu ir mažesniu Mn judrumu, tačiau jį taip pat veikia kritulių nulemtas išplovimas bei dirvožemio oksidacinės–redukcinės sąlygos. Žemaitijoje Mn koncentracijų priklausomybė nuo kritulių buvo ryškesnė, todėl ši stotis labiau atspindi hidrologinį elemento reguliavimą, o Aukštaitijoje Mn kaita buvo stabilesnė.

Geležies koncentracijų didėjimas yra bendras abiejų stočių paskutiniojo laikotarpio požymis. Aukštaitijoje Fe augimas buvo intensyvesnis ir statistiškai reikšmingas, o Žemaitijoje ankstesnė

mažėjimo tendencija po 2020 m. pasikeitė į teigiamą. Kadangi Fe didėjo ir žaliojoje lapijoje, ir nuokritose, šis sinchroniškas signalas gali rodyti regioninį Fe prieinamumo, atmosferinės mineralinių dalelių depozicijos arba hidrologinio režimo pokytį.

Tačiau Fe augimo negalima interpretuoti kaip gerėjančios medžių mitybos. Fe nuokritose gali būti biologinės kilmės, bet taip pat gali patekti su dulkių ir dirvožemio dalelėmis, nusėdusiomis ant lapijos. Nauji tyrimai rodo, kad atmosferinė depozicija gali sudaryti reikšmingą mikroelementų ir metalų patekimo į miško ekosistemas dalį, o lajų danga keičia šių elementų kaupimą ir perdavimą į nuokritas bei dirvožemį. Todėl Fe ir Al tendencijas būtina tikrinti pagal mėginių plovimo, laboratorinės kokybės kontrolės, dirvožemio tirpalo ir atmosferinių dulkių duomenis.

Aliuminio kaita išryškino svarbų stočių skirtumą. Aukštaitijoje Al koncentracijos nuokritose didėjo, ypač paskutiniuoju laikotarpiu, o Žemaitijoje ilgalaikė tendencija išliko silpnai neigiama. Jeigu šie duomenys patikimi, Aukštaitijoje galėjo padidėti Al mobilizacija iš dirvožemio arba mineralinių dalelių nusėdimas ant lapijos. Kadangi tirpus Al gali slopinti smulkiųjų šaknų veiklą ir konkuruoti su Ca bei Mg, jo didėjimas turėtų būti vertinamas kaip potencialiai nepalankus signalas, o ne kaip įprastas elementų ciklo intensyvėjimas.

Na koncentracijos aiškiai atspindėjo geografinį gradientą. Žemaitijoje jų kiekiai ir tarpmetiniai svyravimai buvo didesni dėl Baltijos jūros aerozolių ir vakarinių oro masių poveikio. Aukštaitijoje Na koncentracijos taip pat didėjo 2021–2025 m., tačiau jūrinis signalas išliko silpnesnis. Didesnis Na kiekis Žemaitijos nuokritose gali būti ne tik augalų audinių cheminės sudėties, bet ir druskų nusėdimo ant tankių eglių lajų rezultatas.

Vienas esminių abiejų stočių skirtumų yra meteorologinių veiksnių poveikio stiprumas. Aukštaitijoje sausros ryškiai mažino N koncentracijas, tačiau K ir kitų mobilių elementų koncentracijos daugiausia priklausė nuo išplovimo intensyvumo. Žemaitijoje kritulių kiekis ir sausros plačiau veikė K, Mn, Na, Mg ir kitus elementus. Naujausi tyrimai patvirtina, kad sausra keičia ne tik nuokritų kiekį, bet ir retranslokaciją bei elementų pasiskirstymą tarp žaliosios ir senstančios lapijos (Touche et al., 2024). Eglės, palyginti su atsparesnėmis rūšimis, į sausrą dažniau reaguoja ankstyvu spyglių atmetimu ir didesniais maisto medžiagų ciklo sutrikimais (Ulbricht et al., 2025).

Apibendrinant galima teigti, kad Aukštaitijos KMS nuokritų chemija daugiausia rodo **didėjančios biomasės ir aktyvėjančio, tačiau santykinai stabilaus maisto elementų ciklo modelį**. Čia didėjantis N, P ir Ca grąžinimas į dirvožemį dera su gerėjančia lajų būkle ir didėjančiu nuokritų kiekiu. Vis dėlto K ir Mn mažėjimas bei Al ir Fe augimas rodo, kad net stabilioje pušynų sistemoje formuojasi nauji elementų balanso pokyčiai.

Žemaitijos KMS būdingas **intensyvesnės, bet mažiau stabilios elementų apykaitos modelis**. N ir Ca grįžimas su nuokritomis didėja, tačiau mažėjantis K, ankstesnis Mg silpnėjimas žaliojoje lapijoje, stipri priklausomybė nuo kritulių režimo ir padidėjęs Na poveikis rodo didesnį eglynų mitybos jautrumą. Nuokritų, polajinių kritulių ir žaliosios lapijos duomenys kartu leidžia manyti, kad Žemaitijoje vis didesnė elementų dalis cirkuliuoja per greitą lajų išplovimo ir nuokritų kelią, o tai gali mažinti ilgalaikį sistemos buferinį pajėgumą.

Ekologiniu požiūriu svarbiausias stočių skirtumas yra ne bendras maisto elementų grąžinimo intensyvumas, bet jų išsaugojimo ir perdirbimo stabilumas. Aukštaitijos pušynuose vyrauja konservatyvesnis, lėčiau kintantis ciklas, o Žemaitijos eglynuose – greitesnė, produktyvumą palaikanti, tačiau klimato ekstremumų lengviau sutrikdoma apytaka. Tai gali būti vienas iš biogeocheminių mechanizmų, paaiškinančių didesnį Žemaitijos eglynų pažeidžiamumą sausroms, lajų retėjimui ir biotiniams pažeidimams.

6.3.7. Elementų transformacijos intensyvumo kaita lapijoje ir nuokritose

Cheminių elementų transformacija medžių lajose, lapijoje ir nuokritose yra vienas svarbiausių procesų, reguliuojančių maisto medžiagų išsaugojimą augaluose ir jų grąžinimą į dirvožemį. Vegetacijos metu elementai į lapus ir spyglius patenka per šaknų sistemą bei iš dalies absorbuojami iš atmosferos. Likusi elementų dalis prarandama dėl išplovimo krituliais arba su nuokritomis patenka į miško paklotę. Todėl žaliosios lapijos ir nuokritų cheminės sudėties skirtumas atspindi medžių gebėjimą išsaugoti, perskirstyti ir pakartotinai panaudoti maisto medžiagas.

Ypač svarbi yra azoto ir fosforo rezorbcija, nes šie elementai dažnai riboja miškų produktyvumą. Naujausia pasaulinė analizė parodė, kad jų susigrąžinimo intensyvumą labiausiai lemia lapijos tipas, rūšies ekologinė strategija ir maisto medžiagų prieinamumas, o klimato poveikis priklauso nuo augalų funkcinės grupės ir aplinkos sąlygų (Sophia et al., 2024). Mažos N ir P koncentracijos nuokritose paprastai rodo efektyvesnį jų susigrąžinimą, o didėjančios koncentracijos gali signalizuoti tiek geresnį medžių aprūpinimą elementais, tiek sumažėjusį rezorbcijos efektyvumą. Dėl to šio proceso negalima vertinti vien pagal nuokritų koncentracijas – būtina jas lyginti su žaliosios lapijos sudėtimi, jos mase ir elementų srautais.

Elementų transformacija nėra vienoda skirtingiems jonams. N ir P daugiausia reguliuojami fiziologinės retranslokacijos, K dėl didelio judrumo lengvai perskirstomas augale ir išplaunamas krituliais, o Ca dėl menko judrumo kaupiasi senstančiuose audiniuose ir daugiausia grąžinamas į dirvožemį su nuokritomis. Mg užima tarpinę padėtį. Todėl lapijos ir nuokritų koncentracijų santykiai leidžia atskirti elementų biologinio išsaugojimo strategijas nuo jų praradimo per lajų išplovimą.

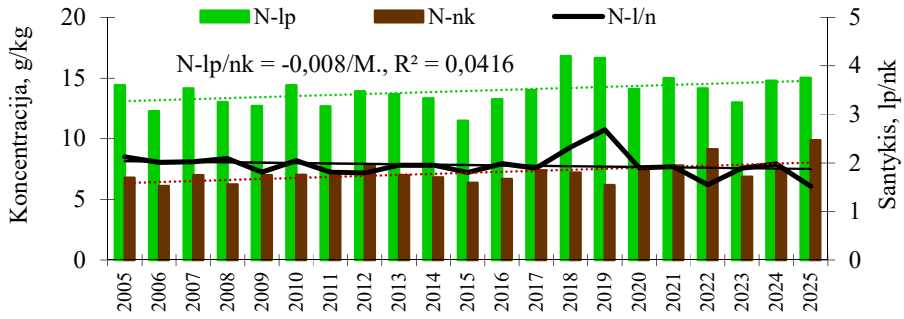
Klimato ekstremumai gali reikšmingai pakeisti šių procesų pusiausvyrą. Eksperimentiniai tyrimai rodo, kad sausra keičia elementų pasiskirstymą tarp žaliosios ir senstančios lapijos, mažina K rezorbciją, riboja jo atsargų išsaugojimą kitam vegetacijos laikotarpiui ir kartu gali šiek tiek padidinti N susigrąžinimą (Touche et al., 2024). Tai rodo, kad sausros poveikis nėra vienakryptis: atskirų elementų transformacija priklauso nuo jų fiziologinės funkcijos, judrumo ir medžių rūšies prisitaikymo strategijos.

Naujausi tyrimai taip pat pabrėžia, kad maistinių elementų rezorbcija gali būti svarbesnė miško azoto aprūpinimui negu jo pakartotinis išlaisvinimas skaidantis nuokritoms. Temperatūriniuose, azoto ribojamuose miškuose didesnis lapijos N susigrąžinimo efektyvumas buvo glaudžiau susijęs su produktyvumu negu nuokritų N mineralizacija, tačiau kartu sumažino tiesioginį azoto patekimą į dirvožemio skaidymo grandinę (Zhang et al., 2023). Taigi tarp elementų išsaugojimo medžiuose ir jų grąžinimo į dirvožemį egzistuoja funkcinis kompromisas.

Hemiborealiniuose miškuose šių procesų vertinimas ypač svarbus, nes mažėjanti atmosferinė azoto depozicija, šiltėjantis klimatas ir dažnėjančios sausros gali keisti tiek elementų įsisavinimą, tiek jų retranslokaciją ir išplovimą. Be to, pušys, eglės ir beržai pasižymi skirtingomis lapijos gyvavimo trukmės ir išteklių naudojimo strategijomis. Dėl to elementų koncentracijų kaita žaliojoje lapijoje ir nuokritose gali būti naudojama kaip jautrus medžių mineralinės mitybos, fiziologinio streso ir visos ekosistemos maisto medžiagų ciklo efektyvumo indikatorius.

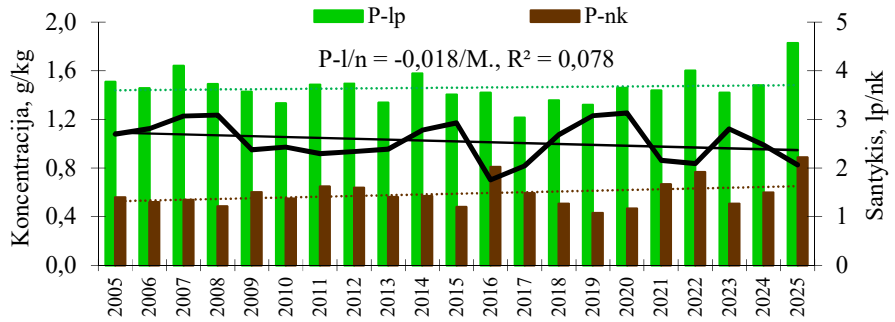
Aukštaitijos KMS baseinas

Palyginus tirtų elementų santykį lapijoje ir nuokritose (l/n) nustatyta, kad nuokritose vidutiniškai azoto sumažėja 2 kartus, t.y. maždaug nuo 14 mg/g iki 7 mg/g. Nepaisant fakto, kad N koncentracijos turi tendenciją nors ir nereikšmingą didėti, jų santykis turi tendenciją mažėti po mažėja po -0,008 per m.



6.33 pav. N koncentracijų lapijoje ir nuokritose kaitos palyginimas

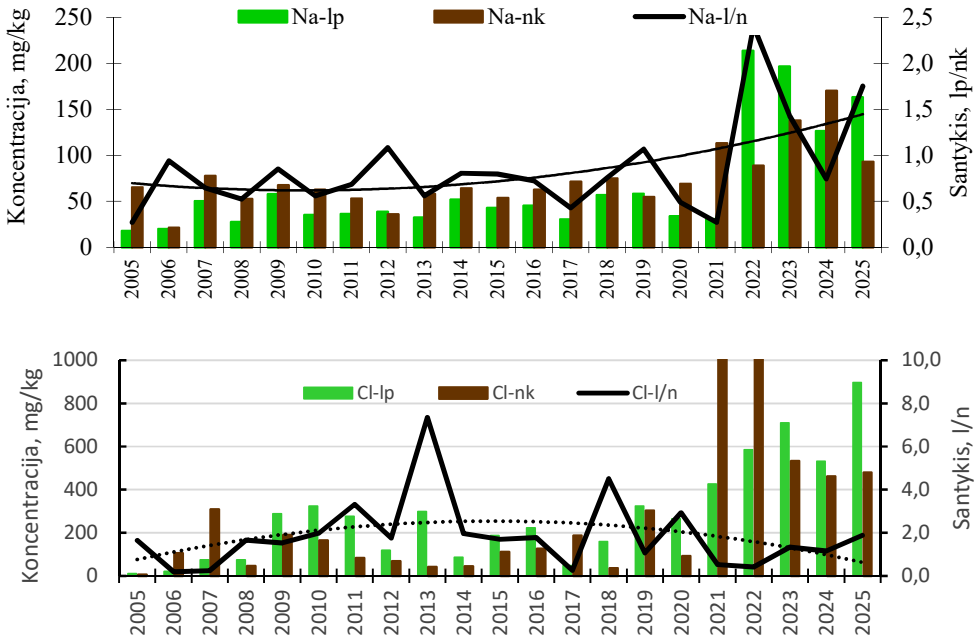
P koncentracijos nuokritose vidutiniškai mažėja daugiau kaip 2,5 karto, t.y. nuo 1,4 mg/g lapijoje iki 0,8 mg/g nuokritose. Dėl didėjančių P koncentracijų nuokritose jų santykis turi tendenciją mažėti po -0,02 per m., tačiau, kaip ir N atveju, ši tendencija yra nereikšminga.



6.34... pav. P koncentracijų lapijoje ir nuokritose kaitos palyginimas

Na nuokritose skirtingai nei N ir P koncentracijos yra iki 1,5 karto didesnės negu lapijoje. Tyrimų pradžioje šis santykis didėjo nereikšmingai svyruodamas apie vieneto reikšmę, tai paskutiniuoju laikotarpiyu Na koncentracijos lapijoje pradėjo viršyti šio elemento kiekius nokritose.

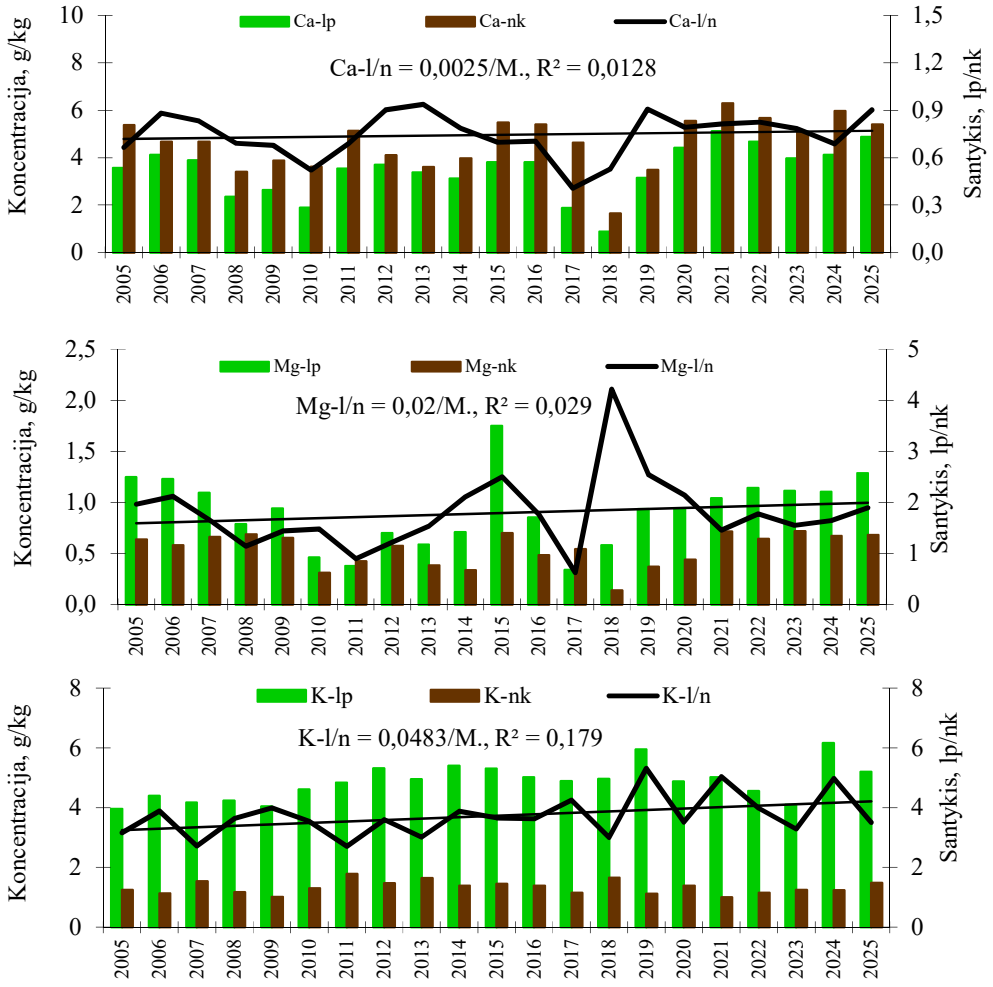
Chloro kaitoje matyti, kad lapijoje šio elemento yra daugiau, o jai senstant ir nukrentant, dėl šio elemento lakumo, koncentracijos nuokritose yra vidutiniškai virš 2 kartus mažesnės negu lapijoje. Paskutiniuoju laikotarpiu šii tendencija pasitvirtino tik iš dalies.



6.35 pav. Na ir Cl koncentracijų lapijoje ir nuokritose kaitos intensyvumas Aukštaitijos KMS

Pagrindinių šarminių katijonų kaitoje stebima bendra tendencija: Nuokritose jų koncentracijoms mažėjant didėja santykis tarp jų koncentracijų lapijoje ir nuokritose. Tai rodo šiltėjančio klimato ir gausėjančių kritulių didėjanti išplovimo ir lapijos audinių intensyvumą.

Pagrindinių šarminių katijonų Ca, K, Mg kaitoje stebima bendra tendencija: Nuokritose jų koncentracijoms mažėjant didėja santykis tarp jų koncentracijų lapijoje ir nuokritose. Tai rodo šiltėjančio klimato ir gausėjančių kritulių didėjanti išplovimo ir lapijos audinių intensyvumą.

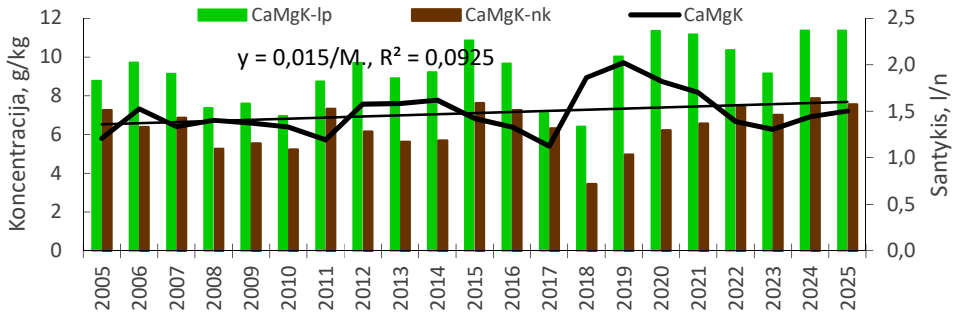


6.36 pav. Ca, Mg ir K koncentracijų lapijoje ir nuokritose transformacijos intensyvumas Aukštaitijos KMS

Aukštaitijos KMS nuokritose kaupiasi daugiau Ca negu lapijoje ir šis santykis po truputį artėja prie 1 didėdamas po 0,0025 per m. Ir indikuodamas, kad skirtumas tarp šio elemento koncentracijų gyvojoje lapijoje ir nuokritose mažėja.

Mg iš lapijos yra intensyviai išplaunamas, todėl jo koncentracijos nuokritose yra mažesnės negu lapijoje. Per tiriamąjį laikotarpį Mg santykis nors ir nereikšmingai didėja po 0,02 per m. Indikuodamas, kad išplovimo procesas intensyvėja.

K intensyviausiai iš lapijos išplaunamas elementas. Šio elemento koncentracijos nuokritose iki 4 kartų mažesnės negu lapijoje. Per tiriamąjį laikotarpį šis santykis turi tendenciją didėti dėl K koncentracijų didėjimo lapijoje ir mažėjimo nuokritose po 0,05 per m.



6.37 pav. Suminis šarminių elementų koncentracijų lapijoje ir nuokritose transformacijos intensyvumas Aukštaitijos KMS

Reikšmingiausiai kito suminis tirtų šarminių katijonų sumažėjimo nuokrituose snatykis. Jei tyrimų pradžioje nuokritose šių elementų buvo tik apie 1,2 karto mažiau negu lapijoje, tai paskuriniuoju laikotarpiu šis santyukis padidėjo iki beveik 2 kartų 2019-2020m. Paskutiniuoju laikotarpiu šis santykis vėl pradėjo mažėti dėl didėjančių koncentracijų lapijoje iki 1,5 karto.Tai klimato kaitos ir tolimųjų oro pernašų rezultatas.

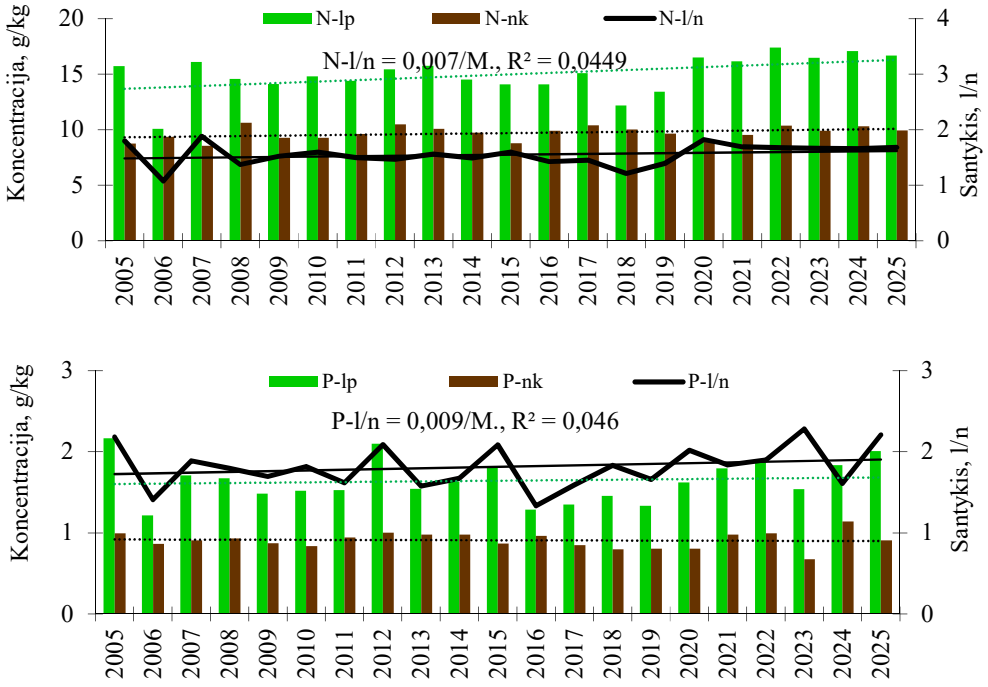
Apibendrinus rezultatus nustatyta, kad N ir P santykis tarp gyvos lapijos ir nuokritų turi tendenciją mažėti dėl šių elementų koncentracijų didėjimo nuokritose. Intensyviausiai iš lapijos išplaunamas K, kiek silpniau Mg ir šių elementų išplovimo intensyvumas per tiriamąjį laikotarpį didėja. Tik Ca koncentracijos nuokritose reikšmingai viršija šio elemento koncentracija lapijoje ir šis santykis taip pat didėja artėdamas prie 1, ką rodo, jo mažėjantį skirtumą tarp gyvų ir negyvų audinių. Na ir Cl koncentracijų transformacijos intensyvumas neturi reikšmingo pobūdžio. Kylanti oro temperatūra ir gausėjantys krituliai kartu su šių elementų tolimosiomis oro pernašomis reikšmingai sąlygoja tokią jų kaitą.

Prognozė ir grėsmė: ***Mažėjantis azoto ir fosforo koncentracijų santykis tarp gyvų lapų ir nuokritų, kurį lemia didėjanti šių elementų koncentracija nuokritose, rodo maistinių medžiagų rezorbcijos efektyvumo sumažėjimą ir sumažėjusį vidinį maistinių medžiagų išsaugojimą. Tuo pačiu metu intensyvesnis kalio ir, mažesniu mastu, magnio išplovimas rodo didėjančius maistinių medžiagų nuostolius lajos lygyje, kurie greičiausiai yra susiję su aplinkos stresu ir pakitusiais kritulių režimais. Priešingai, kalcio koncentracija nuokritose išlieka didesnė nei lapuose, o tai rodo mažąjį jo judrumą augalų audiniuose; tačiau mažėjantis skirtumas tarp gyvų ir senų audinių gali***

rodyti kalcio įsisavinimo, augimo dinamikos ar dirvožemio prieinamumo pokyčius. Kartu šie procesaui rodo poslinkį link mažiau efektyvaus maistinių medžiagų ciklo, kuriam būdinga sumažėjusi rezorbcija ir padidėję maistinių medžiagų nuostoliai.

Žemaitijos KMS baseinas

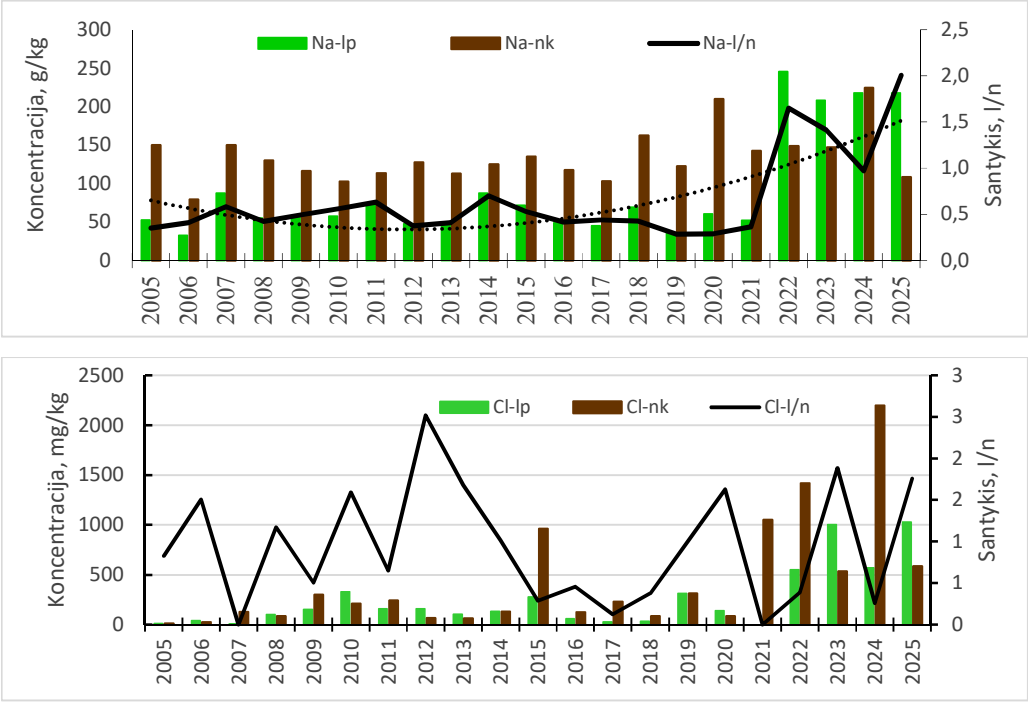
Azoto ir fosforo koncentracijos nuokritose dėl šių elementų panaudojimo fiziologiniuose procesuose iki 2020 m. mažėjo lyginant su koncentracijoms lapijoje iki 1,4 ir 1,8 karto atitinkamai, o jų šis santykis turėjo tendenciją mažėti. Paskutinysis laikotarpis pakeitė šią tendenciją: N santykis didėja po 0,007, o P santykis didėja po 0,009 per m. Tai pagrinde dėl šių elementų koncentracijų mažėjimo nuokritose, kurį sustiprina papildomai nors ir nereikšmingas N koncentracijų augimas lapijoje.



6.38 pav. N ir P koncentracijų lapijoje ir nuokritose transformacijos intensyvumas Žemaitijos KMS

Na ir ypač Cl kaitoje, kaip ir Aukštaitijos KMS, aiškesnės tendencijos nenustatyta. Na skirtingai nei N ir P koncentracijos nuokritose yra iki 2 kartų didesnės negu lapijoje. Iki 2020 m. aiškesnės kaitos šio elemento santykyje nenustatyta, tačiau paskutiniuoju laikotarpiu nuokritose Na koncentracijos pradėjo viršyti Na koncentracijas nuokritose ir šis santykis kaip ir Aukštaitijos KMS reikšmingaipadidėjo, t.y. iki beveik 2.

Ankstesnėje Chloro kaitoje matyti, kad lapijoje šio elemento buvo daugiau, o jai senstant ir nukrentant, dėl šio elemento lakumo, koncentracijos nuokritose buvo vidutiniškai virš 2 kartus mažesnės negu lapijoje. Paskutiniuoju laikotarpiu šis santykis pasikeitė.



6.39 pav. Na ir Cl koncentracijų lapijoje ir nuokritose transformacijos intensyvumas Žemaitijos KMS

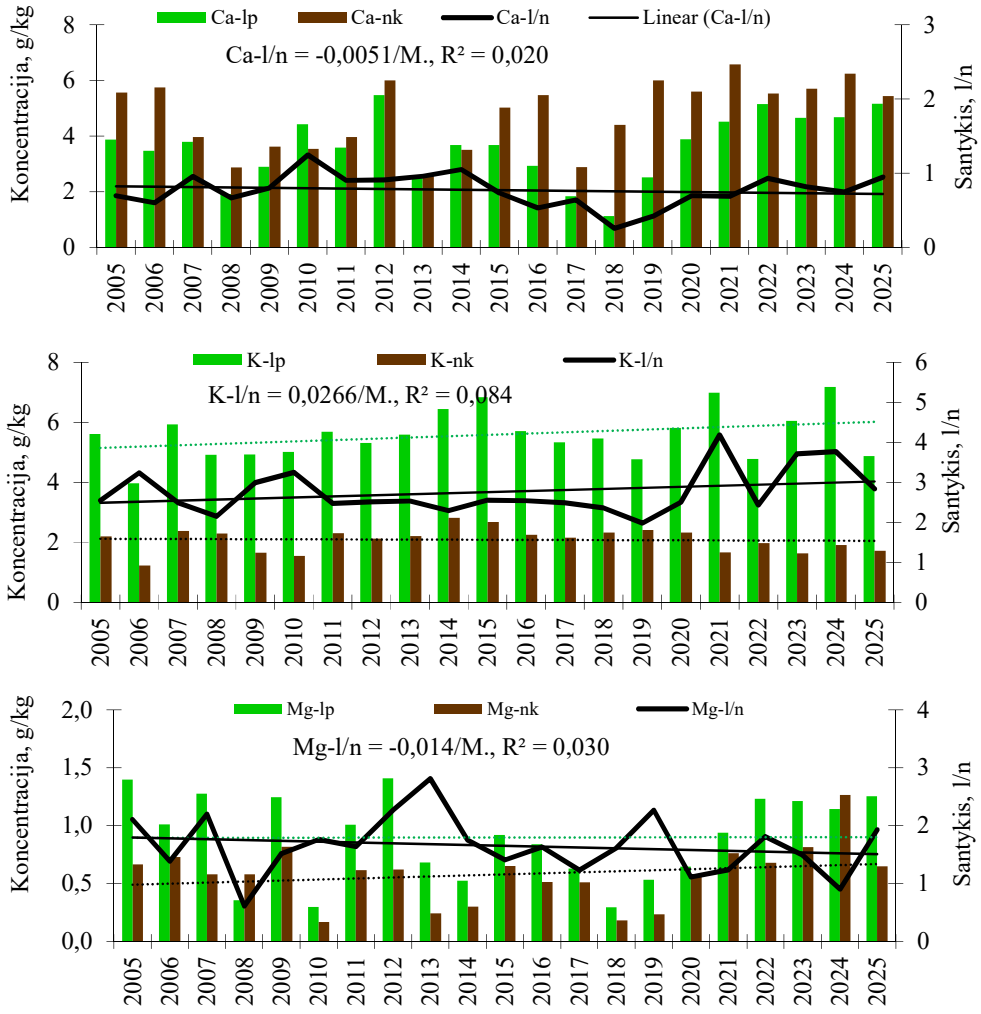
Pagrindinių šarminių katijonų kaitoje stebima skirtinga tendencija negu Aukštaitijos KMS: Nuokritose šių elementų koncentracijoms mažėjant, dėl mažėjančių koncentracijų lapijoje ir krituliuose patenkančiuose su tolimosiomis pernašomis į dirvožemį, mažėja taip pat santykis tarp jų koncentracijų lapijoje ir nuokritose.

Išsiskiria tik Ca koncentracijų kaita, kur santykis tarp Ca koncentracijų lapijoje ir nuokritose visą tiriamąjį laikotarpį praktiškai išlika stabilus ir artimas 1, nors registruojamas šio santykio mažėjimas po 0,005 per m.

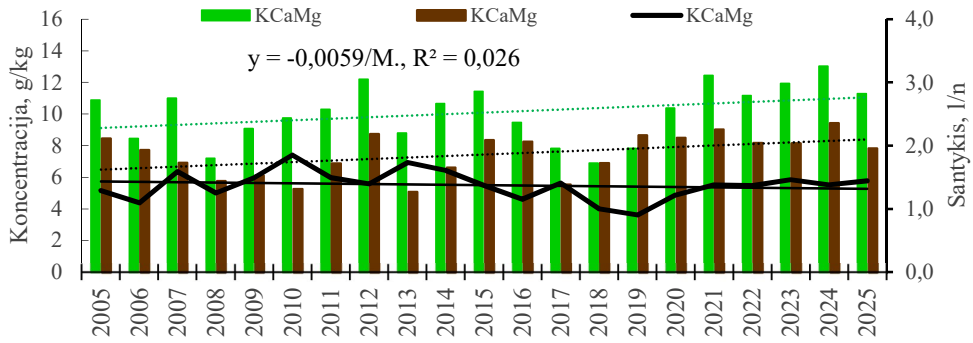
K išplaunamas iš lapijos audinių intensyviausiai. Jo koncentracijoms didėjant lapijoje, bet išliekant stabiliomis nuokritose, santykis didėja po 0,027 per m.

Mg iš lapijos yra išplaunamas paskutiniuoju laikotarpiu silpniau negu tyrimų pradžioje ir jo santykis pradėjo mažėti po 0,014 per m. Tai lėmė mažėjanti Mg koncentracija lapijoje ir didėjanti koncentracija nuokritose. Šio elemento patenka mažiau su tolimosiomis pernašomis dėl ko jo koncentracija pradeda mažėti ir lapijoje. Dėl šios priežasties santykis tarp Mg koncentracijų lapijoje ir nuokritose 2025 m sumažėjo iki 1,5 karto.

Nepaisant skirtingų kaitos tendencijų, nustatytą didėjantį santykį iki 2020 m., 2025 metai pakeitė jau silpnai mažėjantis santykis – po 0,006 karto per m., nors suminis šių elementų kiekis tiek lapijoje tiek ri nuokritose turėjo tendenciją didėti.



6.40 pav. Ca, Mg ir K koncentracijų lapijoje ir nuokritose transformacijos Žemaitijos KMS



6.41 pav. Suminis šarminių elementų koncentracijų lapijoje ir nuokritose transformacijos intensyvumas Žemaitijos KMS

Apibendrinus Žemaitijos KMS rezultatus nustatyta, kad N ir P koncentracijos nuokritose dėl šių elementų panaudojimo fiziologiniuose procesuose mažėja lyginant su koncentracijoms lapijoje iki 1,4 ir 1,8 karto atitinkamai, nors per visą tiriamąjį laikotarpį turi tendenciją didėti dar po 0,007-0,009 karto per m.

Na ir Cl koncentracijos dėl aiškesnės tendencijos nebuvimo, praktiškai buvo stabilios, taip pat kaip ir jų santykis, kurį reikšmingai pakeitė nevienareikšmiškai paskutiniųjų metų duomenys.

Mg iš lapijos yra išplaunamas paskutiniuoju laikotarpiu silpniau negu tyrimų pradžioje ir jo santykis pradėjo mažėti po 0,014 per m. Tai lėmė mažėjanti Mg koncentracija lapijoje ir didėjanti koncentracija nuokritose. K išplaunamas iš lapijos audinių intensyviausiai. Jo koncentracijoms didėjant lapijoje, bet išliekant stabiliomis nuokritose, santykis didėja po 0,027 per m. Išsiskiria tik Ca koncentracijų kaita, kur santykis tarp Ca koncentracijų lapijoje ir nuokritose visą tiriamąjį laikotarpį praktiškai išlika stabilus ir artimas 1. ***Šią kaitą esminiai galėjo sąlygoto didėjantis K, Ca ir Mg srautas su krituliais, kuris didino šių elementų koncentracijas lapijoje.***

Prognozė ir grėsmė: ***Priešingai nei Aukštaitijos KMS, didėjantis azoto ir fosforo santykis tarp gyvos lapijos ir nuokritų, kurį lemia mažėjanti koncentracija nuokritose, rodo padidėjusį maistinių medžiagų rezorbcijos efektyvumą ir stipresnį vidinį maistinių medžiagų išsaugojimą. Tai rodo efektyvesnį ribojančių maistinių medžiagų perdirbimą sistemoje. Nors kalio išplovimas laikui bėgant didėjo, rodydamas didelį jo judrumą ir jautrumą lajos procesams, magnio išplovimas sumažėjo, o tai rodo geresnį vidutiniškai judrių maistinių medžiagų sulaikymą. Kalcio koncentracija nuokritose išliko didesnė nei lapuose, kaip ir tikėtasi dėl mažo jo judrumo; tačiau didėjantis skirtumas tarp gyvų ir senų audinių rodo padidėjusį kaupimąsi senstančiuose audiniuose, kuris gali būti susijęs su stabiliomis dirvožemio sąlygomis arba ilgesne audinių gyvavimo trukme.***

Šie išaiškinti pagrindinių elementų kaitos dėsningumai indikuoją natūralias ekosistemas su nepažeistomis maistinių medžiagų ciklo sistemomis, kurioms būdingos efektyvios rezorbcijos ir selektyvūs maistinių medžiagų nuostoliai.

6.3.8. Pagrindinių komponenčių koncentracijų kaita ir transformacijos nuokritose pagrindinėms tendencijoms ir reikšmingumui išaiškinti

Įkurtos stotys nacionalinių parkų miškų rezervatuosee, kuriuose tiesioginė žmogaus įtaka yra minimali, pasižymi skirtingais, tačiau vienas kitą papildančiais maistinių medžiagų ciklo režimais, kurie kartu atskleidžia natūralių ekosistemų reakcijų į kintančius aplinkos veiksnius spektrą. Tiesioginės žmogaus įtakos nebuvimas leidžia šiuos modelius interpretuoti kaip vidinius ekosistemos procesus, suteikiančius vertingų įžvalgų apie tai, kaip hemiborealiniai miškai reguliuoja maistinių medžiagų dinamiką esant įvairiems apribojimams.

Aukštaitijos KMS mažėjantis azoto (N) ir fosforo (P) rezorbcijos efektyvumas, kurį atspindi didėjanti šių elementų koncentracija nuokritose, rodo silpnėjantį vidinį maistinių medžiagų išsaugojimą. Šį procesą lydi didėjantis kalio (K) ir magnio (Mg) išplovimas, taip pat padidėjusi aliuminio (Al) koncentracija lapijoje, o tai rodo, kad sistema patiria didėjantį fiziologinį stresą ir sutrikusią maistinių medžiagų reguliaciją. Visi šie signalai rodo poslinkį link „atviresnio“ maistinių medžiagų ciklo, kuriam būdingas sumažėjęs vidinis perdirbimas ir didesni išoriniai nuostoliai. Tokios sąlygos atitinka didėjantį maistinių medžiagų disbalansą, kurį greičiausiai lemia azoto ribojimas, dirvožemio cheminiai pokyčiai ir aplinkos stresas, kurie kartu riboja augalų maistinių medžiagų panaudojimo efektyvumą ir keičia ekosistemos funkcionavimą.

Priešingai, Žemaitijos KMS didėjantis azoto ir fosforo santykis tarp gyvų lapų ir nuokritų, kurį lemia mažėjanti nuokritų koncentracija, rodo padidėjusį rezorbcijos efektyvumą ir glaudų ribojančių maistinių medžiagų vidinį perdirbimą. Tai dar labiau skatina mažėjantis nitratų ir amonio kiekis iš atmosferos, kas greičiausiai sustiprina azoto ribojimą ir skatina didesnę priklausomybę nuo vidinių maistinių medžiagų išsaugojimo. Nepaisant didėjančio kritulių sukelto kalio išplovimo, tuo pačiu metu mažėjantis magnio išplovimas rodo selektyvų vidutiniškai judrių maistinių medžiagų sulaikymą, o tai rodo veiksmingą fiziologinį maistinių medžiagų nuostolių reguliavimą. Kalcio (Ca) dinamika, kuriai būdingas didėjantis kaupimasis nuokritose, dar labiau patvirtina struktūrinio maistinių medžiagų ciklo stabilumą šioje vietoje.

Išaiškinti skirtingi procesai leidžia teigti, kad Aukštaitijos KMS, atrodo, pereina prie mažiau efektyvios, streso veikiamos maistinių medžiagų išsaugojimo, o Žemaitijos KMS išlaiko griežtai reguliuojamą, kaupiančią strategiją, kuri pagerina maistinių medžiagų sulaikymą esant ribinėms sąlygoms ir didesnį produktyvumą.

Svarbu tai, kad nuolat didėjantis bazinių katijonų (Ca, K, Mg) srautas kartu su krituliais abiejose stotyse pabrėžia augantį hidrologinių procesų vaidmenį kontroliuojant maistinių medžiagų

nuostolius, net ir skirtingose ekosistemose. Tuo pačiu metu mažėjantis azoto kiekis tampa pagrindiniu veiksniu, skatinančiu maistinių medžiagų ribojimą ir keičiančiu maistinių medžiagų naudojimo strategijas.

Apibendrinus rezultatus, galima teigti, kad sąlygiškai natūralių miškų ekosistemos, prie dabartinių aplinkos sąlygų, gali demonstruoti iš esmės skirtingus maistinių medžiagų ciklo atsakus – nuo streso nulemtų sistemų iki labai konservatyvių, efektyviai reguliuojamų. Šis skirtumas pabrėžia, kad vertinant ekosistemų atsaką į aplinkos pokyčius, reikia atsižvelgti į konkrečioms vietovėms būdingas sąlygas ir elementų sąveikas jose, kadangi maistinių medžiagų ciklas yra labai dinamiškas ir jautrus atmosferos įtakų pokyčiams ir klimato kaitos nulemtiems procesams, o tai turi didelės įtakos miškų produktyvumui, atsparumui ir ilgalaikiam biogeocheminiam funkcionavimui.

Svarbu tai, kad kadangi šie procesai vyksta natūraliame, netvarkomame, saugomame miške, gauti rezultatai suteikia naujų įžvalgų apie natūralų hemiborealinių ekosistemų funkcionavimą ir atsparumą kintančiomis aplinkos sąlygomis.

IŠVADOS

1. Aukštaitijos ir Žemaitijos KMS maistinių medžiagų ciklų skirtumai pirmiausia atspindi nevienodas pušynų ir eglynų ekologines strategijas, o ne tiesioginės ūkinės veiklos poveikį, nes abi stotys įkurtos natūraliuose, netvarkomuose rezervatų miškuose.
2. Aukštaitijos KMS būdingas santykinai lėtas ir konservatyvus maistinių medžiagų ciklas, tačiau didėjančios N ir P koncentracijos nuokritose gali rodyti, kad augant lajų biomasei kartu silpnėja dalies elementų retranslokacija iš senstančios lapijos.
3. Žemaitijos KMS būdinga intensyvesnė maistinių elementų apytaka, kurioje didelė elementų dalis grąžinama į dirvožemį ne tik su nuokritomis, bet ir išplaunama iš tankių eglių lajų su polajiniais krituliais. Ši sistema yra produktyvi, tačiau jautresnė kritulių režimo ir sausrų svyravimams.
4. Turimi duomenys neleidžia vienareikšmiškai teigti, kad Žemaitijos KMS N ir P rezorbcija yra efektyvesnė. Didėjantis N kiekis nuokritose, kai jo koncentracija žaliojoje lapijoje mažėja arba išlieka stabili, gali rodyti ir silpnėjantį azoto susigrąžinimą prieš lapijos kritimą.
5. Kalio apytaka yra jautriausias klimato ir hidrologinių pokyčių indikatorius. Žemaitijoje K mažėjimas nuokritose kartu su intensyviu jo išplovimu iš lajų rodo elemento srauto persiskirstymą ir galimą eglynų mineralinės mitybos pažeidžiamumą.
6. Didėjantis Ca grąžinimas su nuokritomis abiejose stotyse rodo intensyvėjančią struktūrinių audinių apykaitą, tačiau negali būti laikomas geresnio medžių aprūpinimo kalciu požymiu.

7. Fe ir Al koncentracijų pokyčiai, ypač jų didėjimas Aukštaitijos KMS, yra potencialiai svarbūs nauji signalai, tačiau prieš ekologinę interpretaciją turi būti patikrinti pagal dirvožemio chemijos, atmosferinės mineralinių dalelių depozicijos ir laboratorinės analizės kokybės duomenis.
8. Mažėjanti atmosferinė azoto depozicija didina abiejų ekosistemų priklausomybę nuo vidinio azoto perdirbimo, tačiau šio proceso efektyvumą vis labiau reguliuoja vandens režimas, medynų struktūra ir medžių fiziologinė būklė.
9. Maistinių elementų ciklo būklė negali būti patikimai vertinama pagal vieno komponento koncentracijas. Būtina integruoti žaliosios lapijos, nuokritų, polajinių kritulių, dirvožemio tirpalo ir bendrų elementų srautų duomenis.

6.4 Pagrindinių maistinių komponenčių srautai su nuokritomis KM stočių teritorijose

Pagrindinių maisto elementų srautai su nuokritomis yra vienas svarbiausių miško ekosistemų biogeocheminio ciklo rodiklių, apibūdinantis tikrąjį maisto medžiagų grįžimą iš augalijos į dirvožemį. Skirtingai negu elementų koncentracijos žaliojoje lapijoje ar nuokritose, kurios atspindi momentinę medžių fiziologinę būklę, elementų srautai integruoja tiek nuokritų biomasę, tiek jų cheminę sudėtį, todėl leidžia įvertinti bendrą vidinio maisto medžiagų ciklo intensyvumą (Prescott, 2002; Berg & McClaugherty, 2008). Naujausia pasaulinė analizė parodė, kad būtent elementų grįžimo srautai, o ne vien jų koncentracijos, geriausiai apibūdina biogeocheminio ciklo funkcionavimą įvairiose klimato zonose (Yuan et al., 2024).

Didžioji dalis azoto (N), fosforo (P), kalcio (Ca), kalio (K) ir magnio (Mg), kasmet grįžtančių į miško dirvožemį, patenka būtent su nuokritomis. Borealinėse ir hemiborealinėse ekosistemose šie srautai dažniausiai kelis kartus viršija atmosferinės depozicijos kiekius, todėl pagrindinis miško produktyvumą palaikantis mechanizmas yra ne naujų elementų patekimas iš atmosferos, bet efektyvi jų recirkuliacija tarp žaliosios lapijos, nuokritų, paklotės ir dirvožemio (Vitousek & Sanford, 1986; Berg & McClaugherty, 2008; Jonczak et al., 2023).

Pastaraisiais metais vis daugiau dėmesio skiriama klimato kaitos poveikiui elementų srautams. Nustatyta, kad kylanti temperatūra, dažnėjančios sausros, kritulių režimo pokyčiai ir mažėjanti atmosferinė azoto depozicija keičia ne tik nuokritų kiekį, bet ir į dirvožemį grįžtančių maisto elementų srautus. Šie pokyčiai ilgainiui veikia dirvožemio derlingumą, organinės medžiagos skaidymosi intensyvumą bei anglies kaupimą miško ekosistemose (de la Casa et al., 2025; Zhang et al., 2024).

Elementų srautai su nuokritomis taip pat atspindi medžių fiziologinių procesų efektyvumą. Didėjantys azoto ir fosforo srautai dažniausiai siejami su didesniu biologiniu produktyvumu ir spartesne maisto medžiagų apytaka, tuo tarpu bazinių katijonų (Ca, K ir Mg) srautai rodo dirvožemio buferinių savybių palaikymą, rūgštėjimo kompensavimo procesus bei augalų prisitaikymą prie besikeičiančių aplinkos sąlygų. Mikroelementų, tokių kaip geležis (Fe) ir aliuminis (Al), srautų pokyčiai gali būti ankstyvieji dirvožemio cheminių savybių arba augalų fiziologinio streso indikatoriai (Prescott & Vesterdal, 2021; Yuan et al., 2024).

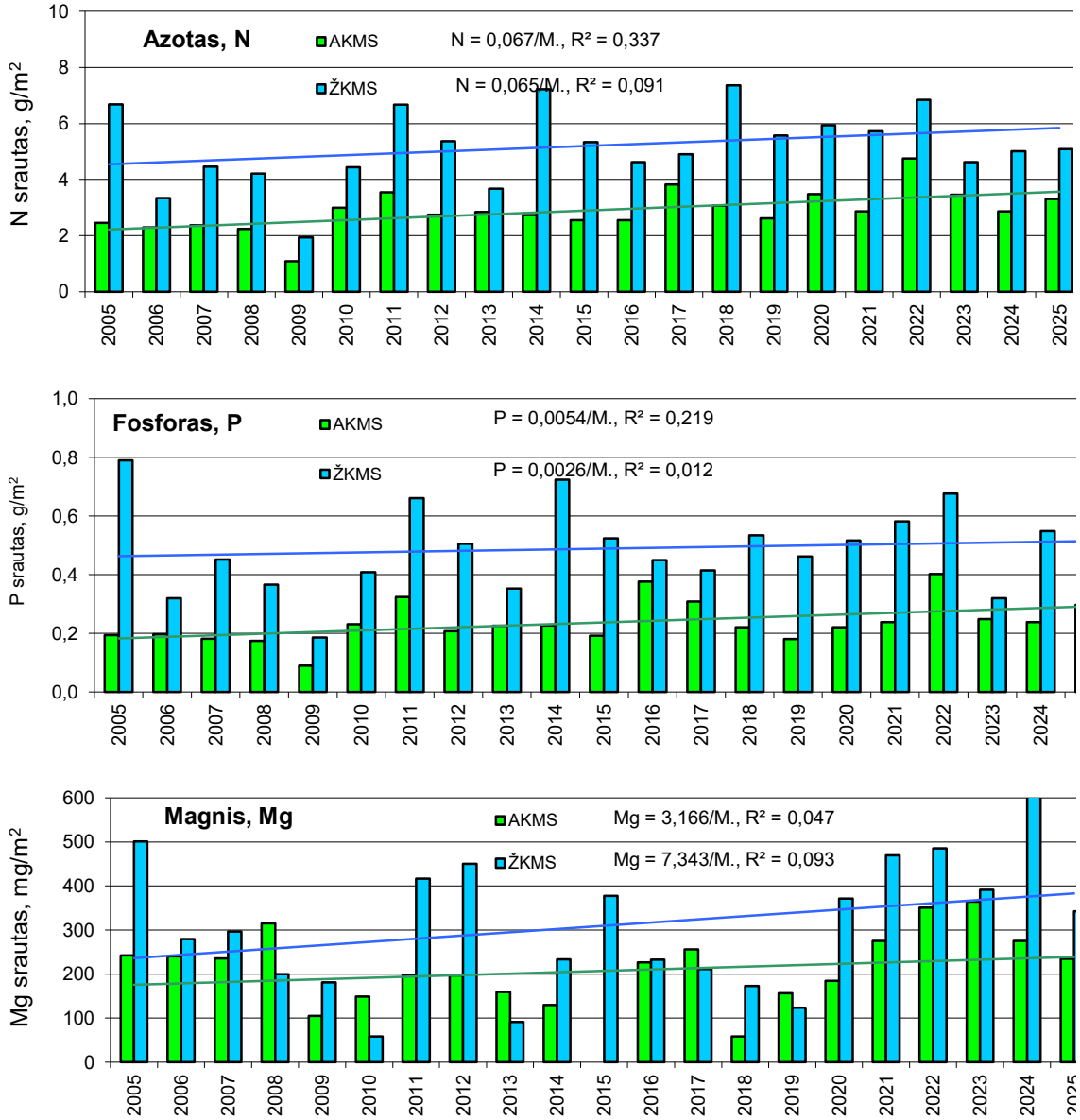
Hemiborealiniuose miškuose, kurių produktyvumą riboja santykinai skurdūs dirvožemiai ir trumpas vegetacijos laikotarpis, ilgalaikiai maisto elementų srautų tyrimai įgyja ypatingą reikšmę. Jie leidžia įvertinti, kaip mažėjanti atmosferinė tarša, klimato šiltėjimas ir dažnėjantys meteorologiniai ekstremumai keičia vidinį maisto medžiagų ciklą bei ilgalaikį miško ekosistemų funkcionavimą. Integruojant atmosferinės depozicijos, polajinių kritulių, žaliosios lapijos, nuokritų cheminės sudėties ir elementų srautų duomenis galima nuosekliai įvertinti visą biogeocheminę grandinę – nuo elementų patekimo iš atmosferos iki jų grįžimo į dirvožemį ir pakartotinio įsitraukimo į medžių mitybą.

Darbo tikslas – pagal nustatytas pagrindinių elementų koncentracijas bei jų pokyčius nuokritose, išaiškinti į ekosistemą patenkančių šių elementų srautus ir galimą poveikį pagrindiniams geosisteminiams procesams, o taip pat, atsižvelgus į išaiškintus procesus, nustatyti galimą miško ekosistemų būklės tolimesnę raidą.

Tirtų elementų srautų analizė parodė, kad Aukštaitijos KMS mišriame ir perbrendusiame pušyne su nuokritomis į paklotę azoto vidutiniškai patenka apie 2,7 g/m^2, kai tuo tarpu Žemaitijos KMS bręstančiame eglyne beveik 2 kartus daugiau, apie 5,1 g/m^2. Per tiriamąjį laikotarpį šio elemento srautas su nuokritomis didėja po 0,07 g/m^2 per m., abiejose stotyse vienodai, tik Aukštaitijos KMS jis buvo reikšmingas, o Žemaitijos KMS – per 2020-2025 m. laikotarpį sumažėjo nuo 0,12 iki 0,07 g/m^2 per m. (6.42 pav.).

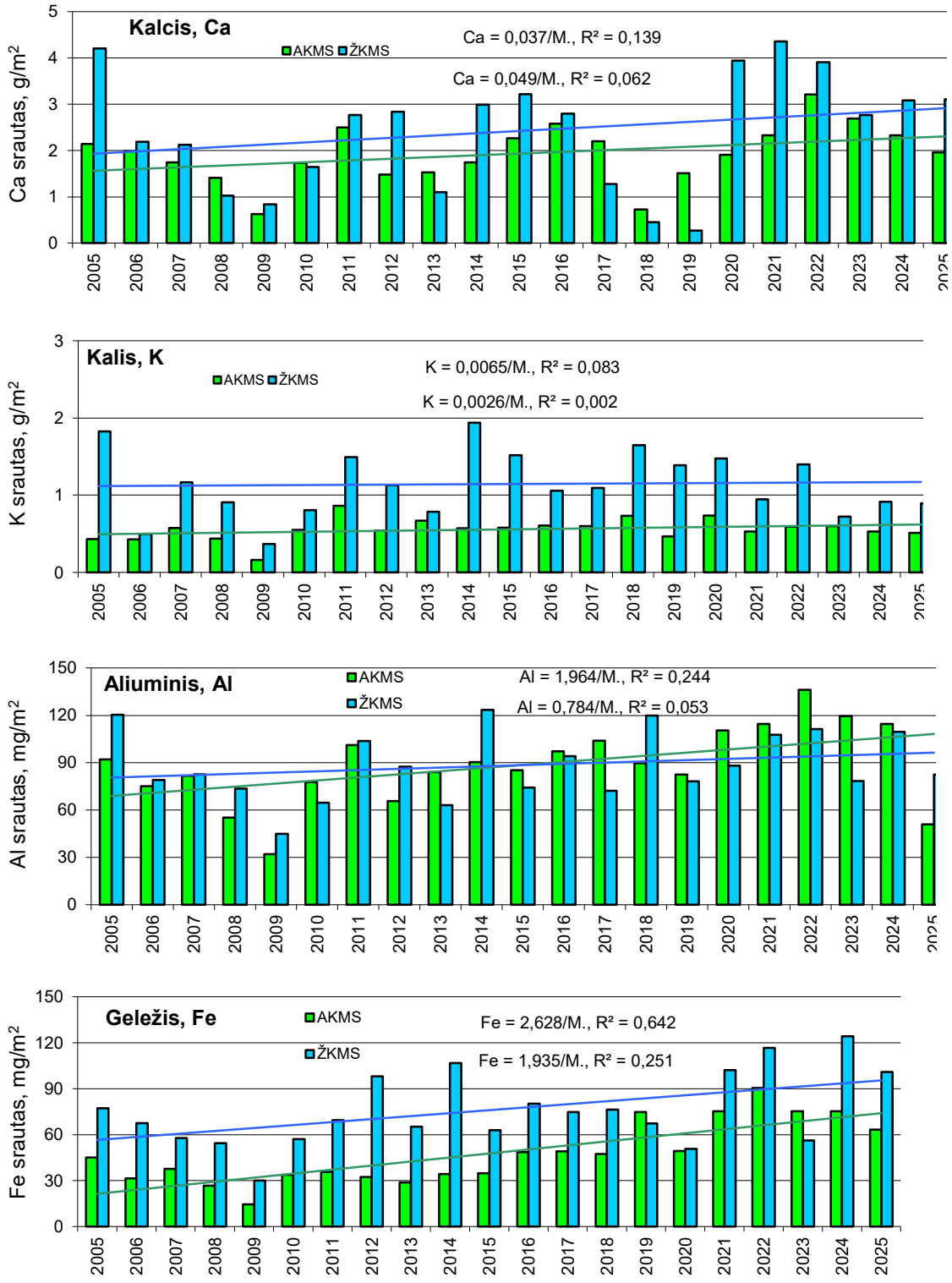
Aukštaitijos KMS mišriame ir perbrendusiame pušyne su nuokritomis į paklotę fosforo vidutiniškai patenka apie 0,22 g/m^2, kai tuo tarpu Žemaitijos KMS bręstančiame eglyne taip pat beveik 2 kartus daugiau, apie 5 g/m^2. Per tiriamąjį laikotarpį Aukštaitijos KMS šio elemento srautas su nuokritomis didėja po 5 mg/m^2 per m., o Žemaitijos KMS žymiau mažiau, vos po 2 mg/m^2 per m.

Aukštaitijos KMS mišriame ir perbrendusiame pušyne su nuokritomis į paklotę Mg vidutiniškai patenka virš 0,2 g/m^2, kai tuo tarpu Žemaitijos KMS bręstančiame eglyne apie 0,3 g/m^2. Per tiriamąjį laikotarpį Aukštaitijos KMS šio elemento srautas su nuokritomis didėjo po 3,2 mg/m^2 per m., o Žemaitijos KMS intensyviau, po 7,3 mg/m^2 per m.



6.42 pav. Tirtų elementų srautai su nuokritomis Aukštaitijos ir Žemaitijos augalijos intensyvaus tyrimo stacionaruose

Aukštaitijos KMS mišriame ir perbrendusiame pušyne su nuokritomis į paklotę Ca vidutiniškai patenka apie 2 g/m^2, kai tuo tarpu Žemaitijos KMS bręstančiame eglyne apie 2,5 g/m^2. Per tiriamąjį laikotarpį Aukštaitijos KMS šio elemento srautas su nuokritomis didėja po 0,037 g/m^2 per m., o Žemaitijos KMS intensyviau, po 0,049 g/m^2 per m. (6.43 pav.).



6.43 pav. Tirtų elementų srautai su nuokritomis Aukštaitijos ir Žemaitijos augalijos intensyvaus tyrimo stacionaruose

Aukštaitijos KMS mišriame ir perbrendusiame pušyne su nuokritomis į paklotę K vidutiniškai patenka apie 0,50 g/m^2, kai tuo tarpu Žemaitijos KMS bręstančiame eglyne apie 1,2 g/m^2. Per tiriamąjį laikotarpį abiejose stotyse K srautas su nuokritomis išliko stabilus paminėtame lygmenyje.

Aukštaitijos KMS mišriame ir perbrendusiame pušyne su nuokritomis į paklotę Fe vidutiniškai patenka apie 50,0 mg/m^2, kai tuo tarpu Žemaitijos KMS bręstančiame eglyne apie 80 mg/m^2. Per tiriamąjį laikotarpį Aukštaitijos KMS šio elemento srautas su nuokritomis didėja po 2,63 mg/m^2 per m., o Žemaitijos KMS kiek mažiau po 1,93 mg/m^2 per m.

Aukštaitijos ir Žemaitijos KMS su nuokritomis į paklotę Al vidutiniškai patenka vienodai apie 90 mg/m^2. Per tiriamąjį laikotarpį Aukštaitijos KMS šio elemento srautas su nuokritomis didėja po 2,02 mg/m^2 per m., o Žemaitijos KMS kinta nereikšmingai, vos po 0,78 mg/m^2 per m. (6.43 pav.).

Didėjantys maistinių medžiagų (N, P, K, Ca, Mg) srautai su nuokritomis yra ekologiniu požiūriu svarbūs, nes jie tiesiogiai sąlygoja ekosistemos maistinių medžiagų balansą, todėl daro didelę įtaką miškų atsparumui būsimiems stresams (sausrai, karščiui, rūgščiųjų iškritų kiekiui, o taip pat ligoms ir kenkėjams).

Išvados

1. Pagrindinių maisto medžiagų (N, P, Ca, Mg) srautai su nuokritomis ilgainiui didėjo abiejose KMS, tačiau didžiausi jų srautai nustatyti Žemaitijos KMS eglyne, kur dėl didesnio medyno produktyvumo ir nuokritų kiekio į paklotę kasmet sugrąžinama gerokai daugiau biogeninių elementų nei Aukštaitijos KMS pušyne.
2. Stabilūs kalio srautai ir didėjantys azoto, fosforo, kalcio bei magnio srautai rodo, kad tiriamose ekosistemose kol kas išlieka aktyvi vidinė maisto medžiagų apytaka, palaikanti dirvožemio derlingumą ir medynų produktyvumą.
3. Didėjantys geležies ir aliuminio srautai su nuokritomis, ypač Aukštaitijos KMS, atspindi intensyvėjančią biogeocheminių elementų cirkuliaciją ir gali būti susiję su klimato kaitos bei dirvožemio cheminių savybių pokyčių sąlygotais mineralinės medžiagos transformacijos procesais.
4. Didėjantis pagrindinių maisto medžiagų grįžimas į paklotę sudaro palankias sąlygas išlaikyti miško ekosistemų mitybos balansą ir atsparumą aplinkos stresams, tačiau šių procesų stabilumas ateityje priklausys nuo klimato kaitos poveikio organinės medžiagos skaidymuisi, maisto medžiagų išplovimui bei medynų rūšinės sudėties pokyčiams.

6.5. Pagrindinių maistinių elementų koncentracijų žaliojoje lapijoje ir nuokritose kaita bei jų srautų su nuokritomis reikšmė

Žaliosios lapijos, nuokritų ir atmosferinių iškritų cheminės sudėties tyrimai parodė, kad Aukštaitijos ir Žemaitijos KMS pagrindinių maistinių elementų ciklą lemia keli nuosekliai susiję procesai: elementų patekimas su krituliais, jų transformacija medžių lajose, kaupimas gyvuose asimiliaciniuose organuose, retranslokacija prieš lapų ir spyglių senėjimą bei likusios dalies grąžinimas į dirvožemį su nuokritomis. Todėl atskirų terpių cheminė sudėtis turi būti vertinama kaip vientisos atmosferos–lajos–dirvožemio sistemos dalis.

Naujausi tyrimai rodo, kad medžių lajos nėra pasyvūs atmosferinių iškritų kolektoriai. Jose vyksta tiesioginė elementų absorbcija, jų mikrobiologinės transformacijos, sausųjų iškritų sulaikymas ir elementų išplovimas iš gyvųjų audinių. Europos miškuose nustatyta, kad reikšminga dalis polajiniuose krituliuose esančių nitratų gali susidaryti dėl nitrifikacijos pačiose lajose, todėl polajinių kritulių cheminė sudėtis nebūtinai tiesiogiai atitinka atmosferinę depoziciją (Guerrieri et al., 2024). Lajų uždarumas ir struktūra taip pat gali būti svarbesni bendram elementų patekimui negu pati medžių rūšis, nes tankios lajos efektyviau sulaiko sausąsias iškritas ir turi didesnį paviršių elementų mainams (Vos et al., 2025).

Žaliosios lapijos cheminė sudėtis atskleidė skirtingas medžių rūšių mitybos strategijas. Beržų lapuose daugumos makroelementų koncentracijos buvo didesnės negu pušų ir eglių spygliuose, o tai rodo intensyvesnę, tačiau aplinkos pokyčiams jautresnę lapuočių maisto medžiagų apykaitą. Paprastoji pušis pasižymėjo konservatyvesne elementų naudojimo strategija, o eglė, ypač Žemaitijos KMS, buvo jautresnė azoto, magnio ir vandens režimo pokyčiams.

Aukštaitijos KMS žaliojoje lapijoje ilgą laiką didėjo N ir K koncentracijos, tačiau 2021–2025 m. šių tendencijų intensyvumas sumažėjo. Žemaitijoje beržų lapuose N koncentracijos mažėjo, o spygliuose dažniausiai stabilizavosi. Abiejose stotyse paskutiniuoju laikotarpiu padidėjo P koncentracijos, todėl azoto koncentracijų stabilizacija arba mažėjimas kartu su P augimu rodo lapijos stechiometrijos poslinkį link mažesnio N santykio.

Šis pokytis gali reikšti didėjančią santykinio azoto ribojimo svarbą, tačiau vien N santykio nepakanka galutinei mitybos diagnozei. Jį būtina vertinti kartu su rūšiai būdingomis koncentracijų ribomis, medžių prieaugiu, defoliacija ir elementų retranslokacija. Mažėjant atmosferinei azoto depozicijai, miškų produktyvumas vis labiau priklausys nuo vidinio N išsaugojimo ir pakartotinio panaudojimo. Naujausi tyrimai pabrėžia, kad azoto ribojimas ir prisotinimas sudaro tarpusavyje susijusį kontinuumą, todėl bendras N kiekis ekosistemoje nebūtinai parodo jo fiziologinį prieinamumą medžiams (Du et al., 2025).

Nuokritų cheminė sudėtis atspindi galutinį medžių maisto medžiagų naudojimo etapą. Prieš lapams ir spygliams nukrentant, judrūs elementai, ypač N, P ir K, gali būti retranslokuojami į jaunesnius audinius ar ilgalaikes medžio atsargas. Todėl jų koncentracijų didėjimas nuokritose gali būti susijęs tiek su didesne lajų biomase ir intensyvesne apytaka, tiek su mažėjančiu retranslokacijos efektyvumu.

Aukštaitijos KMS didėjančios N ir P koncentracijos nuokritose sutapo su bendro nuokritų kiekio augimu. Todėl čia didesnis šių elementų grįžimas į paklotę pirmiausia rodo aktyvėjantį biologinį ciklą, tačiau kartu gali reikšti, kad vis didesnė elementų dalis nebesusigrąžinama prieš spyglių ir lapų kritimą. Žemaitijos KMS taip pat didėjo N grąžinimas su nuokritomis, nors žaliojoje beržų lapijoje jo koncentracija mažėjo. Toks gyvosios lapijos ir nuokritų krypčių neatitikimas gali būti mažėjančio retranslokacijos efektyvumo arba spartesnio senėjimo signalas.

Sausros gali keisti šią pusiausvyrą ne vien mažindamos elementų įsisavinimą. Jos taip pat keičia lapijos senėjimo laiką, elementų perskirstymą ir jų išplovimą. Eksperimentiniai tyrimai parodė, kad sausra modifikuoja lajų maisto medžiagų mainus ir jų paskirstymą tarp žaliosios bei senstančios lapijos (Touche et al., 2024). Brandžios paprastosios eglės į vandens trūkumą gali reaguoti greitu spyglių atmetimu, o sausra reikšmingai sumažina K kiekį nuokritose ir keičia N, P, Ca bei Mg srautus (Ulbricht et al., 2025). Tai pagrindžia didesnį Žemaitijos KMS eglynų cheminės apytakos jautrumą kritulių režimui.

Aiškiausiai vidinio miško maistinių medžiagų ciklo dominavimą parodo elementų srautų palyginimas. Visų pagrindinių tirtų maistinių elementų srautai su nuokritomis reikšmingai viršijo jų srautus su krituliais atviroje vietoje:

- azoto srautas su nuokritomis Aukštaitijos KMS buvo apie 5 kartus, o Žemaitijos KMS – apie 10 kartų didesnis už srautą su atviros vietos krituliais;
- kalcio srautas buvo atitinkamai apie 4 ir 6 kartus didesnis;
- kalio srautas – apie 4 ir 10 kartų didesnis;
- magnio srautas abiejose stotyse atmosferinį srautą viršijo mažiausiai – maždaug 1,5 karto.

Šie santykiai rodo, kad N, K ir Ca kiekį, kasmet pasiekiantį miško paklotę, daugiausia formuoja ne naujas atmosferinis elementų papildymas, bet medžiuose jau esančių medžiagų biologinė recirkuliacija. Atmosferinė depozicija dabartinėmis mažesnės taršos sąlygomis atlieka daugiausia papildančio srauto funkciją, o pagrindinis paklotės aprūpinimas vyksta per lapų, spyglių, žievės ir smulkiųjų šakų apykaitą.

Ypač didelis N ir K nuokritų bei atmosferinių srautų santykis Žemaitijos KMS patvirtina intensyvesnį eglyno biogeocheminį ciklą. Tačiau šis rezultatas negali būti aiškinamas tik didesniu

produktyvumu. Žemaitijoje tankios lajos pasižymi intensyviu K, Ca ir Mg išplovimu, todėl bendras šių elementų grąžinimas į dirvožemį pasiskirsto tarp dviejų pagrindinių kelių – polajinių kritulių ir kietųjų nuokritų. Naujausi tyrimai patvirtina, kad lajų struktūra reikšmingai keičia bendrąją atmosferinę depoziciją, o tankesnėse lajose elementų srautai gali būti daug didesni negu atvirose pušų lajose (Vos et al., 2025).

Aukštaitijos KMS mažesni nuokritų ir atmosferinių srautų santykiai atspindi mažesnę pušynų lapijos biomasę, ažūriškesnes lajas ir lėtesnę maisto medžiagų apykaitą. Tačiau ilgalaikis nuokritų kiekio ir su jomis grįžtančių N, P, Ca bei Mg srautų didėjimas rodo, kad šioje stotyje vidinio ciklo intensyvumas palaipsniui stiprėja.

Magnio srautų santykis buvo gerokai mažesnis negu N, K ar Ca. Tai reiškia, kad atmosferinė depozicija gali sudaryti santykinai svarbesnę Mg balanso dalį. Be to, Mg yra vidutinio judrumo elementas: dalis jo retranslokuojama, dalis išplaunama, o prieinamumas glaudžiai susijęs su dirvožemio rūgščių ir bazių pusiausvyra. Todėl nedideli atmosferinio Mg srauto pokyčiai gali turėti didesnę ekologinę reikšmę negu analogiški N ar K srautų pokyčiai, kurių cikle vyrauja biologinis perdirbimas.

Aukštaitijos KMS būdingas santykinai lėtesnis, konservatyvesnis ir stabilesnis maistinių medžiagų ciklas. Pušynų lajos mažiau sulaiko atmosferines sausąsias iškritas, o elementai ilgiau išlaikomi biomasėje. Didėjantys nuokritų ir elementų srautai čia daugiausia siejasi su didėjančia lajų biomase, mažėjančia defoliacija ir aktyvesniu organinės medžiagos grąžinimu į dirvožemį.

Žemaitijos KMS pasižymi greitesniu ir didesnio masto ciklu. Eglynų tankios lajos sulaiko daugiau atmosferinių medžiagų, intensyviau transformuoja kritulių cheminę sudėtį ir išplauna judrius elementus. Didesni N, K, Ca bei Mg srautai su nuokritomis palaiko intensyvią dirvožemio biologinę apytaką, tačiau kartu reiškia didesnę sistemos priklausomybę nuo efektyvios mineralizacijos, šaknų pakartotinio įsisavinimo ir palankaus drėgmės režimo.

Tokį stočių skirtumą pagrindžia naujausi tyrimai, rodantys, kad maisto medžiagų patekimą ir cirkuliaciją miškuose stipriai lemia lajų uždarumas, biomasės kaita ir medžių atsakas į sausras. Tankiose lajose bendra elementų depozicija didesnė, tačiau sausrai jautrios eglės gali greitai prarasti spyglių biomasę ir su ja susijusias maisto medžiagas.

Naujos tendencijos ir gautų rezultatų naujumas:

- mažėjant atmosferinei taršai nuokritos tampa santykinai vis svarbesniu elementų tiekimo į paklotę keliu. Nuo atmosferinės depozicijos stipriai priklausiusi sistema pereina į režimą, kuriame dirvožemio paviršiaus aprūpinimą daugiausia lemia medžių produktyvumas, lapijos ilgaamžiškumas, retranslokacija ir nuokritų destrukcija.
- hidrologinis elementų ciklo perskirstymas - judrių elementų, ypač K, grįžimas į dirvožemį vis labiau pasiskirsto tarp nuokritų ir polajinių kritulių. Todėl mažėjanti K koncentracija nuokritose nebūtinai reiškia mažesnį bendrą srautą, tačiau gali rodyti didėjančią priklausomybę nuo kritulių režimo ir lajų išplovimo. Tai ypač aktualu Žemaitijos KMS.
- atsiskirianti N ir P dinamika - stabilizuojantis arba lėčiau didėjantis N kiekis žaliojoje lapijoje kartu su P koncentracijų augimu ir didesniu abiejų elementų grąžinimu su nuokritomis rodo, kad miškų mitybos būklę vis labiau lems ne absoliutus elementų kiekis, bet retranslokacijos efektyvumas ir jų tarpusavio santykis.
- bendras Fe ir kai kuriais atvejais Al koncentracijų bei srautų augimas. Šis signalas kol kas negali būti priskirtas nei mitybos gerėjimui, nei neabejotinam cheminiam stresui. Jis gali būti susijęs su metalų judrumo dirvožemyje, hidrologinio režimo, mineralinių aerozolių depozicijos arba analitinių procedūrų pokyčiais, todėl laikytinas prioritetiniu tolesnio patikrinimo objektu.

Svarbiausias šio tyrimo naujumas yra ilgos stebėjimų sekos pagrindu parodyta kiekybinė maistinių elementų ciklo hierarchija: **N, K ir Ca srautai su nuokritomis daug kartų viršija jų atmosferinį patekimą, o Mg balanse atmosferinis šaltinis išlieka santykinai svarbesnis**. Tai leidžia atskirti elementus, kurių ciklą daugiausia palaiko biologinė recirkuliacija, nuo elementų, jautresnių išorinio papildymo pokyčiams.

Kitas reikšmingas naujumas yra dviejų skirtingų natūralių miško strategijų nustatymas. Aukštaitijos pušynuose vyrauja lėtesnė ir stabilesnė elementų apytaka, o Žemaitijos eglynuose – intensyvesnė, produktyvesnė, tačiau kritulių režimui ir fiziologiniam stresui jautresnė sistema. Kadangi abi stotys įkurtos netvarkomuose rezervatų miškuose, šie skirtumai gali būti interpretuojami kaip natūralūs skirtingos rūšinės sudėties hemiborealinių ekosistemų atsako mechanizmai.

Apibendrinant galima teigti, kad atmosferos iškritos išlieka svarbi elementų ciklo papildymo ir lajų cheminių transformacijų grandis, tačiau pagrindinį maisto medžiagų kiekį miško paklotei tiekia vidinė biologinė recirkuliacija lapijoje. Ekosistemų atsparumą lemia ne maksimalus elementų srautas, o gebėjimas išlaikyti pusiausvyrą tarp jų įsisavinimo, retranslokacijos, išplovimo, grąžinimo su nuokritomis, mineralizacijos ir pakartotinio įsisavinimo.

IŠVADOS

1. Nuokritos yra vienas pagrindinių maisto medžiagų grąžinimo į dirvožemį kelių, tačiau jų srautų ekologinę reikšmę lemia ne tik elementų koncentracijos, bet ir bendras nuokritų kiekis, frakcinė sudėtis bei elementų retranslokacija iš senstančių audinių.
2. Žemaitijos KMS beveik visų pagrindinių maistinių elementų srautai su nuokritomis yra didesni negu Aukštaitijos KMS. Tai atspindi didesnę eglyno lapijos biomasę, intensyvesnę audinių kaitą ir spartesnį vidinį biogeocheminį ciklą.
3. Aukštaitijos KMS mažesni absoliutūs elementų srautai pasižymi nuoseklesne ilgalaike didėjimo kryptimi. Šis procesas dera su augančiu nuokritų kiekiu, mažėjančia defoliacija ir didėjančia pušų lajų biomase, todėl daugiausia interpretuotinas kaip intensyvėjančios ekosistemos apytakos požymis.
4. Didesnis N ir P grąžinimas su nuokritomis gali palaikyti dirvožemio mikroorganizmų veiklą ir medynų produktyvumą, tačiau kartu gali rodyti mažėjantį šių elementų retranslokacijos efektyvumą. Todėl jų srautų augimas negali būti automatiškai prilyginamas gerėjančiai medžių mineralinei mitybai.
5. Didėjantys Ca ir Mg srautai gali stiprinti miško paklotės ir viršutinio dirvožemio buferines savybes bei iš dalies kompensuoti ankstesnio rūgštėjimo sukeltus bazinių katijonų nuostolius. Vis dėlto Žemaitijoje jų didesni srautai taip pat gali rodyti intensyvesnį elementų netekimą iš gyvųjų lajų audinių.
6. Kalio srautų stabilumas nuokritose neapibūdina viso jo ciklo, nes reikšminga K dalis, ypač Žemaitijos eglynuose, į dirvožemį patenka su polajiniais krituliais. Todėl K balansas turi būti vertinamas integruojant abu grįžimo kelius.
7. Fe ir Al srautų didėjimas yra naujas ir nepakankamai paaiškintas signalas. Jis gali atspindėti dirvožemio cheminės bei hidrologinės būklės pokyčius ar atmosferinę mineralinių dalelių depoziciją, todėl negali būti laikomas vien maistinių elementų ciklo pagerėjimu.
8. Aukštaitijos KMS reprezentuoja lėtesnį, stabilesnį ir didėjančios biomasės palaikomą elementų ciklą, o Žemaitijos KMS – greitesnę, produktyvesnę, tačiau meteorologiniams ir fiziologiniams sutrikimams jautresnę apytaką.
9. Didėjantys elementų srautai su nuokritomis gali didinti organinės medžiagos skaidymą ir maisto medžiagų mineralizaciją, tačiau jų poveikis ilgalaikiam anglies kaupimui priklausys nuo nuokritų destrukcijos greičio ir dirvožemio mikrobiologinio aktyvumo.

10. Visų tirtų elementų srautai su nuokritomis viršija reikšmingai srautus su krituliais: N nuo 5 iki 10 artų Aukštaitijos ir Žemaitijos KMS atitinkamai; Ca nuo nuo 4 iki 6 atitinkamai; K nuo 4 iki 10 atitinkamai; ir mg mažiausiai – apie 1,5 karto.
11. Miško ekosistemų atsparumą ateityje lems ne pats didžiausias elementų grįžimo į dirvožemį intensyvumas, bet gebėjimas išlaikyti pusiausvyrą tarp maisto medžiagų įsisavinimo, retranslokacijos, išplovimo, grąžinimo su nuokritomis ir pakartotinio panaudojimo.
12. Kadangi abi KMS įkurtos netvarkomuose rezervatų miškuose, nustatyti skirtumai yra vertinga natūralių hemiborealinių ekosistemų biogeocheminio funkcionavimo atskaitos sistema, parodanti, kaip skirtingos medynų struktūros reaguoja į tą patį regioninį taršos mažėjimą ir klimato kaitą.

6.6. Cheminių komponenčių koncentracijų kaitos augalijos komponentuose apibendrinimas

Karo Ukrainoje pasekmė: S srauto su krituliais ir kritulių rūgštingumo padidėjimas.

2011-2025 m. laikotarpio išskirtinis rezultatas: keičiasi tirtų cheminių komponenčių koncentracijų ir srautų santykis. Jei tyrimų pradžioje palajiniuose krituliuose SO_4^{2-}, NH_4^+ ir NO_3^- koncentracijos ir srautai į miško paklotę viršijo šių komponenčių koncentracijas ir srautus atviroje vietoje, indikuodami intensyvų nuplovimą, tai jau paskutiniuoju laikotarpiu registruojamas atvirkštinis procesas: polajiniuose krituliuose šių komponenčių koncentracijos ir srautai į dirvožemį yra mažesni. Tai reikšmingas pokytis miško ekosistemoje.

2017-2024 m. pirmą kartą registruojamas kritulių rūgštingumo rodiklio priartėjimas ar net viršijimas 6 ribą- 2021 m.. T.y. per pirmą tiriamąjį laikotarpį (iki 2010) pH vertė išliko stabili, kai tuo tarpu per antrąjį tiriamąjį laikotarpį (2011-2025 m.) pH vertė padidėjo vienetu, t.y. kritulių rūgštingumas ženkliai sumažėjo ir priartėjo prie neutralaus ribos. Tačiau paskutiniaisiais metais šis rodiklis sumažėjo net 0,5 pH iki 5,5, kas sietina su karu Ukrainoje. Tai išskirtinis pokytis Aukštaitijos KMS miško ekosistemoje.

Tokiu būdu Aukštaitijos KMS baseinas reikšmingai išsivalo nuo sieros komponenčių taršos, o didėjantis šarminių katijonų srautas, ypač K, prisideda prie didėjančio miškų produktyvumo ir atsparumo klimato kaitai.

Žemaitijos KMS polajinių kritulių rūgštingumas yra mažesnis negu atviros vietos kritulių. Per visą tiriamąjį laikotarpį pH vertė iš esmės nesikeitė ir polajinių kritulių svyravo apie 5,3, o atviros vietos apie 5.

Reikšmingiausiai mažėja S koncentracijos polajiniuose krituliuose. Per tiriamąjį laikotarpį šio elemento koncentracijos sumažėjo daugiau kaip nuo 3 mg/l iki 0,3 mg/l, t.y. beveik 10 kartų. Tokiam sumažėjimui įtakos turėjo reikšmingas sulfatų ir SO2 koncentracijų sumažėjimas ore, o tuo pačiu ir mažėjantis nuplovimas nuo lapijos paviršiaus. 2021-2025 m. laikotarpiu S komponenčių koncentracija ir jų srautai į miško paklotę išlieka minimaliame lygmenyje lyginant su 2015-2020 m.

Žemaitijos KMS, skirtingai negu Aukštaitijos KMS, nitratų koncentracija krituliuose po laja ir jų rautas reikšmingai nesiskiria nuo nitratų koncentracijos ir jų srauto krituliuose atviroje vietoje. Paskutiniuoju laikotarpiu 2022 - 2025 m. nitratų koncentracijos pradėjo didėti atviroje vietoje.

Amonio koncentracijos ir srautas po laja kito taip pat analogiškai jų koncentracijoms ir srautui atviroje vietoje. Paskutiniuoju laikotarpiu amonio koncentracijos atviros vietos krituliuose ir jo srautas virš 5 kartų viršija amonio koncentracijas ir srautą po medžių lajomis tačiau turi tendenciją mažėti. Mažėjimo intensyvumą slopina, 2019 m., dėl nežinomų dar priežasčių, reikšmingai padidėjusios amonio koncentracijos atviros vietos krituliuose ir jų srautas su krituliais. Išimti sudaro taip pat 2019 ir 2025 m., kai ***atviros vietos krituliuose išaugo amonio koncentracijos, o su jomis ir N rautai padidėjo ir prilygo 2000jų m. koncentracijoms ir srautams. Ar tai karo Ukrainoje pasekmė parodys ateities tyrimai.***

K koncentracija ir srautas polajiniuose krituliuose viršija K koncentracijas ir srautą atviros vietos krituliuose daugiau negu 20 kartų ir šis išplovimo intensyvumas keičiantis klimatui nuolat didėja, nors K koncentracijos atviros vietos krituliuose turi tendenciją mažėti, skirtingai negu Aukštaitijos KMS, kur šio elemento koncentracijos atviros vietos krituliuose didėja.

Apibendrinant gautus rezultatus Žemaitijos KMS galima būtų taip pat teigti, kad miško ekosistemos reikšmingai išsivalo nuo sieros komponenčių taršos, didėjantis šarminių katijonų srautas prisideda prie didėjančio miškų produktyvumo ir atsparumo klimato kaitai, tačiau tik dėl intensyvesnio šarminių katijonų išplovimo ir audinių. Žemaitijos KMS mažėja K, Na ir K koncentracijos bei srautai su krituliais atviroje vietoje. Cl koncentracijų augimą reiktų vertinti kaip neigiamą veiksnį didinantį kritulių rūgštingumą. Paskutiniaisiais metais(2022-2025 m.) registruojamas Na, Ca ir Mg koncentracijų ir srautų mažėjimas į miško paklotę Žemaitijos KMS.

Rūgštinančių komponenčių koncentracijos krituliuose ir jų srautai į miško paklotę Žemaitijos KMS baseine yra reikšmingai didesni negu Aukštaitijos KMS baseine, dėl tolimųjų oro teršalų pernašų iš Vidurio ir Vakarų Europos. Čia karo galimos pasekmės mažiau išreikštos.

KMS baseinuose pasibaigė sieros komponenčių nuplovimas nuo lapijos paviršiaus. Nei S koncentracijos polajiniuose krituliuose nei jų srautai su krituliais reikšmingai neviršija šio elemento koncentracijas ir srautus atviroje vietoje. Tai išskirtinai naujas rūgštinančių komponenčių transformacijos rezultatas KMS baseinuose.

Nitratų NO_3^- kaitoje stebimos dvi skirtingos tendencijos. Tyrimų pradžioje dėl intensyvesnės taršos šiais junginiais nuplovimas nuo augalijos paviršiaus iki 2011-2012 m. viršijo sugėrimą šių junginių per žioteles, viršydamas koncentracijas ir srautus atviroje vietoje. Aukštaitijos KMS ši tendencija tęsėsi tik iki 2002 m. Paskutiniuoju laikotarpiu sugėrimas per žioteles viršija nusėdimą abiejose stotyse, indikuojant mažėjančia bendrą oro tarša nitratais.

Amonio NH_4^+ koncentracijų ir srautų kaitoje praeinant pro medžių lapija esminių skirtumų tarp KM stočių nenustatyta. Pagrindinė tendenciją: iki 2000 m. nuplovimas nuo augalijos paviršiaus reikšmingai viršijo amonio sugerties proceso intensyvumą. Paskutiniuoju laikotarpiu sugerties intensyvumas reikšmingai viršijo nuplovimą dėl ko mažėjo šios komponentės koncentracijos polajiniuose krituliuose bei jos srautai į dirvožemį su krituliais.

Na ir Cl koncentracijos ir srautai iki 10 ir 20 kartų atitinkamai yra didesni Žemaitijos KMS negu Aukštaitijos KMS nors jų kaitoje stebimos identiškos tendencijos. Iki 2010 m. abiejose stotyse didėjo nuplovimas nuo lapijos paviršiaus. Paskutiniuoju laikotarpiu nuplovimas mažėja, dėl ko mažėja ir šių komponenčių koncentracijos polajiniuose krituliuose ir jų srautai, turintys reikšmingos įtakos bendram kritulių rūgštingumui ir jo mažėjimui Aukštaitijos KMS baseine.

K, Ca ir Mg kaitoje stebimas ypač intensyvus šių elementų išplovimas iš lapijos indikuodamas, kad šių elementų kiekiai lapijoje turėtų didėti, o nuokritose mažėti. Tai reikšmingas procesas praturtinantis dirvožemį pagrindiniais maistiniais komponentais.

Aukštaitijos KMS per tiriamąjį laikotarpį ir paskutinįjį (2021-2025 m.) atitinkamai N koncentracijos reikšmingai didėja beržo po 0,225 g/kg per m., dabar po0,17 g/kg per m.; pušies I m. spygliuose po 0,158 g/kg per m. dabar po 0,1 g/kg per m.; nereikšmingai pušies II m. spygliuose po 0,117 g/kg per m. dabar po 0,07 g/kg per m. ir mažėja, nors taip pat nereikšmingai – eglės spygliuose po -0,023 g/kg per m. dabar po -0,005 g/kg per m. Nepaisant šio fakto, per visą tiriamąjį laikotarpį N koncentracija lapijoje vidutiniškai didėja po 0,119 g/kg per m., dabar po 0,08 g/kg per m. Tai geros miško ekosistemos būklės rodiklis (4.1 – 4.2 pav. ir 4.1 lentelė), nors augimo intensyvumas mažėja ir tik mažėjimo intensyvumas eglės spygliuose artėja prie nulio. ***Tai gali būti pirmieji objektyvūs pušų ir beržų būklės blogėjimo požymiai.***

P kaitoje stebimos skirtingos tendencijos, t.y. jei 2020 m buvo nustatyta, kad visuose tirtuose lapų/spyglių pavyzdžiuose P koncentracija pakankamai reikšmingai mažėja, tai antruoju laikotarpiu jau registruojama ir šios komponentės augimo tendencija. Eglės ir pušies spygliuose P koncentracijos mažėjo po 0,06g/kg, tai dabar eglės spygliuose P didėja po 0,007, o pušies I m. spygliuose po 0,01 g/kg per m. B lapuose P koncentracijos mažėjo i***ntensyviausiai – po 0,05 g/kg per m., tai dabar tik po -0,007*** g/kg per m. Mažėjimo tendencija išliko ir P II m. spygliuose po -0,002 g/kg per m.

Paskutiniuoju laikotarpiu (2021-2025 m.) stebima P koncentracijų augimo tendencija spygliuose, o beržų lapuose dar išlieka stabili.

Per tiriamąjį laikotarpį ir paskutinįjį (2021-2025 m.) atitinka, nustatyta K koncentracijų didėjimo tendencija 2020 m. beržų lapuose po 0,13 g/kg per m., dabar po 0,08 g/kg per m., pušies spygliuose I metų po 0,104 g/kg per m., dabar po 0,07 g/kg per m. ir II metų po 0,128 g/kg per m., dabar po 0,06 g/kg per m. o eglių spygliuose šio elemento koncentracijos išlieka praktiškai stabilios ar dabar kiek ta didėja tik po 0,007 g/kg per m.

Iš esmės priešinga buvo Ca koncentracijų kaita medžių lapijoje. Per 15 m. tiriamąjį laikotarpį Ca koncentracija pakankamai reikšminga mažėjo beržų lapuose (po -0,259 g/kg per m.) ir pušų I metų spygliuose po 0,08 g/kg per m., o didėjo eglių spygliuose (po +0,146 g/kg per m.), tačiau šis augimas nebuvo reikšmingas.

Didžiausios magnio koncentracijos nustatytos beržų lapuose, kur jos vidutiniškai siekė 1,8 g/kg. Mažesnės koncentracijos nustatytos tirtuose spygliuose: eglės ir pušų, kurios reikšmingai nesiskyrė tarpusavyje ir svyravo apie 0,7-0,8 g/kg.

Per tiriamąjį laikotarpį stebima Mg mažėjimo tendencija ir ypač beržų lapuose (po -0,124 g/kg per m.) ir pušies I m. spygliuose (po -0,08 g/kg per m.). Šio elemento pokyčiai eglės ir pušies II metų spygliuose yra nereikšmingi. Paskutiniuoju laikotarpiu Mg koncentracijos lapijoje reikšmingai nepakito.

Mn kaitoje stebima mažėjimo tendencija tačiau ji nereikšminga ir tik eglių spygliuose Mn didėja (po 0,044g/kg per m.). Paskutiniuoju laikotarpiu esminių pokyčių Mn koncentracijų kaitoje nenustatyta. Esminiai skirtumai registruojami nuo 2020 metų kai Al koncentracija lapijoje reikšmingai pradėjo didėti.

Iš paminėtų elementų reikšmingiausiai didėja geležies koncentracijos visuose pavyzdžiuose. ***Per paskutinįjį laikotarpį Fe koncentracijos lapijoje dar labiau išaugo, o eglių spygliuose 2023 ir 2025 metais pasiekė maksimalias reikšmes. Veiksnius, kurie galėjo sąlygoti tokį Fe koncentracijų augimą (išskyrus nekokybišką cheminę analizę) šiai dienai įvardyti negalima.***

Žemaitijos KMS eglių ir skirtingo amžiaus pušies spygliuose N koncentracija tik tyrimų pradžioje praktiškai nesiskyrė, tačiau pastaruoju laikotarpiu pušies I metų spygliuose N koncentracijos beveik 2 kartus viršija N koncentracijas eglės spygliuose. ***2021-2025 m. šis skirtumas mažėja, kaip ir beržų lapuose mažėja, o eglės spygliuose kaip ir pušies neturi aiškesnės tendencijos.***

Mažiausiomis P koncentracijomis pasižymėjo antrų metų pušies spygliai. ***Per tiriamąjį laikotarpį, nuo 2005 iki 2020 m. bendrojo fosforo koncentracija turi tendencija mažėti. Reikšmingiausiai mažėja P koncentracija beržų lapuose (po 0,07 g/kg per m.). Kituose tirtuose lapijos pavyzdžiuose reikšmingesnių kaitos tendencijų nenustatyta. 2021-2025 m. išsiskyrė reikšmingai padidėjusiomis P koncentracijomis beržų lapuose. Šio elemento didėjo ir eglės bei pušies abiejų amžių spygliuose. Tai pasikartojantis dėsningumas kaip ir Aukštaitijos KMS. P koncentracijos lapijoje didėja. Tai N:P santykio disbalansas galintis turėti neigiamų pasekmių miško ekosistemų medžių būklei ir atsparumui nepalankiems aplinkos veiksniams.***

K koncentracijos didėja ir ypač intensyviai pušies spygliuose. Po sausrų poveikio šio elemento koncentracijos reikšmingai mažėjo.. Paskutiniuoju laikotarpiu didėjimo tendencija liko tik beržų lapuose, kai tuo tarpu spygliuose K koncentracijos išlieka stabilios.

Per 2005-2025 m. laikotarpį beržų lapuose ir pušies II metų spygliuose Ca koncentracijos turi tendenciją didėti, kai likusiuose pavyzdžiuose išlieka stabilios.

Per tiriamąjį laikotarpį Mn ir Mg koncentracijų kaitoje nustatytos mažėjimo ir panašaus intensyvumo tendencijos eglės ir pušų spygliuose. Beržų lapuose kaita nereguliari.

Aliuminio koncentracijų kaitoje išaiškinti tie patys esminiai pokyčiai kaip ir Aukštaitijos KMS. 2021-2025 m. kaip ir Aukštaitijos KMS, Al koncentracijos lapijoje reikšmingai padidėjo.

Fe koncentracijos lapijoje turėjo reikšmingos tendencijos didėti, kaip ir Aukštaitijos KMS, Šiuos pokyčius reikšmingai sąlygojo paskutiniojo laikotarpio Fe koncentracijų kaitos rezultatai.

Iki 2020 m. Žemaitijos KMS Na koncentracijų kaitoje aiškesnių tendencijų nenustatyta. 2021-2025 m. registruojamas reikšmingas Na padidėjimas visuose tirtuose lapijos pavyzdžiuose.

Bepasikartojančios sausros bei intensyvūs krituliai gali turėti reikšmingos įtakos makroelementų koncentracijų kaitai, kaip ir bendrai miško ekosistemų būklei bei jos tvariai plėtrai.

Išanalizavus nuokritų kaitą per visą tiriamąjį laikotarpį nustatyta, kad kasmet jų nuolat didėja po maždaug 66 kg/ha, t.y. jei tyrimų pradžioje Aukštaitijos KMS vidutiniškai susidarydavo tik apie 2500 kg/ha nuokritų, tai paskutiniuoju laikotarpiu nuokritų kiekis jau artėja prie 5000 kg/ha ribos, nepaisant fakto, kad 2025 m. nuokritų kiekis artimas mažiausioms savo reikšmėms per visą tiriamąjį laikotarpį. Tai būtų aiškinama, dėl padidėjusio užterštumo pablogėjusia medžių lajų būkle ir mažesne lapijos biomase paskutiniaisiais metais dėl karo padarinių Ukrainoje.

I stacionare augančių medžių lajų defoliacijos (6.7 pav.) ir nuokritų kiekio kaitos analizė parodė, kad didėjantis nuokritų kiekis indikuoja ir didesnę spyglių masę ir mažėjančią defoliaciją, t.y. nuokritų kiekiui didėjant po 100 kg/ha medžių lajų vidutinė defoliacija mažėja maždaug po beveik 0,2 %. Įskaitant paskutinįjį 5 metų laikotarpį nustatytas dėsningumas nepasikeitė, tik sumažėjo priklausomybės reikšmingumas. Nustatytos 2025 m. tarpusavio priklausomybės tarp nuokritų kiekio ir metinių meteorologinių parametrų buvo labai silpnos ir nereikšmingos.

Išanalizavus nuokritų kaitą per visą tiriamąjį laikotarpį Žemaitijos KMS nustatyta, kad nuokritų kiekis kasmet, kaip ir Aukštaitijos KMS, nuolat didėja po maždaug 68,9 kg/ha, t.y. jei tyrimų pradžioje Žemaitijos KMS baseine vidutiniškai susidarydavo tik apie 3000 kg/ha nuokritų, tai paskutiniuoju laikotarpiu nuokritų kiekis jau dažnai viršijo 7000 kg/ha ribą, tik paskutiniuoju laikotarpiu svyruoja apie 5000 kg/ha. Tai būtų aiškinama, kad dėl blogėjančios būklės, formuojasi mažesnė lapijos biomasė, kuri ir sąlygoja mažesnius nuokritų kiekius.

Didėjantis nuokritų kiekis indikuoja ir didesnę spyglių masę ir mažėjančią defoliaciją, t.y. nuokritų kiekiui didėjant po 100 kg/ha medžių lajų vidutinė defoliacija mažėja maždaug po 0,1 %. Silpnesnį koreliacinį ryšį tarp nuokritų kiekio ir medžių lajų defoliacijos galėjo sąlygoti faktas, kad tyrimai šioje stotyje vykdomi brandžiame eglyne, kuriame reikšmingą dalį nuokritų sudaro smulkios šakelės dažniausiai nulaužomos dėl sniego ar apledėjimo.

Ankstesnių tyrimų rezultatai rodė, kad per sezoną Dzūkijos KMS nuokritų rinkimo stotyje susidaro vidutiniškai 3.770 kg/ha nuokritų arba iki 25% daugiau negu Aukštaitijos KMS. Tai sąlygoja medynų, kuriuose registruojamos nuokritos, struktūra. Dzūkijos nuokritų rinkimo stotis įkurta jaunesniame pušyne, kuriame pušys auga žymiai tankiau negu Aukštaitijos nuokritų stotyje.

Ilgalaikiai arbatos pakelių įrimo intensyvumo tyrimai parodė, kad sunkiai irančios arbatos segmentai nesuyra net ir per 4 metų laikotarpį, kai tuo tarpu greitai irančios arbatos, po keturių metų laikotarpio jų segmentų jau nerandama. Gauti rezultatai patvirtina ir sausos medienos irimo greičius, pagal kuriuos, sausa mediena miške ir jau nuvirtusi ant žemės pradeda irti tik po 10 metų pertraukos.

Aukštaitijos KMS nuokritose tirtų maistinių elementų kaitai įtakos turėjo ir sezoniškumas, ir nuokritų struktūros ypatumai. Bendrojo azoto ir fosforo koncentracijų kaitoje išsiskiria laikotarpis, kada šių elementų koncentracijos nuokritose didžiausios, tai pavasario mėnesiai, kada nuokritose pradeda vyrauti ne lapija ar žievė, o pumpurų ir stabilų žvyneliai. Mažiausios N ir P koncentracijos nuokritose registruojamos rudens mėnesiais, kada krenta trečių metų pušies spygliai ir beržų lapai. Per žiemos mėnesius lietus ir sniegas, matyt, išplauna šiuos elementus iš spyglių ir lapų, dėl ko koncentracijos šių elementų nuokritose taip pat vienos iš mažiausių.

Per tiriamąjį laikotarpį iki 2020 m. ***bendrojo azoto kiekis nuokritose turėjo tendenciją didėti po 0,093 mg/g, dabar (įskaitant 2021-2025 m.) didėja jau po 0,08 mg/g per m. N didėjo praktiškai visais metų laikais. N koncentracijų kaita nuokritose yra reikšminga.***

2021-2025 m. N koncentracija nuokritose pasiekė savo maksimalią reikšmę (2025 m.), vidutiniškai siekdama 10g/kg ribą.

Bendrojo fosforo kiekis nuokritose per tiriamąjį laikotarpį, kaip ir lapijoje dabartiniu laikotarpiu, taip pat didėjo po 0,006 g/kg per m. Išsiskiria 2016 m., kai P koncentracijos nuokritose pasiekė savo didžiausią reikšmę per visą tiriamąjį laikotarpį ir ypač nuokritose surinktose per šaltąjį laikotarpį (I).

2021-2025 m. pasižymėjo padidintomis P koncentracijomis nuokritose, o 2025 m. P koncentracija, kaip ir N, pasiekė didžiausią reikšmę – apie 0,9 g/kg.

Per tiriamąjį laikotarpį iki 2020 m. vidutinė ***kalcio koncentracija nuokritose turėjo pakankamai aiškią tendenciją mažėti (po -0,115 g/kg per m.) ir ypač rudens nuokritose (po -0,254 g/kg per m.). 2021-2025 m. tyrimo rezultatai rodo padidėjusias Ca koncentracijas nuokritose dėl ko jo bendra tendencija per visą tiriamąjį laikotarpį pasikeitė. Ca koncentracijos nuokritose palaipsniui didėja po 0,07 g/kg ir artėja prie reikšmingo lygmens. Didžiausios Ca koncentracijos nustatytos 2015-2016 m. laikotarpiu. 2025 m. Ca koncentracijos buvo arti savo maksimalios reikšmės, t.y. apie 5 g/kg.***

Kalio koncentracijoms nuokritose išaiškinta mažėjimo tendencija (po 0,007 g/kg per m.. Intensyviausiai šio elemento mažėja vegetacijos laikotarpio nuokritose. Kritulių stoka galėjo sąlygoti K jonų mažesnį išplovimą iš negyvųjų organų, dėl ko K koncentracijos nuokritose 2018 – 2019 m. didėjo. Gausūs krituliai žiemos ir pavasario laikotarpiu galėjo turėti reikšmingos įtakos K koncentracijų sumažėjimui 2020 m., kai šio elemento vidutinė koncentracija nuokritose pasiekė 1,39 g/kg. 2021-2025 m. registruojamas palaipsnis K koncentracijų nuokritose augimas nuo maždaug 0,7 g/kg 2020 m. iki 1,5 g/kg 2025.

Per tiriamąjį laikotarpį labai panašiai kito Mn ir Mg koncentracijos nuokritose. Mg kaip ir Ca koncentracija nuokritose didėjo po 0,006 g/kg, o Mn kaip ir K mažėjo po -0,003 gt/kg Tačiau skirtingai nuo ankstesnių metalų koncentracijų kaitos, šios kaitos intensyvumas nebuvo abiems atvejais reikšmingas.

Per tiriamąjį laikotarpį Fe ir Al koncentracijos nuokritose turėjo tendencijas didėti ir ypač vasaros pabaigos ir rudens laikotarpio nuokritose. Al kaitos intensyvumas bendrai 1,66 ir buvo nereikšmingas, o Fe viršijo net 4 mg/kg ir buvo reikšmingas, dėl ypač didelių koncentracijų 2021-2025 m. laikotarpiu.

2018-2019 m. sausros turėjo reikšmingos įtakos Zn ir Na koncentracijoms nuokritose mažėti, o palankiais 2020 m. šių elementų koncentracijos nuokritose vėl padidėjo ir pasiekė 2017 m. lygmenį. 2021-2025 m. registruojamas šių elementų padidėjimas Aukštaitijos KMS nuokritose.

Apibendrinus tyrimo rezultatus gautus Aukštaitijos KMS baseine nustatyta, kad paskutiniuoju laikotarpiu dėl bepasikartojančių sausrų poveikio reikšmingai nuokritose pradėjo mažėti K, ir Mn, o didėjimo tendencijos nustatytos N, P, Ca, Fe ir Al koncentracijoms.

Žemaitijos KMS nuokritų cheminė analizė parodė, kad bendrojo N ir P koncentracijų kaitai esminės įtakos, kaip ir Aukštaitijos KMS, turėjo nuokritų sezoniškumas, tačiau skirtingai nei Aukštaitijos KMS, didžiausios bendrojo azoto ir fosforo koncentracijos stebimos pavasario (II) ir vasaros (III) mėnesiais, kiek mažesnės žiemos (I) ir mažiausios vėlyvo rudens (IV) mėnesiais.

Per tiriamąjį laikotarpį bendrojo N ir K koncentracijos nuokritose turėjo skirtingas tendencija. Nuo tyrimų pradžios iki 2012-2014 m. šių elementų koncentracijos nuokritose turėjo tendenciją didėti ir jau paminėtais metais pasiekė savo maksimalias reikšmes. Vėliau, 2016-2017 m. didelės koncentracijos dar kartą kartojosi, o paskutiniuoju laikotarpiu išliko artis savo maksimalios vertės, t.y. N – apie 10 g/kg. Tokiu būdu per visą laikotarpį N koncentracijos nuokritose didėjo po 0,023 g/kg per m.

P kaitoje aiškesnės tendencijos nenustatyta. Per visą tiriamąjį laikotarpį P koncentracija nuokritose mažėja po -0,002 g/kg ir ši tendencija yra nereikšminga.

2015-2019 ir 2023 m. stebimas ženklus P koncentracijų nuokritose mažėjimas iki beveik 0,6 g/kg, o jau paskutiniaisiais metais koncentracijos vėl padidėjo ir 2024 m. pasiekė maksimalią reikšmę – apie 12 g/kg.

K koncentracijų daugiametėje iki 2020 m. kaitoje akivaizdi buvo šio elemento didėjimo tendencija praktiškai visus metus. Intensyviausiai didėjo šio elemento vegetacijos pradžios nuokritose, net po 0,12 g/kg per m. ir ši kaita buvo reikšminga. Po 0,03 g/kg per m. didėjo K koncentracijos ir vasaros bei rudens laikotarpiu nors ir nereikšmingai. Tokia sezoninė koncentracijų kaita sąlygojo, kad vidutiniškai K koncentracija nuokritose per šį tiriamąjį laikotarpį didėja po 0,042 g/kg per m. ir ši kaita yra beveik reikšminga (4.6 lentelė).

2021-2025 m. tyrimo rezultatai reikšmingai pakeitė šią nusistovėjusią tendenciją. Per visą31 m. tiriamąjį laikotarpį K koncentracijos nuokritose nors ir nereikšmingai bet pradėjo mažėti po 0,002 g/kg per m. Didėjimo tendencija išliko tik pavasario mėn. nuokritose, tačiau tik dėl didelių šio elemento koncentracijų 2014-2020 m. laikotarpiu. Paskutiniaisiais metais K koncentracijos reikšmingai mažėja ir šio laikotarpio nuokritose. Galima grėsmė ekosistemoms – reikšmingas K koncentracijų mažėjimas nuokritose 2020-2025 m. laikotarpiu.

Ankstesnių tyrimų rezultatai parodė, kad sausros ar nepakankamas kritulių kiekis atrodo, kad turi įtakos šio elemento gausai nuokritose, dėl sumažėjusio jo išplovimo iš organinio substrato. 2020 m. padidėjus kritulių kiekiui, K koncentracija nuokritose sumažėjo iki 2,32 g/kg, kaip ir buvo sumažėjusi 2017 m. iki 2,1 g/kg. Kokią įtaką turi K srautai su krituliais bus galima įvertinti gavus detalia šio elemento kaitos ore ir krituliuose ataskaitą iš Fizikos instituto mokslininkų.

Kalcio koncentracijų kaitoje sezoniškumo poveikio nustatyti nepavyko, tačiau ***per tiriamąjį laikotarpį iki 2020 m., analogiškai kaip ir Aukštaitijos KMS, nustatyta šio elemento koncentracijų reikšmingas panašaus intensyvumo mažėjimas*** visais metų laikais (po -0,18 -0,23 g/kg per m.) (6.15 pav. ir 6.6 lentelė). Vienos didžiausių šio elemento koncentracijų nustatyta buvo 2016 m. Intensyviu išplovimu 2017 m. būtų galima aiškinti Ca sumažėjimą nuokritose 2017m. Jei ***2018 m. Ca koncentracijų nustatymo patikimumas kėlė abejonių, tai 2019 m. Ca koncentracijos vėl nustatytos vienos iš mažiausių per visą tiriamąjį laikotarpį.***

Analogiškai K koncentracijų kaitos atveju, Ca koncentracijos paskutiniuoju 20020-2025 m. laikotarpiu reikšmingai padidėjo. Dabar, įskaitant ir šį laikotarpį, Ca koncentracijos nuokritose vidutiniškai didėja po 0,07 g/kg per m.ir didžiausios koncentracijos nustatytos žiemos mėnesių nuokritose, kurios Žemaitijos KMS baseine dėl smulkių šakučių gausos juose, siekia maksimalias reikšmes.

Žemaitijos KMS nuokritose iki 2020 m. mažėjo Mg tačiau didėjo Mn koncentracijos praktiškai ištisus metus. Būtent Mn koncentracija nuokritose lemia kritulių kiekis, dėl ko 2017 ir 2020 m. Mn koncentracijos nuokritose buvo mažesnės už 1,5 g/kg, o sausros metais jos viršydavo 1,6-1,8 g/kg. 2020 m. šių elementų nuokritose sumažėjo: Mg iki 1,42 g/kg, o Mn iki 1,4. Tokia priklausomybė nuo kritulių galėjo sąlygoti nereikšmingą nei sezoninę nei daugiametę kaitą.

2020-2025 m. nustatytos koncentracijos pakeitė šį dėsningumą. Kaip ir Aukštaitijos KMS nuokritose pastaruoju laiku mažėja Mn koncentracijos po 0,008 g/kg per m., o Mg didėja po 0,008 g/kg per m. Tai paskutiniųjų etų tyrimo rezultatų išdavą, kuriai reikšmingos įtakos turėjo turėti ir šių elementų srautai su krituliais.

Per tiriamąjį laikotarpį iki 2020 m. Fe ir Al koncentracijos nuokritose, turėjo tendenciją mažėti. Šių elementų mažėjimo intensyvumas buvo panašus ir sudarė po -2,0 ir 2,7 mg/kg per metus, nors ši kaita buvo nereikšminga. Paskutinysis 2020-2025 m. laikotarpis pakeitė Fe koncentracijų kaitos pobūdį, kuris tapo teigiamas, t.y. per visą tiriamąjį laikotarpį Fe koncentracijos nuokritose pradėjo didėti po 1,6 mg/kg per m. ir šis koncentracijos didėjimas tęsėsi per visą metų sezoną. Al koncentracijos dabartiniu laikotarpiu mažėja po -0,27 mg/kg per m. Šių elementų kaitą Žemaitijos KMS baseine yra nereikšminga.

Zn koncentracijos per visą tiriamąjį laikotarpį praktiškai išlieka panašiame lygmenyje, 2020 m. jo koncentracija pasiliko apie 50 mg/kg lygmenyje, kai tuo tarpu Na koncentracijoje nustatytas ryškus padidėjimas iki 210 mg/kg. Tai didžiausia reikšmė per visą tiriamąjį laikotarpį ir ji turėtų būt siejama su Baltijos jūros įtaka ir vyraujančių vėjų kryptimi. 2025 m. Xn koncentracijos reikšmingai nepakito, o Na kiek tai mažėjo ypač 2023 m.

Išskirtinis nuokritų cheminės analizės rezultatų bruožas - daugeliu atveju sausra sąlygojo tirtų elementų didėjimo procesą, dėl jų sumažėjusio išplovimo krituliais ir priešingai, gausūs krituliai išplaudavo elementus, dėl ko jų koncentracijos nuokritose turėjo tendenciją mažėti.

Santykis ir balansas tarp elementų:

Aukštaitijos KMS nuokritose vidutiniškai azoto sumažėjo 2 kartus, t.y. maždaug nuo 14 mg/g iki 7 mg/g. Nepaisant fakto, kad N koncentracijos turi tendenciją nors ir nereikšmingą didėti, o jų santykis turi tendenciją mažėti, po -0,008 per m.

P koncentracijos nuokritose vidutiniškai mažėja daugiau kaip 2,5 karto, t.y. nuo 1,4 mg/g lapijoje iki 0,8 mg/g nuokritose. Dėl didėjančių P koncentracijų nuokritose jų santykis turi tendenciją mažėti po -0,02 per m., tačiau, kaip ir N atveju, ši tendencija yra nereikšminga.

Na nuokritose skirtingai nei N ir P koncentracijos yra iki 1,5 karto didesnės negu lapijoje. Tiriamuoju laikotarpiu – pradžioje šis santykis didėjo nereikšmingai, svyruodamas apie vieneto reikšmę, tai paskutiniuoju laikotarpiyu Na koncentracijos lapijoje pradėjo viršyti šio elemento kiekius nokritose.

Chloro kaitoje matyti, kad lapijoje šio elemento yra daugiau, o jai senstant ir nukrentant, dėl šio elemento lakumo, koncentracijos nuokritose yra vidutiniškai virš 2 kartus mažesnės negu lapijoje. Paskutiniuoju laikotarpiu ši tendencija pasitvirtino tik iš dalies.

Pagrindinių šarminių katijonų Ca, K, Mg kaitoje stebima bendra tendencija: Nuokritose jų koncentracijoms mažėjant didėja santykis tarp jų koncentracijų lapijoje ir nuokritose. Tai rodo šiltėjančio klimato ir gausėjančių kritulių didėjanti išplovimo ir lapijos audinių intensyvumą.

Aukštaitijos KMS nuokritose kaupiasi daugiau Ca negu lapijoje ir šis santykis po truputį artėja prie 1 didėdamas po 0,0025 per m. Ir indikuodamas, kad skirtumas tarp šio elemento koncentracijų gyvojoje lapijoje ir nuokritose mažėja.

Mg iš lapijos yra intensyviai išplaunamas, todėl jo koncentracijos nuokritose yra mažesnės negu lapijoje. Per tiriamąjį laikotarpį Mg santykis nors ir nereikšmingai didėja po 0,02 per m. Indikuodamas, kad išplovimo procesas intensyvėja.

K intensyviausiai iš lapijos išplaunamas elementas. Šio elemento koncentracijos nuokritose iki 4 kartų mažesnės negu lapijoje. Per tiriamąjį laikotarpį šis santykis turi tendenciją didėti dėl K koncentracijų didėjimo lapijoje ir mažėjimo nuokritose po 0,05 per m.

Reikšmingiausiai kito suminis tirtų šarminių katijonų sumažėjimo nuokrituose snatykis. Jei tyrimų pradžioje nuokritose šių elementų buvo tik apie 1,2 karto mažiau negu lapijoje, tai paskuriniuoju laikotarpiu šis santyukis padidėjo iki beveik 2 kartų 2019-2020m. Paskutiniuoju laikotarpiu šis santykis vėl pradėjo mažėti dėl didėjančių koncentracijų lapijoje iki 1,5 karto.Tai klimato kaitos ir tolimųjų oro pernašų rezultatas.

Žemaitijos KMS baseinas

Azoto ir fosforo koncentracijos nuokritose dėl šių elementų panaudojimo fiziologiniuose procesuose iki 2020 m. mažėjo lyginant su koncentracijoms lapijoje iki 1,4 ir 1,8 karto atitinkamai, o jų santykis turėjo tendenciją mažėti. Paskutinysis laikotarpis pakeitė šią tendenciją: N santykis didėja po 0,007, o P santykis didėja po 0,009 per m. Tai pagrinde dėl šių elementų koncentracijų mažėjimo nuokritose, kurį sustiprina papildomai nors ir nereikšmingas N koncentracijų augimas lapijoje.

Pagrindinių šarminių katijonų kaitoje stebima skirtinga tendencija negu Aukštaitijos KMS: Nuokritose šių elementų koncentracijoms mažėjant, dėl mažėjančių koncentracijų lapijoje ir krituliuose patenkančiuose su tolimosiomis pernašomis į dirvožemį, mažėja taip pat santykis tarp jų koncentracijų lapijoje ir nuokritose.

Išsiskiria tik Ca koncentracijų kaita, kur santykis tarp Ca koncentracijų lapijoje ir nuokritose visą tiriamąjį laikotarpį praktiškai išlieka stabilus ir artimas 1, nors registruojamas šio santykio mažėjimas po 0,005 per m.

K išplaunamas iš lapijos audinių intensyviausiai. Jo koncentracijoms didėjant lapijoje, bet išliekant stabiliomis nuokritose, santykis didėja po 0,027 per m.

Mg iš lapijos yra išplaunamas paskutiniuoju laikotarpiu silpniau negu tyrimų pradžioje ir jo santykis pradėjo mažėti po 0,014 per m. Tai lėmė mažėjanti Mg koncentracija lapijoje ir didėjanti koncentracija nuokritose. Šio elemento patenka ***mažiau su tolimosiomis pernašomis*** dėl ko jo koncentracija pradeda mažėti ir lapijoje. Dėl šios priežasties santykis tarp Mg koncentracijų lapijoje ir nuokritose 2025 m sumažėjo iki 1,5 karto.

Nepaisant skirtingų kaitos tendencijų, nustatytą didėjantį santykį iki 2020 m., 2025 metai pakeitė jau silpnai mažėjantis santykis – po 0,006 karto per m., nors suminis šių elementų kiekis tiek lapijoje tiek ri nuokritose turėjo tendenciją didėti.

Apibendrinus Žemaitijos KMS rezultatus nustatyta, kad N ir P koncentracijos nuokritose dėl šių elementų panaudojimo fiziologiniuose procesuose mažėja lyginant su koncentracijoms lapijoje iki 1,4 ir 1,8 karto atitinkamai, nors per visą tiriamąjį laikotarpį turi tendenciją didėti dar po 0,007-0,009 karto per m. Na ir Cl koncentracijos dėl aiškesnės tendencijos nebuvimo, praktiškai buvo stabilios, taip pat kaip ir jų santykis, kurį reikšmingai pakeitė nevienareikšmiškai paskutiniųjų metų duomenys. Mg iš lapijos yra išplaunamas paskutiniuoju laikotarpiu silpniau negu tyrimų pradžioje ir jo santykis pradėjo mažėti po 0,014 per m. Tai lėmė mažėjanti Mg koncentracija lapijoje ir didėjanti koncentracija nuokritose. K išplaunamas iš lapijos audinių intensyviausiai. Jo koncentracijoms didėjant lapijoje, bet išliekant stabiliomis nuokritose, santykis didėja po 0,027 per m. Išsiskiria tik Ca koncentracijų kaita, kur santykis tarp Ca koncentracijų lapijoje ir nuokritose visą tiriamąjį laikotarpį praktiškai išlika stabilus ir artimas 1. ***Šią kaitą esminiai galėjo sąlygoto didėjantis K, Ca ir Mg srautas su krituliais, kuris didino šių elementų koncentracijas lapijoje.***

Srautų su nuokritomis lyginamoji analizė parodė, kad Aukštaitijos KMS mišriame ir perbrendusiame pušyne su nuokritomis į paklotę azoto vidutiniškai patenka apie 2,7 g/m^2, kai tuo tarpu Žemaitijos KMS bręstančiame eglyne beveik 2 kartus daugiau, apie 5,1 g/m^2. Per tiriamąjį laikotarpį šio elemento srautas su nuokritomis didėja po 0,07 g/m^2 per m., abiejose stotyse vienodai, tik Aukštaitijos KMS jis buvo reikšmingas, o Žemaitijos KMS – per 2020-2025 m. laikotarpį sumažėjo nuo 0,12 iki 0,07 g/m^2 per m.

Aukštaitijos KMS mišriame ir perbrendusiame pušyne su nuokritomis į paklotę fosforo vidutiniškai patenka apie 0,22 g/m^2, kai tuo tarpu Žemaitijos KMS bręstančiame eglyne taip pat beveik 2 kartus daugiau, apie 5 g/m^2. Per tiriamąjį laikotarpį Aukštaitijos KMS šio elemento srautas su nuokritomis didėja po 0,005 g/m^2 per m., o Žemaitijos KMS vos po 0,002 g/m^2 per m.

Aukštaitijos KMS mišriame ir perbrendusiame pušyne su nuokritomis į paklotę Mg vidutiniškai patenka virš 0,2 g/m^2, kai tuo tarpu Žemaitijos KMS bręstančiame eglyne apie 0,3 g/m^2. Per tiriamąjį laikotarpį Aukštaitijos KMS šio elemento srautas su nuokritomis didėjo po 3,2 mg/m^2 per m., o Žemaitijos KMS intensyviau, po 7,3 mg/m^2 per m.

Aukštaitijos KMS mišriame ir perbrendusiame pušyne su nuokritomis į paklotę Ca vidutiniškai patenka apie 2 g/m^2, kai tuo tarpu Žemaitijos KMS bręstančiame eglyne apie 2,5 g/m^2. Per tiriamąjį laikotarpį Aukštaitijos KMS šio elemento srautas su nuokritomis didėja po 0,037 g/m^2 per m., o Žemaitijos KMS intensyviau, po 0,049 g/m^2 per m.

Aukštaitijos KMS mišriame ir perbrendusiame pušyne su nuokritomis į paklotę K vidutiniškai patenka apie 0,50 g/m^2, kai tuo tarpu Žemaitijos KMS bręstančiame eglyne apie 1,2 g/m^2. Per tiriamąjį laikotarpį abiejose stotyse K srautas su nuokritomis išliko stabilus paminėtame lygmenyje.

Aukštaitijos KMS mišriame ir perbrendusiame pušyne su nuokritomis į paklotę Fe vidutiniškai patenka apie 50,0 mg/m^2, kai tuo tarpu Žemaitijos KMS bręstančiame eglyne apie 80 mg/m^2. Per tiriamąjį laikotarpį Aukštaitijos KMS šio elemento srautas su nuokritomis didėja po 2,63 mg/m^2 per m., o Žemaitijos KMS kiek mažiau po 1,93 mg/m^2 per m.

Aukštaitijos ir Žemaitijos KMS su nuokritomis į paklotę Al vidutiniškai patenka vienodai apie 90 mg/m^2. Per tiriamąjį laikotarpį Aukštaitijos KMS šio elemento srautas su nuokritomis didėja po 2,02 mg/m^2 per m., o Žemaitijos KMS kinta nereikšmingai, vos po 0,78 mg/m^2 per m. (6.17 pav.).

Didėjantys maistinių medžiagų srautai su nuokritomis nuokritomis gali paskatinti trumpalaikį maistinių medžiagų įsisavinimą bei didesnį ekosistemos produktyvumą, tačiau jų ilgalaikė ekologinė reikšmė priklauso nuo dirvožemio kaupimo ir reasimiliacijos procesų efektyvumo, kuris galiausiai lems, ar miško ekosistemos ateityje, veikiant aplinkos veiksniams, veiks kaip kaupiančioji, ar kaip išeikvojanti maistinių medžiagų sistema.

BENDROSIOS IŠVADOS

1. Ilgalaikiai 1995–2025 m. tyrimai parodė esminę Aukštaitijos ir Žemaitijos KMS biogeocheminio funkcionavimo transformaciją: miško ekosistemos pereina nuo atmosferinės rūgštinančios taršos kontroliuojamo režimo prie sistemos, kurioje vyrauja klimato, hidrologinių sąlygų, medynų struktūros ir vidinės elementų recirkuliacijos poveikis.
2. Ryškiausias atmosferinės apkrovos pokytis – daugkartinis sieros junginių koncentracijų ir srautų sumažėjimas. Aukštaitijos KMS sieros nuplovimas nuo lajų beveik išnyko, o Žemaitijoje išliko nedidelė likutinė apkrova dėl intensyvesnės tolimosios oro teršalų pernašos ir tankesnių eglių lajų. Tai reikšmingas miško ekosistemų išsivalymas nuo ankstesnės rūgštinančios taršos.
3. Kritulių rūgštingumo mažėjimas buvo ryškesnis Aukštaitijos KMS, kur atviros vietos kritulių pH priartėjo prie silpnai rūgščios ar beveik neutralios reakcijos. Žemaitijoje pH išliko stabilesnis dėl didesnės rūgštinančių junginių apkrovos, jūrinių aerozolių ir sudėtingesnio jonų balanso. Paskutinių metų sieros srautų ir rūgštingumo padidėjimas rodo, kad pagerėjusi atmosferinė aplinka tebėra jautri regioniniams emisijų ir oro masių pernašos pokyčiams; galimas karo Ukrainoje poveikis turėtų būti vertinamas kaip tikrintina hipotezė.

4. Per tris dešimtmečius iš esmės pasikeitė medžių lajų funkcinis vaidmuo. Didelės taršos laikotarpiu jos daugiausia kaupė sausąsias SO_4^{2-}, NO_3^- ir NH_4^+ iškritas ir nuplaudavo jas į miško paklotę, o sumažėjus atmosferinei apkrovai tapo aktyviu biogeocheminiu filtru, absorbuojančiu, transformuojančiu ir perskirstančiu atmosferinius junginius.
5. Azoto junginių apykaitoje nustatytas perėjimas nuo nuplovimo prie biologinės sugerties. Aukštaitijos KMS nitratų sugertis pradėjo viršyti nuplovimą maždaug nuo 2002 m., Žemaitijos KMS – nuo 2011–2012 m., o amonio sugertis abiejose stotyse pradėjo dominuoti po 2006 m. Šis laiko skirtumas atspindi nevienodą atmosferinę apkrovą, medynų struktūrą ir rūšinę sudėtį.
6. Mažėjant atmosferinei azoto depozicijai, medynų produktyvumas vis labiau priklauso nuo vidinio N perdirbimo. Vis dėlto žaliojoje lapijoje nustatytas N koncentracijų augimo lėtėjimas arba mažėjimas kartu su P koncentracijų didėjimu rodo galimą santykinio azoto ribojimo stiprėjimą. Todėl pagrindinė nauja mitybos rizika yra ne absoliutus vieno elemento trūkumas, o N, P, K, Ca ir Mg tarpusavio disbalansas.
7. Medžių rūšys į šiuos pokyčius reaguoja nevienodai. Beržas išryškėjo kaip jautriausias mineralinės mitybos pokyčių indikatorius, paprastoji pušis – kaip konservatyvesnę ir stabilesnę išteklių naudojimo strategiją išlaikanti rūšis, o paprastoji eglė, ypač Žemaitijos KMS, pasižymėjo didesne priklausomybe nuo palankaus drėgmės režimo ir subalansuoto K bei Mg prieinamumo.
8. Bazinių katijonų ciklai tapo svarbiausiu klimato ir hidrologinių pokyčių indikatoriumi. Kalis dėl didelio judrumo jautriausiai reagavo į sausras, retranslokaciją ir išplovimą krituliais, Ca daugiausia kaupėsi senstančiuose struktūriniuose audiniuose, o Mg dinamika atspindėjo fotosintetinės mitybos ir dirvožemio rūgščių–bazių pusiausvyros pokyčius. Žemaitijos eglynuose šių elementų apykaita buvo gerokai intensyvesnė negu Aukštaitijos pušynuose.
9. Didėjantys Ca ir Mg srautai į miško paklotę gali palaikyti viršutinio dirvožemio buferines savybes ir iš dalies kompensuoti ankstesnio rūgštėjimo sukeltus nuostolius. Tačiau ypač Žemaitijoje dideli jų srautai su polajiniais krituliais ir nuokritomis gali reikšti ne vien geresnį aprūpinimą, bet ir intensyvesnį elementų praradimą iš gyvųjų lajų audinių.
10. Na ir Cl dinamika patvirtino Baltijos jūros bei vakarinių oro masių poveikį, ypač Žemaitijos KMS. Šių elementų kaupimasis ant lajų ir nuplovimas į paklotę keičia bendrą jonų balansą, o didesnės Cl^- koncentracijos gali riboti tolesnį kritulių rūgštingumo mažėjimą ir keisti bazinių katijonų ekologinį poveikį.
11. Sinchroniškas Fe koncentracijų didėjimas žaliojoje lapijoje ir nuokritose abiejose stotyse bei Al didėjimas, ypač Aukštaitijoje, yra naujas ir nepakankamai paaiškintas regioninis signalas. Jis

gali būti susijęs su dirvožemio hidrologinio ir cheminio režimo pokyčiais, metalų mobilizacija, atmosferine mineralinių dalelių depozicija arba analitiniais veiksniais, todėl negali būti interpretuojamas kaip vienareikšmis medžių būklės gerėjimas.

12. Nuokritų kiekio didėjimas ilgalaikėje perspektyvoje ne visada reiškia lajų degradaciją. Aukštaitijos pušynuose jis sutapo su mažėjančia defoliacija ir didėjančia lajų biomase, todėl daugiausia atspindi produktyvumo ir organinės medžiagos apytakos augimą. Žemaitijos eglynuose didesni nuokritų srautai turi dvejopą reikšmę – rodo aukštą produktyvumą, bet gali atspindėti ir spartesnę spyglių kaitą bei fiziologinį stresą.
13. Dzūkijos KMS pušynai reprezentuoja trečią funkcinį modelį – išteklius taupančią, skurdžioms ir sausoms augavietėms prisitaikiusią sistemą, kurioje nuokritų kiekį stipriai lemia medyno tankumas, konkurencija ir savaiminis šakų apmirimas. Šio tipo ekosistemų stabilumą labiausiai riboja vandens prieinamumas.
14. Nuokritų cheminė sudėtis parodė, kad didėjanti N ir P koncentracija gali reikšti tiek aktyvesnę biologinę apytaką, tiek silpnėjančią šių elementų retranslokaciją iš senstančių audinių. Todėl didesnės koncentracijos ar srautai su nuokritomis negali būti automatiškai laikomi gerėjančios medžių mitybos požymiu – juos būtina vertinti kartu su žaliosios lapijos chemija ir tiesiogiai apskaičiuotu rezorbcijos efektyvumu.
15. Elementų kiekybinių srautų analizė parodė, kad miško paklotės aprūpinimą maisto medžiagomis pirmiausia palaiko vidinė biologinė recirkuliacija, o ne naujas jų patekimas iš atmosferos. N srautai su nuokritomis atviros vietos kritulių srautus viršijo maždaug 5 kartus Aukštaitijoje ir 10 kartų Žemaitijoje, Ca – atitinkamai 4 ir 6 kartus, K – 4 ir 10 kartų, o Mg – apie 1,5 karto.
16. Didžiausias nuokritų ir atmosferinių srautų santykis Žemaitijoje patvirtina greitesnę ir didesnio masto eglyno biogeocheminę apytaką. Tačiau ši sistema labiau priklauso nuo nuolatinės mineralizacijos, pakartotinio šaknų įsisavinimo ir palankaus drėgmės režimo. Aukštaitijoje elementų srautai mažesni, bet pasižymi nuoseklesne didėjimo kryptimi ir didesniu ilgalaikiu stabilumu.
17. Stabilus K srautas su nuokritomis neparodo visos jo apytakos, nes didelė šio elemento dalis, ypač Žemaitijos eglynuose, į dirvožemį patenka su polajiniais krituliais. Todėl patikimas K, Ca ir Mg balansas turi apimti atmosferinę depoziciją, lajų išplovimą, nuokritų srautus, dirvožemio tirpalą ir šaknų įsisavinimą.
18. Nuokritų destrukcijos tyrimai parodė, kad organinės medžiagos mineralizaciją pirmiausia reguliuoja substrato kokybė. Lapuočių tipo nuokritos suyra daug greičiau negu spygliuočių, o

klimato, drėgmės ir atmosferinės azoto depozicijos reikšmė didėja vėlesnėse skaidymosi stadijose. Dėl to medynų rūšinė sudėtis lemia ne tik maisto medžiagų srautų dydį, bet ir jų grąžinimo į aktyvią dirvožemio apytaką greitį.

19. Šiltėjimas ir pakankamas drėgmės prieinamumas gali spartinti nuokritų destrukciją, maisto elementų mineralizaciją ir CO_2 išsiskyrimą. Todėl didėjantis nuokritų kiekis nebūtinai didins ilgalaikį dirvožemio anglies kaupimą: galutinį rezultatą lems pusiausvyra tarp organinės medžiagos patekimo ir jos mikrobiologinio skaidymo.
20. Trijų KMS palyginimas leidžia išskirti skirtingas natūralių hemiborealinių miškų funkcionavimo strategijas: Dzūkijos pušynams būdinga išteklių taupymo ir vandens ribojama strategija, Aukštaitijos pušynams – lėtesnė, stabilesnė ir didėjančios biomasės palaikoma apytaka, o Žemaitijos eglynams – intensyvi, produktyvi, tačiau klimato ir hidrologiniams ekstremumams jautresnė elementų recirkuliacija.
21. Svarbiausia nauja ilgalaikio monitoringo tendencija yra ta, kad pagrindiniu miško ekosistemų stabilumo veiksniu tampa ne atmosferinės taršos lygis, o gebėjimas išlaikyti subalansuotą elementų įsisavinimą, retranslokaciją, išplovimą, grąžinimą su nuokritomis, mineralizaciją ir pakartotinį panaudojimą.
22. Kadangi KMS įkurtos natūraliuose, rezervatų miškuose, nustatyti skirtumai yra vertinga miško ekosistemų natūralaus atsako į klimato kaitą ir atmosferinės taršos mažėjimą atskaitos sistema. Jie parodo, kad vienodas regioninis aplinkos fonas skirtingos rūšinės ir struktūrinės sudėties medynuose suformuoja iš esmės skirtingus biogeocheminio atsparumo mechanizmus.
23. Galutinė integruojanti išvada: Lietuvos hemiborealiniai miškai pereina į naują funkcionavimo etapą, kuriame klasikinės rūgščiosios taršos reikšmė mažėja, o ekosistemų produktyvumą, anglies balansą ir atsparumą vis labiau lemia klimato ekstremumų, hidrologinio režimo, medynų struktūros ir daugelio maisto elementų tarpusavio pusiausvyra.

BENDROSIOS GRĖSMĖS

Atmosferinės rūgštinančios apkrovos atsinaujinimo rizika. Nors sieros junginių koncentracijos ir jų srautai per ilgalaikį tyrimų laikotarpį reikšmingai sumažėjo, paskutiniaisiais metais nustatytas sieros srautų padidėjimas ir kritulių pH sumažėjimas rodo, kad miško ekosistemos tebėra jautrios regioniniams emisijų ir tolimosios oro masių pernašos pokyčiams. Energetikos, pramonės, transporto ar karinių konfliktų sukelti emisijų pokyčiai gali laikinai atnaujinti rūgštinančią apkrovą. Galimas karo Ukrainoje poveikis vertintinas kaip tikrintina hipotezė, kuriai pagrįsti reikalinga oro masių trajektorijų ir emisijų analizė.

Didesnis Žemaitijos KMS pažeidžiamumas tolimajai oro teršalų pernašai. Žemaitijos KMS rūgštinančių junginių koncentracijos ir jų srautai išlieka didesni negu Aukštaitijoje. Dėl geografinės padėties, vakarinių oro masių dominavimo ir tankesnių eglių lajų ši ekosistema yra jautresnė atmosferinės apkrovos svyravimams. Rūgštinančios iškritos čia gali veikti kartu su klimato, hidrologiniais ir biotiniais stresoriais.

Azoto ciklo ir elementų disbalansas lapijoje. Mažėjant atmosferiniam neorganinio azoto srautui, medynų produktyvumas vis labiau priklauso nuo vidinio N įsisavinimo. Kartu nustatytas N koncentracijų augimo lėtėjimas arba mažėjimas ir P koncentracijų didėjimas gali rodyti santykinio azoto ribojimo stiprėjimą. Toks N pusiausvyros pokytis gali mažinti fotosintezės, augimo ir medžių atsako į ilgesnį vegetacijos laikotarpį efektyvumą.

Mažėjantis maistinių elementų išsaugojimo efektyvumas. Didėjančios N ir P koncentracijos nuokritose, ypač kai jų kaupimasis žaliojoje lapijoje stabilizuojasi ar silpnėja, gali rodyti mažesnę šių elementų retranslokaciją iš senstančių organų. Tai reikštų didesnį maisto medžiagų praradimą iš gyvosios biomasės ir didesnę medžių priklausomybę nuo greitos nuokritų mineralizacijos bei pakartotinio šaknų įsisavinimo. Ši rizika turi būti tikrinama tiesiogiai apskaičiuojant rezorbcijos efektyvumą.

Bazinių katijonų balanso silpnėjimas. Didėjantis produktyvumas didina K, Ca ir Mg poreikį, tačiau intensyvus šių elementų išplovimas iš lajų ir jų grąžinimas su nuokritomis gali viršyti šaknų įsisavinimo bei dirvožemio atsargų atkūrimo galimybes. Tokiu atveju aktyvi apytaka palaikytų trumpalaikį produktyvumą, bet kartu mažintų ilgalaikį mineralinės mitybos rezervą.

Kalio ciklo pažeidžiamumas. Kalis yra jautriausias hidrologinių ir fiziologinių pokyčių indikatorius. Jo išplovimas iš lajų, koncentracijų mažėjimas nuokritose ir priklausomybė nuo kritulių režimo, ypač Žemaitijos eglynuose, gali silpninti žiotelių reguliaciją, osmoreguliaciją ir vandens naudojimo efektyvumą. Sutrikęs K ciklas gali didinti medžių jautrumą pasikartojančioms sausroms.

Magnio prieinamumo ir fotosintetinio pajėgumo mažėjimas. Mg koncentracijų mažėjimas žaliojoje lapijoje ar didesnis jo praradimas su nuokritomis gali riboti chlorofilo sintezę ir fotosintezę. Ši grėsmė ypač aktuali eglėms, kurių fiziologinė būklė labiau priklauso nuo stabilaus dirvožemio drėgmės ir subalansuoto bazinių katijonų prieinamumo.

Klimato ekstremumų poveikis lajų reguliacinei funkcijai. Dažnėjančios sausros, karščio bangos ir netolygus kritulių pasiskirstymas gali mažinti žiotelių aktyvumą, keisti NO_3^- ir NH_4^+ sugertį, skatinti ankstyvą lapijos senėjimą ir didinti elementų išplovimą. Sumažėjus išorinei atmosferinei apkrovai, visos ekosistemos stabilumas labiau priklauso nuo medžių fiziologinės būklės, todėl lajų pažeidimai gali sutrikdyti kelias biogeocheminio ciklo grandis vienu metu.

Žemaitijos eglynų didesnis fiziologinis jautrumas. Tankios lajos ir didelis lapijos ploto indeksas lemia intensyvų elementų sulaikymą, transformaciją bei išplovimą, tačiau kartu didina priklausomybę nuo palankaus vandens režimo. Sausros, kenkėjai, ligos ir defoliacija gali greičiau sutrikdyti eglynų elementų apytaką negu konservatyvesnėse pušynų sistemose.

Jūrinių aerozolių ir chloridų poveikis jonų balansui. Na^+ ir Cl^- srautai, ypač Žemaitijos KMS, gali keisti kritulių, paklotės ir dirvožemio joninę sudėtį. Padidėjęs Cl^- kiekis gali riboti tolesnį rūgštingumo mažėjimą, skatinti bazinių katijonų išplovimą ir keisti K, Ca bei Mg santykius augalams prieinamoje dirvožemio frakcijoje.

Fe ir Al mobilizacijos rizika. Sinchroniškas Fe ir Al koncentracijų didėjimas žaliojoje lapijoje, nuokritose ir jų srautuose gali rodyti pakitusį dirvožemio rūgštingumą, hidrologinį režimą, metalų judrumą arba atmosferinę mineralinių dalelių depoziciją. Patvirtintas Al prieinamumo didėjimas galėtų pažeisti smulkiąsias šaknis, riboti Ca ir Mg įsisavinimą bei stiprinti cheminį stresą.

Spartėjančios organinės medžiagos apytakos poveikis anglies balansui. Didėjantis nuokritų kiekis ir maisto elementų grąža gali skatinti mikroorganizmų aktyvumą ir mineralizaciją. Jeigu klimato šiltėjimas ir pakankamas drėgnumas spartins nuokritų destrukciją labiau negu didės organinės medžiagos patekimas, gali mažėti miško paklotės C atsargos ir didėti CO_2 emisija.

Didėjanti priklausomybė nuo vidinės biologinės recirkuliacijos. Kadangi N, K ir Ca srautai su nuokritomis daug kartų viršija jų atmosferinį patekimą, miško produktyvumas vis labiau priklauso nuo nuokritų skaidymo, elementų mineralizacijos ir pakartotinio įsisavinimo. Bet koks šios grandinės sutrikimas – sausra, dirvožemio biologinio aktyvumo sumažėjimas, šaknų pažeidimas ar maisto elementų imobilizacija – gali turėti didelį poveikį visos ekosistemos būklei.

Nepakankamo integruoto vertinimo rizika. Pavienės elementų koncentracijos negali patikimai apibūdinti ekosistemos mitybos būklės. Didesnis elemento kiekis nuokritose gali reikšti ir aktyvesnę apytaką, ir silpnesnę retranslokaciją, o mažesnis kiekis – ir trūkumą, ir efektyvesnį išsaugojimą. Netiksliai interpretuojant vieną terpę, galima klaidingai įvertinti medynų atsparumą, todėl būtina integruoti kritulių, polajinių kritulių, žaliosios lapijos, nuokritų, dirvožemio tirpalo ir medžių būklės duomenis.

BENDROSIOS IŠVADOS

Sieros iškritų reikšmė ir toliau mažės. Atsižvelgiant į 1995–2025 m. tendencijas, tikėtina, kad sieros junginių koncentracijos ir jų srautai išliks nedideli, todėl klasikinis dirvožemio rūgštėjimas dėl sieros iškritų nebebus pagrindinis Lietuvos miško ekosistemų būklę reguliuojantis veiksnys. Vis dėlto regioniniai emisijų pokyčiai ir tolimosios oro masių pernašos gali sukelti trumpalaikius sieros apkrovos bei kritulių rūgštingumo padidėjimus.

Miško ekosistemų funkcionavimą vis labiau lems vidinė elementų apytaka. Mažėjant išorinei rūgštinančiai apkrovai, pagrindinę reikšmę įgis elementų įsisavinimas, perskirstymas, išplovimas iš lajų, grąžinimas su nuokritomis ir pakartotinis įsisavinimas iš dirvožemio. Todėl ekosistemų stabilumą vis mažiau apibrėš atmosferinės taršos lygis ir vis daugiau – vidinio biogeocheminio ciklo efektyvumas.

Medžių lajų, kaip aktyvaus biogeocheminio filtro, reikšmė didės. Tikėtina, kad lajos ir toliau reguliuos NO_3^- ir NH_4^+ patekimą į dirvožemį, dalį atmosferinio azoto tiesiogiai įtraukdamos į fiziologinius procesus. Dėl to lajų funkcinė būklė gali tapti vienu jautriausių ankstyvųjų miško ekosistemų stabilumo ir atsparumo rodiklių.

Azoto ciklas taps vis labiau priklausomas nuo medžių fiziologinės būklės. Ilgėjantis vegetacijos laikotarpis gali didinti azoto poreikį ir jo panaudojimą lajose, tačiau mažėjanti atmosferinė N iškritos stiprins priklausomybę nuo vidinės azoto recirkuliacijos. Todėl produktyvumą vis labiau ribos ne bendras azoto kiekis, o jo įsisavinimo, transformacijos ir pakartotinio panaudojimo efektyvumas.

Santykinio azoto ribojimo reikšmė gali didėti. Jeigu N koncentracijų stabilizacija arba mažėjimas ir P koncentracijų didėjimas išliks, gali toliau mažėti lapijos N santykis. Tai ribotų medžių gebėjimą panaudoti ilgesnį vegetacijos laikotarpį ir palankesnes temperatūros sąlygas produktyvumui didinti, ypač beržams ir eglėms.

Aukštaitijos KMS pušynuose tikėtinas santykinai stabilus biogeocheminis režimas. Mažesnis lajų tankumas, silpnesnis elementų išplovimas ir konservatyvesnė pušų išteklių naudojimo strategija turėtų palaikyti stabilesnę elementų apytaką. Vis dėlto ilgalaikis stabilumas priklausys nuo to, ar bus išlaikytas pakankamas N, K ir Mg prieinamumas bei neintensyvės Fe ir Al mobilizacija.

Žemaitijos KMS eglynuose elementų apytaka išliks intensyvesnė, bet jautresnė. Didelis lapijos ploto indeksas ir tankios lajos toliau skatins K, Ca ir Mg sulaikymą, išplovimą ir grąžinimą į dirvožemį. Trumpuoju laikotarpiu tai gali palaikyti produktyvumą, tačiau ilgalaikis

stabilumas vis labiau priklausys nuo vandens režimo, šaknų įsisavinimo ir gebėjimo kompensuoti elementų netekimą iš lajų.

Bazinių katijonų ciklai taps aktyvesni ir labiau priklausomi nuo klimato. Šiltėjant klimatui ir ilgėjant vegetacijos laikotarpiui, tikėtinas intensyvesnis K, Ca ir Mg judėjimas tarp žaliosios lapijos, polajinių kritulių, nuokritų ir dirvožemio. Šių elementų srautų didėjimas gali praturtinti miško paklotę, tačiau pats savaime nereikš gerėjančios medžių mitybos, jeigu jų grąžinimas į dirvožemį vyks dėl didesnio praradimo iš gyvųjų audinių.

Kalio ciklas taps vienu svarbiausių atsparumo sausrai rodiklių. K koncentracijų ir srautų kaita vis labiau priklausys nuo kritulių režimo, lapijos išplovimo ir medžių vandens balanso. Žemaitijos eglynuose K srauto persiskirstymas iš nuokritų į polajinius kritulius gali stiprėti, todėl viso elemento balanso vertinimui reikės analizuoti abu grįžimo į dirvožemį kelius.

Klimato ekstremumai taps svarbesni už vidutinių meteorologinių sąlygų pokyčius. Sausros, karščio bangos ir intensyvūs krituliai gali keisti lajų elementų sugertį, retranslokaciją, išplovimą, spyglių išlaikymo trukmę ir nuokritų cheminę sudėtį. Todėl ateities elementų ciklo kaita bus labiau priklausoma nuo ekstremalių epizodų dažnumo ir jų sekos negu nuo vien vidutinės metinės temperatūros ar kritulių sumos.

Nuokritų vaidmuo aprūpinant miško paklotę maisto elementais išliks dominuojantis. Kadangi N, K ir Ca srautai su nuokritomis daug kartų viršija jų patekimą su atviros vietos krituliais, miško produktyvumą ir dirvožemio derlingumą toliau daugiausia palaikys vidinė biologinė recirkuliacija. Atmosferinė depozicija išliks svarbi kaip papildantis, bet ne pagrindinis maisto medžiagų šaltinis.

Didėjantis nuokritų kiekis nebūtinai didins ilgalaikį anglies kaupimą. Jeigu klimato šiltėjimas ir palankus drėgmės režimas spartins nuokritų destrukciją, dalis didėjančio organinės medžiagos srauto bus greičiau mineralizuojama ir grąžinama į atmosferą CO_2 pavidalu. Todėl miško anglies balansas priklausys nuo pusiausvyros tarp nuokritų susidarymo ir jų skaidymosi greičio.

Na ir Cl taps svarbesniais atmosferos cirkuliacijos pokyčių indikatoriais. Didėjant vakarinių oro masių ir jūrinės kilmės aerozolių įtakai, Na^+ ir Cl^- dinamika gali geriau atspindėti Baltijos jūros poveikio ir atmosferos cirkuliacijos kaitą. Šis signalas bus ryškiausias Žemaitijos KMS, tačiau gali stiprėti ir rytinėje Lietuvos dalyje.

Fe ir Al kaitos reikšmė turės būti patikslinta. Jeigu pastaraisiais metais nustatytas Fe ir Al koncentracijų bei srautų didėjimas pasitvirtins, tai gali rodyti naują dirvožemio hidrologinio ir cheminio režimo etapą. Šių elementų dinamika ateityje gali tapti svarbiu dirvožemio–šaknų–lajų sistemos pokyčių indikatoriumi, tačiau tik atmetus analitinius ir paviršinės taršos veiksnius.

Maistinių elementų rezorbcijos strategijos tarp stočių gali toliau skirtis. Aukštaitijoje didėjančios N ir P koncentracijos nuokritose gali rodyti silpnėjantį jų išsaugojimą senstančiuose audiniuose, o Žemaitijoje rezorbcijos kryptis išlieka mažiau vienareikšmė. Todėl ateityje būtina tiesiogiai apskaičiuoti rūšims būdingą N, P ir K rezorbcijos efektyvumą, įvertinant žaliosios ir senstančios lapijos masės pokyčius.

Skirtingų medynų prisitaikymo strategijos išliks nevienodos. Dzūkijos pušynų raidą pirmiausia ribos vandens prieinamumas, Aukštaitijos pušynuose tikėtinas stabilesnis produktyvumo ir elementų recirkuliacijos režimas, o Žemaitijos eglynuose išliks intensyvi, tačiau klimato ekstremumams ir biotiniams pažeidimams jautresnė apytaka.

Miško ekosistemų atsparumą lems elementų ciklo pusiausvyra, o ne didžiausi srautai. Didelis maisto medžiagų grąžinimas į dirvožemį gali palaikyti produktyvumą tik tuomet, kai mineralizacija, šaknų įsisavinimas ir elementų išsaugojimas biomasėje išlieka subalansuoti. Todėl intensyvesnis ciklas nebūtinai reikš didesnį atsparumą, ypač jeigu jį lydės maisto medžiagų nuostoliai ir vandens režimo sutrikimai.

Apibendrinanti prognozė.

Lietuvos hemiborealiniai miškai pereina į naują funkcionavimo etapą, kuriame klasikinės rūgščiosios taršos poveikis mažėja, o ekosistemų raidą vis labiau reguliuoja klimato ekstremumai, hidrologinis režimas, medynų rūšinė ir struktūrinė sudėtis bei vidinės maisto elementų recirkuliacijos efektyvumas.

Ilgalaikiai Kompleksiško monitoringo duomenys atskleidė esminę Lietuvos hemiborealinių miškų biogeocheminę transformaciją: sumažėjus rūgštinančiai atmosferinei taršai, ekosistemų būklę vis mažiau lemia atmosferinės kilmės elementų srautas į miško ekosistemą ir vis labiau – medžių lajų gebėjimas reguliuoti, išsaugoti ir recirkuliuoti maisto elementus atmosferos–lapijos–nuokritų–dirvožemio sistemoje. Tai patvirtina daug kartų atmosferinį patekimą viršijantys N, K ir Ca srautai su nuokritomis, rodantys, kad miško produktyvumą pirmiausia palaiko vidinė biologinė apytaka. Tačiau ši apytaka nėra vienodai stabili: Aukštaitijos pušynuose formuojasi lėtesnis ir atsparesnis elementų ciklas, o Žemaitijos eglynuose – intensyvesnė, produktyvesnė, bet klimato ir hidrologiniams ekstremumams jautresnė sistema. Todėl pagrindinė ateities grėsmė yra ne pavienio elemento trūkumas ar rūgščioji tarša, bet visos biogeocheminės pusiausvyros sutrikimas, kai didėjantis produktyvumas, spartėjanti nuokritų apytaka ir elementų išplovimas viršija ekosistemos gebėjimą juos išsaugoti ir pakartotinai panaudoti. Kitaip tariant, Lietuvos miškai pereina iš taršos kontroliuojamos į klimato ir vidinės recirkuliacijos kontroliuojamą būklę, o jų atsparumą lems ne tai, kiek elementų patenka į ekosistemą, bet tai, kaip efektyviai jie joje išlaikomi.

VII. DIRVOŽEMIO VANDENS, GRUNTINIO BEI PAVIRŠINIO (UPELIŲ) VANDENS TYRIMAI KM STOČIŲ UPELIŲ BASEINŲ TERITORIJOSE

Vanduo miško ekosistemoje yra ne tik būtinas augalų fiziologinių procesų išteklius, bet ir pagrindinė terpė, jungianti atmosferą, medžių lajas, paklotę, dirvožemį, gruntinius bei paviršinius vandenis į vientisą hidrologinę ir biogeocheminę sistemą. Su vandeniu į ekosistemą patenka atmosferinės kilmės sieros, azoto, chloro, bazinių katijonų ir kitų elementų junginiai, o dirvožemyje vanduo užtikrina jų tirpimą, sorbciją, desorbciją, biologinį pasisavinimą, transformaciją ir migraciją. Todėl vandens cheminė sudėtis atspindi ne vien vandens šaltinio savybes, bet ir visą kompleksą baseine vykstančių fizikinių, cheminių bei biologinių procesų (Likens & Bormann, 2013; Weldon et al., 2026).

Miško baseinų biogeochemijos tyrimuose vanduo gali būti laikomas pagrindiniu medžiagų apykaitos „nešikliu“. Krituliai ir sausoji depozicija lemia išorinį cheminių medžiagų patekimą, sąveika su medžių lajomis pakeičia kritulių cheminę sudėtį, dirvožemio tirpale išryškėja dirvožemio buferinės savybės ir biologinis elementų pasisavinimas, o gruntinio bei upelių vandens chemija parodo, kokia medžiagų dalis migruoja žemiau aktyviosios šaknų zonos arba galutinai eksportuojama iš baseino. Dėl to vien tik atskirų vandens telkinių koncentracijų analizė ne visada pakankama – būtina kartu vertinti vandens srautus, jų kaupimąsi ekosistemoje ir išnešimą su nuotėkiu (Likens & Bormann, 2013; Weldon et al., 2026).

Dirvožemio vanduo šioje sistemoje užima išskirtinę vietą, nes yra tiesioginė cheminė medžių šaknų ir dirvožemio mikroorganizmų aplinka. Jo sudėtyje greitai atsispindi atmosferinių iškritų pokyčiai, organinės medžiagos mineralizacija, nitrifikacija, katijonų mainai, mineralų dūlėjimas, augalų maisto medžiagų pasisavinimas ir sezoniniai dirvožemio drėgmės svyravimai. Dėl santykinai greitos reakcijos dirvožemio tirpalas gali parodyti prasidedantį maisto medžiagų disbalansą ar rūgštėjimo procesą anksčiau, negu reikšmingi pokyčiai nustatomi viso dirvožemio cheminėje sudėtyje arba medžių lajose. Todėl ICP Forests monitoringo sistemoje dirvožemio tirpalo tyrimai naudojami kaip svarbus ankstyvojo perspėjimo metodas, vertinant rūgštinančių junginių poveikį, bazinių katijonų prieinamumą, aliuminio mobilizaciją ir galimą riziką medžių mitybai ir bendrai jų būklei (Johnson et al., 2018; ICP Forests, 2025).

Europos ICP Forests duomenų analizė parodė, kad sumažėjus rūgštinančioms iškritoms sulfatų koncentracijos miško dirvožemio tirpale daugelyje vietovių reikšmingai sumažėjo. Tačiau dirvožemio cheminis atsakas nebuvo vienodas. Rūgštims jautriuose paviršiniuose mineraliniuose horizontuose kai kur nustatytas rūgščių neutralizavimo gebos atsikūrimas, tačiau gilesniuose

horizontuose ir geriau buferizuotuose dirvožemiuose atsakas buvo silpnesnis arba net priešingos krypties. Be to, bazinių katijonų ir aliuminio santykis daugelyje tirtų vietų negerėjo. Tai rodo, kad mažėjančios rūgštinančių komponenčių iškritos neužtikrina greito ir visapusiško dirvožemio cheminio atsikūrimo, ypač ten, kur paidėjusios iškritos jau buvo sumažinusi kalcio, magnio ir kitų bazinių elementų atsargas (Johnson et al., 2018).

Gruntinio vandens cheminė sudėtis suteikia informaciją apie medžiagų migraciją žemiau pagrindinės šaknų zonos ir jungia dirvožemio procesus su paviršinių vandenų būkle. Palyginti su dirvožemio vandeniu, gruntinio vandens reakcija dažniausiai yra lėtesnė, nes ją lemia ilgesnis vandens išbuvimo laikas, sąveika su gilesniais mineraliniais sluoksniais, redukcinės–oksidacinės sąlygos ir skirtingų hidrologinių srautų maišymasis. Dėl šios priežasties gruntinio vandens cheminiai pokyčiai gali rodyti ilgalaikį nitratų, sulfatų, bazinių katijonų, geležies, mangano, aliuminio ar organinių junginių judėjimą, kuris ne visuomet tiesiogiai matomas paviršiniame dirvožemio tirpale.

Paviršiniai vandenys, ypač maži miško upeliai, integruoja procesus, vykstančius visoje jų baseino teritorijoje. Upelio cheminė sudėtis priklauso nuo iškritų, dirvožemio ir geologinio substrato savybių, požeminio vandens indėlio, augalijos struktūros, organinės medžiagos sankaupų, reljefo bei hidrologinio režimo. Todėl nedideli, hidrologiškai aiškiai apibrėžti miško baseinai yra ypač tinkami medžiagų balansams ir priežastiniams ryšiams tirti. Juose galima palyginti su krituliais bei depozicija patenkantį medžiagų kiekį su jų išnešimu upelio nuotėkiu ir įvertinti, ar ekosistema konkretų elementą daugiausia sulaiko, kaupia, transformuoja, ar praranda (Weldon et al., 2026).

Vandens chemijos pokyčiai dažnai atsiranda veikiant keliems vienu metu kintantiems veiksniams. Mažėjančios rūgščiosios iškritos gali skatinti organinės anglies tirpumą, o didėjantis kritulių kiekis ar dažnesni intensyvūs nuotėkio epizodai – jos išplovimą iš viršutinių dirvožemio horizontų. Tyrimai parodė, kad mažesnės rūgštinės apkrovos sąlygomis gali didėti ištirpusios organinės anglies ir organinio azoto mobilizacija, o neorganinio azoto koncentracijos tuo pat metu gali mažėti. Dėl to keičiasi ne tik atskirų medžiagų koncentracijos, bet ir C santykis, organinių medžiagų biologinis prieinamumas bei upelių ekosistemų metabolizmas (Ruckhaus et al., 2023).

Būtent tokiu integruotu principu organizuojama Tarptautinė kompleksinio monitoringo programa – ICP Integrated Monitoring. Joje vienu metu tiriama daugiau kaip 20 tarpusavyje susijusių atmosferos, hidrologinių, cheminių ir biologinių komponentų: krituliai, polajiniai krituliai, dirvožemio vanduo, gruntinis vanduo, paviršinis nuotėkis, dirvožemis, augalija ir biota. Vieningi metodai ir hidrologiškai apibrėžtų baseinų principas leidžia vertinti medžiagų balansus, ekosistemų atsikūrimą po taršos sumažėjimo ir klimato kaitos poveikį skirtingiems ekosistemos komponentams (Weldon et al., 2026).

Ilgalaikio monitoringo būtinybę lemia ir tai, kad miško baseinų biogeocheminiai procesai pasižymi dideliu sezoniniu bei tarpmetiniu kintamumu. Pavieniais metais užfiksuoti pokyčiai gali būti susiję su sausrų, liūčių, šiltų žiemų, gausaus sniego tirpsmo ar kitų trumpalaikių reiškinių poveikiu. Tik kelių dešimtmečių trukmės stebėjimai leidžia atskirti epizodines anomalijas nuo kryptingų cheminių pokyčių, nustatyti vėluojančias ekosistemos reakcijas ir įvertinti, ar stebima sistema artėja prie naujos pusiausvyros būsenos. Hubbard Brook ir kitų ilgalaikių miško baseinų tyrimų patirtis parodė, kad vandenilio jonų, sulfatų, kalcio, nitratų ir kitų medžiagų srautai per kelis dešimtmečius gali reikšmingai keistis, todėl ilgalaikių duomenų apibendrinimas vien tik bendromis vidutinėmis reikšmėmis gali paslėpti svarbiausius ekosistemos raidos etapus (Likens & Bormann, 2013).

Taigi dirvožemio, gruntinio ir paviršinio vandens cheminiai tyrimai suteikia skirtingą, tačiau tarpusavyje papildančią informaciją. Dirvožemio vanduo jautriausiai parodo procesus šaknų zonoje, gruntinis vanduo – medžiagų migraciją ir transformaciją gilesniuose sluoksniuose, o upelių vanduo – galutinį viso baseino biogeocheminį atsaką ir medžiagų eksportą. Šių komponentų bendras vertinimas kartu su atmosferinės depozicijos, meteorologiniais, hidrologiniais, dirvožemio ir biologiniais duomenimis sudaro metodologinį pagrindą miško ekosistemų stabilumui, jų cheminiam atsikūrimui ir reakcijai į klimato kaitą tirti.

Atmosferinės iškritos ir miško vandenų cheminės sudėties sąveika

Atmosferinės iškritos yra pagrindinis išorinis cheminių elementų patekimo į natūralias miško ekosistemas kelias. Kartu su krituliais bei sausosiomis iškritomis į ekosistemas patenka sieros, azoto, chloro, natrio, kalcio, magnio, kalio ir kitų elementų junginiai, kurie dalyvauja dirvožemio rūgštėjimo, maisto medžiagų apykaitos ir vandens cheminės sudėties formavimosi procesuose. Miško ekosistemose šių medžiagų likimą lemia sudėtinga atmosferos, medžių lajų, dirvožemio, gruntinio ir paviršinio vandens sąveika, todėl sausumos vandens cheminė sudėtis laikoma vienu patikimiausių ilgalaikio atmosferinių iškritų poveikio indikatorių (Likens & Bormann, 2013; Johnson et al., 2018).

XX amžiaus antroje pusėje sparčiai augusios sieros dioksido (SO_2) ir azoto oksidų (NO_x) emisijos Europoje ir Šiaurės Amerikoje sukėlė plačiai paplitusį miško dirvožemių ir paviršinių vandenų rūgštėjimą. Sieros rūgštis ir azoto rūgštys, susidarančios atmosferoje oksiduojantis sieros ir azoto junginiams, su atmosferinėmis iškritomis patekdavo į miško baseinus ir ilgainiui viršydavo natūralų dirvožemių neutralizavimo pajėgumą. Dėl to mažėjo dirvožemio pH, didėjo vandenilio jonų aktyvumas, buvo išplaunami kalcio, magnio ir kalio jonai, o jų vietą dirvožemio sorbciniame komplekse užimdavo aliuminio ir vandenilio jonai. Šie procesai ilgainiui pakeitė ne tik dirvožemio, bet ir dirvožemio tirpalo, gruntinio bei paviršinio vandens cheminę sudėtį (Likens & Bormann, 2013; Johnson et al., 2018).

Rūgštėjimo procesas prasideda tuomet, kai į dirvožemį patenkančių rūgštinančių junginių kiekis viršija dirvožemio buferinį pajėgumą. Pirmiausia sunaudojamos karbonatų atsargos, vėliau vyksta bazinių katijonų išstūmimas iš sorbcinio komplekso, o ilgainiui prasideda aliuminio turinčių mineralų irimas. Dėl šių procesų dirvožemio tirpale didėja Al^{3+} koncentracija, mažėja Ca^{2+}, Mg^{2+} ir K^{+} kiekiai, blogėja šaknų mitybos sąlygos ir didėja toksiško aliuminio poveikio rizika augalams. Ypač jautrios šiems pokyčiams yra borealinės ir hemiborealinės ekosistemos, kurių dirvožemiai pasižymi maža bazinių katijonų atsarga ir silpnu buferiniu pajėgumu (Johnson et al., 2018).

Azoto junginių poveikis yra sudėtingesnis. Amonio (NH_4^+) ir nitratų (NO_3^-) patekimas į ekosistemą iš pradžių gali skatinti medžių augimą, jeigu azotas yra augimą ribojantis elementas. Tačiau ilgalaikės padidėjusios azoto iškritos lemia vadinamąjį azoto prisotinimą (nitrogen saturation), kai biologinis azoto poreikis tampa mažesnis už jo patekimą į ekosistemą. Tuomet nitratai pradeda migruoti žemiau aktyviosios šaknų zonos ir kartu su savimi išplauna kalcio, magnio bei kalio jonus. Tokiu būdu azoto iškritos netiesiogiai stiprina dirvožemio rūgštėjimą ir spartina maisto medžiagų praradimą iš baseino (Likens & Bormann, 2013). Šis procesas ypač svarbus vertinant ilgalaikį miško ekosistemų tvarumą.

Vienas svarbiausių rūgštėjimo padarinių yra aliuminio mobilizacija. Esant žemam pH, dirvožemio mineraluose esantis aliuminis pereina į tirpią formą ir patenka į dirvožemio tirpalą. Padidėjusi Al^{3+} koncentracija ne tik slopina šaknų augimą ir vandens įsisavinimą, bet ir trikdo kalcio bei magnio pasisavinimą. Dėl šios priežasties daugelis tarptautinių monitoringo programų naudoja ne vien absoliučią aliuminio koncentraciją, bet ir bazinių katijonų bei aliuminio molinį santykį (Bc/Al), kuris laikomas vienu patikimiausių medžių šaknų aplinkos būklės rodiklių (Johnson et al., 2018).

Per pastaruosius tris dešimtmečius Europoje įgyvendintos sieros dioksido ir azoto oksidų emisijų mažinimo priemonės reikšmingai sumažino rūgščiųjų atmosferinių iškritų apkrovą. Ilgalaikiai ICP Forests stebėjimai parodė, kad 1995–2012 m. laikotarpiu sulfatų koncentracija dirvožemio tirpale viršutiniuose mineraliniuose horizontuose sumažėjo vidutiniškai daugiau kaip 50 %, o gilesniuose horizontuose – apie 40 %. Kartu mažėjo bendrojo aliuminio koncentracijos, tačiau dirvožemio rūgštingumo mažėjimas buvo gerokai lėtesnis ir nevienodas skirtinguose dirvožemiuose. Rūgštims jautriuose dirvožemiuose rūgščių neutralizavimo geba didėjo, tuo tarpu geriau bazėmis prisotintuose dirvožemiuose reikšmingų pokyčių nenustatyta arba jie buvo priešingos krypties. Be to, Bc/Al santykis daugelyje stebėjimo vietų beveik negerėjo, rodydamas, kad medžių šaknų aplinka atsikuria gerokai lėčiau negu mažėja atmosferinės iškritos. Šie rezultatai aiškiai parodė, kad tarp emisijų sumažėjimo ir ekosistemų cheminio atsikūrimo egzistuoja ilgas laiko vėlavimas (time lag), kurį lemia lėtas dirvožemio geocheminių procesų atsakas (Johnson et al., 2018).

Paviršiniuose vandenyse ekosistemų atsikūrimas paprastai pasireiškia sulfatų koncentracijos mažėjimu, pH didėjimu ir rūgščių neutralizavimo gebos (ANC) gerėjimu. Tačiau naujausi ilgalaikiai tyrimai rodo, kad šis procesas nėra linijinis. Kai kuriuose baseinuose sulfatų koncentracija mažėja sparčiau negu atsistato bazinių katijonų atsargos, todėl bendras vandens cheminės sudėties gerėjimas vyksta lėčiau nei buvo tikėtasi. Prie šio reiškinio prisideda ir klimato kaitos sąlygomis didėjantis ištirpusios organinės anglies kiekis bei hidrologinio režimo pokyčiai, kurie keičia cheminių elementų migraciją dirvožemyje ir upeliuose (Johnson et al., 2018; ICP Waters, 2024).

Šiuolaikinė samprata apie atmosferinių iškritų poveikį miško vandenims iš esmės skiriasi nuo vyravusios prieš tris dešimtmečius. Anksčiau pagrindinis dėmesys buvo skiriamas rūgštėjimo intensyvumui ir sieros junginių poveikiui, tuo tarpu šiandien vis daugiau dėmesio skiriama ilgalaikiam ekosistemų atsikūrimui, azoto prisotinimo procesams, bazinių katijonų balansui ir klimato kaitos sąveikai su hidrologiniais procesais. Todėl dirvožemio, gruntinio ir paviršinio vandens cheminė sudėtis vertinama ne tik kaip atmosferinių iškritų poveikio indikatorius, bet ir kaip integruotas miško ekosistemų funkcionavimo, jų atsparumo bei ilgalaikio stabilumo rodiklis.

Klimato kaita ir ir miško vandenų cheminės sudėties sąveika

Per pastaruosius tris dešimtmečius klimato kaita tapo vienu svarbiausių veiksnių, lemiančių miško ekosistemų vandens cheminės sudėties pokyčius. Jeigu XX amžiaus pabaigoje pagrindinis dėmesys buvo skiriamas rūgščiųjų atmosferinių iškritų sukeltam dirvožemių ir paviršinių vandenų rūgštėjimui, tai XXI amžiuje vis daugiau tyrimų rodo, kad klimato kaita keičia ne tik vandens balansą, bet ir visų pagrindinių biogeocheminių ciklų funkcionavimą. Oro temperatūros kilimas, kritulių režimo pokyčiai, dažnėjančios sausros, intensyvios liūtys, šiltesnės žiemos bei trumpėjantis dirvožemio įšalo laikotarpis keičia dirvožemio vandens režimą, organinės medžiagos skaidymosi intensyvumą, maisto medžiagų judrumą ir jų eksportą iš miško baseinų (IPCC, 2023; Weldon et al., 2026; Moore & MacDonald, 2024).

Vandens cheminė sudėtis yra vienas jautriausių šių pokyčių indikatorių, nes ji integruoja klimato poveikį hidrologiniams, geocheminiams ir biologiniams procesams. Temperatūros didėjimas spartina organinės medžiagos mineralizaciją, mikrobiologinį aktyvumą ir azoto transformaciją dirvožemyje, tuo tarpu pakitęs kritulių pasiskirstymas lemia skirtingą cheminių elementų migraciją dirvožemio profilyje bei jų išplovimą į gruntinius ir paviršinius vandenis. Dėl šios priežasties klimato kaitos poveikis vandens chemijai retai pasireiškia vieno parametro pokyčiais – dažniausiai keičiasi visa biogeocheminė sistema, apimanti anglies, azoto, sieros ir bazinių katijonų ciklus (Likens & Bormann, 2013; Johnson et al., 2018).

Vienas ryškiausių klimato kaitos padarinių miško baseinuose yra hidrologinio režimo pokyčiai. Šiltėjančios žiemos didina skysto pavidalo kritulių dalį, mažina sniego atsargas ir keičia sezoninį nuotėkio pasiskirstymą. Dėl ankstyvesnio sniego tirpsmo ir ilgesnio vegetacijos sezono keičiasi vandens infiltracija, gruntinio vandens papildymas bei medžiagų transportas dirvožemyje. Tuo tarpu vasaros sausros mažina dirvožemio drėgmę, lėtina vandens apytaką ir sudaro sąlygas dirvožemyje kauptis mineraliniam azotui, kuris po pirmųjų gausesnių kritulių gali būti greitai išplautas į upelius. Tokie „karštųjų momentų“ (hot moments) reiškiniai tampa vis dažnesni klimato kaitos sąlygomis ir gali lemti trumpalaikius, bet labai didelius nitratų eksporto šuolius.

Ne mažiau svarbus klimato kaitos padarinys yra didėjantis ištirpusios organinės anglies (DOC) kiekis miško vandenyse. Pastarųjų dviejų dešimtmečių tyrimai rodo, kad daugelyje Europos ir Šiaurės Amerikos miško baseinų stebimas nuoseklus DOC koncentracijų didėjimas dirvožemio tirpale, gruntiniame ir paviršiniame vandenyje. Šį procesą lemia keli tarpusavyje susiję veiksniai: mažėjančios rūgščiosios atmosferinės iškritos didina organinių rūgščių tirpumą, aukštesnė temperatūra spartina organinės medžiagos skaidymąsi, o dažnesni intensyvūs krituliai didina organinių junginių išplovimą iš viršutinių dirvožemio horizontų. Vis dėlto naujausi ilgalaikiai tyrimai rodo, kad didėjančios DOC koncentracijos nebūtinai reiškia proporcingai didėjantį anglies eksportą – galutinį srautą lemia ir nuotėkio pokyčiai, todėl koncentracijas visada būtina vertinti kartu su hidrologiniais duomenimis.

Klimato kaita reikšmingai veikia ir azoto ciklą. Aukštesnė temperatūra skatina nitrifikaciją bei organinio azoto mineralizaciją, o ekstremalūs meteorologiniai reiškiniai – sausros, audros, vabzdžių pažeidimai ar medynų žūtis – gali sutrikdyti biologinį azoto pasisavinimą. Dėl to padidėja nitratų koncentracijos dirvožemio tirpale ir jų eksportas į upelius. Naujausi modeliavimo ir ilgalaikių stebėjimų rezultatai rodo, kad klimato kaita ir miško būklės blogėjimas gali tapti vienu svarbiausių ištirpusio neorganinio azoto eksporto veiksnių net ir tuose regionuose, kuriuose atmosferinės azoto iškritos pastaraisiais metais mažėjo.

Didėjanti oro temperatūra taip pat spartina silikatinių ir karbonatinių mineralų dūlėjimą, keisdama bazinių katijonų patekimą į dirvožemio tirpalą. Tačiau šio proceso poveikį dažnai kompensuoja intensyvesnis katijonų išplovimas dėl didesnių nuotėkių arba dažnesnių ekstremalių kritulių. Todėl daugelyje Europos miško baseinų bazinių katijonų balansas išlieka neigiamas, nepaisant sumažėjusių rūgščiųjų atmosferinių iškritų. Šis reiškinys rodo, kad klimato kaita gali lėtinti cheminį ekosistemų atsikūrimą net ir sumažėjus antropogeninei taršai.

Svarbus klimato kaitos aspektas yra didėjantis ekstremalių reiškinių dažnis. Ilgalaikės sausros, intensyvios liūtys, audros, miškų gaisrai ir vabzdžių pažeidimai gali iš esmės pakeisti

vandens cheminę sudėtį. Po didelio masto trikdžių dažnai padidėja nitratų, sulfatų, kalio, kalcio, magnio, geležies ir mangano koncentracijos upelių vandenyje, nes sutrinka augalų maisto medžiagų pasisavinimas ir suaktyvėja organinės medžiagos skaidymas. Tačiau šių pokyčių mastas labai priklauso nuo baseino geologinių sąlygų, dirvožemio savybių, pažeidimo intensyvumo ir hidrologinio režimo.

Pastaraisiais metais vis daugiau dėmesio skiriama klimato kaitos, anglies ir azoto ciklų tarpusavio sąveikai. Didėjanti atmosferos CO_2 koncentracija gali skatinti medžių produktyvumą ir azoto naudojimo efektyvumą, tačiau tuo pačiu keisti organinės medžiagos kaupimąsi dirvožemyje bei jos cheminę sudėtį. Šie procesai gali paveikti tiek DOC susidarymą, tiek azoto išplovimą, todėl vandens cheminė sudėtis tampa vienu svarbiausių rodiklių, leidžiančių vertinti miško ekosistemų prisitaikymą prie klimato kaitos.

Šiuolaikiniai tyrimai vis aiškiau rodo, kad klimato kaitos poveikis vandens chemijai negali būti nagrinėjamas atskirai nuo atmosferinių iškritų, dirvožemio procesų ir hidrologinio režimo. Šie veiksniai veikia vienu metu, dažnai sustiprindami arba susilpnindami vienas kito poveikį. Todėl ilgalaikis kompleksinis monitoringas, apimantis atmosferines iškritas, dirvožemio, gruntinio ir paviršinio vandens cheminę sudėtį bei meteorologinius ir hidrologinius matavimus, yra vienintelis patikimas būdas įvertinti tikrąjį klimato kaitos poveikį miško ekosistemoms. Šiuo požiūriu ICP Forests, ICP Waters ir ICP Integrated Monitoring programos sudaro unikalią mokslinę infrastruktūrą, leidžiančią ne tik nustatyti ilgalaikes vandens cheminės sudėties tendencijas, bet ir atskleisti pagrindinius jas lemiančius procesus bei prognozuoti būsimus hemiborealinių miškų ekosistemų pokyčius.

Bendrasis darbo tikslas būtų – kompleksiškai įvertinti ilgalaikius dirvožemio, gruntinio ir paviršinio vandens cheminės sudėties pokyčius Lietuvos kompleksinio monitoringo stočių upelių baseinuose, nustatant atmosferinių iškritų, klimato kaitos, hidrologinių procesų ir dirvožemio biogeocheminių ciklų sąveiką bei jų reikšmę hemiborealinių miško ekosistemų funkcionavimui, atsparumui ir ilgalaikiam stabilumui.

Darbų metodika

Iki 2015 m. dirvožemio vandens, gruntinio bei paviršinio (upelių) vandens tyrimus Aukštaitijos ir Žemaitijos KM stočių upelių baseinų teritorijose vykdė Gamtos tyrimo centro Geologijos ir geografijos instituto mokslininkai vadovaujami dr. I Baužienės. Nuo 2017 m. duomenų surinkimą ir pradinį jų apdorojimą atliko VDU mokslininkai, konsultuojami dr I.Baužienės.

Integruoto monitoringo teritorijose Lietuvoje, dviejose sąlygiškai natūraliose ekosistemose Aukštaitijos NP Ažvinčių girios rezervate (nuo 1993 m.) ir Žemaitijos NP Plokštinės girios rezervate (nuo 1995 metų) stebima ekosistemų būklė. Ekosistemos būklės pokyčiai įvertinami pagal pamatinių ekosistemos elementų dirvožemio, dirvožemio vandens, gruntinio vandens cheminės sudėties dinamiką. Analizuojant šiuos duomenis drauge su kritulių duomenimis, vertinamas su tolimomis pernašomis į Lietuvos teritoriją patenkančių teršalų kaupimasis ir pakitimas dirvožemyje, nustatomas medžiagų išplovimo iš dirvožemių režimas, migracijos keliai ir teršalų patekimas į gruntinį vandenį, bei išnešimas upeliais į paviršinio vandens telkinius. Dirvožemio sudėties, upelio, dirvožemio vandens ir gruntinio vandens režimo ir sudėties stebėsena rodo ir klimato pokyčių pasekmes.

Šie duomenys naudingi, sudarant balansus ir modelius, pagal kuriuos įvertinamas antropogeninės veiklos ir klimato kaitos poveikis natūralioms ekosistemoms ir prognozuojama jų būklė ateityje. Sąlygiškai natūralių ekosistemų monitoringo duomenis galima naudoti kaip atskaitos tašką, vertinant regioninę taršą, jungti į globalios taršos vertinimo sistemą.

2020 m. atlikti šie techninėje užduotyje numatyti darbai:

1. surinko ir apdorojo dirvožemio vandens, gruntinio vandens ir upelių vandens cheminės analizės 2015-2020 metų duomenis;

2. vykdė stebėjimų įrangos patikrą integruoto monitoringo teritorijose;

3. nustatė ištirpusių maistinių medžiagų (azotas ir fosforas) ir sieros balansų nuotėkio sudedamąsias Aukštaitijos ir Žemaitijos KM stočių baseinuose;

5. atliekant tyrimus, vadovautasi ICP KM programos ir ICP KM Vadovo kompleksiniam monitoringui (Manual for Integrated Monitoring. Convention on Long-range Transboundary Air Pollution of the UNECE, International Cooperative Programme on Integrated Monitoring of Air Pollution Effects on Ecosystems. Changes in reporting of biological data (subprogrammes: VG, VS) in 2010, toliau - ICP KM Vadovas) reikalavimais;

6. palygino 2020 metų duomenis su gautais iš AAA 2019 metų bei 1994-2015 metų laikotarpio duomenimis.

Kompleksiniai dirvožemio vandens, gruntinio vandens bei upelių vandens cheminės sudėties tyrimai atliekami mažų upelių baseinuose, esančiuose Aukštaitijos (LT01) ir Žemaitijos (LT03) nacionaliniuose parkuose – tose vietose, kur antropogeninis poveikis yra mažiausias visoje Lietuvoje. Daroma prielaida, kad baseinai hidrologiškai yra uždari. Detalus upelių baseinų fizinis-geografinis, klimatinių rodiklių aprašymas, teminiai žemėlapiai, darbų vykdymo ir cheminių analizių metodikos pateiktos Geografijos instituto ataskaitose (Dirvožemių…, 1993, Dirvožemių…, 1994, Dirvožemių…, 1995).

Pastovūs dirvožemio vandens, gruntinio vandens bei upelių vandens cheminės sudėties stebėjimai Aukštaitijos nacionalinio parko integruoto monitoringo teritorijoje (NP IMT) pradėti 1993 metų rudenį, o Žemaitijos NP IMT – 1995-jų metų pavasarį.

Nuo 1999.01.04 Aukštaitijos nacionaliniame parke, Rūgštėliškio kaime, kuris yra už 4,5 km į Šiaurės rytus nuo Integruoto monitoringo teritorijos (10 km iki Tauragnų miesto, 17 km nuo Ignalinos MS ir 21 km nuo Dūkšto MS) įkurta meteorologinė stotis. Šalia meteorologinės stoties aikštelės buvo instaliuoti trys PT1000 dirvožemio temperatūros matavimo davikliai , kuriais imta matuoti dirvožemio temperatūrą 20, 10, ir 5 cm gyliuose. 2001.10.30 – dirvožemio temperatūrą matuojantys PT1000 davikliai perkelti už 100 m, į miško dirvožemį, o 2012.01.18 PT1000 dirvožemio temperatūros matavimo davikliai pakeisti kitais, automatiniais davikliais (*Campbell Scientific* 107 temperatūros matavimo zondai su *BetaTherm* 100K6A termistoriais).

Dirvožemio vandens mėginiai cheminei analizei imami kas mėnesį šiltuoju metų laikotarpiu. Tuo pačiu apskaičiuojamas ir dirvožemio vandens nuotėkis iš 1 km^2 20 cm ir 40 cm gyliuose. Jei žiemą dirvožemis būna neįšalęs ir kartojasi dažni atlydžiai, vandens pavyzdžiai imami ir dirvožemio vandens nuotėkis skaičiuojamas tuo pačiu periodiškumu.

Suomių tyrėjai 1997–1998 metais, finansuojant Šiaurės šalių ministrų tarybai (Nordic Counsil of Ministers), vykdė programą "The Integrated Groundwater Monitoring Network in the Baltic and Nordic Countries" ir įrengė du standartinius, uždaro tipo lizimetrus, kurie Žemaitijos IMT veikia iki šiol ir vadinami didžiuoju ir mažuoju suomių lizimetrais.

Didysis suomių lizimetras yra 140 cm skersmens ir 170 cm gylio (pagamintas iš stiklo pluošto) bei skirtas infiltracinio vandens debitui stebėti. Iš lizimetro dugno susikaupęs vanduo plastiko vamzdžiu nuteka i rinktuvą namelin, kur *kas savaitę* išmatuojamas jo tūris. Debito matavimai atliekami nuo 1998 lapkričio 11 dienos. Kritulių kiekiui, patenkančiam į lizimetrą, stebėti salia jo (už 1 metro įrengtas kritulmatis). Matuojamas per savaitę susikaupęs kritulių kiekis.

Mažasis suomių lizimetras yra pagamintas iš plastikinio 56 cm skersmens ir 70 cm ilgio vamzdžio ir naudojamas infiltracinio vandens kiekio ir cheminės sudėties stebėjimui. Kitaip, nei seklieji lizimetrai (20 ir 40 cm), mažasis suomių lizimetras stebėjimo laikotarpiu dar nebuvo užšalęs (gylis 70 cm). Jis yra uždaras, sujungtas vamzdžiu su nameliu, kuriame yra indas vandeniu. *Kas mėnesį* nustatomas prasifiltravusio vandens tūris ir paimamas 1 litro mėginys cheminei analizei laboratorijoje.

Kas mėnesį nustatomas dirvožemio drėgnumas 20 ir 40 cm gyliuose.

Gruntinio vandens mėginiai imami 6 kartus per metus, gruntinio vandens lygis matuojamas kas 2 savaites.

Upelių vandens mėginiai cheminei analizei imami kas mėnesį visus metus, pagal savirašių duomenis apskaičiuojami kasdieniai upelių debitai. Upelių vandenyje kas mėnesį išmatuojamas ištirpusio deguonies kiekis.

Visose trijose vandens mėginių rūšyse (dirvožemio, gruntinio ir upelio) nuo stebėjimų pradžios reguliariai analizuojama SO_4, NO_3N, NH_4N, Ca, Na, K, Mg, Cl, $P_{visuminis}$, Mn, Fe, Si, pH. Nuo 2000 metų matuojamas fosfatų fosforo (PO_4P), ir visuminio azoto ($N_{visuminis}$) kiekis, nuo 2002 m. pradėta matuoti visuminį aliuminio kiekį, o nuo 2003 m. – visuminį organinės anglies kiekį. Nuo 2000 metų vidurio visose paprogramėse, 3 kartus per metus, balandžio, liepos ir spalio mėnesiais pradėta matuoti sunkiųjų metalų (Cu, Cr, Cd, Pb, Zn, Ni) kiekius gamtiniame vandenyje. Iš viso nustatomi 23 cheminiai parametrai.

Visi mėginiai imami ir jų cheminės analizės atliekamos vadovaujantis vieninga metodika (The Working…, 1989, Environment…, 1993, ICP IM…, 1998), pagal kurią dirba ir kitos integruoto monitoringo programoje dalyvaujančios šalys.

Duomenys analizuojami palyginant svertinius metų vidurkius, rangų ir koreliacijų metodais.

Dirvožemio vandens nuotekis skaičiuojamas pagal lizimetro darbinį plotą.

Gruntinio vandens dinaminės atsargos apskaičiuojamos pagal formulę (Сакалаускене, 1969):

$$Qd = \sum \mu \cdot F \cdot \Delta h$$

Qd dinaminės atsargos, μ – vandens atidavimo koeficientas, *F – plotas,* Δh – lygio metinė amplitudė. Požeminis nuotėkis (*Q*) apskaičiuotas:

$Q = \frac{Qd}{365 - t}$, *kur t laikas, kai gruntinio vandens lygis kyla.*

Baseino plotas Aukštaitijos integruoto monitoringo stotyje yra patikslintas pagal santykinai inertiškos medžiagos (sulfatų) balansą ekosistemoje (Baužienė, 2005) Chloridų balanso nebuvo galima apskaičiuoti, nes nebuvo duomenų apie chloridus kritulių vandenyje.

Plotas gruntinio vandens dinaminių atsargų skaičiavimui yra nustatytas pagal gręžinių altitudes, darant prielaidą, kad teritorijose, vienodai pakilusiose virš jūros lygio, gruntinio vandens lygio svyravimo amplitudės yra panašios.

Viso baseino vandens balansas sudarytas pagal supaprastintą lygtį ir apskaičiuotas bendras garavimas:

$$ET = Pt - qt \pm \Delta S,$$

Čia: *ET* – bendras garavimas, *qt* – nuotėkis, ΔS - vandens atsargų pokytis dirvožemyje per laikotarpį t (Ruseckas, 2008).

Dėmens ΔS reikšmės nustatymas yra problematiškas, nes dirvožemio drėgnumas per metus (dažniausiai pavasarį-vasarą) mažėja ne tik dėl nuotėkio į gruntinius vandenis (aeracijos zoną), bet ir dėl transpiracijos (Dobkevičius, 2001). Daryta prielaida, kad metų pradžioje, kai žemės paviršių dengia sniegas, šaltuoju sezonu, vandens išgaravimas iš dirvožemio lygus nuliui, drėgmės pokyčiai (ΔS) dirvožemyje vyksta tik dėl gravitacinės drėgmės judėjimo į gruntinius vandenis. ΔS nustatyta, iš dirvožemio drėgmės praėjusių metų vegetacijos laikotarpio pabaigoje atimant dirvožemio drėgmę kitų metų vegetacijos laikotarpio pradžioje. Jei skirtumas neigiamas, nenaudojamas ΔS skaičiavimams, nes tai reiškia, kad šaltuoju laikotarpiu drėgmė dirvožemyje kaupėsi ir garavimui įtakos neturėjo. Prie šaltojo sezono drėgmės pokyčio pridedame pavasarinį pokytį, t.y., dirvožemio drėgmės sumažėjimą per pirmąjį mėnesį nuo pavasarinio polaidžio iki mažiausio lauko drėgnumo, kuris smėlio dirvožemiuose yra 15%. Jei metų pabaigoje dirvožemio drėgmė viršija mažiausią lauko drėgmę, pridedame ir rudeninę gravitacinę drėgmę.

7.1. Dirvožemio vandens cheminės savybės KM baseinų teritorijose ir jų reikšmė miško ekosistemų tvarumui

Dirvožemio vanduo yra aktyviausia miško ekosistemų hidrologinė ir biogeocheminė terpė, jungianti atmosferines iškritas, dirvožemio mineralinę ir organinę dalį, augalų šaknų sistemą, dirvožemio mikroorganizmus, gruntinius bei paviršinius vandenis į vientisą medžiagų apykaitos sistemą. Jis ne tik aprūpina augalus vandeniu, bet ir yra pagrindinė terpė, kurioje vyksta cheminių elementų tirpimas, jų pernaša, jonų mainai, organinių junginių transformacija, augalų maisto medžiagų pasisavinimas bei jų migracija dirvožemio profilyje. Todėl dirvožemio vandens kiekis ir jo cheminė sudėtis lemia daugelio hidrologinių, biologinių ir biogeocheminių procesų eigą bei visos miško ekosistemos funkcionavimą (Likens & Bormann, 2013; Johnson et al., 2018).

Dirvožemio vandens prieinamumas tiesiogiai reguliuoja medžių fiziologinį aktyvumą – fotosintezę, transpiraciją, maisto medžiagų įsisavinimą, augimą ir produktyvumą. Kartu jis lemia dirvožemio mikroorganizmų aktyvumą, organinės medžiagos skaidymosi intensyvumą, azoto transformacijų spartą, maisto medžiagų mineralizaciją ir anglies kaupimąsi dirvožemyje. Todėl dirvožemio vandens režimas yra vienas svarbiausių veiksnių, reguliuojančių medžiagų apytaką ir ekosistemų produktyvumą. Naujausi pasauliniai tyrimai rodo, kad dirvožemio drėgmė yra vienas pagrindinių ekosistemos produktyvumo, evapotranspiracijos ir anglies ciklo kontrolės veiksnių įvairiuose biomuose, tiesiogiai susiejantis vandens prieinamumą su anglies įsisavinimu ir šiltnamio efektą sukeliančių dujų apykaita (Yang et al., 2025; Mao et al., 2025).

Pastarųjų metų technologinė pažanga leidžia vis tiksliau įvertinti dirvožemio drėgmės erdvinį ir laiko kintamumą. Didelės skiriamosios gebos stebėjimai rodo, kad net ir nedideli dirvožemio drėgmės pokyčiai gali reikšmingai keisti vandens srautus, medžių vandens naudojimo efektyvumą bei visos ekosistemos reakciją į klimato kaitą (Huang et al., 2025; Vorobevskii et al., 2024). Šios krypties tyrimai pastaraisiais metais pradėti ir Lietuvos kompleksinio monitoringo stotyse, bendradarbiaujant su tarptautiniu projektu **Forest 4.0**, kurio tikslas – įvertinti dirvožemio drėgmės dinamiką ir jos ryšius su medžių fiziologija, vandens apykaita bei klimato kaitos poveikiu hemiborealinių miškų ekosistemose.

Pakankamas dirvožemio drėgnumas didina miško ekosistemų atsparumą sausroms, karščio bangoms ir kitiems klimato ekstremumams, palaikydamas stabilų medžių augimą ir vandens balansą. Priešingai, ilgalaikis vandens trūkumas mažina fotosintezės intensyvumą, riboja maisto medžiagų pasisavinimą, lėtina medžių augimą, didina jų pažeidžiamumą biotiniams ir abiotiniams stresams bei gali padidinti medžių žūties riziką. Ne mažiau svarbus ir priešingas reiškinys – perteklinis dirvožemio sudrėkimas. Ilgalaikis dirvožemio užmirkimas riboja deguonies patekimą į šaknų zoną, slopina šaknų kvėpavimą, keičia mikrobiologinius procesus ir didina redukcinių reakcijų intensyvumą. Vienas tokių atvejų buvo užregistruotas Aukštaitijos kompleksinio monitoringo stotyje, kur dėl ilgalaikio užtvindymo viename tyrimų plotelyje žuvo visi stebėti medžiai. Šis pavyzdys akivaizdžiai parodo, kad dirvožemio vandens režimo pokyčiai gali tapti svarbiu medynų produktyvumą ir stabilumą ribojančiu veiksniu (Yu et al., 2025).

Tačiau vien dirvožemio vandens kiekio nepakanka suprasti, kokie procesai vyksta ekosistemoje. Panašų drėgmės režimą turinčiuose medynuose gali vykti iš esmės skirtingi biogeocheminiai procesai, priklausomai nuo dirvožemio cheminės sudėties, atmosferinių iškritų, augalų mitybos intensyvumo, mikrobiologinio aktyvumo ir hidrologinių sąlygų. Todėl šiuolaikinėje miško ekologijoje dirvožemio vanduo tiriamas ne tik kaip vandens išteklius augalams, bet ir kaip aktyviausia biogeocheminių procesų terpė.

Dirvožemio vandens cheminė sudėtis yra pirmasis ekosistemos komponentas, kuriame atsispindi atmosferinių iškritų, dirvožemio mineralų dūlėjimo, organinės medžiagos skaidymosi, šaknų veiklos ir mikrobiologinių procesų pokyčiai. Skirtingai nuo paties dirvožemio, kurio cheminės savybės dažniausiai keičiasi lėtai, dirvožemio tirpalas į aplinkos pokyčius reaguoja labai greitai. Dėl šios priežasties jis laikomas vienu jautriausių ankstyvojo perspėjimo indikatorių, leidžiančių nustatyti rūgštėjimo procesus, bazinių katijonų išplovimą, aliuminio mobilizaciją, azoto prisotinimą, organinės anglies migraciją ir kitus svarbiausius biogeocheminius pokyčius dar prieš jiems pasireiškiant medžių mityboje ar medynų būklėje (Johnson et al., 2018; ICP Forests, 2025).

Kompleksinio monitoringo programose dirvožemio vanduo tiriamas ne kaip atskiras aplinkos komponentas, bet kaip terpė, integruojanti atmosferos, dirvožemio, hidrologinius ir biologinius procesus. Kiekvienas nustatomas cheminis rodiklis – pH, sulfatai, nitratai, amonis, baziniai katijonai, aliuminis, geležis, manganas ar ištirpusi organinė anglis – atspindi tam tikrus ekosistemoje vykstančius procesus. Jų koncentracijų kitimas leidžia spręsti apie dirvožemio rūgštėjimą arba cheminį atsikūrimą, maisto medžiagų balansą, azoto ciklo pokyčius, organinės medžiagos transformaciją, klimato kaitos poveikį bei bendrą ekosistemos atsparumą. Todėl šie rodikliai turi būti interpretuojami ne kaip pavienės cheminių elementų koncentracijos, bet kaip tarpusavyje susijusių biogeocheminių procesų indikatoriai.

Vadovaujantis Tarptautinės kompleksinio monitoringo programos (ICP Integrated Monitoring) koncepcija, pagrindinis dirvožemio vandens cheminių tyrimų tikslas yra ne vien nustatyti atskirų cheminių elementų koncentracijas, bet suprasti priežastinius ryšius tarp atmosferinių iškritų, klimato kaitos, hidrologinių procesų, dirvožemio geochemijos ir biologinės veiklos. Tik integruotai vertinant šiuos procesus galima nustatyti medžiagų migracijos dėsningumus, įvertinti miško ekosistemų cheminį atsparumą, jų atsikūrimo eigą ir prognozuoti galimus pokyčius ateityje.

Tokiu būdu dirvožemio vanduo yra pagrindinė jungtis tarp augmenijos, dirvožemio ir atmosferos. Jo kintamumas lemia miškų produktyvumą, anglies dinamiką ir ilgalaikį ekosistemos stabilumą. Todėl dirvožemio vandens dinamikos supratimas yra labai svarbus vertinant miškų tvarumą vykstant klimato kaitai ir dažnėjant ekstremalioms sausroms.

Dirvožemio vandens cheminei sudėčiai didelę reikšmę turi vandens sąveikos su dirvožemiu intensyvumas, apie kurį galima spręsti pagal pavasario polaidžio vandens kiekį ir vandens atsargų pokyčių amplitudę šiltuoju (vegetacijos) laikotarpiu. Jei žiemą sniego nedaug, tada šiltojo laikotarpio pradžioje dirvožemio vandens atsargos nepasipildo, o negausaus besifiltruojančio vandens sąveika su dirvožemiu yra neglaudi, o jei pavasario polaidžio metu per dirvožemį sunkiasi daug, vandens medžiagų išplovimas iš dirvožemio padidėja. Didelę įtaką medžiagų išplovimui iš dirvožemio turi įšalo gylis ir dirvožemio drėgmės atsargų kaita. Nuo 2014 metų nebesusidaro gilesnis nei 20 cm įšalas, o 2019 metais dirvožemio įšalo visai nebuvo užfiksuota (1.13 pav.).

Nuo 2003 metų 2007, 2011, 2013 ir 2015 metų pavasarį drėgmės trūko, buvo mažiau dirvožemio vandens atsargų, negu šiltojo laikotarpio pabaigoje, o per pavasario polaidį dirvožemio drėgmės atsargos labiausiai pasipildė 2020-2021 ir 2023 metais .

7.1. pav. Dirvožemio drėgmės atsargų kaita Aukštaitijos IMS 2003-2025 metais. Grafike pateikiamos pirminės išmatuotos reikšmės, kas 2 savaites šiltuoju laikotarpiu.

2025 metais dirvožemio drėgmės atsargos 0-20 ir 0-40 cm gylyje Aukštaitijos IMS buvo didžiausios nuo 2003 m., kai turime matavimus vegetacijos laikotarpiu kas 2 savaites. 2025 metais dirvožemio drėgmės atsargos pagal vidurkį ir kaitą metų bėgyje panašios į 2012 metų, bet mažai kintančios. Po sausringų 2015-2016 metų, 11 metų iš eilės dirvožemio drėgnis šiltuoju laikotarpiu tolygiai didėjo. Per pastaruosius 5 metus didžiausi dirvožemio drėgmės kontrastai (vadinasi ir dirvožemio vandens srauto intensyvumas) buvo 2021 ir 2023 metais.

Palankūs medžiagų išplovimui pavasarį (dėl menko įšalo ir didelio polaidžio vandens kiekio) buvo 2004, 2008, 2009, 2016 ir 2019-2023 metai. Didžiausi dirvožemio drėgnio kontrastai vegetacijos laikotarpiu buvo 2004, 2006, 2015, 2020, 2021 ir 2023 metais.

Reikšmingai besiskiriantys kritulių kiekiai 2017 ir 2019 metais turėjo tam tikros reikšmingos įtakos KMS baseinų dirvožemio vandens kokybei. ***2020 metais dirvožemio drėgmės atsargos 0-40 cm gylyje abiejose stotyse buvo didžiausios nuo 2003 m., kai turime patikimų duomenų.*** Kritulių kiekis 2025 metais Aukštaitijos IMS buvo 824 mm (110% 2000-2024 metų vidurkio ir 122% Utenos MS SKN1991-2020). Rekordiškai didelė (didžiausia nuo 2000 m.) kritulių dalis (65 %) iškrito gegužės-rugsėjo mėnesį. Vidutiniškai šiltuoju laikotarpiu iškrinta 51 %.

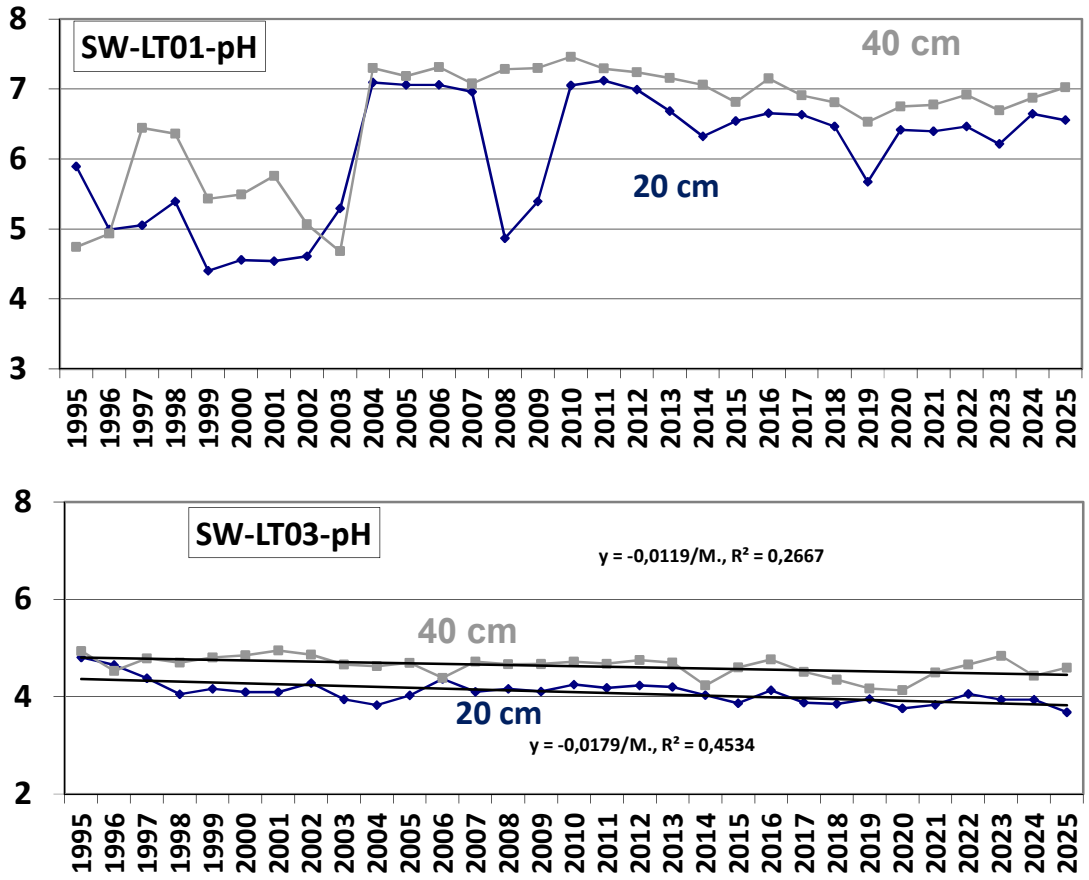
Vienas svarbiausių pokyčių Aukštaitijos KMS baseine yra dirvožemio vandens atsargų reikšmingas didėjimas nuo 2018 m., kuris turėjo turėti reikšmingos įtakos visiems bio-, geo sisteminiams procesams vykstantiems ekosistemoje.

Apibendrinant, ilgalaikiai stebėjimai parodė, kad dirvožemio vandens cheminę sudėtį ir medžiagų migracijos intensyvumą Aukštaitijos kompleksinio monitoringo stoties baseine pirmiausia lemia ne absoliutus kritulių kiekis, bet hidrologinio režimo pokyčiai – pavasario polaidžio vandens kiekis, dirvožemio įšalo gylis bei dirvožemio drėgmės atsargų sezoninė dinamika. Nuo 2014 m. praktiškai nebesiformuojantis gilus dirvožemio įšalas, didėjantis šaltojo laikotarpio infiltracijos intensyvumas ir nuo 2018 m. nuosekliai didėjančios dirvožemio vandens atsargos rodo esminį hidrologinio režimo persitvarkymą, susijusį su klimato šiltėjimu. Dėl šių pokyčių pavasarį didėja vandens filtracija per dirvožemio profilį, intensyvėja cheminių elementų išplovimas, o vegetacijos laikotarpiu didesni dirvožemio drėgmės kontrastai sustiprina medžiagų migraciją ir biogeocheminių procesų dinamiką. Todėl dirvožemio vandens režimo pokyčiai laikytini vienu svarbiausių veiksnių, lemiančių ilgalaikę dirvožemio, gruntinio ir paviršinio vandens cheminės sudėties kaitą bei hemiborealinių miško ekosistemų funkcionavimo pokyčius klimato kaitos sąlygomis.

Dirvožemio vandens rūgštingumo tyrimų rezultatai parodė, kad Aukštaitijos KMS dirvožemio vandens pH tyrimų pradžioje buvo <5 20 cm gylyje ir apie 5,5 40 cm gylyje. Toks vandens rūgštingumas laikėsi iki 2004 metų. 2004-2013 metais pH buvo artimas neutraliam, bet pagreitėjus dirvožemio vandens filtracijai, 2015-2025 m. ėmė rūgštėti ir paskutiniaisiais metais 20 cm gylyje pH sumažėjo iki 6,5, o 40 cm gylyje iki 7,0. ***2008, 2018-2019 ir 2023 m. sausros sąlygojo dirvožemio vandens, nors ir nežymų rūgštumo didėjimo procesą.***

Vandens rūgštėjimo didėjimo trendas Aukštaitijos KMS nustatytas nuo 2004 ir ypač ryškus nuo 2010 m., kuris tęsėsi iki 2023 m. 20 cm gylyje pH reikšmei mažėjant nuo pH 7,1 iki pH 6,2 20 cm gylyje ir nuo pH 7,5 iki pH 6,7 40 cm gylyje. Tik paskutiniuoju 2023 – 2025 m. laikotarpiu vandens rūgštingumas pradėjo mažėti, pH padidėjus atitinkamai iki 6,6 ir 7,0 reikšmių.

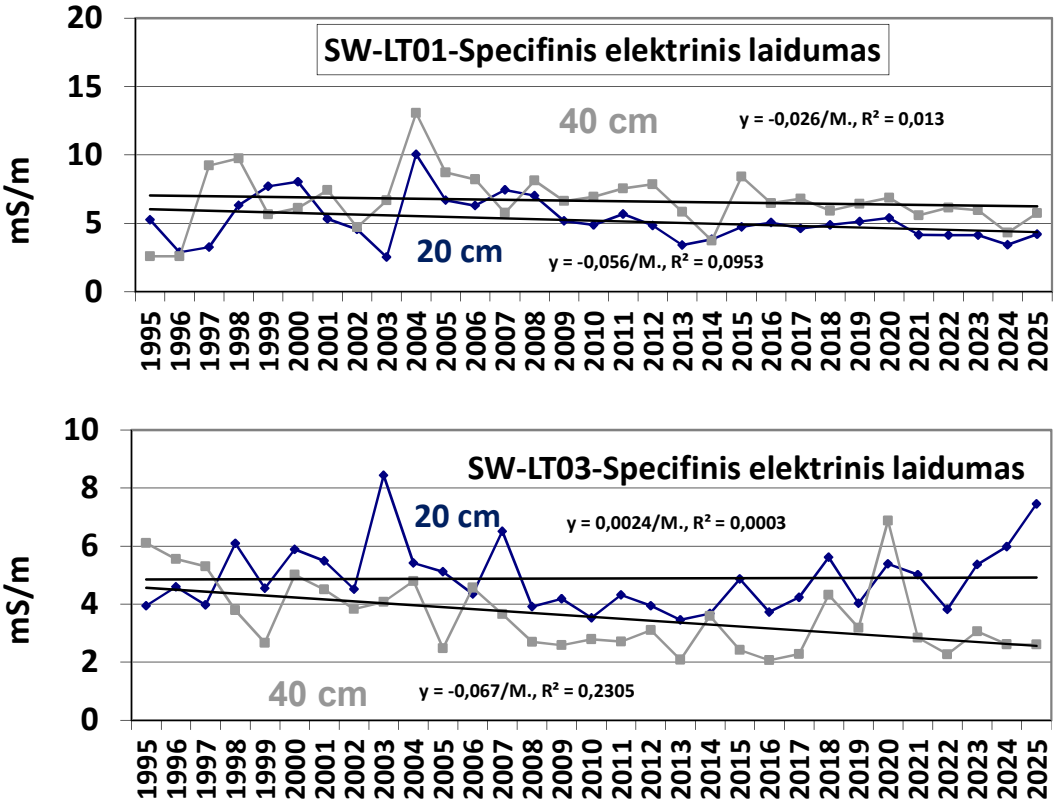
Žemaitijos KMS dirvožemio vandens rūgštingumas didėjo laipsniškai, pH reikšmei mežėjant nuo 4,9 iki 3,7 20 cm gylyje ir nuo 4,9 iki 4,4 40 cm gylyje. Tai yra per tiriamąjį laikotarpį pH reikšmė mažėjo po -0,018 pH per m. 20 cm gylyje ir kiek silpnesnį po -0,011 pH per m. 40 cm gylyje. Paskutiniuoju 2023-2025 m. laikotarpiu dirvožemio vandens rūgtingumas reikšmingai nesikeitė, nors nežymus rūgštėjimas vis dar tęsėsi ir ypač 20 cm gylyje, kur pH reikšmė sumažėjo iki 3,68. Tai didžiausias dirvožemio rūgštingumo lygmuo Žemaitijos KMS per visą tiriamąjį laikotarpį.



7.2 pav. Dirvožemio vandens savybių kitimas, pH (1 iš 18).

Tokiu būdu besikeičiančios aplinkos sąlygos ir tolimųjų oro teršalų kaita per visą tiriamąjį laikotarpį turi didinantį dirvožemio vandens rūgštėjimą poveikį. Tai reikšmingas veiksnys galintis ateityje turėti esminės įtakos miško ekosistemų bendram tvarumui.

Specifinio elektrinio laidumo (SEL) kaitoje nustatytos šio parametro mažėjimo tendencijos: Aukštaitijos KMS 20 cm gylyje SEL mažėjo po -0,026 mS/m., o 40 cm gylyje po -0,026 mS per m. Žemaitijos KMS mažėjimo tendencija nustatyta tik 40 cm gylyje, kai SEL mažėjo po -0,067 mS/m. 20 cm gylyje SEL mažėjo tik iki 2010 (2013), kai jo reikšmė sumažėjo nuo 6,0 iki 3,46 mS/m. 2013-2025 m. laikotarpiu SEL padidėjo nuo nuo 3,46 iki 7,5 mS/m.

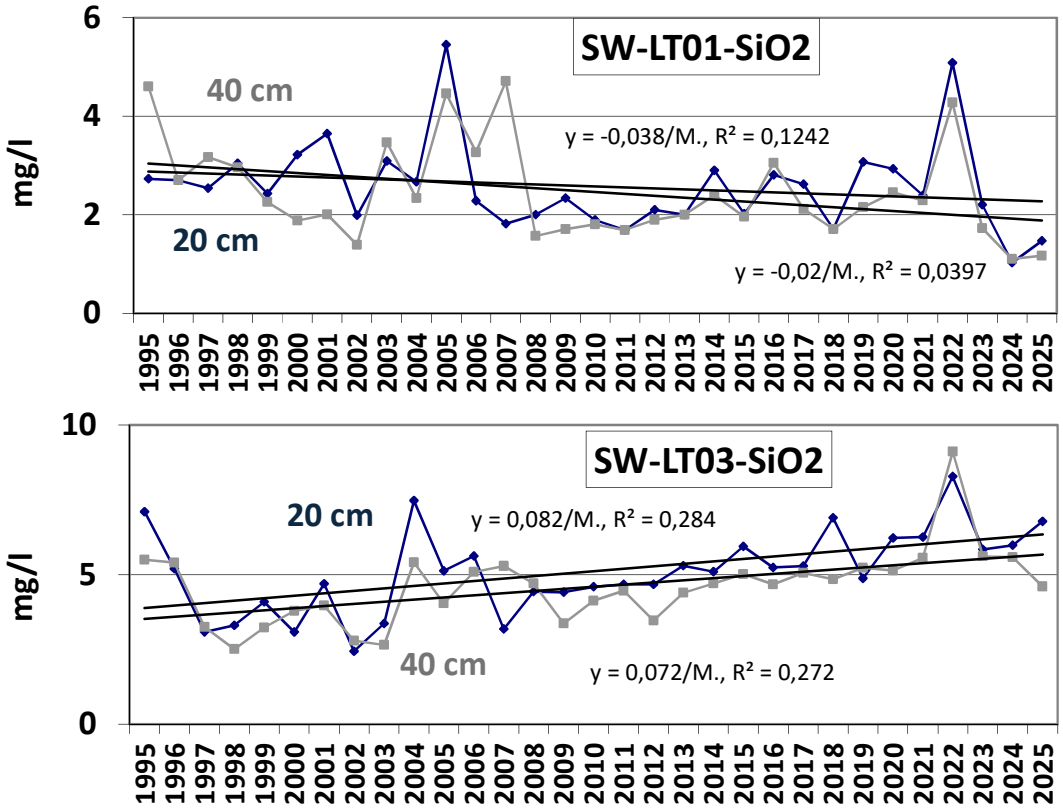


7.2 pav. Dirvožemio vandens savybių kitimas, SEL (2 iš 18).

Išskirtinis rezultatas yra tai, kad gilesniame dirvožemio vandenyje Aukštaitijos KMS baseine SEL yra didesnis, o Žemaitijos KMS mažesnis negu seklesniame vandenyje.

Tokią dirvožemio rūgštingumo ir SEL kaitą turėjo lydėti ir atitinkama specifinio elektrinio laidumo kaita, kuri turėjo didėti. Ši tendencija pasitvirtino reikšmingiau tik Žemaitijos KMS dirvožemio vandenyje, kai SiO2 abiejuose gyliuose didėjo po 0,08 ir 0,07 hg/l per m. 20 ir 40 cm gylyje atitinkamai. Aukštaitijos KMS – nustatyti priešingi procesai: SiO2 koncentracijos nereikšmingai bet turėjo tendenciją mažėti po 0,02-0,03 mg/l per m.. ***Išskirtinai mažos koncentracijos šioje stotyje nustatytos paskutiniaisiais 2023-2025 metais, kai jos siekė ma=iausias reik6mes per vis1 tiriam1j5 laikotarp5, t.y. apie 1 mg/l ir tai jau būtų galima vertinti kaip grėsmę miškams ar priežastį, kodėl Aukštaitijos KMS miškų būklė ir produktyvumas paskutiniaisiais metais prastėja.***

Žemaitijos KMS paskutiniuoju laikotarpiu SiO2 koncentracijos toliau didėjo su nežymia išimtimi 40 cm gylyje, kai šio junginio reikšmė sumažėjo.



7.2 pav. Dirvožemio vandens savybių kitimas, SiO2 (3 iš 18).

Šių rezultatų apibendrinimas leidžia teigti, kad ilgalaikiai dirvožemio vandens tyrimai parodė, kad Aukštaitijos ir Žemaitijos kompleksinio monitoringo stočių baseinuose vyksta skirtingo pobūdžio dirvožemio geocheminiai procesai, kuriuos lemia nevienodos hidrologinės sąlygos, dirvožemio savybės, atmosferinių iškritų apkrova ir klimato kaitos sąlygojami vandens režimo pokyčiai.

Aukštaitijos KMS dirvožemio vandens rūgštingumas tyrimų pradžioje buvo silpnai rūgštus, tačiau 2004–2013 m. dirvožemio vandens reakcija tapo artima neutraliai. Nuo 2010 m., o ypač po 2015 m., nustatytas pakartotinis dirvožemio vandens rūgštėjimas, kuris tęsėsi iki 2023 m., nors pastaraisiais metais pH vėl nežymiai padidėjo. Tikėtina, kad šiuos pokyčius lėmė ne vien atmosferinių iškritų sudėties kaita, bet ir reikšmingai pasikeitęs dirvožemio hidrologinis režimas. Nuo 2014 m. praktiškai nebesiformuojantis gilus dirvožemio įšalas, didėjanti žiemos infiltracija ir nuo 2018 m. nuosekliai didėjančios dirvožemio vandens atsargos sudarė palankesnes sąlygas intensyvesnei vandens filtracijai per dirvožemio profilį bei tirpių medžiagų migracijai.

Žemaitijos KMS dirvožemio vandens rūgštėjimas buvo nuoseklus visą stebėjimų laikotarpį. Paviršiniame 20 cm dirvožemio sluoksnyje pH sumažėjo nuo 4,9 iki 3,7, o 40 cm gylyje – nuo 4,9 iki 4,4. Toks ilgalaikis rūgštėjimas rodo, kad dirvožemio buferinis pajėgumas šiame baseine išlieka ribotas, o vykstantys katijonų mainų ir mineralų dūlėjimo procesai dar nepajėgia visiškai kompensuoti rūgštinančių veiksnių poveikio. Nors Europoje rūgščiųjų atmosferinių iškritų apkrova per pastaruosius dešimtmečius reikšmingai sumažėjo, Žemaitijos KMS duomenys rodo, kad dirvožemio cheminis atsikūrimas vyksta gerokai lėčiau negu mažėja tarša, o tai atitinka ilgalaikių ICP Forests tyrimų rezultatus (Johnson et al., 2018).

Specifinio elektrinio laidumo pokyčiai papildė dirvožemio rūgštingumo analizę ir atskleidė skirtingą tirpių jonų migracijos pobūdį abiejose stotyse. Aukštaitijos KMS specifinis elektrinis laidumas abiejuose gyliuose nuosekliai mažėjo, rodydamas mažėjantį bendrą ištirpusių jonų kiekį dirvožemio tirpale. Tai gali būti siejama su didėjančia infiltracija, intensyvesniu tirpių junginių išplovimu ir mažesniu jų kaupimusi aktyviojoje šaknų zonoje. Tuo tarpu Žemaitijos KMS viršutiniame dirvožemio sluoksnyje po 2013 m. stebėtas ryškus specifinio elektrinio laidumo didėjimas rodo aktyvesnę tirpių jonų akumuliaciją arba intensyvesnį jų išsiskyrimą iš dirvožemio kietosios fazės. Šie skirtumai leidžia daryti prielaidą, kad Aukštaitijos KMS vyrauja intensyvesnė vertikalioji vandens filtracija, o Žemaitijos KMS didesnę reikšmę turi dirvožemio geocheminiai procesai ir lėtesnė vandens apykaita.

Ištirpusio silicio (SiO_2) koncentracijų dinamika dar aiškiau išryškino skirtingą šių ekosistemų geocheminę raidą. Žemaitijos KMS SiO_2 koncentracijos visą stebėjimų laikotarpį didėjo, rodydamos intensyvėjančius silikatinių mineralų dūlėjimo procesus ir didesnį silicio mobilumą dirvožemio tirpale. Tuo tarpu Aukštaitijos KMS nustatyta priešinga tendencija – SiO_2 koncentracijos palaipsniui mažėjo ir 2023–2025 m. pasiekė mažiausias reikšmes per visą stebėjimų laikotarpį. Toks mažėjimas gali rodyti mažesnį tirpaus silicio prieinamumą, kurį tikėtina lėmė sustiprėjusi vandens filtracija, pakitęs dirvožemio vandens režimas ir sumažėjęs silicio kaupimasis aktyviojoje šaknų zonoje. Nors šiuo metu nėra pakankamai duomenų teigti, kad tokios koncentracijos tiesiogiai riboja medžių augimą, naujausi tyrimai rodo, kad silicio prieinamumas gali būti svarbus augalų atsparumui sausrai, temperatūriniam stresui, patogenams ir kitoms klimato kaitos sukeltoms apkrovoms, todėl ilgalaikis SiO_2 mažėjimas turėtų būti laikomas potencialiu ankstyvuoju ekosistemos pokyčių indikatoriumi.

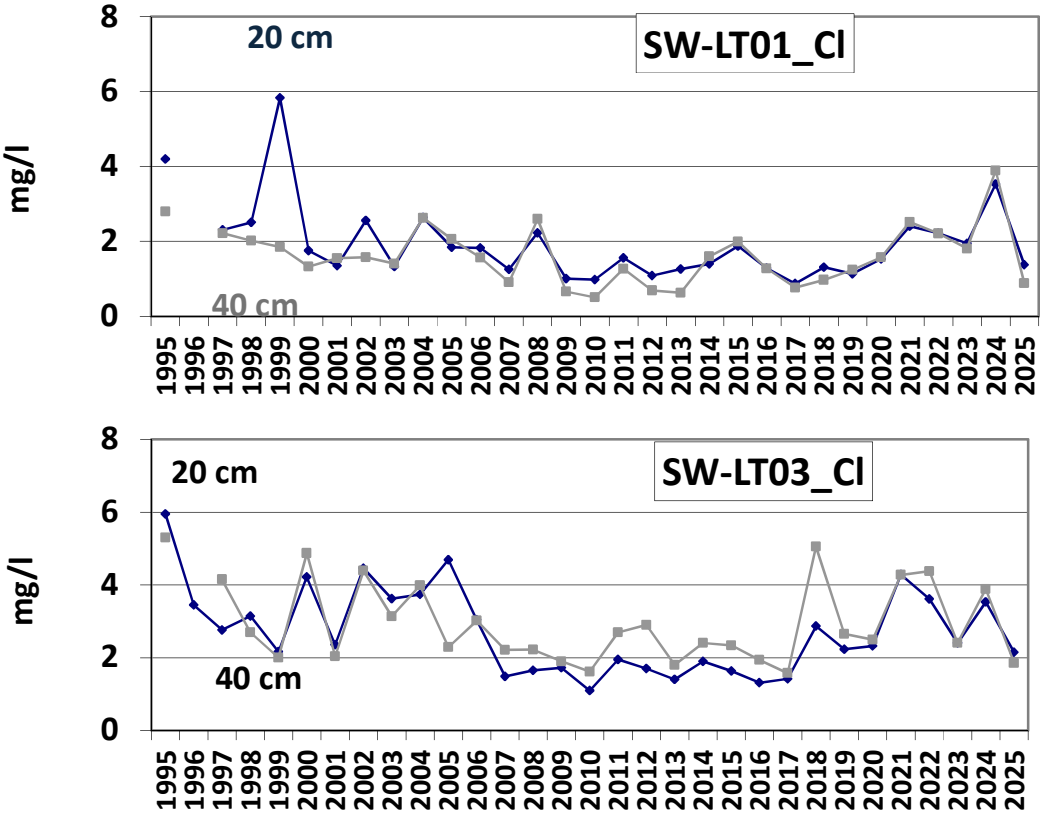
Kadangi SiO_2 koncentracijos sutampa su medžių būklės blogėjimu, didesne defoliacija, produktyvumo mažėjimu ar kitais ekosistemos pokyčiais Aukštaitijos KMS, atsiranda galimybė pagrįstai kelti hipotezę, kad **tirpaus silicio dinamika gali būti ankstyvas hemiborealinių miško ekosistemų būklės indikatorius**. Hipotezę patvirtinti bus galima po kito penkerių metų laikotarpio, apibendrinant jau arti 40 metų tyrimo rezultatus.

Vertinant šiuos rodiklius kompleksiškai galima teigti, kad dirvožemio vandens rūgštingumas, specifinis elektrinis laidumas ir ištirpusio silicio koncentracijos yra glaudžiai susiję su dirvožemyje vykstančiais hidrologiniais ir geocheminiais procesais. Jų ilgalaikiai pokyčiai atspindi ne tik rūgštėjimo ar cheminio atsikūrimo eigą, bet ir besikeičiantį vandens filtracijos intensyvumą, mineralų dūlėjimą, tirpių jonų migraciją bei maisto medžiagų balansą. Šie procesai tiesiogiai veikia augalų šaknų mitybos sąlygas, dirvožemio mikroorganizmų ir kitų pedobiontų aktyvumą, organinės medžiagos skaidymąsi ir biogeocheminių ciklų funkcionavimą. Todėl ilgalaikė šių rodiklių stebėsena leidžia ne tik vertinti dirvožemio vandens cheminės sudėties kaitą, bet ir anksti nustatyti klimato kaitos bei hidrologinio režimo pokyčių poveikį hemiborealinių miško ekosistemų atsparumui ir ilgalaikiam stabilumui.

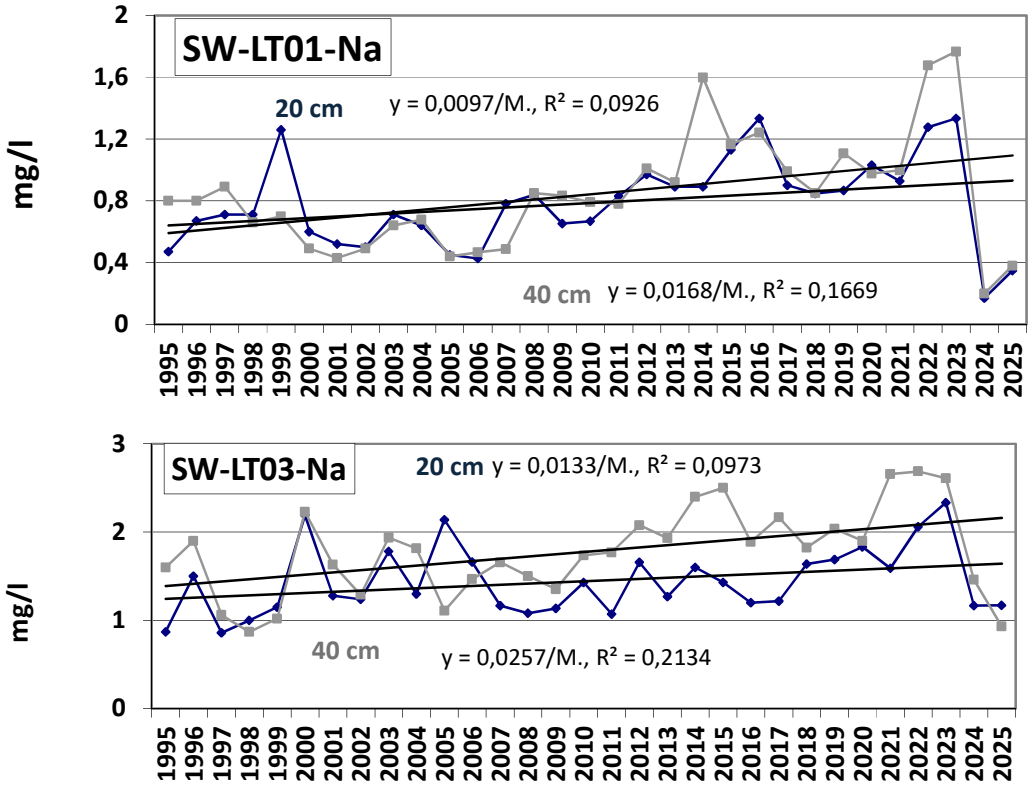
Cl koncentracijų kaita abiejų stočių dirvožemio vandenyje vyksta pagal vienodą charakterį: nėra reikšmingų skirtumų tarp Cl koncentracijų skirtinuose gyliuose; antra - nuo tyrimų pradžios iki 2010 metų Cl koncentracijos vandenyje mažėja, kai tuo tarpu antruoju tiriamuoju laikotarpiu nuo 2010 (2013) iki 2025 m. turi tendenciją didėti. Palyginus Cl koncentracijų kaitą tarp stočių, nustatytas apie 1 mg/l skirtumas, rodantis didesnę Baltijos jūros įtaką Žemaitijos KMS baseino dirvožemio vandens sudėčiai. Išaiškintas toks kaitos pobūdis gerai sutampa su temperatūrų ir kritulių kiekio kaitos pobūdžių pristatytų I skyriuje. Ar tai priežastiniai ryšiai parodys ateities tyrimai.

Išskirtinė Na koncentracijų daugiametė didėjimo tendencija dirvožemio vandenyje, abiejose KMS iki 2023 m., kai Na koncentracija abiejų stočių dirvožemio vandenyse padiekė savo maksimalias reikšmes per visa tiriamąjį laikotarpį. Aukštaitijos KMS – 1,8, o Žemaitijos KMS 2,6 Na mg/l.

2024-2025 metais Na koncentracijos drastiškai sumažėjo abiejose stotyse, koncentracijai nukritus iki mažiausių nuo 2006 metų, iki 0,3 ir 1,0 Na mg/l Aukštaitijos ir Žemaitijos KMS atitinkamai.



7.2 pav. Dirvožemio vandens savybių kitimas, Cl (4 iš 18).



7.2 pav. Dirvožemio vandens savybių kitimas, chloridai ir Na (5 iš 18).

Apibendrinanti natrio (Na^+) ir chloridų (Cl^-) koncentracijų kaitos analizė parodė, kad šių jonų kaitą Aukštaitijos ir Žemaitijos kompleksinio monitoringo stočių dirvožemio vandenyje pirmiausia lemia regioniniai atmosferiniai ir hidrologiniai procesai, o ne dirvožemyje vykstančios biogeocheminės transformacijos. Skirtingai nuo sieros, azoto ar bazinių katijonų, chloridai dirvožemyje beveik nesorbuojami ir aktyviai nedalyvauja biologiniuose procesuose, todėl jų koncentracijos paprastai atspindi atmosferinių iškritų intensyvumą, vandens infiltraciją ir hidrologinių srautų pokyčius. Natris taip pat laikomas santykinai konservatyviu elementu, kurio migraciją daugiausia reguliuoja atmosferinis įnašas ir vandens apykaita.

Abiejose kompleksinio monitoringo stotyse nustatytas labai panašus chloridų koncentracijų kitimo pobūdis. Iki maždaug 2010 m. Cl^- koncentracijos dirvožemio vandenyje palaipsniui mažėjo, o vėliau jų koncentracijos vėl pradėjo didėti. Toks dėsningumas buvo stebimas tiek 20, tiek 40 cm gylyje, o reikšmingų koncentracijų skirtumų tarp šių gylių nenustatyta. Tai rodo, kad chloridų migraciją daugiausia kontroliuoja vertikalus vandens judėjimas dirvožemio profilyje, o ne vietiniai dirvožemio geocheminiai procesai. Pastebėta maždaug 1 mg l^{-1} didesnė chloridų koncentracija Žemaitijos KMS dirvožemio vandenyje atitinka geografinę stočių padėtį ir tikėtina atspindi didesnę Baltijos jūros aerozolių įtaką vakarų Lietuvos regionui.

Įdomu tai, kad chloridų koncentracijų pokyčiai gerai sutapo su pirmame skyriuje nustatytais oro temperatūros ir kritulių režimo pokyčiais. Šis sutapimas leidžia kelti prielaidą, kad klimato kaitos sąlygomis didėjantis kritulių kiekio bei jų sezoninio pasiskirstymo kintamumas gali keisti atmosferinės kilmės jonų patekimą į dirvožemį ir jų migraciją dirvožemio profilyje. Tačiau šiuo metu dar nepakanka įrodymų teigti, kad tarp šių reiškinių egzistuoja tiesioginis priežastinis ryšys, todėl ši hipotezė turėtų būti tikrinama tolesniais kompleksiniais hidrologiniais ir atmosferinių iškritų tyrimais.

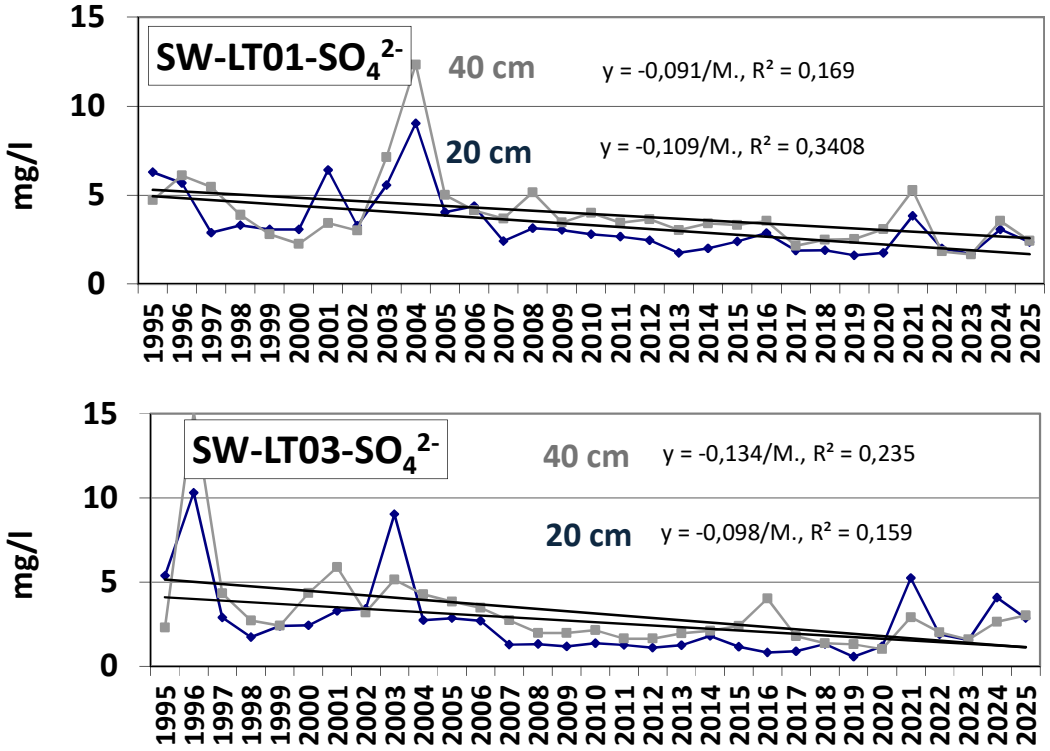
Natrio koncentracijų dinamika buvo dar išraiškingesnė. Abiejose stotyse iki 2023 m. nustatytas nuoseklus Na^+ koncentracijų didėjimas, o 2023 m. pasiektos didžiausios koncentracijos per visą stebėjimų laikotarpį. Tačiau jau 2024–2025 m. Na^+ koncentracijos abiejose stotyse staiga sumažėjo iki mažiausių reikšmių nuo 2006 m. Kadangi toks pokytis vienu metu užfiksuotas tiek rytų, tiek vakarų Lietuvos monitoringo stotyse, mažai tikėtina, kad jį lėmė vietiniai dirvožemio procesai. Labiau tikėtina, kad šis reiškinys susijęs su regioninio masto hidrologinio režimo pokyčiais, ypač su itin drėgnais 2024–2025 m., kai padidėjęs vandens kiekis dirvožemyje galėjo sumažinti tirpių jonų koncentracijas dėl praskiedimo efekto ir spartesnio jų išplovimo iš aktyviosios šaknų zonos.

Vertinant Na^+ ir Cl^- koncentracijų kaitą kartu su anksčiau aptartais dirvožemio vandens rūgštingumo, specifinio elektrinio laidumo ir SiO_2 pokyčiais, galima teigti, kad šie jonai pirmiausia atspindi besikeičiantį hidrologinį režimą, o ne vidinius dirvožemio biogeocheminius procesus. Todėl jų ilgalaikė stebėsena yra svarbi ne tiek vertinant dirvožemio rūgštėjimą ar maisto medžiagų balansą, kiek analizuojant atmosferinių iškritų kilmę, vandens filtracijos intensyvumą ir klimato kaitos poveikį vandens apykaitai miško ekosistemose.

Apibendrinant galima teigti, kad chloridų ir natrio koncentracijų dinamika patvirtina ankstesniuose skyriuose nustatytą išvadą, jog pastarąjį dešimtmetį hemiborealinių miškų dirvožemiuose vis didesnę reikšmę įgauna hidrologinio režimo pokyčiai. Šie rodikliai gali būti laikomi jautriais regioninio masto vandens apykaitos ir atmosferinės kilmės medžiagų pernašos indikatoriais, papildančiais informaciją, gaunamą iš rūgštėjimo bei maisto medžiagų ciklo rodiklių.

Išskirtinai teigiamas ekosistemose vykstantis procesas yra sulfatų kiekio dirvožemio vandenyje reikšmingas sumažėjimas, abiejų stočių dirvožemio vandenyje. Tai daugiamečio S junginių emisijos mažinimo Vidurio ir Vakarų Europoje, (taip pat ir Lietuvoje) rezultatas. Tyrimų pradžioje sulfatų dirvožemio vandenyje buvo registruojama virš 10 mg/l, tai 2018-2019 metais S koncentracijos Aukštaitijos KMS dirvožemio vandenyje 20 cm gylyje pirmą kartą sumažėjo žemiau 1,6 mg/l (40 cm gylyje apie 2,5 mg/l), o Žemaitijos KMS 20 cm gylyje pirmą kartą žemiau 0,6 mg/l (40 cm gylyje apie 1), t.y. Aukštaitijos KMS beveik 4-5 kartus, Žemaitijos KMS net iki 10 kartų mažiau negu tyrimų pradžioje. Palyginus tarp stočių, nustatyta, kad sulfatų koncentracijos iki dviejų kartų Aukštaitijos KMS viršija sulfatų koncentracijas Žemaitijos KMS dirvožemio vandenyje. Įvertinus daugiamečius tendus, matyti, Kad Aukštaitijos KMS dirvožemio vandenyje 20 cm gylyje sulfatų mažėja po 0,11, o 40 cm gyluje po 0,09 mgS/l per metus. Žemaitijos KMS šis mažėjimas pasireišia tokiu intensyvumu atitinkamai: 0,10 ir 0,13 mgS/l per metus. 2023 metais sulfatų koncentracija Aukštaitijos KMS dirvožemyje siekė apie 1,65 mgS/l, o Žemaitijos KMS 1,58 mg S/l. Sulfatų koncentracijos didesniame gylyje buvo kiek tai didesnės negu seklesniame gylyje, bet šis skirtumas nebuvo rekšmingas.

Paskutiniuoju laikotarpiu Aukštaitijos KMS 2021 ir 2024 metais registruotas pakankamai ženklus sulfatų padidėjimas vandenyje, o Žemaitijos KMS jau nuo 2020 m. sulfatų kaitą galima būtų vertinti kaip didėjančią. Ar tai naujai besiformuojančios grėsmės pradžia parodys ateities tyrimai, bet jau ir tokie pokyčiai galėjo sąlygoti neigiamus pokyčius ir pačioje miško ekosistemoje, medžių būklės ir produktyvumo srityje.



7.2 pav. Dirvožemio vandens savybių kitimas, sulfatai (6 iš 18).

Ilgalaikė sulfatų (SO_4^{2-}) koncentracijų kaita dirvožemio vandenyje atskleidė vieną ryškiausių teigiamų pokyčių Lietuvos kompleksinio monitoringo stočių miško ekosistemose. Abiejose stotyse nustatytas nuoseklus ir statistiškai reikšmingas sulfatų koncentracijų mažėjimas rodo ilgalaikį rūgštinančių sieros junginių apkrovos mažėjimą, kuris yra tiesioginė sieros dioksido (SO_2) emisijų mažinimo Europoje ir Lietuvoje pasekmė. Šis dėsningumas visiškai atitinka Europos ICP Forests ir ICP Integrated Monitoring programų rezultatus, kurie rodo, kad per pastaruosius tris dešimtmečius sieros iškritos sumažėjo daugiau kaip 70–90 %, o tai lėmė spartų sulfatų koncentracijų mažėjimą atmosferinėse iškritose, dirvožemio tirpale ir paviršiniuose vandenyse (Johnson et al., 2018; ICP Forests, 2024; UNECE ICP IM, 2024).

Tyrimų pradžioje sulfatų koncentracijos dirvožemio vandenyje abiejose stotyse viršijo 10 mg l^{-1}, tačiau jau 2018–2019 m. jos sumažėjo iki istoriškai mažiausių reikšmių – Aukštaitijos KMS apie 1,6–2,5 mg l^{-1}, o Žemaitijos KMS – iki 0,6–1,0 mg l^{-1}. Taigi per visą stebėjimų laikotarpį sulfatų koncentracijos sumažėjo maždaug 4–5 kartus Aukštaitijos KMS ir net iki 10 kartų Žemaitijos KMS. Toks mažėjimo mastas yra vienas ryškiausių cheminių pokyčių visoje monitoringo programoje ir patvirtina, kad miško ekosistemos palaipsniui atsigauna po XX amžiaus antroje pusėje vyravusios intensyvios rūgštinančios atmosferinės taršos.

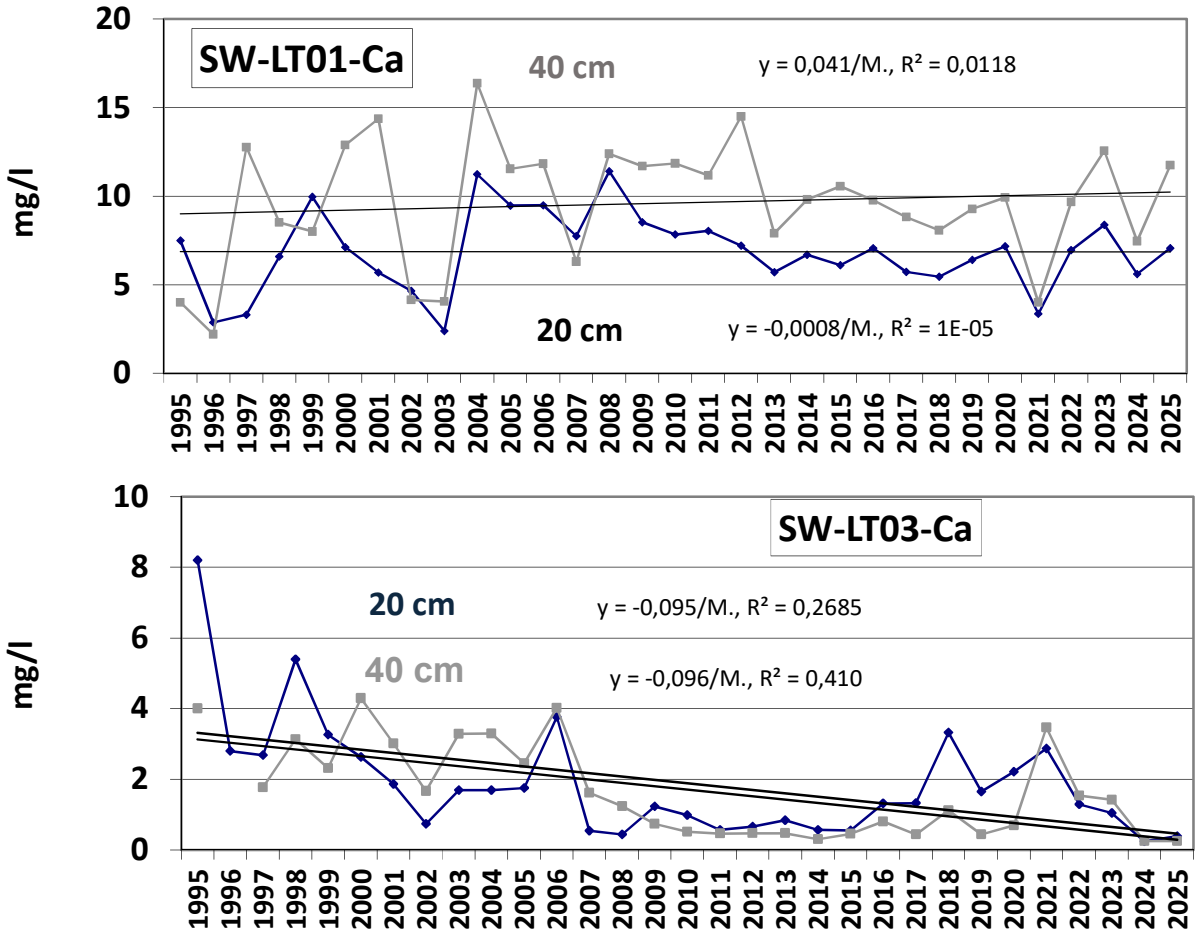
Sulfatų koncentracijų mažėjimas yra vienas svarbiausių miško ekosistemų cheminio atsikūrimo požymių. Mažėjant sulfatų srautams silpnėja dirvožemio rūgštėjimas, mažėja bazinių katijonų išplovimas, lėtėja aliuminio mobilizacija ir palaipsniui atsikuria dirvožemio buferinės savybės. Šie procesai gerina medžių šaknų mitybos sąlygas, didina mikroorganizmų ir kitų pedobiontų aktyvumą, spartina maisto medžiagų apytakos stabilizavimąsi bei sudaro palankesnes sąlygas ilgalaikiam miško ekosistemų atsparumui. ***Naujausi Europos tyrimai rodo, kad būtent sulfatų koncentracijų mažėjimas dirvožemio tirpale yra vienas patikimiausių indikatorinių požymių, rodančių ekosistemų cheminį atsikūrimą po ilgalaikio rūgščiųjų atmosferinių iškritų poveikio*** (Johnson et al., 2018; Wellbrock et al., 2024).

Pastaraisiais stebėjimų metais užfiksuoti trumpalaikiai sulfatų koncentracijų padidėjimai Aukštaitijos KMS (2021 ir 2024 m.) bei Žemaitijos KMS (nuo 2020 m.) rodo, kad ilgalaikis ekosistemų cheminio atsikūrimo procesas nėra visiškai tolygus. Šiuos svyravimus galėjo lemti keli tarpusavyje susiję veiksniai. Viena vertus, klimato kaitos sąlygomis didėjanti dirvožemio drėgmės dinamika, dažnėjantys sausrų ir intensyvių kritulių periodai gali skatinti dirvožemyje sukauptos sieros mobilizaciją ir sulfatų išplovimą (Johnson et al., 2018; ICP Forests, 2024**). Kita vertus, ankstesniuose šios monografijos skyriuose parodyta, kad 2022–2023 m. atmosferinėse iškritose Lietuvoje buvo registruotas laikinas sieros junginių srautų padidėjimas, sutapęs su karo Ukrainoje pradžia ir padidėjusiomis emisijomis dėl karinės veiklos, energetikos infrastruktūros pažeidimų bei gaisrų. Panašūs regioniniai sieros junginių koncentracijų padidėjimai tuo laikotarpiu buvo registruoti ir kitose Europos monitoringo programose. Todėl negalima atmesti prielaidos, kad dalis nustatyto trumpalaikio sulfatų koncentracijų padidėjimo dirvožemio vandenyje galėjo būti susijusi su padidėjusia atmosferine sieros apkrova. Vis dėlto dabartiniai duomenys neleidžia kiekybiškai atskirti karo sukeltų atmosferinių emisijų poveikio nuo hidrologinio režimo ir vidinių dirvožemio biogeocheminių procesų įtakos, todėl šiam klausimui išspręsti būtini tolesni ilgalaikiai kompleksinio monitoringo tyrimai.**

Apibendrinant galima teigti, kad sulfatų koncentracijų kaita dirvožemio vandenyje patvirtina ilgalaikį hemiborealinių miško ekosistemų cheminio atsikūrimo procesą, prasidėjusį sumažėjus sieros junginių emisijoms Europoje. Tačiau pastarųjų metų koncentracijų svyravimai rodo, kad klimato kaitos sąlygomis vis didesnę reikšmę įgauna hidrologiniai ir biogeocheminiai procesai, galintys modifikuoti sieros apytaką nepriklausomai nuo dabartinės atmosferinės taršos lygio. Todėl ilgalaikė sulfatų stebėsena išlieka vienu svarbiausių rodiklių vertinant ne tik rūgštinančios taršos poveikį, bet ir klimato kaitos įtaką miško ekosistemų cheminiam stabilumui.

Dirvožemio vandens rūgštingumo didėjimą (nors ir nereikšmingą) paskutiniuoju laikotarpiu galėjo sąlygoti ir pagrindinių maistinių medžiagų, tokių kaip Ca, K ir Mg koncentracijų kaita. Tiriamuoju laikotarpiu nustatyta, kad Ca koncentracijos dirvožemio vandenyje turi aiškia mažėjimo tendenciją Aukštaitijos KMS iki 2013 m., po to iki dar nežymiai mažėjo iki 2020 m. ir 2021 pasikė vieną iš žemiausių lygių per visa tiriamąjį laikotarpį, t.y. 3,4 mgCa/l abiejuose dirvo=emio vandens gyliuose, ką indikuoja ir šio elemento kaita tiek lapijoje, tiek ir nuokritose.

Nežymus šio elemento padidėjimas registruojamas tik paskutiniaisiais 2022-2025 m. dėl ko 20 cm gylyje per visą tiriamąjį laikotarpį Ca koncentacijų kaitoje aiškesnės tendencijos nenustatyta, o 40 gylyje registruojama Ca koncentracijų didėjimo tendencija po 0,04 mgCa/l per metus.

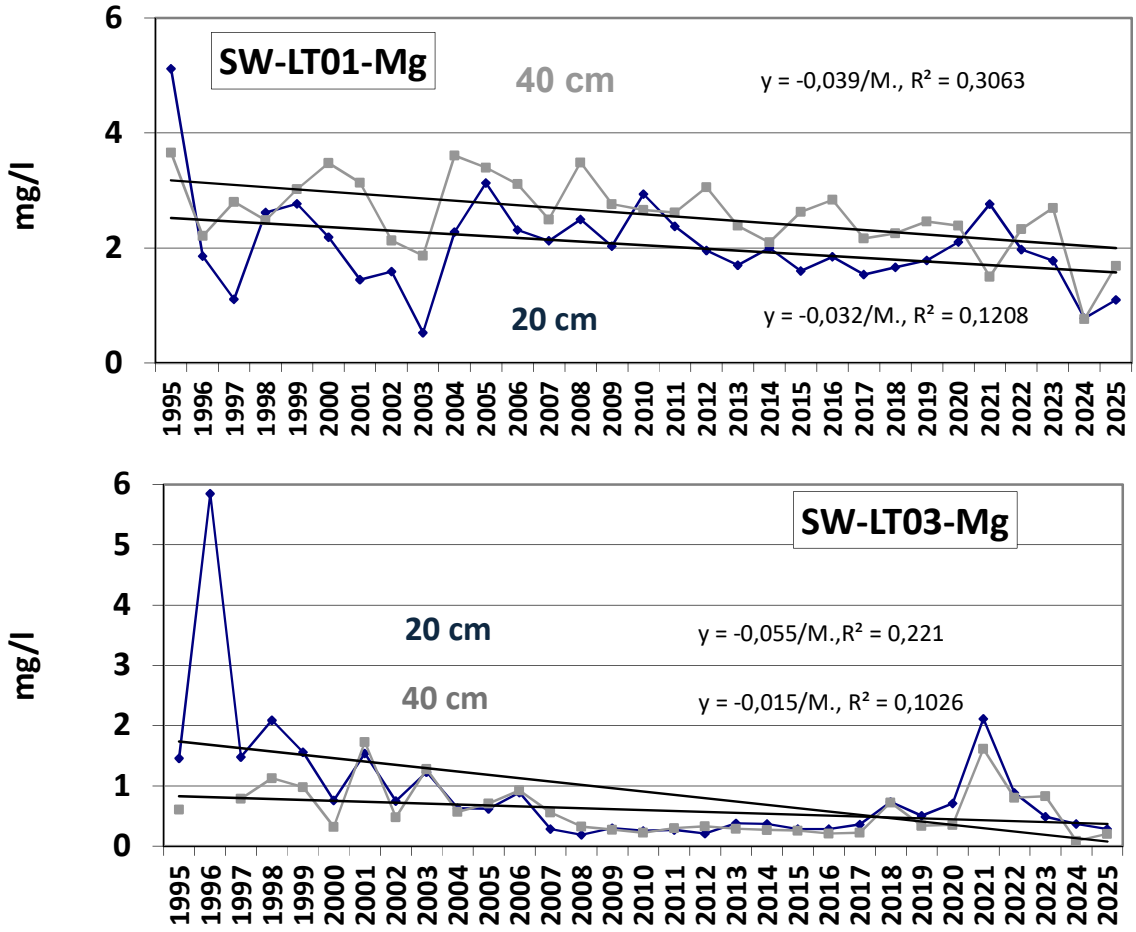


7.2 pav. Dirvožemio vandens savybių kitimas, kalcis (9 iš 18).

Žemaitijos KMS Ca koncentracija tiriamuoju laikotarpi mažėja po -0,095 mgCa/l per m. abiejuose gyliuose. Tačiau šis kaitos teendas nėra vienareikšmiškas. Nustatytas mažėjimas buvo ypač ryškus iki 2o14 m., kai Ca koncentracijos pasiekė iki to laiko mažiausias savo reikšmes, t.y. apie 0,5 mgCa/l. Nuo šių metų iki 2021 m. Ca concentracijos reikšmingai didėjo ir pasiekė beveik 4 mgCa/l

lygį. Paskutiniuoju laikotarpiu 2022-2025 m., kai Aukštaitijos KMS Ca koncentracijos reikšmingai didėjo, Žemaitijos KMS buvo registruojamas ypač ženklus šio elemento koncentracijų sumažėjimas iki pačių žemiausių reikšmių per visą tiriamąjį laikotarpį, t.y. iki 0,3 mgCa/l.

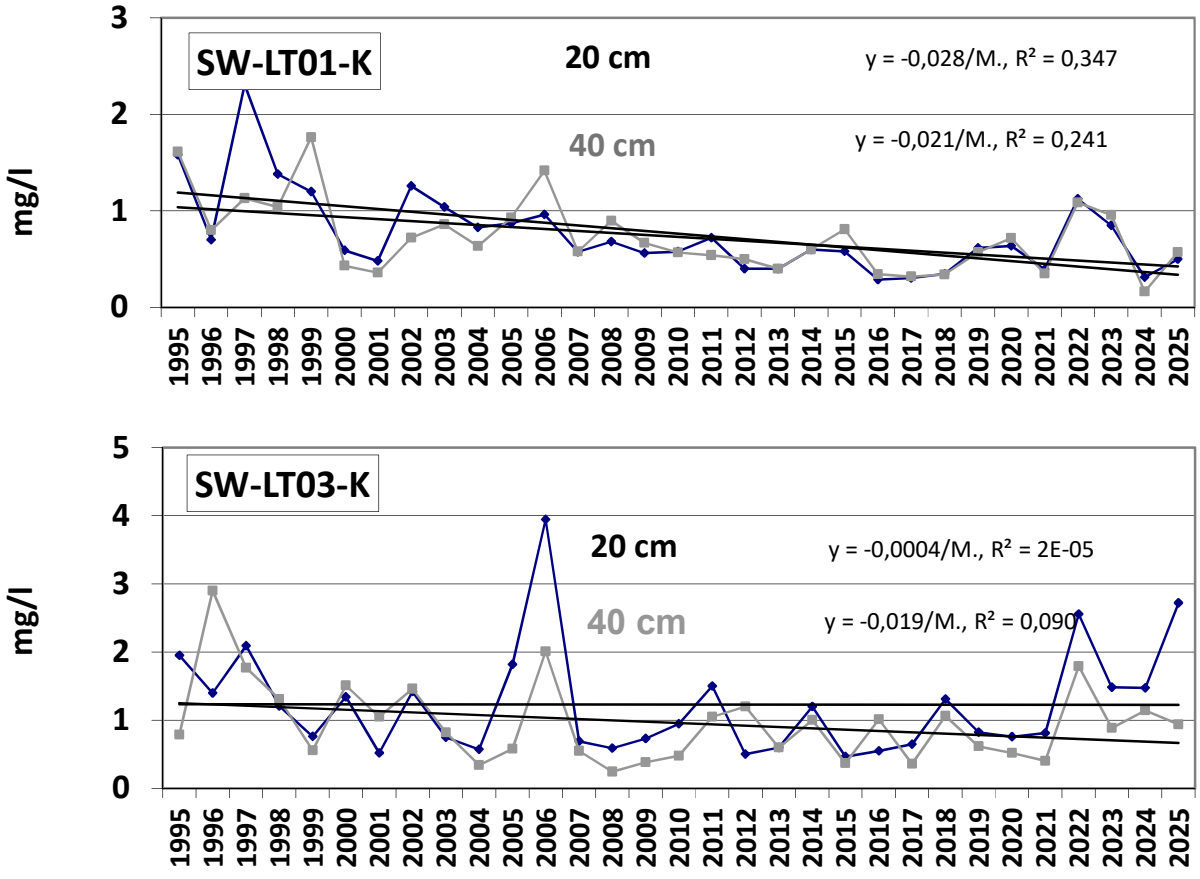
Analogiška tendencija nustatyta ir Mg kaitoje. KM stočių abiejuose gyliuose Mg koncentracijos dirvožemio vandenyje turėjo aiškią tendenciją mažėti. Tiriamuoju laikotarpiu Aukštaitijos KMS dirvožemio vandenyje Mg koncentracijos mažėja po -0,032 ir -0,039 mg/l per m. atitinkamai 20 ir 40 cm gyliuose, o Žemaitijos KMS vandenyje po 0,055 ir 0,015 mg/l atitinkamai. Paskutiniaisiais 2024-2025 m. abiejose stotyse registruojami vienos mažiausių koncentracijų per visą tiriamąjį laikotarpį: Aukštaitijos KMS – 0,8 mgMg/l, o Žemaitijos KMS – 0,2-0,3 mgMg/l. esminių skirtumų tarp Mg koncentracijų skirtinuose dirvožemio gyliuose nenustatyta, gal tik Aukštaitijos KMS 40 cm gylyje Mg koncentracija buvo 0,5 mgMg/l didesnės nei 20 cm gylyje.



7.2 pav. Dirvožemio vandens savybių kitimas, Mg (7 iš 18).

K koncentracijos taip pat mažėjo dirvožemio vandenyje. Aukštaitijos KMS K mažėjo po 0,028 ir 0,021 mg/l per m., atitinkamai 20 ir 40 cm gylyje. Išskirtiniai K koncentracijų rezultatai Aukštaitijos KMS. Šio elemento kiekiai 2016-2018 m. laikotarpiu sumažėjo iki minimaliausių reikšmių per visą tiriamąjį laikotarpį, t.y. iki 0,3 mgK/l. Toks šio elemento koncentracijų mažėjimas dirvožemio vandenyje gerai siejasi ir su jo koncentracijų mažėjimu lapijoje. 2019 – 2022 m. Aukštaitijos KMS užregistruotas K koncentracijų padidėjimo procesas ir 20, ir 40 cm gylio dirvožemio vandenyse ir tik paskutiniuoju laikotarpiu, t.y. 2022-2025 m. registruojamas vėl ženklus sumažėjimas, kai 2024 m. pasiekė patį mažiausią lygį per visą tiriamąjį laikotarpį, t.y. vos 0,2 mgK/l.

Žemaitijos KMS nustatytas K koncentracijų mažėjimo trendas abieuose gyliuose po -0,0004 ir -0,019 mgK/l per m. tačiau ir šiose stotyje ši kaita nebuvo vienareikšmė. Mažėjimo tendencija ryškiausiai tęsėsi tik iki 2021 m. paskutiniuoju 2022-2025 m. laikotarpiu kai Aukštaitijos KMS dirvožemio vandenyje K koncentracijos mažėjo, Žemaitijos KMS buvo registruota reikšmingas šio element koncentracijų augimas abiejuose gyliuose: 20 cm gylyje koncentracijos išaugo nuo 0,8 iki 2,7 mgK/l, o 40 cm gylyje nuo 0,4 iki 1,2 mgK/l.



7.2 pav. Dirvožemio vandens savybių kitimas, kalis (8 iš 18).

Kalcio (Ca^{2+}), magnio (Mg^{2+}) ir kalio (K^{+}) koncentracijų ilgalaikė kaita dirvožemio vandenyje atspindi vienus svarbiausių miško ekosistemų biogeocheminių procesų – bazinių katijonų balansą, dirvožemio buferinės gebos pokyčius bei augalams prieinamų maisto medžiagų dinamiką. Šių elementų koncentracijas dirvožemio tirpale lemia atmosferinės iškritos, mineralų dūlėjimas, katijonų mainai dirvožemyje, medžių šaknų pasisavinimas ir vandens filtracija. Todėl jų ilgalaikė stebėsena laikoma vienu svarbiausių rodiklių vertinant miško ekosistemų cheminį atsparumą ir atsikūrimą po ilgalaikės rūgštinančios taršos (Johnson et al., 2018; Wellbrock et al., 2024).

Aukštaitijos KMS kalcio koncentracijos iki maždaug 2013 m. nuosekliai mažėjo, o vėliau stabilizavosi ir paskutiniaisiais metais net šiek tiek padidėjo. Mažiausios Ca^{2+} koncentracijos buvo užregistruotos apie 2020–2021 m., kai jos sumažėjo iki maždaug 3,4 mg l^{-1}. Šis laikotarpis sutapo su sumažėjusiomis kalcio koncentracijomis medžių lapijoje ir nuokritose, rodančiomis, kad kalcio balanso pokyčiai vyko ne tik dirvožemio tirpale, bet ir visoje ekosistemoje. Tuo tarpu Žemaitijos KMS ilgalaikė kalcio koncentracijų mažėjimo tendencija buvo dar ryškesnė – paskutiniaisiais stebėjimų metais koncentracijos sumažėjo iki maždaug 0,3 mg l^{-1}, t. y. mažiausių reikšmių per visą tyrimų laikotarpį. Tokios mažos koncentracijos rodo, kad bazinių katijonų atsargos šiame baseine gali būti labiau išsekusios negu Aukštaitijos KMS.

Panašūs dėsningumai nustatyti ir Mg koncentracijų kaitoje. Abiejose KM stotyse Mg^{2+} koncentracijos ilgainiui mažėjo, o 2024–2025 m. pasiekė žemiausias reikšmes per visą stebėjimų laikotarpį. Kadangi magnis yra vienas svarbiausių chlorofilo molekulės elementų ir aktyviai dalyvauja fotosintezėje, jo ilgalaikis mažėjimas gali turėti neigiamos įtakos medžių fiziologinei būklei, ypač klimato kaitos sąlygomis dažnėjant sausroms ir aukštos temperatūros periodams.

Kalio koncentracijų dinamika buvo sudėtingesnė. Aukštaitijos KMS nustatyta bendra mažėjimo tendencija, kurią nutraukė trumpalaikis koncentracijų padidėjimas 2019–2022 m., o po jo sekė naujas ryškus sumažėjimas iki mažiausių koncentracijų per visą stebėjimų laikotarpį. Tuo tarpu Žemaitijos KMS po ilgalaikio mažėjimo paskutiniaisiais metais nustatytas reikšmingas kalio koncentracijų padidėjimas. Kadangi kalis dirvožemyje yra vienas judriausių augalų maisto elementų, jo koncentracijų svyravimai dažnai atspindi ne tik dirvožemio geocheminius procesus, bet ir medžių šaknų aktyvumą, organinės medžiagos mineralizaciją bei hidrologinio režimo pokyčius. Todėl skirtinga kalio dinamika abiejose stotyse tikėtina susijusi su skirtingomis dirvožemio savybėmis ir vandens režimu.

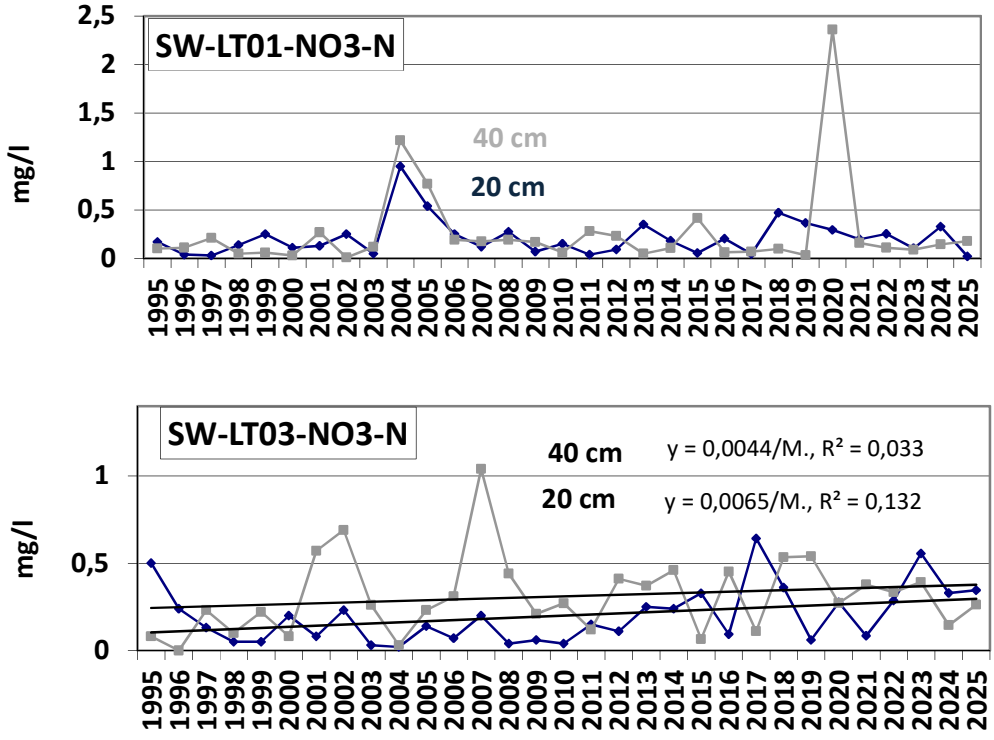
Tokiu būdu, ryškėja bendras dėsningumas – ilgalaikis katijonų koncentracijų mažėjimas sutampa su anksčiau nustatytais dirvožemio vandens rūgštėjimo, specifinio elektrinio laidumo mažėjimo ir intensyvėjančios vandens filtracijos procesais. Tai leidžia daryti prielaidą, kad klimato kaitos sąlygomis didėjantis vandens judėjimas dirvožemio profilyje spartina bazinių katijonų išplovimą iš aktyviosios šaknų zonos. Kita vertus, sumažėjusios sieros iškritos ir lėtėjantis dirvožemio rūgštėjimas turėtų mažinti šių elementų išplovimą. Todėl nustatyta bazinių katijonų dinamika greičiausiai atspindi dviejų vienu metu vykstančių procesų sąveiką – ilgalaikį ekosistemų cheminį atsikūrimą po rūgštinančios taršos ir vis stiprėjantį klimato kaitos poveikį hidrologiniam režimui.

Bazinių katijonų mažėjimas yra taip pat vienas svarbiausių signalų, rodančių galimą dirvožemio derlingumo mažėjimą. Kalcis ir magnis palaiko dirvožemio buferinę gebą, reguliuoja šaknų membranų funkcijas, fermentų aktyvumą ir medžių mineralinę mitybą, o kalis yra pagrindinis elementas, reguliuojantis osmosinius procesus, žiotelių veiklą ir augalų atsparumą sausrai. Todėl ilgalaikis šių elementų koncentracijų mažėjimas gali paveikti ne tik medžių augimą ir produktyvumą, bet ir dirvožemio mikroorganizmų bei kitų pedobiontų aktyvumą, organinės medžiagos skaidymąsi ir bendrą miško ekosistemų atsparumą. Naujausi Europos tyrimai rodo, kad daugelyje rūgščių miško dirvožemių bazinių katijonų atsikūrimas vyksta gerokai lėčiau negu mažėja sieros iškritos, todėl bazinių katijonų balansas ir toliau išlieka vienu jautriausių ilgalaikio ekosistemų atsparumo rodiklių (Johnson et al., 2018; de Vries et al., 2023; Wellbrock et al., 2024).

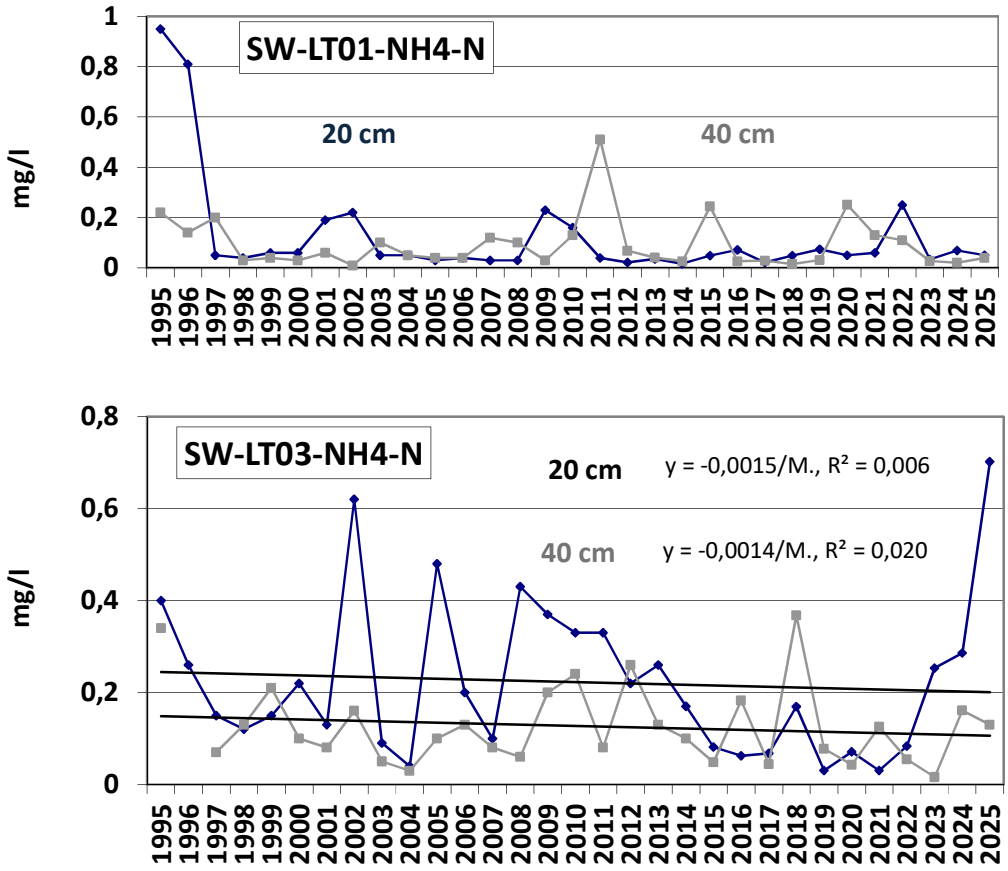
Apibendrinant galima teigti, kad bazinių katijonų koncentracijų dinamika patvirtina, jog Lietuvos hemiborealiniuose miškuose ilgalaikis atmosferinės taršos mažėjimo sukeltas cheminis atsikūrimas vyksta kartu su naujais klimato kaitos nulemtais hidrologinio režimo pokyčiais. Šių dviejų procesų sąveika tampa vienu svarbiausių veiksnių, reguliuojančių medžių mitybą, dirvožemio derlingumą ir ilgalaikį miško ekosistemų stabilumą.

Šiuolaikinėje miško ekologijoje nitratų koncentracijų didėjimas dirvožemio tirpale laikomas vienu jautriausių azoto ciklo pokyčių indikatorių. Jis dažniausiai siejamas su intensyvėjančia organinės medžiagos mineralizacija, aktyvesne nitrifikacija, mažėjančiu augalų azoto pasisavinimu arba hidrologinio režimo pokyčiais (Aber et al., 1989; Gundersen et al., 2006; Dise et al., 2009; Butterbach-Bahl et al., 2011; De Vries et al., 2014; Fleischer et al., 2021).

Nitratų ir amonio koncentracijų kaitoje Aukštaitijos KMS dirvožemio vandenyje aiškesnės tendencijos nustatyti nepavyko, išskyrus nepaaiškinamus nitratų koncentracijų šuolius 2008 2004-2005 ir 2020 m., kas galėtų būti aiškinama trumpalaike vandens tarša organinėmis atliekomis. Amonio koncentracijų kaitoje tokie šuoliai buvo registruojami 2009 ir 2011 bei 2020 ir 2022.



7.2 pav. Dirvožemio vandens savybių kitimas, nitratinis azotas (10 iš 18).

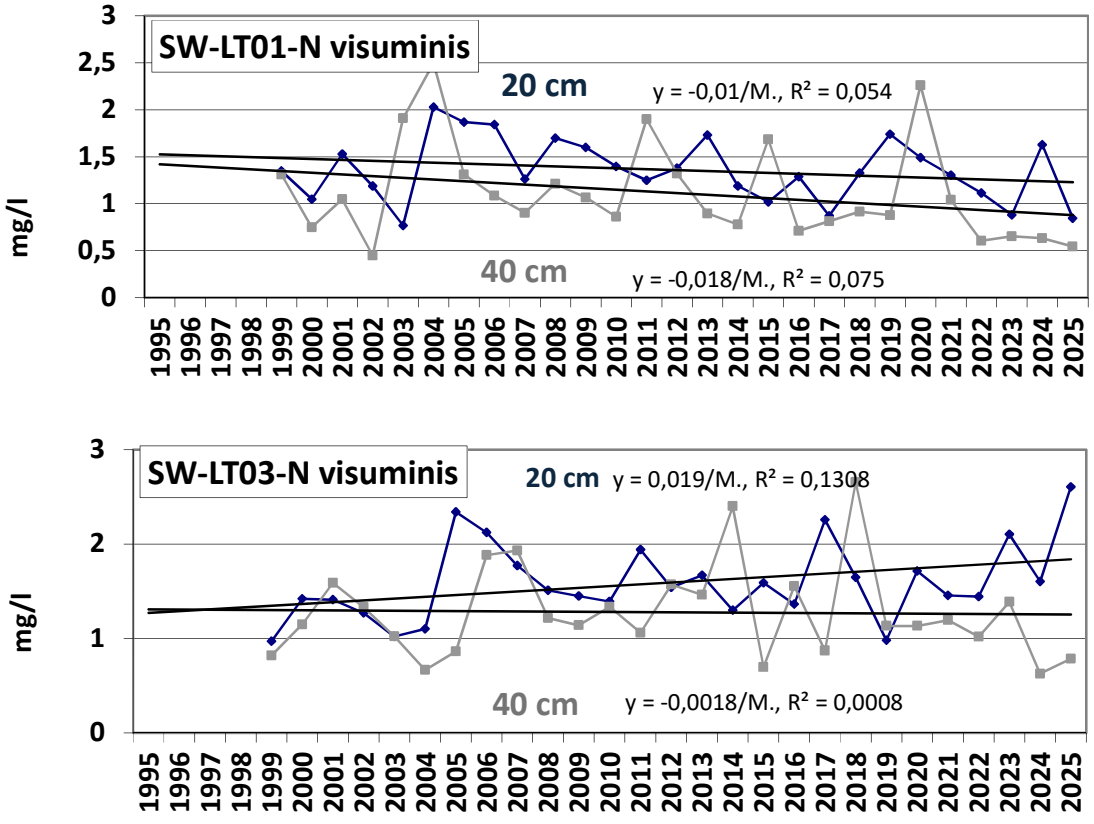


7.2 pav. Dirvožemio vandens savybių kitimas, amonio azotas(11 iš 18).

Žemaitijos KMS nitratų koncentracijos turi tendenciją didėti po 0,006 ir 0,004 mg/l per m. 20 ir 40 cm gylyje atitinkamai, kai tuo tarpu amonio kaitoje aiškesnės tendencijos, kaip ir Aukštaitijos KMS nustatyti nepavyko. Išsiskiria tik paskutinieji 2023-2025 metai, kai amonio koncentracijos 20 cm gylio vandenyje reikšmingai pakilo.

Amonio koncentracijos Aukštaitijos KMS vandenyse išlieka stabilios praktiškai per visą tiriamąjį laikotarpį su vienetiniais koncentracijų padidėjimo atvejais 2009, 2011, 2020 ir 2022 m. Tačiau Žemaitijos KMS registruojama šio elemento mažėjimo tendencija abiejuose gyliuose, maždaug po 0,0015 mg/l per m. Išskirtinis paskutinysis 3 m laikotarpis, kai amonio koncentracijos 20 cm gylyje šoktelėjo iki maksimalių reikšmių per visą tiriamąjį laikotarpį.

Visuminio azoto koncentracijų dirvožemio vandenyje rezultatai rodo skirtingas daugiametes tendencijas. Aukštaitijos KMS dirvožemio vandenyje šios komponentės koncentracijos dirvožemio vandenyje palaipsniui mažėja po -0,01 ir -0,02 mg/l per m. 20 ir 40 cm gylyje atitinkamai. Žemaitijos KMS baseino dirvožemio vandenyje nustatyta priešinga tendencija: bendro N koncentracijos išlieka stabilios (40 cm gylyje) ar didėja (20 cm gylyje) po 0,02 mg/l per m. Azoto junginių koncentracijos padidėjimą Žemaitijos IMS dirvožemyje galėjo lemti dirvožemio drėgmės sumažėjimas.



7.2 pav. Dirvožemio vandens savybių kitimas, visuminis N (12 iš 18).

Padidėjus dirvožemio aeracijai organinių medžiagų skaidymasis paspartėjo, todėl azoto junginiai linkę oksiduotis, kas paspartino mineralinių ir organinių azoto junginių oksidacinius procesus. Aukštaitijos KMS šis efektas nepasireiškė dėl mažo organinės medžiagos kiekio.

Tyrimų rezultatai parodė, kad Azoto junginių koncentracijų dinamika dirvožemio vandenyje yra vienas jautriausių miško ekosistemų azoto ciklo funkcionavimo indikatorių, atspindintis organinės medžiagos mineralizacijos, nitrifikacijos, augalų azoto pasisavinimo bei hidrologinių procesų tarpusavio sąveiką. Skirtingai nei bazinių katijonų ar sulfatų koncentracijos, nitratų (NO_3^-) ir amonio (NH_4^+) kiekiai dirvožemio tirpale pasižymi didele sezonine ir daugiamete variacija, todėl jų pokyčius dažniausiai lemia ne vien atmosferinė azoto apkrova, bet ir dirvožemio temperatūra, drėgmė, aeracija, mikroorganizmų aktyvumas bei medžių fiziologinė būklė (Aber et al., 1989; Gundersen et al., 2006; Dise et al., 2009; De Vries et al., 2014; Lovett & Goodale, 2011).

Aukštaitijos KMS dirvožemio vandenyje aiškių ilgalaikių nitratų ir amonio koncentracijų kitimo tendencijų nenustatyta. Registruoti pavieniai nitratų (2004–2005, 2008 ir 2020 m.) bei amonio (2009, 2011, 2020 ir 2022 m.) koncentracijų padidėjimai greičiausiai atspindi trumpalaikius azoto ciklo suaktyvėjimo epizodus, susijusius su organinės medžiagos mineralizacijos, nitrifikacijos ar hidrologinio režimo pokyčiais, o ne nuolatinį azoto apkrovos didėjimą. Panašūs trumpalaikiai neorganinio azoto koncentracijų šuoliai aprašyti ir ilgalaikiuose borealinių bei vidutinių platumų miškų tyrimuose, kuriuose jie siejami su sausrų ir pakartotinio dirvožemio sudrėkinimo ciklais, šiltomis žiemomis, padidėjusia organinės medžiagos mineralizacija arba laikinu medžių azoto pasisavinimo sumažėjimu.

Žemaitijos KMS nustatyta kitokia azoto junginių dinamika. Nitratų koncentracijos turėjo silpną, tačiau nuoseklią didėjimo tendenciją, o bendrojo azoto koncentracijos viršutiniame dirvožemio sluoksnyje taip pat didėjo. Tuo tarpu amonio koncentracijos ilgalaikėje perspektyvoje mažėjo, nors 2023–2025 m. viršutiniame dirvožemio sluoksnyje buvo registruotas ryškus jų padidėjimas. Tokia dinamika leidžia manyti, kad šiame baseine pastaraisiais dešimtmečiais suaktyvėjo organinės medžiagos mineralizacijos ir nitrifikacijos procesai. Naujausios pasaulinės miško dirvožemių metaanalizės rodo, kad klimato sąlygos, ypač dirvožemio drėgmė ir temperatūra, yra vieni svarbiausių nitratų susidarymą reguliuojančių veiksnių, o didėjanti aeracija ir intensyvesnė organinės medžiagos sklaida skatina nitrifikaciją bei nitratų kaupimąsi dirvožemio tirpale.

Šio tyrimo rezultatai gerai dera su anksčiau nustatytais hidrologinio režimo pokyčiais. Žemaitijos KMS laikotarpiais, kai dirvožemis buvo sausesnis ir geriau aeruojamas, buvo registruojamas didesnis nitratų ir bendrojo azoto kiekis dirvožemio vandenyje. Toks dėsningumas

atitinka dabartinį supratimą, kad geresnė dirvožemio aeracija spartina organinės medžiagos mineralizaciją bei nitrifikaciją, todėl didėja nitratų koncentracijos ir jų migracijos galimybės dirvožemio profilyje. Tuo tarpu Aukštaitijos KMS, kur dirvožemio vandens atsargos pastaraisiais metais reikšmingai padidėjo, bendrojo azoto koncentracijos palaipsniui mažėjo, o tai rodo pastovesnį azoto ciklą ir efektyvesnį azoto sulaikymą ekosistemoje. Panašūs procesai nustatyti ir borealiniuose miškuose, kuriuose ilgalaikiai eksperimentai parodė, kad net padidėjusi azoto apkrova ne visuomet lemia didesnį nitratų išplovimą, nes azotas efektyviai įjungiamas į biologinį ciklą.

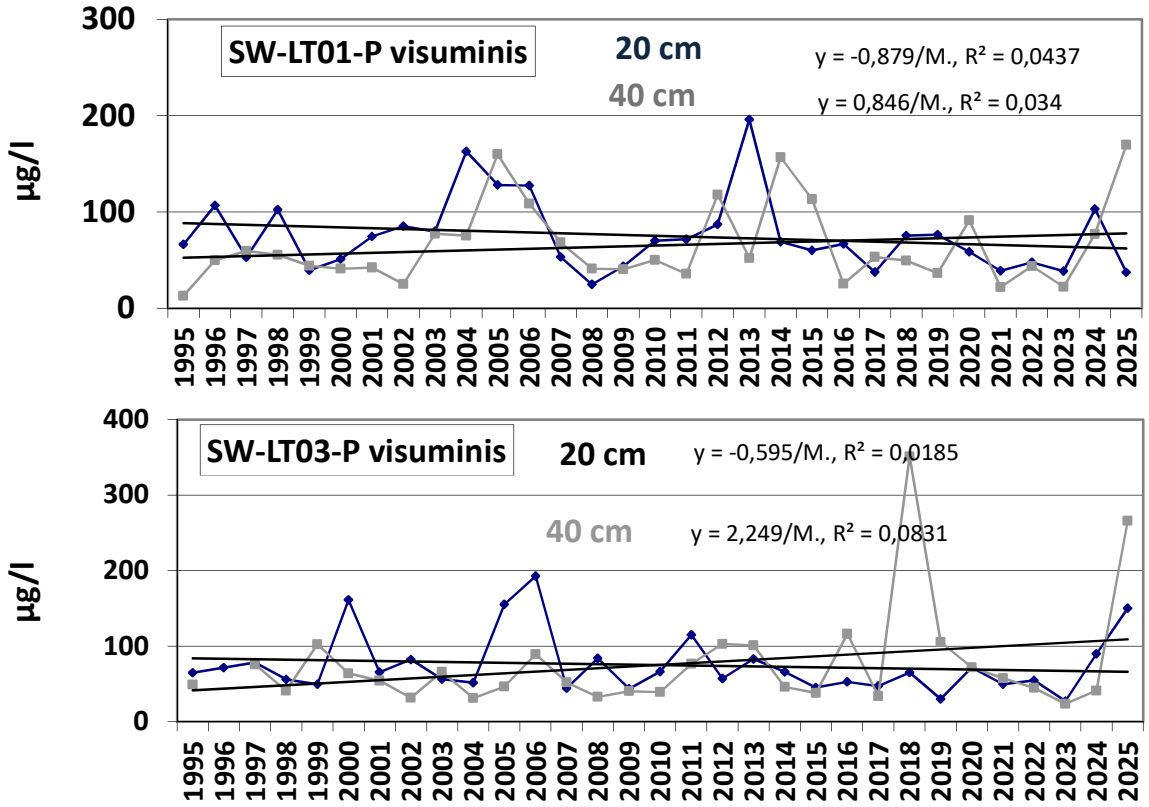
Tokiu būdu azoto junginių pokyčiai yra svarbūs todėl, kad nitratų koncentracijų didėjimas paprastai laikomas vienu ankstyviausių azoto ciklo pokyčių požymių. Ilgalaikis nitratų koncentracijų augimas gali rodyti silpnėjančią ekosistemos gebą sulaikyti azotą, didesnę nitratų išplovimo riziką, dirvožemio rūgštėjimo intensyvėjimą bei bazinių katijonų netekimą. Tuo tarpu stabilios arba mažėjančios bendrojo azoto koncentracijos dažniausiai rodo, kad miško ekosistema išlaiko aukštą biologinio azoto panaudojimo efektyvumą ir išlieka azotą konservuojanti sistema (Aber et al., 1989; Dise et al., 2009; De Vries et al., 2014).

Apibendrinant galima teigti, kad Aukštaitijos KMS azoto ciklas išlieka santykinai stabilus ir konservatyvus, o bendrojo azoto koncentracijų mažėjimas rodo efektyvų azoto panaudojimą ekosistemoje. Tuo tarpu Žemaitijos KMS nustatytas nitratų ir bendrojo azoto koncentracijų didėjimas leidžia manyti, kad šiame baseine klimato kaitos sąlygomis pradeda stiprėti azoto mineralizacijos ir nitrifikacijos procesai. Ar šie pokyčiai yra trumpalaikė hidrologinio režimo pasekmė, ar ilgalaikio azoto ciklo transformacijos pradžia, galės parodyti tik tolesni kompleksinio monitoringo tyrimai.

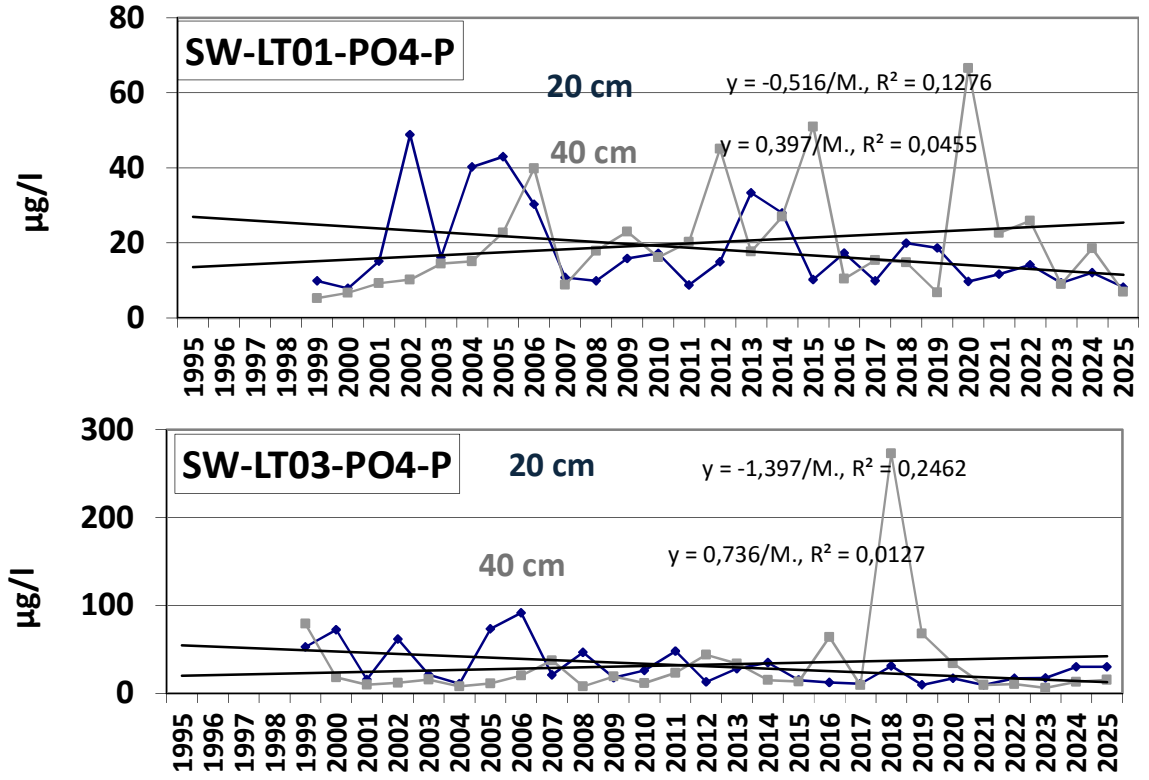
.

Fosforas yra mažiausiai judrus pagrindinis augalų mitybos elementas. Dauguma fosfatų dirvožemyje yra sorbuojami geležies ir aliuminio oksidų, molio mineralų arba įjungiami į organinę medžiagą, todėl jų koncentracijos dirvožemio tirpale paprastai yra labai mažos ir jautriai reaguoja į biologinius procesus bei redokso sąlygų pokyčius, o ne į atmosferines iškritas (Vitousek et al., 2010; Hou et al., 2021; Augusto et al., 2017).

P koncentracijos 2016-2023 m. Aukštaitijos KMS dirvožemio vandenyje buvo ties mažiausiomis koncentracijomis, o 2024 m. pakilo iki 2004-2006 ir 2013 metų lygio, o 2025 metais, 40 cm gylyje pakilo iki didžiausios reikšmės per visą stebėjimų laikotarpį. tuo tarpu Žemaitijos KMS 2025 metais visuminio fosforo koncentracija dirvožemio vandenyje buvo antra didžiausia (2018 m. buvo maksimali). Augant kritulių kiekiui P koncentracija dirvožemio vandenyje mažėja, bet dėl gausių kritulių ir staigių drėgmės atsargų pokyčių visuminio fosforo padaugėja 40 cm gylyje.



7.2 pav. Dirvožemio vandens savybių kitimas, visuminis fosforas (13 iš 18).



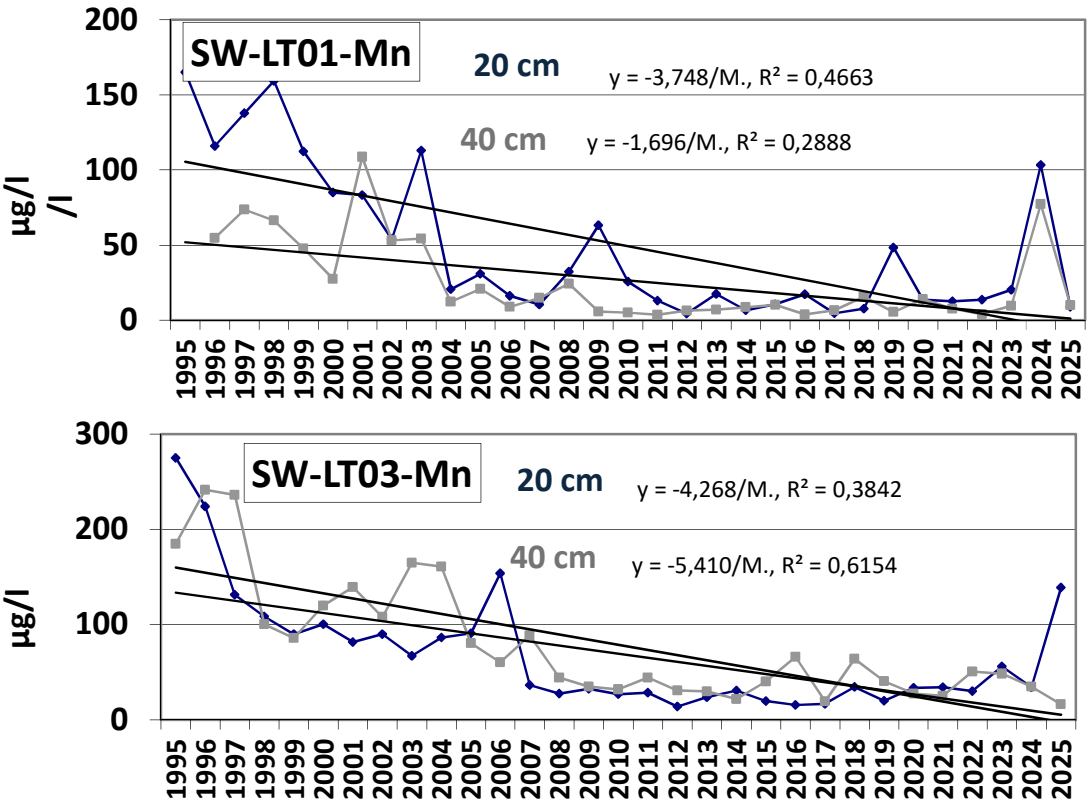
7.2 pav. Dirvožemio vandens savybių kitimas, fosfatai (14 iš 18).

Daugiamečiai (31 m.) tyrimų rezultatai parodė, kad fosfatų, kaip ir visuminio P koncentracijų dirvožemio vandenyje kaitoje tiek Aukštaitijos, tiek ir Žemaitijos KMS baseine nustatytos nevienareikšmės tendencijos. Abiejų stočių baseinuose fosfatų ir visuminio P mažėja 20 cm gylio dirvožemio vandenyje, o didėja 40 cm gylyje.

Viršutinėje dirvožemio dalyje yra didžiausia smulkiųjų šaknų ir mikorizės koncentracija. Dėl to augalai ir mikoriziniai grybai labai efektyviai surenka fosforą iš dirvožemio tirpalo. Naujausi darbai rodo, kad klimato šiltėjant fosforo biologinis ciklas gali dar labiau intensyvėti, todėl fosfatų koncentracijos dirvožemio tirpale mažėja, nors bendras fosforo kiekis ekosistemoje nesikeičia (Augusto et al., 2017; Hou et al., 2021). Tai labai gerai atitinka Jūsų 20 cm sluoksnio rezultatus.

40 cm gylyje biologinis fosforo sunaudojimas jau gerokai mažesnis. Rezultatai parodė, kad po 2018 m. padidėjo dirvožemio vandens atsargos ir sustiprėjo infiltracija. Todėl dalis fosforo tampa mobilesnė ir migruoja į gilesnius sluoksnius, dėl ko palaipsniu augatiek visuminio, tiek ir fosfatų koncentracijos didesniame dirvožemio vandens lygyje.

Abiejose kompleksinio monitoringo stotyse nustatytas fosfatų ir bendrojo fosforo koncentracijų mažėjimas 20 cm gylyje bei didėjimas 40 cm gylyje rodo, kad ilgalaikėje perspektyvoje keičiasi fosforo pasiskirstymas dirvožemio profilyje. Tikėtina, kad viršutiniame dirvožemio sluoksnyje dėl intensyvaus šaknų ir mikorizės aktyvumo bei efektyvios biologinės fosforo recirkuliacijos tirpaus fosforo koncentracijos mažėja, tuo tarpu didėjanti vandens filtracija ir organinės medžiagos mineralizacija skatina didesnį fosforo judrumą gilesniuose dirvožemio horizontuose. Kadangi analogiškos tendencijos nustatytos tiek Aukštaitijos, tiek Žemaitijos KMS, tikėtina, kad jos atspindi ne lokalius, bet bendrus klimato kaitos ir dirvožemio biogeocheminių procesų nulemtus pokyčius hemiborealinių miškų ekosistemose.



7.2 pav. Dirvožemio vandens savybių kitimas, manganas (15 iš 18).

Mangano (Mn) koncentracijų dinamika dirvožemio vandenyje laikoma vienu jautriausių dirvožemio rūgštingumo, redokso sąlygų ir mineralinių medžiagų judrumo indikatorių. Skirtingai nuo bazinių katijonų, mangano tirpumas labai priklauso nuo dirvožemio oksidacijos–redukcijos sąlygų, pH ir organinės medžiagos skaidymosi intensyvumo. Todėl Mn koncentracijų pokyčiai dažnai naudojami vertinant ilgalaikius dirvožemio biogeocheminių procesų pokyčius bei miško ekosistemų cheminį atsikūrimą (Kabata-Pendias, 2011; Alloway, 2013; Augusto et al., 2017).

Šio tyrimo rezultatai parodė aiškią ir vienakryptę mangano koncentracijų mažėjimo tendenciją abiejų kompleksinio monitoringo stočių dirvožemio vandenyje. Aukštaitijos KMS mangano koncentracijos mažėjo vidutiniškai po 1,7–3,7 µg l^{-1} per metus, o Žemaitijos KMS dar intensyviau – po 4,3–5,4 µg l^{-1} per metus. Kadangi analogiškos tendencijos nustatytos abiejose geografiškai skirtingose monitoringo stotyse, tikėtina, kad jos atspindi bendrus ilgalaikius miško dirvožemių biogeocheminius procesus, o ne lokalių aplinkos veiksnių poveikį.

Mažėjant rūgštinančių junginių apkrovai, mangano judrumas dirvožemio tirpale dažniausiai mažėja, nes didesnė jo dalis pereina į mažiau tirpias oksidų ir hidroksidų formas arba yra adsorbuojama dirvožemio koloidų paviršiuje (Augusto et al., 2017; Bolan et al., 2023). Šią tendenciją paaiškina ilgalaikis sulfatų mažėjimas ir laipsniškas dirvožemių atsikūrimas.

Trumpalaikiai mangano koncentracijų padidėjimai sausaisiais metais greičiausiai susiję su sumažėjusiu vandens filtracijos intensyvumu ir ilgesniu dirvožemio tirpalo kontaktu su mineraline dirvožemio dalimi. Tokios trumpalaikės reakcijos aprašytos ir kituose borealinių bei vidutinių platumų miškų tyrimuose, kuriuose sausros keičia dirvožemio redokso režimą, mikrobiologinį aktyvumą ir mikroelementų tirpumą. Tačiau šie pokyčiai buvo trumpalaikiai ir nepakeitė bendros ilgalaikės mangano koncentracijų mažėjimo krypties.

Nustatyta mangano koncentracijų mažėjimo tendencija gali būti vertinama kaip teigiamas miško ekosistemų cheminės būklės požymis. Esant rūgštiems dirvožemiams Mn^{2+} tampa labai judrus ir didelėmis koncentracijomis gali būti fitotoksiškas, trikdyti kalcio, magnio ir geležies pasisavinimą bei neigiamai veikti šaknų augimą ir dirvožemio mikroorganizmų aktyvumą. Todėl mažėjantis mangano judrumas gali rodyti didėjančią dirvožemio cheminę pusiausvyrą ir palankesnes sąlygas augalų bei dirvožemio biotos funkcionavimui. Vis dėlto manganas yra būtinas mikroelementas, dalyvaujantis fotosintezėje, fermentų aktyvinime ir antioksidacinėse sistemose, todėl ilgalaikė jo stebėsena išlieka svarbi vertinant miško ekosistemų mitybos balansą ir jų atsparumą klimato kaitai.

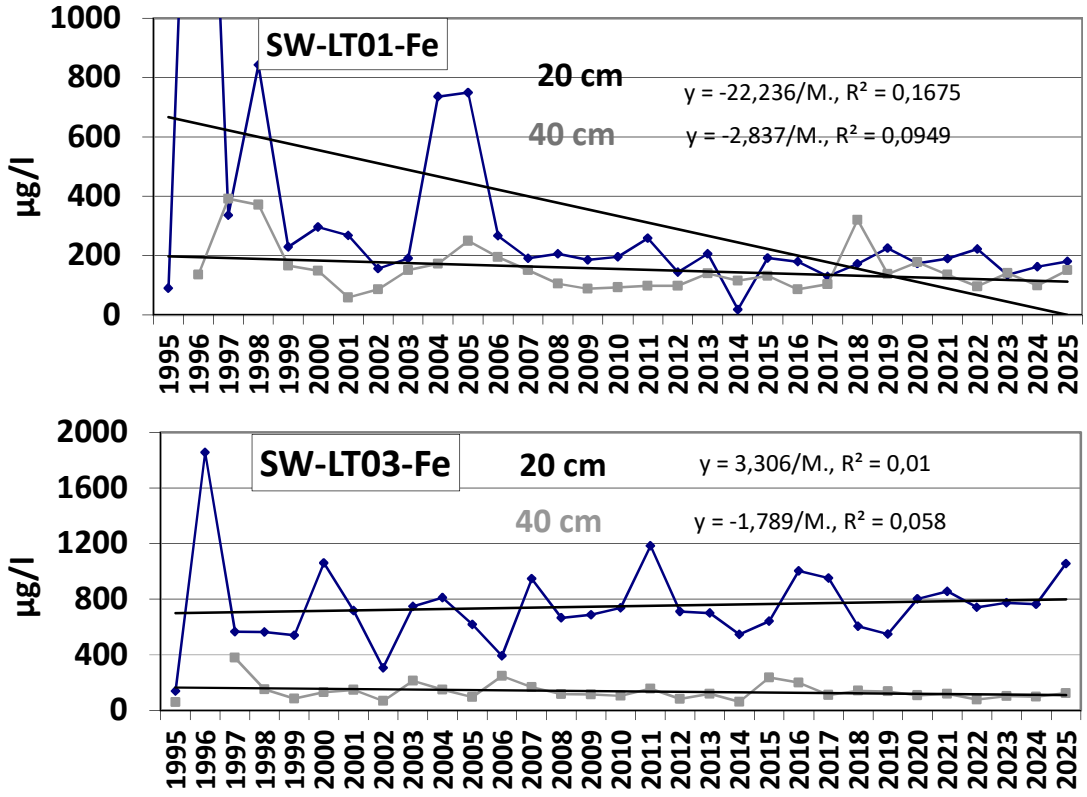
Fe koncentracija Aukštaitijos KMS baseino dirvožemio vandenyje 20 cm gylyje reikšmingai sumažėjo po 2006 m. ir iki 2025 turėjo labai menka tendenciją toliau mažėti. 40 cm gylyje, tokio drastiško sumažėjimo nenustatyta, nors per visą tiriamąjį laikotarpį Fe koncentracija dirvožemio vandenyje mažėjo po -2,84 µg/ l per m.

Žemaitijos KMS baseine Fe koncentracijų kaitoje ryškesnių pokyčių neįvyko. Per visą tiriamąjį laikotarpį Fe koncenentracijos 20 cm gylyje palaipsniui augo po 3,31 µg/ l per m., o 40 cm gylyje mažėjo, kaip ir Aukštaitijos KMS, po -1,79 µg/ l per m.

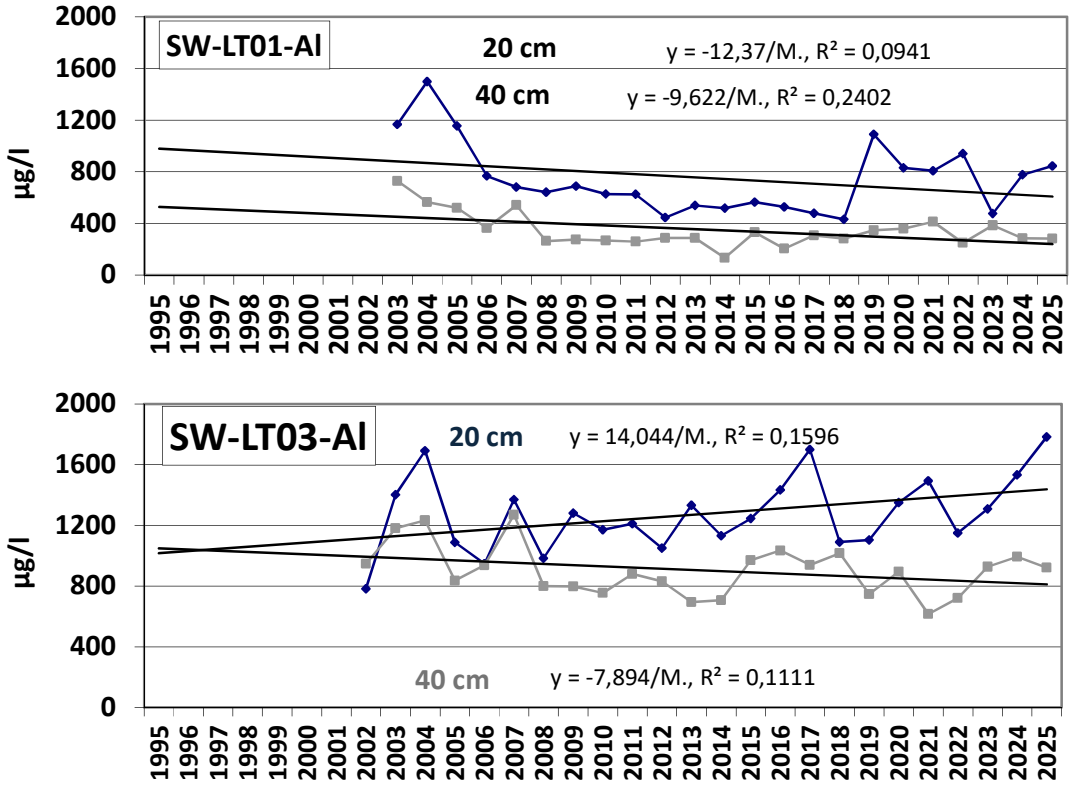
Mažesnio gylio dirvožemio vandenyje Fe koncentracijos Žemaitijos KMS iki 4 kartų vyršijo Fe koncentracijas Aukštaitijos KMS.

Al kaitoje nustatytos panašios tendencijos. Aukštaitijos KMSabiejuose gyliuose Al koncentracijos mažėjo po -12,4 ir 9,6 µg/ l per m. Žemaitijos KMS mažėjimo tendencija nustatyta tik Al koncentracijoms 40 cm gylyje, t.y. po -7,9 µg/ l per m., kai tuo tarpu 20 cm gylyje Al koncentracija pakankamai reikšmingai didėjo po +14,0 µg/ l per m.

Palyginus tarp stočių, didesnėmis koncentracijomis pasižymėjo Žemaitijos KMS dirvožemio vanduo, didesnės koncentracijos taip pat buvo nustatytos ir seklesniuose dirvožemio vandens slugsojimo gyliuose.



7.2 pav. Dirvožemio vandens savybių kitimas, geležis (16 iš 18).



7.2 pav. Dirvožemio vandens savybių kitimas, aliuminis (17 iš 18).

Fe ir Al kaitoje reikšmingesnių kaitos tendencijų nustatyti nepavyko tai kaip ir reikšmingesnės sausrų įtakos 2018-2019 m. Nepaisant šio fakto Al koncentracija dirvožemio vandenyje Aukštaitijos KMS mažėja po -12 ir -9 µg/l per m. Žemaitijos KMS šio elemento mažėja tik gilesnio sluoksnio dirvožemio vandenyje. Paviršiniame sluoksnyje Al koncentracijos turi tendencija didėti po 14 µg/l per m. Paskutiniaisiais metais, kaip ir 2017 bei 2004 registruotos maksimalios šio elemento koncentracijos, siekiančios 1,7-1,8 mg/l. Aukštaitijos KMS Al koncentracijos 2025 m. siekė 0,8 ir 0,3 mg/l 20 ir 40 cm gylyje atitinkamai.

Geležies (Fe) ir aliuminio (Al) koncentracijų dinamika dirvožemio vandenyje yra vienas svarbiausių dirvožemio rūgštėjimo, redokso procesų ir mineralinių medžiagų judrumo indikatorių. Abiejų elementų tirpumą pirmiausia reguliuoja dirvožemio rūgštingumas, oksidacijos–redukcijos sąlygos, organinės medžiagos kiekis bei vandens režimas. Todėl ilgalaikiai Fe ir Al koncentracijų pokyčiai plačiai naudojami vertinant miško dirvožemių cheminį atsikūrimą po rūgščiųjų atmosferinių iškritų mažėjimo bei klimato kaitos poveikį dirvožemio biogeocheminiams procesams (Cronan & Grigal, 1995; De Vries et al., 2014; Augusto et al., 2017; ICP Forests, 2024).

Aukštaitijos KMS dirvožemio vandenyje nustatytas ryškus geležies koncentracijų sumažėjimas, ypač 20 cm gylyje po 2006 m., rodo mažėjantį geležies judrumą aktyviojoje šaknų zonoje. Gilesniame dirvožemio sluoksnyje geležies koncentracijos taip pat mažėjo, tačiau gerokai lėčiau. Tuo tarpu Žemaitijos KMS viršutiniame dirvožemio sluoksnyje nustatyta silpna geležies koncentracijų didėjimo tendencija, o 40 cm gylyje, kaip ir Aukštaitijos KMS, geležies koncentracijos palaipsniui mažėjo. Be to, viso tyrimo laikotarpiu Žemaitijos KMS viršutinio sluoksnio dirvožemio vandenyje geležies koncentracijos buvo iki keturių kartų didesnės negu Aukštaitijos KMS, kas rodo skirtingas dirvožemio geochemines ir hidrologines sąlygas.

Panašūs dėsningumai nustatyti ir aliuminio koncentracijų kaitoje. Aukštaitijos KMS abiejuose gyliuose registruotas nuoseklus aliuminio koncentracijų mažėjimas, tuo tarpu Žemaitijos KMS aliuminio koncentracijos mažėjo tik 40 cm gylyje, o 20 cm gylyje ilgalaikėje perspektyvoje didėjo. Didesnės Fe ir Al koncentracijos Žemaitijos KMS, ypač viršutiniame dirvožemio sluoksnyje, leidžia manyti, kad šiame baseine geležies ir aliuminio mobilizaciją labiau lemia rūgštesnės dirvožemio sąlygos bei didesnis organinių medžiagų kiekis. Tokia interpretacija gerai dera su šiame darbe nustatytu mažesniu dirvožemio vandens pH ir didesniu rūgštingumu Žemaitijos KMS.

Tarptautiniai tyrimai rodo, kad mažėjant rūgščiųjų atmosferinių iškritų apkrovai daugelyje Europos miškų mažėja tirpaus aliuminio koncentracijos, nes didėjant dirvožemio buferinei gebai mažėja aliuminio mineralų tirpumas. Tuo pačiu metu geležies koncentracijų pokyčiai dažniau siejami

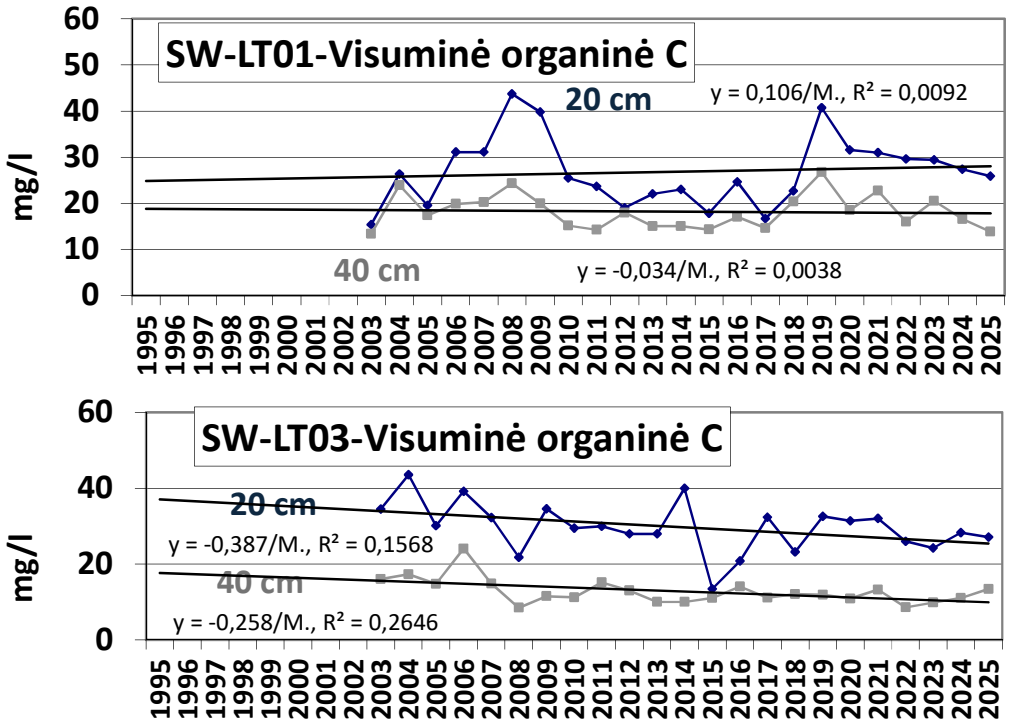
su redokso sąlygų, dirvožemio drėgmės ir organinių kompleksų kaita negu vien su pH pokyčiais (Cronan & Grigal, 1995; De Vries et al., 2014; Augusto et al., 2017). Todėl Aukštaitijos KMS nustatytas ilgalaikis Fe ir Al koncentracijų mažėjimas gali būti vertinamas kaip dirvožemio cheminio atsikūrimo požymis, tuo tarpu Žemaitijos KMS viršutiniame dirvožemio sluoksnyje išliekantis geležies ir aliuminio judrumas rodo, kad dirvožemio geocheminė pusiausvyra šiame baseine dar nėra visiškai stabilizavusis.

Aliuminio koncentracijų pokyčiai yra ypač svarbūs miško ekosistemoms. Esant rūgštiems dirvožemiams tirpus Al^{3+} tampa fitotoksiškas – slopina smulkiųjų šaknų augimą, trikdo kalcio, magnio ir fosforo pasisavinimą, mažina mikorizinių grybų aktyvumą bei gali riboti medžių produktyvumą. Geležis, priešingai, yra būtinas mikroelementas, dalyvaujantis fotosintezėje, kvėpavime ir fermentinėse reakcijose, tačiau jos perteklius taip pat gali trikdyti kitų maisto medžiagų pasisavinimą. Todėl ilgalaikis tirpių Fe ir Al koncentracijų mažėjimas Aukštaitijos KMS gali būti vertinamas kaip palankus miško ekosistemų cheminės būklės pokytis, o didesnės šių elementų koncentracijos Žemaitijos KMS rodo didesnį dirvožemio jautrumą rūgštėjimui ir klimato kaitos nulemiamiems hidrologinio režimo pokyčiams.

Apibendrinant galima teigti, kad geležies ir aliuminio koncentracijų dinamika patvirtina nustatytą bendrą dirvožemių biogeocheminių procesų kryptį. Aukštaitijos KMS ilgalaikis Fe ir Al koncentracijų mažėjimas rodo dirvožemio cheminės būklės stabilizavimąsi ir mažėjantį potencialiai toksiškų metalų judrumą, tuo tarpu Žemaitijos KMS išliekantis didesnis šių elementų judrumas viršutiniame dirvožemio sluoksnyje rodo lėtesnį dirvožemio cheminį atsikūrimą bei didesnę rūgštėjimo procesų įtaką šio baseino ekosistemai.

Dirvožemio vandens trūkumas lėmė, kad Aukštaitijos stoties dirvožemio vandenyje ištirpusios organinės anglies koncentracija 2019 metais padidėjo, bet gausūs krituliai plauna organinę anglį iš 20 ir net 40 cm gylių, dėl ko koncentracija 2020-2025 metais turi tendencija mažėti, bet didesnių koncentracijų lygmenyje, jei lyginant su 2010-2017 m. laikotarpiu. Žemaitijos KMS registruojamas palaipsniui mažėjantis C koncentracijų trendas dirvožemio vandenyje. 20 cm gylyje C mažėja po -0,4 mg/l per m., o 40 cm gylyje po -0,26 mg/l per m. (7.2 pav., 20).

Palyginus ištirpusios organinės anglies koncentracijas tarp stočių, akivaizdžių skirtumų nenustatyta, tik seklesniame dirvožemio vandenyje šio elemento koncentracijos buvo didenės negu gylesniuose sluoksniuose ir ypač Žemaitijos KMS



7.2 pav. Dirvožemio vandens savybių kitimas, visuminė organinė anglis (18 iš 18).

Ištirpusios organinės anglies (DOC) koncentracijų dinamika leidžia geriau paaiškinti geležies ir aliuminio migracijos ypatumus dirvožemio profilyje. Daugelis tyrimų rodo, kad didelė dalis tirpių Fe ir Al junginių miško dirvožemiuose yra susiję su organiniais kompleksais, todėl jų judrumą lemia ne vien dirvožemio rūgštingumas, bet ir ištirpusios organinės anglies kiekis (Tipping et al., 2002; Evans et al., 2008; De Vries et al., 2014). Šio tyrimo rezultatai parodė, kad Aukštaitijos KMS po 2019 m. sausros DOC koncentracijos trumpam padidėjo, tačiau dėl gausių kritulių 2020–2025 m. pradėjo mažėti, tikėtina, intensyvėjant organinės anglies išplovimui iš viršutinių dirvožemio sluoksnių. Tuo tarpu Žemaitijos KMS nustatyta nuosekli DOC koncentracijų mažėjimo tendencija abiejuose gyliuose, nors viršutiniame dirvožemio sluoksnyje DOC koncentracijos išliko didesnės negu gilesniame sluoksnyje. Tokia dinamika gerai paaiškina ir didesnes Fe bei Al koncentracijas Žemaitijos KMS 20 cm gylyje, nes organinių kompleksų susidarymas didina šių metalų tirpumą ir jų migraciją dirvožemio tirpale.

DOC taip pat yra vienas svarbiausių dirvožemio tirpalo komponentų, reguliuojančių ne tik anglies apytaką, bet ir daugelio cheminių elementų judrumą miško ekosistemose. Tyrimai rodo, kad DOC dalyvauja geležies (Fe) ir aliuminio (Al) kompleksų susidaryme, kontroliuoja jų tirpumą, migraciją dirvožemio profilyje ir kartu reguliuoja fosforo (P) sorbcijos bei desorbcijos procesus.

Todėl šiuolaikinėje miško dirvožemių biogeochemijoje DOC laikoma pagrindine grandimi, siejančia klimato kaitos nulemtus hidrologinio režimo pokyčius su maisto medžiagų prieinamumu augalams.

Aukštaitijos KMS po 2019 m. sausros registruotas laikinas DOC koncentracijų padidėjimas, o vėliau – jų mažėjimas dėl intensyvesnio dirvožemio vandens filtracijos proceso. Tuo tarpu Žemaitijos KMS nustatyta nuosekli DOC koncentracijų mažėjimo tendencija, nors viršutiniame (20 cm) dirvožemio sluoksnyje DOC koncentracijos visą laikotarpį išliko didesnės negu 40 cm gylyje. Tokia dinamika rodo, kad organinės anglies migraciją pirmiausia reguliuoja kritulių režimas, dirvožemio drėgmė ir organinės medžiagos skaidymosi intensyvumas, o ne vien organinės anglies atsargos dirvožemyje. Šie rezultatai gerai atitinka Europos miškų tyrimus, kuriuose parodyta, kad DOC koncentracijų kaitą pirmiausia lemia klimato sąlygos, dirvožemio tipas ir vandens režimas.

DOC koncentracijų pokyčiai padeda paaiškinti ir geležies bei aliuminio koncentracijų dinamiką. Didelė tirpios geležies ir aliuminio dalis miško dirvožemiuose egzistuoja ne laisvų jonų pavidalu, o sudaro kompleksus su ištirpusia organine anglimi. Tokie Fe–DOC ir Al–DOC kompleksai didina šių metalų judrumą, ypač rūgščiuose miško dirvožemiuose, ir lemia jų migraciją į gilesnius dirvožemio horizontus. Šio tyrimo rezultatai rodo, kad didesnės DOC koncentracijos viršutiniame Žemaitijos KMS dirvožemio sluoksnyje sutampa su didesnėmis Fe ir Al koncentracijomis, o tai leidžia manyti, kad organinių kompleksų susidarymas yra vienas svarbiausių šių elementų judrumą reguliuojančių mechanizmų.

Ne mažiau svarbi yra DOC sąveika su fosforo ciklu. Naujausi tyrimai rodo, kad fosforo prieinamumą miško dirvožemiuose pirmiausia reguliuoja jo sorbcija ant geležies ir aliuminio oksidų paviršiaus. Tuo pačiu metu DOC konkuruoja su fosfatais dėl tų pačių sorbcijos vietų, todėl organinės anglies koncentracijų pokyčiai gali keisti fosforo judrumą ir migraciją dirvožemio profilyje. Be to, Fe ir Al oksidai sudaro pagrindinį fosforo rezervuarą rūgščiuose miško dirvožemiuose, todėl jų koncentracijų pokyčiai tiesiogiai veikia augalams prieinamo fosforo kiekį.

Ši koncepcija gerai paaiškina nustatytą fosforo pasiskirstymą dirvožemio profilyje. Fosfatų ir bendrojo fosforo koncentracijų mažėjimas 20 cm gylyje bei didėjimas 40 cm gylyje leidžia manyti, kad viršutiniame dirvožemio sluoksnyje fosforas intensyviai įtraukiamas į biologinę apytaką – jį pasisavina smulkiosios šaknys ir mikoriziniai grybai, o dalis fosforo, susijungusi su Fe–DOC ir Al–DOC kompleksais arba silpniau sorbuota prie mineralinės dirvožemio dalies, migruoja į gilesnius horizontus. Tokia fosforo dinamika vis dažniau aprašoma vidutinių platumų miškuose, kuriuose klimato kaitos sąlygomis didėjantis vandens filtracijos intensyvumas keičia fosforo pasiskirstymą dirvožemio profilyje.

Apibendrinant galima teigti, kad Lietuvos kompleksinio monitoringo stočių duomenys rodo glaudžią klimato kaitos, hidrologinio režimo, ištirpusios organinės anglies, geležies, aliuminio ir fosforo ciklų tarpusavio sąveiką. Didėjant dirvožemio vandens filtracijai keičiasi DOC migracija, kuri reguliuoja Fe ir Al kompleksų susidarymą, o pastarieji lemia fosforo sorbciją, judrumą ir prieinamumą augalams. Todėl šių komponentų ilgalaikė stebėsena leidžia vertinti ne tik atskirų cheminių elementų koncentracijų pokyčius, bet ir fundamentalius hemiborealinių miško ekosistemų biogeocheminių ciklų pokyčius klimato kaitos sąlygomis.

7.1.1. Dirvožemio vandens cheminės sudėties ilgalaikių pokyčių apibendrinimas

Daugiau kaip tris dešimtmečius vykdyti dirvožemio vandens tyrimai Aukštaitijos ir Žemaitijos kompleksinio monitoringo stočių baseinuose parodė, kad jo cheminė sudėtis kito ne kaip pavienių, tarpusavyje nesusijusių elementų visuma, bet kaip integruotas miško ekosistemų atsakas į mažėjančias rūgščiąsias atmosferines iškritas, klimato kaitą, dirvožemio vandens režimo persitvarkymą, biologinį elementų pasisavinimą ir vidinių geocheminių ciklų pokyčius. Šiuolaikinėje ICP Forests ir ICP Integrated Monitoring koncepcijoje dirvožemio tirpalas vertinamas būtent kaip jautri grandis, jungianti atmosferines iškritas, dirvožemio sorbcinį kompleksą, mineralų dūlėjimą, šaknų zoną, mikroorganizmų veiklą ir medžiagų migraciją į gilesnius horizontus. Dėl to jo ilgalaikė analizė leidžia pokyčius nustatyti anksčiau, negu jie tampa aiškiai matomi visuminėje dirvožemio sudėtyje, lapijoje ar medynų būklėje (Johnson et al., 2018; Wellbrock et al., 2024; Weldon et al., 2026).

Rūgštingumas, specifinis elektrinis laidumas ir silicio junginiai

Dirvožemio vandens pH kaita atskleidė esminius stočių skirtumus. Aukštaitijos KMS tyrimų pradžioje dirvožemio vanduo buvo rūgštus, vėliau jo reakcija priartėjo prie neutralios, o nuo maždaug 2010–2015 m. iki 2023 m. vėl buvo registruojamas pH mažėjimas. Paskutiniaisiais metais pH nežymiai padidėjo iki maždaug 6,6 20 cm ir 7,0 40 cm gylyje. Žemaitijos KMS nustatyta daug nuoseklesnė ir ekologiniu požiūriu nepalankesnė tendencija: pH sumažėjo iki maždaug 3,7 paviršiniame ir 4,4 gilesniame dirvožemio vandenyje. Tai rodo, kad Žemaitijos KMS šaknų zonoje išlieka stipriai rūgšti terpė, kurioje didėja Al ir Mn tirpumas, mažėja dalies bazinių katijonų prieinamumas, slopinama bakterinė mineralizacija ir keičiasi mikorizinių grybų bei kitų pedobiontų bendrijos. Rūgštėjimo poveikis priklauso ne tik nuo absoliutaus pH, bet ir nuo Ca, Mg, Al, organinių ligandų bei dirvožemio buferinių savybių santykio (Cronan & Grigal, 1995; Johnson et al., 2018; Kunito et al., 2014).

Specifinio elektrinio laidumo mažėjimas Aukštaitijos KMS abiejuose gyliuose rodo mažėjantį bendrą ištirpusių jonų kiekį dirvožemio tirpale. Tai dera su sulfatų, Mg, K, SiO_2 ir dalies metalų koncentracijų mažėjimu bei gali atspindėti tiek mažesnę išorinę jonų apkrovą, tiek intensyvesnį jų išplovimą ir praskiedimą didėjant vandens kiekiui. Žemaitijos KMS 40 cm gylyje taip pat vyravo laidumo mažėjimas, tačiau paviršiniame sluoksnyje po 2010–2013 m. jis didėjo. Kartu su mažėjančiu pH, didėjančiais Al ir Fe kiekiais bei kai kurių azoto ir kalio formų koncentracijomis tai rodo aktyvesnę mineralų, organinių medžiagų ir sorbcinio komplekso sąveiką rūgščioje viršutinio horizonto terpėje. Pats laidumas neatskleidžia jonų kilmės ar ekologinio palankumo, todėl gali būti interpretuojamas tik kartu su atskirų anijonų ir katijonų sudėtimi.

SiO_2 koncentracijos parodė priešingą stočių raidą. Žemaitijos KMS jų didėjimas abiejuose gyliuose gali būti siejamas su silikatinių mineralų dūlėjimu, rūgščios terpės palaikomu mineralų tirpumu ir silicio migracija. Aukštaitijos KMS SiO_2 koncentracijos mažėjo ir 2023–2025 m. pasiekė maždaug 1 mg l^{-1}. Tai gali rodyti silpnesnį tirpaus silicio papildymą iš mineralų ar biogeninių silicio atsargų ir (arba) intensyvesnį jo išnešimą iš aktyviosios šaknų zonos. Silicis augalams nėra visuotinai pripažįstamas būtinu elementu, tačiau dalyvauja dirvožemio–augalų grįžtamuosiuose ryšiuose ir gali stiprinti atsparumą sausrai, temperatūriniam bei biologiniam stresui. Vis dėlto miško medžiams nėra nustatyta universali kritinė dirvožemio tirpalo Si koncentracija, todėl Aukštaitijoje nustatytas sumažėjimas vertintinas kaip potencialus biogeocheminio ciklo pokyčio indikatorius, o ne įrodytas medžių būklės blogėjimo veiksnys (Katz et al., 2021; Wang et al., 2021; Xu et al., 2023).

Chloridai ir natris

Cl^- koncentracijų kaita abiejose stotyse pasižymėjo panašiu dėsningumu: iki maždaug 2010 m. jos mažėjo, o nuo 2010–2013 m. pradėjo didėti. Reikšmingų skirtumų tarp 20 ir 40 cm gylių nenustatyta, todėl koncentracijų dinamiką tikėtina stipriai reguliavo vertikali vandens infiltracija. Maždaug 1 mg l^{-1} didesnis Cl^- lygis Žemaitijos KMS pagrįstai siejamas su stipresne Baltijos jūros aerozolių įtaka vakarų Lietuvai. Tačiau chloridas nėra absoliučiai konservatyvus: jis gali būti laikinai kaupiamas dirvožemyje ir organinėje medžiagoje, patekti į biologinį ciklą ir vėl būti išlaisvinamas. Todėl jo ilgalaikė kaita atspindi atmosferinių iškritų, hidrologijos ir dalies vidinių dirvožemio procesų sąveiką, o ne vien kritulių praskiedimą (Svensson et al., 2012; Kaushal et al., 2023).

Na^+ koncentracijos iki 2023 m. didėjo abiejose stotyse, o 2024–2025 m. staigiai sumažėjo iki mažiausių reikšmių nuo 2006 m. Vienalaikis lūžis geografiškai skirtinguose baseinuose labiau būdingas regioniniam atmosferos ar hidrologinio režimo poveikiui negu vietinei dirvožemio reakcijai. Atsižvelgiant į 2025 m. Aukštaitijoje registruotas rekordines vandens atsargas ir didelę šiltojo laikotarpio kritulių dalį, Na^+ sumažėjimą galėjo lemti praskiedimas ir ankstesniais metais

susikaupusių tirpių jonų išplovimas. Tačiau šią hipotezę reikėtų tikrinti pagal Na^+ srautus atmosferinėse iškritose, polajiniuose krituliuose, gruntiniame ir upelio vandenyje. Na^+ ir Cl^- rezultatai sustiprina bendrą išvadą, kad klimato kaitos sąlygomis vandens kiekio ir tekėjimo kelių pokyčiai tampa svarbiu dirvožemio tirpalo chemijos reguliatoriumi.

Sulfatai ir cheminis atsikūrimas

Ryškiausias teigiamas pokytis buvo ilgalaikis SO_4^{2-} koncentracijų sumažėjimas. Nuo tyrimų pradžioje registruotų daugiau kaip 10 mg l^{-1} jos sumažėjo maždaug 4–5 kartus Aukštaitijos ir iki 10 kartų Žemaitijos KMS. Šis rezultatas tiesiogiai dera su Europos SO_2 emisijų ir sieros iškritų mažėjimu bei ICP Forests tinklo nustatytu sulfatų koncentracijų kritimu dirvožemio tirpale. Mažesnė SO_4^{2-} migracija silpnina elektroneutralumą palaikantį Ca^{2+}, Mg^{2+} ir K^+ išplovimą, mažina Al mobilizaciją ir sudaro prielaidas rūgščių neutralizavimo gebai atsikurti. Vis dėlto Europos tyrimai rodo, kad sulfatų sumažėjimas yra greitesnis negu bazinių katijonų atsargų ir šaknų aplinkos atsikūrimas; daugelyje vietų Bc/Al santykis gerėja lėtai arba beveik nesikeičia (Johnson et al., 2018).

Po 2020 m. stebėti epizodiniai SO_4^{2-} padidėjimai negali būti automatiškai laikomi naujos ilgalaikės taršos pradžia. Juos galėjo lemti atmosferinės sieros iškritų svyravimai, sausros metu susikaupusios redukuotos ar organinės sieros oksidacija, anksčiau sukauptų sulfatų desorbcija ir padidėjęs išplovimas drėgnais metais. Ankstesniuose darbo skyriuose nustatytas laikinas sieros iškritų padidėjimas po karo Ukrainoje pradžios gali būti vienas papildomų veiksnių, tačiau jo indėlis turėtų būti įrodytas trajektorijų, oro masių, iškritų ir dirvožemio vandens srautų analize. Todėl dabartiniai duomenys pagrindžia ilgalaikį cheminį atsikūrimą, kurį pastaruoju laikotarpiu modifikuoja epizodiniai atmosferos ir hidrologijos poveikiai.

Baziniai katijonai: Ca, Mg ir K

Nepaisant labai ryškaus sulfatų sumažėjimo, bazinių katijonų koncentracijos neparodė tokio pat aiškaus atsikūrimo. Ca^{2+} Aukštaitijos KMS iki 2013–2021 m. mažėjo, o paskutiniaisiais metais nežymiai padidėjo. Žemaitijos KMS po laikino padidėjimo 2017–2021 m. koncentracijos vėl sumažėjo iki maždaug 0,3 mg l^{-1}. Mg^{2+} abiejose stotyse nuosekliai mažėjo ir 2024–2025 m. pasiekė vienas mažiausių reikšmių. K^+ taip pat daugiausia mažėjo, tačiau Žemaitijoje 2022–2025 m. paviršiniame sluoksnyje registruotas ryškus padidėjimas. Tokia nevienoda dinamika rodo, kad šiuos jonus reguliuoja skirtingi procesai: mineralų dūlėjimas, katijonų mainai, ankstesnio rūgštėjimo palikimas, biologinis pasisavinimas, paklotės mineralizacija ir hidrologinis išplovimas.

Europos miškuose nustatyta, kad net sumažėjus rūgščiosioms iškritoms bazinių katijonų koncentracijos gali išlikti mažos, nes ankstesniais dešimtmečiais buvo išsekintos greitai mobilizuojamos atsargos, o mineralų dūlėjimas jas papildo lėtai. Mažos Ca atsargos silpnina

dirvožemio buferinę gebą, šaknų ir membranų stabilumą; Mg trūkumas gali riboti chlorofilo sintezę ir fotosintezę; K stoka blogina osmosinį reguliavimą, žiotelių kontrolę ir atsparumą sausrai. Be to, bazinių katijonų sumažėjimas keičia mikrobų ir dirvožemio faunos gyvenamąją aplinką bei organinių liekanų skaidymą. Tačiau vien mažos koncentracijos tirpale dar neįrodo visuminio deficito, todėl jas būtina vertinti kartu su mainų komplekso atsargomis, lapijos chemine sudėtimi, nuokritomis, dūlėjimo srautais ir medynų produktyvumu (Johnson et al., 2018; Battles et al., 2014; Wellbrock et al., 2024).

Aukštaitijos KMS K ir Ca pokyčių sutapimas su lapijos bei nuokritų chemine sudėtimi sustiprina prielaidą, kad dalis dirvožemio tirpalo pokyčių apima visą dirvožemio–augalų sistemą. Žemaitijos KMS itin mažos Ca ir Mg koncentracijos kartu su žemu pH ir didėjančiu Al paviršiniame sluoksnyje rodo didesnę mitybos disbalanso riziką. Tuo tarpu naujausias K koncentracijų padidėjimas šiame sluoksnyje gali atspindėti sustiprėjusią paklotės mineralizaciją, šaknų pažeidimą, sumažėjusį medžių pasisavinimą arba koncentracijos efektą, tačiau priežastis turėtų būti tikrinama pagal nuokritų srautus, medžių būklę ir hidrologinius duomenis.

Azoto junginiai

NO_3^-, NH_4^+ ir bendrojo N dinamika parodė, kad azoto ciklas stotyse funkcionuoja skirtingai. Aukštaitijos KMS neorganinio N koncentracijoms nebuvo būdinga nuosekli ilgalaikė kryptis, o bendrojo N koncentracijos mažėjo. Pavieniai NO_3^- ir NH_4^+ šuoliai greičiau atspindi trumpalaikius mineralizacijos, nitrifikacijos, sausros–sudrėkinimo, šiltos žiemos, medynų pažeidimo ar vandens srautų epizodus negu nuolatinę taršą organinėmis atliekomis. Miško dirvožemiuose didelę įnešamo NH_4^+ ir NO_3^- dalį gali sulaikyti organinis horizontas, mineralinis dirvožemis, mikroorganizmai ir augalai, todėl neorganinio N koncentracija yra labai dinamiška (Gundersen et al., 2006; Gurmesa et al., 2022).

Žemaitijos KMS NO_3^- ir paviršinio sluoksnio bendrojo N koncentracijos didėjo, o NH_4^+ ilgalaikėje perspektyvoje mažėjo, išskyrus ryškų 2023–2025 m. šuolį 20 cm gylyje. NO_3^- didėjimas kartu su NH_4^+ mažėjimu gali būti suderinamas su aktyvesne nitrifikacija, ypač esant geresnei aeracijai ir intensyvesnei organinės medžiagos mineralizacijai. Tačiau paskutiniojo laikotarpio NH_4^+ padidėjimas gali rodyti amonifikacijos, augalų pasisavinimo, nitrifikacijos ar redokso sąlygų persitvarkymą. Vien pagal koncentracijas negalima konstatuoti azoto prisotinimo; tam būtina vertinti N iškritas, C santykį, NO_3^- srautus žemiau šaknų zonos, lapijos N, prieaugį ir medynų pažeidimus. Vis dėlto Žemaitijos tendencijos rodo didesnį azoto judrumą ir potencialiai didesnę NO_3^- lydimo Ca, Mg ir K išplovimo bei rūgštėjimo riziką (Dise et al., 2009; Schmitz et al., 2024; Cecchini et al., 2021).

Fosforas

Abiejose stotyse nustatytas bendras vertikalus dėsningumas – fosfatų ir bendrojo P koncentracijos mažėjo 20 cm gylyje, tačiau didėjo 40 cm gylyje. Kadangi P miško dirvožemyje yra palyginti mažai judrus ir didelė jo dalis sorbuojama Fe bei Al oksidų, įjungiama į organinę medžiagą arba biologiškai recirkuliuojama, vienodas dėsningumas dviejuose baseinuose gali rodyti ilgalaikį P persiskirstymą dirvožemio profilyje. Viršutiniame horizonte mažėjimą gali lemti intensyvus smulkiųjų šaknų ir mikorizės pasisavinimas bei P imobilizacija organinėje ir mineralinėje fazėje; gilesniame horizonte didėjimą – tirpaus organinio P, koloidinių Fe–Al–P kompleksų arba silpniau sorbuotų fosfatų migracija didėjant infiltracijai.

Organinės N ir P formos pasižymi didele afiniteto mineralams įvairove, o Fe ir Al oksidai yra vieni svarbiausių jų sorbentų. DOC gali konkuruoti su fosfatais dėl sorbcijos vietų ir keisti tiek P mobilumą, tiek organinės anglies stabilumą. Todėl P profilio pokyčius tikslinga vertinti kartu su DOC, Fe, Al, pH ir vandens srautais, o ne vien kaip augalų pasisavinimo rezultatą (Spohn, 2024; Amenkhienan et al., 2025; Yi et al., 2023).

Jei tirpaus P mažėjimas aktyviojoje šaknų zonoje tęstųsi kartu su didėjančiu N prieinamumu, gali stiprėti santykinis P ribojimas, didėti medžių priklausomybė nuo mikorizės ir vidinės P recirkuliacijos. Tačiau šiai išvadai pagrįsti reikėtų lapijos N, nuokritų P, šaknų ir mikorizės duomenų bei P frakcijų dirvožemyje.

Manganas, geležis ir aliuminis

Mn koncentracijos reikšmingai mažėjo abiejose stotyse, ypač Žemaitijoje. Mn tirpumas labai priklauso nuo pH ir redokso būklės: rūgščioje ar redukcinėje aplinkoje Mn(IV) oksidai redukuojami iki judresnio Mn^{2+}, o aeruojamoje terpėje Mn gali oksiduotis ir būti sulaikomas kietojoje fazėje. Todėl ilgalaikis Mn mažėjimas gali rodyti sumažėjusį jo mobilumą ir mažesnę toksinių koncentracijų riziką. Vis dėlto sausų metų trumpalaikiai padidėjimai nėra vienareikšmiai: juos gali lemti koncentravimas dėl mažesnio vandens tūrio, ilgesnė vandens sąveika su mineralais, organinių medžiagų transformacijos ar po sausros vykstantis impulsinis mobilizavimas. Kadangi Mn yra būtinas fotosintezės ir fermentų veiklos mikroelementas, labai mažos koncentracijos taip pat neturėtų būti automatiškai laikomos vien teigiamu pokyčiu.

Fe ir Al rezultatai parodė aiškiausią stočių kontrastą. Aukštaitijos KMS abiejų elementų koncentracijos daugiausia mažėjo, o tai sutampa su sulfatų mažėjimu ir rodo mažėjantį metalų mobilumą. Žemaitijos KMS 40 cm gylyje Fe ir Al taip pat mažėjo, tačiau 20 cm gylyje jų koncentracijos didėjo ir buvo gerokai didesnės negu Aukštaitijoje. Šį procesą paaiškina ypač žemas Žemaitijos dirvožemio vandens pH, didesnis DOC kiekis paviršiniame sluoksnyje ir Fe bei Al

gebėjimas sudaryti organinius kompleksus. Todėl bendrosios Fe ir Al koncentracijos nebūtinai atitinka laisvų Fe ir fitotoksiško Al^{3+} koncentracijas; jų ekologiniam pavojingumui nustatyti būtina elementų speciacijos arba bent DOC, pH ir Bc/Al santykio analizė.

Al yra ypač svarbus, nes rūgščioje terpėje jo mobilizacija gali slopinti smulkiųjų šaknų augimą, bloginti Ca ir Mg pasisavinimą ir veikti mikorizę. Aukštaitijoje mažėjantis Al gali būti vertinamas kaip palankus cheminio atsikūrimo požymis. Žemaitijoje vienalaikis Al didėjimas, Ca ir Mg mažėjimas bei pH kritimas paviršiniame horizonte rodo potencialiai nepalankiausią viso tirto parametrų komplekso derinį. Fe, priešingai, yra būtinas augalams, bet kartu labai svarbus DOC ir P stabilizavimo bei pernašos komponentas. Naujausi globalūs tyrimai patvirtina, kad Fe ir Al oksidai yra esminiai mineralinės organinės anglies stabilizavimui, o redokso ar rūgštingumo pokyčiai gali išlaisvinti kartu susietą C ir P (Jia et al., 2024; Patzner et al., 2020; Masiello et al., 2008).

Ištirpusi organinė anglis ir jos integruojantis vaidmuo

DOC Aukštaitijos KMS padidėjo po 2019 m. sausros, o 2020–2025 m. mažėjo, tačiau išliko didesniame lygyje negu 2010–2017 m. Žemaitijoje DOC nuosekliai mažėjo abiejuose gyliuose, o didesnės koncentracijos, ypač Žemaitijoje, buvo registruojamos 20 cm gylyje. DOC koncentracijos mažėjimas drėgnais metais gali būti susijęs su praskiedimu ir išplovimu, tačiau koncentracija ir medžiagos srautas nėra tas pats: mažėjant koncentracijai bendras DOC eksportas gali didėti, jeigu vandens srautas padidėja labiau. Todėl galutinei išvadai būtina apskaičiuoti koncentracijų ir vandens srautų sandaugą.

DOC yra jungiamoji grandis tarp organinės medžiagos skaidymo, metalų kompleksiškumo, P mobilumo ir anglies eksporto. Rūgščiuose miško dirvožemiuose dalis DOC sorbuojama arba nusodinama su Fe ir Al, taip stabilizuojant anglį, tačiau keičiantis pH ir redokso sąlygoms šie kompleksai gali būti mobilizuojami. Ši sąveika leidžia paaiškinti, kodėl Žemaitijos paviršiniame sluoksnyje didesnis DOC lygis sutampa su aukštesnėmis Fe ir Al koncentracijomis, o P koncentracijos ilgainiui didėja gilesniame horizonte. Tai pagrindžia hipotezę apie dalies C–Fe–Al–P kompleksų vertikalią migraciją, tačiau jai įrodyti reikėtų koloidų, metalo speciacijos ir organinio bei neorganinio P formų analizės. Mineralų ir organinės medžiagos sąveika laikoma vienu pagrindinių dirvožemio C stabilumo mechanizmų, todėl jos pokyčiai turi reikšmę ne tik medžių mitybai, bet ir miško dirvožemio anglies balansui (Camino-Serrano et al., 2014; Xu et al., 2024; Georgiou et al., 2022).

Bendroji ekosisteminė sintezė

Visų rodiklių kompleksas rodo, kad abiejose stotyse baigiasi laikotarpis, kai dirvožemio vandens chemiją daugiausia kontroliavo didelės sieros iškritos, ir formuojasi naujas režimas, kuriame

vis didesnę reikšmę įgauna klimato sąlygos, vandens atsargų dydis, įšalo nykimas, sezoninis infiltracijos intensyvumas, organinių medžiagų transformacija ir biologinis elementų pasisavinimas.

Aukštaitijos KMS ryškus sulfatų, Fe, Al, Mn, Mg, K, SiO_2 ir bendrojo N mažėjimas kartu su mažėjančiu specifiniu elektriniu laidumu rodo sumažėjusią išorinę rūgštinančią apkrovą, tačiau taip pat gali reikšti intensyvesnį tirpių medžiagų išnešimą iš aktyviosios šaknų zonos. Didėjančios dirvožemio vandens atsargos ir drėgni paskutinieji metai stiprina praskiedimo ir vertikalios migracijos reikšmę. Ca koncentracijų stabilizavimasis yra palankus požymis, tačiau Mg, K ir SiO_2 mažėjimas rodo, kad maisto medžiagų bei mineralinių junginių balansas dar nėra visiškai stabilus.

Žemaitijos KMS cheminei raidai būdingas daug didesnis rūgštingumas, Ca ir Mg koncentracijų mažėjimas, Al ir Fe didėjimas 20 cm gylyje, NO_3^- ir bendrojo N augimas bei didesnės Cl^- koncentracijos. Šis parametrų derinys rodo silpnesnį paviršinio horizonto buferinį pajėgumą, aktyvesnį metalų ir azoto judrumą ir didesnę šaknų mitybos disbalanso riziką. Didėjančios SiO_2 ir K koncentracijos gali atspindėti aktyvesnį mineralų dūlėjimą bei organinės medžiagos mineralizaciją, tačiau jos nebūtinai kompensuoja Ca ir Mg išsekimą.

Ekologiniu požiūriu svarbiausia išvada yra ta, kad atmosferinės sieros taršos mažėjimas nevirto vienodu ir visapusišku dirvožemio cheminės būklės atsikūrimu. Sulfatų sumažėjimas yra neabejotinai palankus, tačiau bazinių katijonų, N, P, DOC, Fe, Al ir Mn dinamika rodo, kad ekosistemų atsaką vis labiau lemia vandens režimas ir vidinės biogeocheminės sąveikos. Šių pokyčių pasekmės gali apimti medžių mitybos ir vandens naudojimo efektyvumo pokyčius, mikorizės ir mikroorganizmų aktyvumo persitvarkymą, pedobiontų bendrijų kaitą, pakitusį organinės medžiagos skaidymąsi ir anglies stabilizavimą bei maisto medžiagų migraciją į gruntinius ir paviršinius vandenis.

Todėl dirvožemio vandens cheminė būklė negali būti vertinama pagal vieną rodiklį. Patikimiausią ekosistemos diagnostiką sudaro tarpusavyje susijusių rodiklių kompleksas: pH ir Al apibūdina rūgštėjimo riziką; SO_4^{2-} – rūgštinančios sieros apkrovos palikimą; Ca, Mg ir K – buferinę gebą bei mitybą; NO_3^-, NH_4^+ ir bendrasis N – mineralizaciją, nitrifikaciją ir N sulaikymą; P, Fe, Al ir DOC – organinių–mineralinių kompleksų bei P prieinamumo kaitą; Mn ir Fe – redokso sąlygas; Na^+ ir Cl^- – atmosferinę kilmę ir hidrologinę pernašą; SEL – bendrą tirpių jonų lygį; o SiO_2 – mineralų dūlėjimo ir biologinio silicio ciklo pokyčius.

Apibendrinant galima teigti, kad ilgalaikė Aukštaitijos ir Žemaitijos KMS dirvožemio vandens cheminės sudėties kaita atskleidžia pereinamąjį hemiborealinių miško ekosistemų raidos etapą: mažėjant rūgščiosioms sieros iškritoms silpnėja dalis istorinio rūgštėjimo poveikio, tačiau klimato kaitos nulemtas hidrologinio režimo persitvarkymas vis labiau kontroliuoja medžiagų

tirpumą, vertikalią migraciją, biologinį prieinamumą ir išnešimą iš aktyviosios šaknų zonos. Šių procesų balansas, ypač bazinių katijonų, Al, N, P ir DOC sąveika, ateityje gali tapti vienu svarbiausių veiksnių, lemiančių medžių būklę, produktyvumą, dirvožemio biologinį aktyvumą ir bendrą miško ekosistemų atsparumą.

IŠVADOS

Vienas svarbiausių pokyčių Aukštaitijos KMS baseine yra dirvožemio vandens atsargų reikšmingas didėjimas nuo 2018 m., kuris turėjo turėti reikšmingos įtakos visiems bio-, geo sisteminiams procesams vykstantiems ekosistemoje.

1. **Ilgalaikę dirvožemio vandens cheminės sudėties kaitą vis labiau reguliuoja besikeičiantis hidrologinis režimas.** Vienas svarbiausių Aukštaitijos KMS baseino pokyčių – nuo 2018 m. reikšmingai didėjančios dirvožemio vandens atsargos, mažėjantis įšalo gylis ir intensyvėjanti vandens infiltracija. Šie pokyčiai veikia medžiagų tirpumą, praskiedimą, išplovimą ir vertikalią migraciją, todėl tampa svarbiu visų dirvožemyje vykstančių biologinių ir geocheminių procesų reguliatoriumi.
2. **Dirvožemio vandens rūgštingumo kaita atskleidė esminį stočių būklės skirtumą.** Aukštaitijos KMS 2004–2013 m. vyravusi artima neutraliai vandens reakcija nuo 2010–2015 m. iki 2023 m. palaipsniui rūgštėjo, tačiau 2023–2025 m. pH vėl nežymiai padidėjo. Žemaitijos KMS dirvožemio vanduo buvo rūgštus nuo stebėsenos pradžios, o 2025 m. 20 cm gylyje pH sumažėjo iki maždaug 3,7 – žemiausios reikšmės per visą tyrimų laikotarpį. Tai rodo išliekantį silpną paviršinio dirvožemio buferinį pajėgumą ir didesnę Al mobilizacijos, bazinių katijonų netekimo bei šaknų mitybos disbalanso riziką Vakarų Lietuvos miško ekosistemose.
3. **Specifinio elektrinio laidumo ir SiO_2 kaita patvirtino skirtingą stočių geocheminę raidą.** Aukštaitijos KMS mažėjantis laidumas rodo bendro ištirpusių jonų kiekio mažėjimą, kurį galėjo lemti mažesnė išorinė cheminių medžiagų apkrova, praskiedimas ir intensyvesnis išplovimas. Žemaitijos KMS 20 cm gylyje po 2010–2013 m. laidumo didėjimas sutapo su rūgštėjimu bei didėjančiu kai kurių judrių elementų kiekiu. SiO_2 koncentracijos Žemaitijoje didėjo, o Aukštaitijoje mažėjo ir 2023–2025 m. pasiekė mažiausias reikšmes. Pastaroji tendencija rodo silpnėjantį tirpaus silicio papildymą arba spartesnį jo išnešimą iš šaknų zonos, tačiau tiesioginis poveikis medžių būklei dar turi būti patikrintas atskirais tyrimais.

4. **Ryškiausias teigiamas cheminės būklės pokytis – daugkartinis sulfatų koncentracijų sumažėjimas.** Palyginti su tyrimų pradžia, jų kiekis Aukštaitijos KMS sumažėjo maždaug 4–5, o Žemaitijos KMS – iki 10 kartų. Tai patvirtina ilgalaikį sieros emisijų ir rūgščiųjų atmosferinių iškritų mažėjimo poveikį bei prasidėjusį ekosistemų cheminį atsikūrimą. Vis dėlto nuo 2020 m. Žemaitijoje ir atskirais 2021 bei 2024 m. Aukštaitijoje registruoti sulfatų padidėjimai rodo, kad sieros ciklą vis labiau modifikuoja epizodinės atmosferinės apkrovos, hidrologiniai svyravimai ir dirvožemyje sukauptos sieros mobilizacija. Galimas karo Ukrainoje metu padidėjusių sieros iškritų indėlis turėtų būti vertinamas kartu su oro masių pernašos ir medžiagų srautų duomenimis.
5. **Sulfatų mažėjimas dar neužtikrino visapusiško bazinių katijonų atsikūrimo.** Ca, Mg ir K koncentracijos daugeliu atvejų toliau mažėjo, o mažiausios Mg koncentracijos abiejose stotyse ir itin mažos Ca koncentracijos Žemaitijos KMS užregistruotos paskutiniaisiais tyrimų metais. Tai rodo, kad anksčiau išsekintos bazinių katijonų atsargos atsikuria lėtai, o jų balansą vis labiau veikia vandens filtracija, biologinis pasisavinimas ir išnešimas iš aktyviosios šaknų zonos. Toks procesas gali silpninti dirvožemio buferinę gebą, medžių mineralinę mitybą, fotosintezę ir atsparumą sausroms.
6. **Kalio kaita patvirtino glaudų dirvožemio vandens ir augalijos mitybos ryšį.** Aukštaitijos KMS ilgalaikis K koncentracijų mažėjimas dirvožemio vandenyje sutapo su jo mažėjimu lapijoje, todėl šis dėsningumas apima visą dirvožemio–augalų sistemą. Žemaitijos KMS 2022–2025 m. K koncentracijų padidėjimas paviršiniame sluoksnyje gali būti susijęs su intensyvesne paklotės mineralizacija, sumažėjusiu augalų pasisavinimu, medžių pažeidimais arba pakitusiu vandens režimu; šiems mechanizmams atskirti būtina K srautų atmosferinėse iškritose, nuokritose ir lapijoje analizė.
7. **Azoto ciklas stotyse vystėsi skirtingomis kryptimis.** Aukštaitijos KMS aiškių ilgalaikių NO_3^- ir NH_4^+ koncentracijų tendencijų nenustatyta, o bendrojo N koncentracijos mažėjo, rodydamos santykinai konservatyvų azoto ciklą ir efektyvų jo biologinį sulaikymą. Pavieniai neorganinio N šuoliai greičiausiai atspindi trumpalaikius mineralizacijos, nitrifikacijos, sausros–pakartotinio sudrėkinimo ar medynų būklės pokyčius, o ne įrodytą išorinę taršą. Žemaitijos KMS didėjančios NO_3^- ir paviršinio sluoksnio bendrojo N koncentracijos kartu su ilgalaikiu NH_4^+ mažėjimu gali rodyti intensyvėjančią nitrifikaciją ir didėjantį azoto judrumą. Tai didina nitratų išplovimo, rūgštėjimo ir bazinių katijonų netekimo riziką, nors azoto prisotinimui konstatuoti dar būtina įvertinti N iškritas, C santykį, lapijos chemiją ir N išnešimo srautus.

8. **Fosfatų ir bendrojo P priešinga kaita skirtinguose gyliuose rodo ilgalaikį fosforo persiskirstymą dirvožemio profilyje.** Jų koncentracijų mažėjimas 20 cm ir didėjimas 40 cm gylyje abiejose stotyse gali būti susijęs su intensyviu P biologiniu pasisavinimu ir imobilizacija aktyviojoje šaknų zonoje bei tirpių organinių, koloidinių arba Fe–Al kompleksais susietų fosforo junginių migracija į gilesnius horizontus. Jei šis procesas tęstųsi, viršutiniame dirvožemio sluoksnyje galėtų stiprėti santykinis P ribojimas ir medžių priklausomybė nuo mikorizės bei vidinės fosforo recirkuliacijos.
9. **Mangano koncentracijų mažėjimas buvo vienas nuosekliausių abiejų stočių pokyčių.** Jis rodo ilgalaikį Mn judrumo dirvožemio tirpale mažėjimą ir galimą didelių, augalams bei pedobiontams toksiškų koncentracijų rizikos silpnėjimą. Tačiau sausaisiais metais nustatyti trumpalaikiai koncentracijų padidėjimai rodo, kad Mn ciklas išlieka jautrus dirvožemio drėgmės, redokso sąlygų ir tirpalo koncentravimo pokyčiams. Kadangi Mn yra būtinas fotosintezės ir fermentinių procesų mikroelementas, jo mažėjimas turi būti vertinamas kartu su lapijos chemine sudėtimi.
10. **Fe ir Al dinamika patvirtino daug didesnį Žemaitijos KMS paviršinio dirvožemio geocheminį jautrumą.** Aukštaitijos KMS abiejuose gyliuose Al ir daugiausia Fe koncentracijos mažėjo, rodydamos mažėjantį metalų judrumą bei dalinį cheminį atsikūrimą. Žemaitijos KMS 40 cm gylyje Fe ir Al taip pat mažėjo, tačiau 20 cm gylyje jų koncentracijos didėjo ir gerokai viršijo Aukštaitijos lygį. Šis dėsningumas sutampa su žemu pH ir didesne DOC koncentracija paviršiniame sluoksnyje, todėl tikėtina, kad metalų judrumą palaiko rūgštėjimas ir Fe–DOC bei Al–DOC kompleksų susidarymas. Didėjantis Al kartu su mažėjančiais Ca ir Mg sudaro nepalankiausią Žemaitijos KMS rodiklių kompleksą, galintį riboti smulkiųjų šaknų augimą, maisto medžiagų pasisavinimą ir mikorizės funkcionavimą.
11. **Ištirpusios organinės anglies kaita atskleidė glaudų jos ryšį su hidrologiniu režimu ir metalų bei fosforo migracija.** Aukštaitijos KMS DOC koncentracija padidėjo po 2019 m. sausros, o 2020–2025 m. mažėjo, tačiau išliko aukštesnė negu 2010–2017 m. Žemaitijos KMS nustatytas nuoseklus DOC koncentracijų mažėjimas, nors 20 cm gylyje jos išliko didesnės nei 40 cm gylyje. Koncentracijų mažėjimas drėgnais metais gali reikšti praskiedimą ir intensyvesnį išnešimą, tačiau ne būtinai mažesnį DOC srautą. DOC sąveika su Fe ir Al gali reguliuoti metalų bei P judrumą, todėl galutinė anglies eksporto ir maisto medžiagų persiskirstymo analizė turi būti grindžiama ne tik koncentracijomis, bet ir vandens srautais.

12. **Na^+ ir Cl^- kaita patvirtino regioninės atmosferinės pernašos ir hidrologinio režimo svarbą.** Didesnės Cl^- koncentracijos Žemaitijos KMS atspindi stipresnę Baltijos jūros aerozolių įtaką. Iki 2010 m. mažėjusios, o vėliau didėjusios Cl^- koncentracijos ir iki 2023 m. augęs Na^+ kiekis rodo ilgalaikį atmosferinių bei hidrologinių procesų persitvarkymą. Tačiau 2024–2025 m. abiejose stotyse užfiksuotas staigus Na^+ sumažėjimas paneigia ankstesnę išvadą apie nenutrūkstamą jo augimą ir labiau atitinka praskiedimo bei intensyvesnio išplovimo drėgnais metais hipotezę.
13. **Bendras rodiklių kompleksas rodo, kad atmosferinės taršos sumažėjimas nesukėlė vienodo ir visapusiško dirvožemio cheminio atsikūrimo.** Sulfatų sumažėjimas buvo ryškus ir palankus, tačiau bazinių katijonų, N, P, DOC, Fe ir Al dinamika atskleidė vėluojantį bei stočių sąlygoms specifišką atsaką. Aukštaitijos KMS cheminę kaitą vis labiau lemia didėjančios vandens atsargos, praskiedimas ir vertikalus medžiagų išnešimas, o Žemaitijos KMS išlieka rūgštesnė, silpniau buferizuota ir didesniu Al, Fe bei azoto judrumu pasižyminti sistema.
14. **Pagrindinė ilgalaikių tyrimų išvada – Lietuvos hemiborealinių miškų dirvožemio vandens chemijoje formuojasi naujas procesų režimas.** Ankstesnį tiesioginį didelių sieros iškritų poveikį palaipsniui keičia klimato kaitos kontroliuojama hidrologijos, organinės medžiagos transformacijos, mineralų dūlėjimo, biologinio elementų pasisavinimo ir vertikalios migracijos sąveika. Šių procesų balansas, ypač pH–Al–bazinių katijonų, N–P bei DOC–Fe–Al sąveikos, ateityje gali tapti vienu svarbiausių veiksnių, lemiančių medžių mitybą ir produktyvumą, mikorizės bei pedobiontų bendrijų funkcionavimą, dirvožemio anglies stabilumą ir bendrą miško ekosistemų atsparumą.

Apibendrinamoji išvada

Ilgalaikis kompleksinis monitoringas parodė, kad dirvožemio vandens cheminės sudėties pokyčiai negali būti vertinami kaip atskirų elementų koncentracijų didėjimas ar mažėjimas. Jie atspindi vientisą priežasties–pasekmės grandinę: klimato ir atmosferinių iškritų pokyčiai keičia įšalo, dirvožemio drėgmės ir filtracijos režimą; šie procesai reguliuoja rūgštingumą, organinės anglies ir metalų kompleksavimą, mineralų dūlėjimą, maisto medžiagų biologinį prieinamumą bei jų išnešimą iš aktyviosios šaknų zonos. Todėl tolesnei hemiborealinių miškų būklės diagnostikai svarbiausia integruotai vertinti ne pavienius rodiklius, bet jų tarpusavio santykius ir srautus, ypač pH, Bc/Al, N, DOC–Fe–Al bei koncentracijų ir vandens nuotėkio sąveiką.

GALIMOS GRĖSMĖS MIŠKO EKOSISTEMOMS

1. **Tolesnis dirvožemio vandens rūgštėjimas, ypač Žemaitijos KMS, gali tapti viena svarbiausių grėsmių medžių mitybai ir šaknų sistemos būklei.** Žemas pH didina Al ir Mn tirpumą, mažina Ca, Mg ir kitų bazinių katijonų prieinamumą, keičia fosforo sorbciją ir gali slopinti smulkiųjų šaknų bei mikorizinių grybų aktyvumą. Žemaitijos KMS 20 cm gylyje nustatytas pH sumažėjimas iki maždaug 3,7 kartu su didėjančiomis Al ir Fe koncentracijomis rodo didėjančią šaknų zonos cheminio streso riziką.
2. **Bazinių katijonų – Ca, Mg ir K – ilgalaikis mažėjimas gali riboti medžių mineralinę mitybą ir silpninti dirvožemio buferinę gebą.** Ca trūkumas gali neigiamai veikti šaknų augimą ir ląstelių membranų stabilumą, Mg mažėjimas – fotosintezę ir chlorofilo susidarymą, o K trūkumas – žiotelių veiklą, vandens balansą ir medžių atsparumą sausroms. Kalio koncentracijų mažėjimo sutapimas dirvožemio vandenyje ir lapijoje rodo, kad šis procesas jau gali apimti visą dirvožemio–augalų sistemą.
3. **Didėjantis Al judrumas Žemaitijos KMS paviršiniame dirvožemio sluoksnyje gali sustiprinti maisto medžiagų disbalansą.** Tirpus Al gali konkuruoti su Ca ir Mg dėl šaknų pasisavinimo vietų, slopinti šaknų ilgėjimą, mažinti vandens bei maisto medžiagų įsisavinimą ir trikdyti mikorizės funkcionavimą. Ypač nepalankus derinys susidaro tada, kai Al koncentracijos didėja, o Ca ir Mg kartu mažėja.
4. **Didėjantis nitratų ir bendrojo azoto judrumas Žemaitijos KMS gali rodyti silpnėjančią ekosistemos gebą sulaikyti azotą.** Jei ši tendencija tęstųsi, galėtų didėti nitratų išplovimas į gilesnius dirvožemio sluoksnius ir paviršinius vandenis, stiprėti dirvožemio rūgštėjimas bei bazinių katijonų netekimas. Azoto pertekliaus sąlygomis taip pat gali keistis pomiškio ir žolinės augalijos rūšinė sudėtis, mažėti rūšių, prisitaikiusių prie skurdžių dirvožemių, gausa ir didėti nitrofilinių rūšių dominavimas.
5. **Fosforo mažėjimas aktyviojoje šaknų zonoje gali didinti santykinio P trūkumo riziką.** Fosfatų ir bendrojo P koncentracijų mažėjimas 20 cm gylyje, kartu didėjant jų koncentracijoms 40 cm gylyje, gali rodyti fosforo persiskirstymą iš pagrindinės šaknų zonos į gilesnius horizontus. Ilgainiui tai gali didinti medžių priklausomybę nuo mikorizės ir vidinės fosforo recirkuliacijos bei riboti produktyvumą, ypač jei azoto prieinamumas tuo pat metu didėja.

6. **Ištirpusios organinės anglies, Fe, Al ir P kompleksų vertikali migracija gali keisti maisto medžiagų prieinamumą ir dirvožemio anglies stabilumą.** Intensyvėjant vandens filtracijai, dalis DOC ir su juo susijusių Fe, Al bei P junginių gali būti pernešama į gilesnius horizontus arba išnešama iš baseino. Tai gali mažinti organinės anglies ir fosforo atsargas paviršiniame dirvožemyje, keisti mikroorganizmų substratų prieinamumą ir didinti anglies eksportą į gruntinius bei paviršinius vandenis.
7. **Didėjantis dirvožemio vandens kiekis nėra vienareikšmiškai palankus ekosistemai.** Nors didesnės vandens atsargos mažina sausrų poveikį, ilgalaikis drėgmės perteklius gali riboti deguonies patekimą į šaknų zoną, keisti redokso sąlygas, skatinti Fe ir Mn mobilizaciją, slopinti šaknų kvėpavimą ir didinti medžių žūties riziką. Aukštaitijos KMS registruotas visų medžių žuvimas užmirkusiame tyrimų plotelyje rodo, kad vandens perteklius gali tapti tiesiogine medynų stabilumo grėsme.
8. **Didėjanti vandens infiltracija ir medžiagų išplovimas gali spartinti maisto medžiagų netekimą iš aktyviosios šaknų zonos.** Mažėjantis specifinis elektrinis laidumas, SiO_2, Mg, K ir dalies kitų elementų koncentracijos Aukštaitijos KMS rodo, kad didesnės vandens atsargos gali ne tik praskiesti dirvožemio tirpalą, bet ir didinti medžiagų išnešimą į gilesnius horizontus. Jei mineralų dūlėjimas ir atmosferinis įnašas šių nuostolių nekompensuos, gali palaipsniui mažėti dirvožemio derlingumas.
9. **Tirpaus silicio mažėjimas Aukštaitijos KMS gali rodyti besikeičiantį mineralų dūlėjimo ir biologinio silicio ciklą.** Nors nėra pakankamo pagrindo dabartines SiO_2 koncentracijas laikyti tiesiogiai kritinėmis medžiams, ilgalaikis jų mažėjimas gali silpninti augalų atsparumą sausrai, temperatūriniam stresui ir patogenams. Šis pokytis turėtų būti vertinamas kaip galimas ankstyvas naujos biogeocheminės rizikos indikatorius.
10. **Pastarųjų metų sulfatų koncentracijų padidėjimai gali lėtinti ekosistemų cheminį atsikūrimą.** Nors ilgalaikė sieros koncentracijų mažėjimo kryptis išlieka palanki, epizodiniai padidėjimai gali skatinti bazinių katijonų išplovimą ir Al mobilizaciją. Šiuos svyravimus gali lemti anksčiau dirvožemyje sukauptos sieros mobilizacija, hidrologiniai ekstremumai ir galimos papildomos regioninės emisijos, įskaitant karo Ukrainoje sukeltų atmosferinių iškritų poveikį.
11. **Na ir Cl koncentracijų kaita rodo didėjantį dirvožemio vandens chemijos jautrumą regioniniams atmosferos ir hidrologiniams procesams.** Staigūs jų koncentracijų pokyčiai gali atspindėti oro masių cirkuliacijos, jūrinių aerozolių pernašos, kritulių sezoniškumo,

praskiedimo ir išplovimo kaitą. Nors dabartinės koncentracijos savaime nerodo druskėjimo grėsmės, šių jonų dinamika įspėja apie vis stipresnę klimato ir hidrologinio režimo kontrolę.

12. **Dirvožemio mikroorganizmų, mikorizės ir pedobiontų bendrijoms didžiausią grėsmę kelia ne vienas atskiras cheminis pokytis, o jų kompleksas.** Rūgštėjimas, bazinių katijonų mažėjimas, Al judrumo didėjimas, kintantis N ir P prieinamumas bei DOC srautų persitvarkymas gali keisti bakterijų ir grybų santykį, slopinti jautrias dirvožemio faunos grupes, lėtinti arba keisti organinės medžiagos skaidymąsi ir trikdyti maisto medžiagų recirkuliaciją.
13. **Didžiausia ilgalaikė grėsmė yra ekosistemų cheminio atsikūrimo ir klimato kaitos sukelto hidrologinio persitvarkymo nesutapimas.** Sieros iškritų sumažėjimas sudarė prielaidas rūgštėjimui silpnėti, tačiau bazinių katijonų atsargos, šaknų zonos pH ir maisto medžiagų balansas atsikuria lėtai. Tuo pat metu didėjantis vandens kiekis, mažėjantis įšalas, dažnesni sausros–gausių kritulių ciklai ir stiprėjanti vertikali medžiagų migracija gali sukurti naują maisto medžiagų išplovimo ir cheminio disbalanso režimą.

Apibendrinanti grėsmė

Pagrindinė galima grėsmė Lietuvos hemiborealinėms miško ekosistemoms yra ne atskiro cheminio elemento koncentracijos pokytis, bet ilgalaikis šaknų zonos cheminės aplinkos persitvarkymas, kai mažėjant istorinei sieros taršai nevisiškai atsikūrusias dirvožemio buferines sistemas pradeda vis stipriau veikti klimato kaitos nulemtas vandens režimas. Rūgštėjimo, bazinių katijonų mažėjimo, Al judrumo, azoto ir fosforo persiskirstymo bei DOC–Fe–Al kompleksų migracijos sąveika gali palaipsniui silpninti medžių mineralinę mitybą, produktyvumą ir atsparumą klimato ekstremumams, keisti dirvožemio biologinę įvairovę bei didinti maisto medžiagų ir organinės anglies eksportą iš miško baseinų.

PROGNOZĖS

1. **Tikėtina, kad dirvožemio vandens cheminę sudėtį ateityje vis mažiau lems atmosferinės rūgščiosios iškritos, o vis daugiau – klimato kaitos nulemtas hidrologinis režimas.** Per pastaruosius tris dešimtmečius sieros junginių koncentracijos dirvožemio vandenyje sumažėjo kelis kartus, todėl rūgštėjimo procesai vis labiau praranda dominuojančią reikšmę. Ateityje pagrindiniu dirvožemio cheminės sudėties reguliatoriumi taps kritulių pasiskirstymas, vandens infiltracijos intensyvumas, dirvožemio drėgmės dinamika ir ekstremalių meteorologinių reiškinių dažnėjimas.
2. **Didėjantis dirvožemio vandens kiekis ir spartėjanti infiltracija gali lemti intensyvesnę maisto medžiagų migraciją iš aktyviosios šaknų zonos.** Ypač tai gali būti būdinga Aukštaitijos KMS, kur nuo 2018 m. registruojamas reikšmingas dirvožemio vandens atsargų didėjimas. Jei ši tendencija išliks, tikėtina, kad didės Ca, Mg, K, DOC ir dalies kitų tirpių junginių išnešimas į gilesnius dirvožemio sluoksnius bei gruntinius vandenis.
3. **Žemaitijos KMS paviršinio dirvožemio rūgštėjimas gali tęstis ir artimiausiais dešimtmečiais, jeigu neatsikurs bazinių katijonų atsargos.** Tokiu atveju gali didėti Al judrumas, silpnėti dirvožemio buferinė geba ir didėti šaknų sistemos cheminis stresas. Vis dėlto šių procesų intensyvumas priklausys nuo atmosferinių iškritų sudėties, mineralų dūlėjimo greičio ir klimato kaitos scenarijų.
4. **Bazinių katijonų atsikūrimas greičiausiai bus gerokai lėtesnis negu sulfatų mažėjimas.** Todėl net ir toliau mažėjant rūgščiosioms iškritoms dirvožemio cheminė pusiausvyra gali atsikurti tik palaipsniui. Artimiausiais dešimtmečiais bazinių katijonų balansas išliks vienu jautriausių miško ekosistemų stabilumo rodiklių.
5. **Azoto ir fosforo ciklų sąveika gali tapti vienu svarbiausių produktyvumą reguliuojančių veiksnių.** Jeigu Žemaitijos KMS tęsis nitratų koncentracijų didėjimas, o Aukštaitijos ir Žemaitijos KMS viršutiniame dirvožemio sluoksnyje mažės augalams prieinamo fosforo, tikėtina, kad didės santykinis fosforo ribojimas. Tokiu atveju vis didesnę reikšmę įgis mikorizės veikla, vidinė maisto medžiagų recirkuliacija ir biologinis fosforo mobilizavimas.
6. **Ištirpusios organinės anglies vaidmuo dirvožemio biogeocheminiuose cikluose didės.** Didėjant klimato sąlygotam dirvožemio drėgmės kintamumui, DOC vis labiau reguliuos Fe ir Al kompleksų susidarymą, fosforo judrumą ir organinės anglies eksportą iš miško baseinų. Todėl DOC gali tapti vienu svarbiausių ankstyvųjų klimato kaitos poveikio indikatorių.

7. **Fe ir Al judrumą ateityje vis labiau lems ne vien rūgštingumas, bet ir organinių kompleksų susidarymas.** Todėl vien bendrųjų Fe ir Al koncentracijų vertinimo nebeužteks – būtina stebėti jų speciaciją, DOC koncentracijas ir bazinių katijonų bei aliuminio santykius.
8. **Dažnėjant sausrų ir intensyvių kritulių ciklams, didės trumpalaikių dirvožemio cheminės sudėties svyravimų amplitudė.** Tokie epizodai gali skatinti impulsinę mineralizaciją, nitratų, DOC, Fe ir Mn mobilizaciją, po kurios seks intensyvesnis šių medžiagų išplovimas. Todėl ateityje sezoniniai svyravimai gali tapti svarbesni už daugiametes vidutines koncentracijas.
9. **Tikėtina, kad didės skirtumai tarp Lietuvos regionų.** Aukštaitijos KMS dirvožemio cheminę raidą labiau lems vandens pertekliaus ir išplovimo procesai, o Žemaitijos KMS – rūgštėjimo, mažos buferinės gebos ir aktyvesnio metalų bei azoto judrumo procesai. Tai reiškia, kad ateityje miško ekosistemų valdymo ir apsaugos priemonės turės būti vis labiau pritaikomos konkrečių regionų geocheminėms sąlygoms.
10. **Ilgalaikėje perspektyvoje didžiausi pokyčiai tikėtini ne atskirų elementų koncentracijose, o jų tarpusavio ryšiuose.** Ateityje svarbiausiais miško ekosistemų būklės rodikliais taps ne pavieniai cheminiai elementai, bet jų kompleksiniai santykiai – pH ir Bc/Al, Ca/Mg/K balansas, N santykis, DOC–Fe–Al kompleksų dinamika bei cheminių medžiagų srautai. Būtent šie integruoti rodikliai greičiausiai taps jautriausiais hemiborealinių miškų prisitaikymo prie klimato kaitos indikatoriais.

Bendroji prognozė

Remiantis 31 metų kompleksinio monitoringo duomenimis galima prognozuoti, kad artimiausiais dešimtmečiais Lietuvos hemiborealinių miškų dirvožemio vandens cheminė sudėtis pereis į naują vystymosi etapą. Istorinės rūgščiosios atmosferinės iškritos palaipsniui praras dominuojančią reikšmę, o pagrindiniais dirvožemio biogeocheminių procesų reguliatoriais taps klimato kaitos nulemtas vandens režimas, organinės medžiagos transformacija, biologinis maisto medžiagų pasisavinimas ir jų vertikali migracija. Todėl ateities miško ekosistemų stabilumą lems ne vien dirvožemio rūgštėjimo mastas, bet visos dirvožemio–vandens–augalų sistemos gebėjimas palaikyti subalansuotą maisto medžiagų ciklą ir prisitaikyti prie didėjančio klimato nepastovumo.

7.2. Gruntinio vandens savybės KM baseinų teritorijose

Gruntinis vanduo yra vienas iš pagrindinių komponentų, kontroliuojančių miško ekosistemų funkcionavimą, produktyvumą ir ilgalaikį tvarumą. Jo slūgsojimo gylis labai svarbus miškams, ypač ilgai trunkančiais sausringais laikotarpiais, taip palaikydamas medžių augimą, maistinių medžiagų įsisavinimą, transpiraciją ir ekosistemų atsparumą ekstremalioms klimato sąlygoms (Weldon et.all, 2026). Sąveika tarp gruntinio vandens, dirvožemio vandens, paviršinio ir atmosferos kritulių reguliuoja hidrologinius ir biogeocheminius ciklus, kurie lemia miškų būklę ir bendrą ekosistemos stabilumą. Todėl gruntinio vandens režimo pokyčiai gali tiesiogiai paveikti miško gyvybingumą, biologinę įvairovę, maistinių medžiagų ciklą ir anglies sekvestracijos pajėgumus.

Gruntinio vandens lygio svyravimus pirmiausia kontroliuoja kritulių kintamumas, evapotranspiracija, klimato atšilimas ir baseino charakteristikos. Vuorenmaa ir kt. (2017) parodė, kad ilgalaikis hidrologinis kintamumas daro didelę įtaką biogeocheminiams srautams ir ekosistemų atsakams Europos ICP KM baseinuose. Mažėjantis požeminio vandens lygis gali padidinti sausros įtampą, sumažinti vandens prieinamumą giliai įsišaknijusiems medžiams, pakeisti rūšių sudėtį ir pabloginti regeneracijos procesus, ypač nuo gruntinio vandens lygio priklausomuose miškuose. Ir atvirkščiai, padidėjęs gruntinio vandens lygis gali sudaryti dirvožemio sąlygas, kuriose trūksta deguonies, o tai neigiamai veikia šaknų kvėpavimą ir mikrobų aktyvumą.

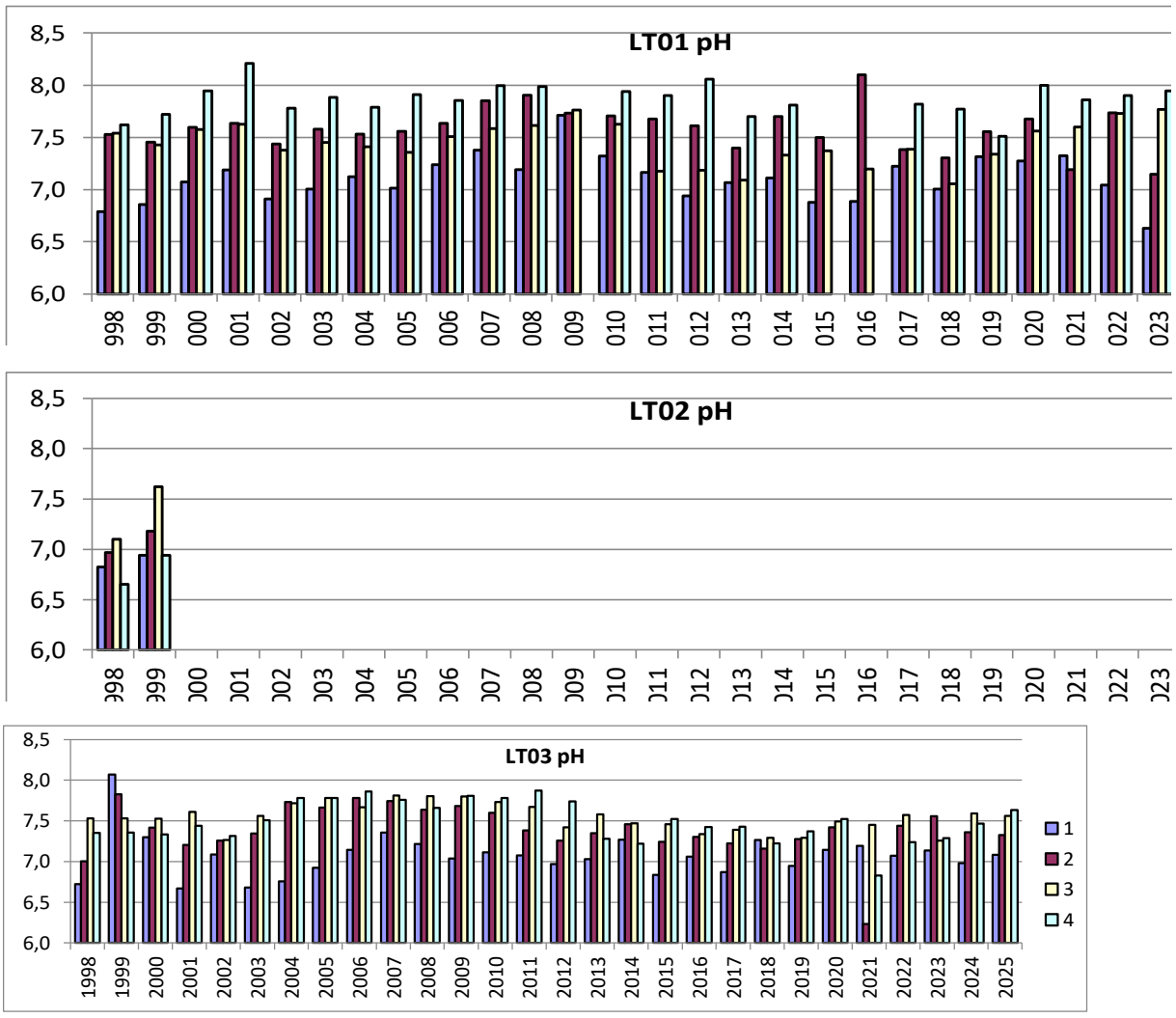
Gruntinio vandens cheminė sudėtis vienodai svarbi miško ekosistemos tvarumui, nes ji atspindi ir natūralius geocheminius procesus, ir antropogeninį aplinkos įtaką. Sulfatų, azoto junginių ir bazinių katijonų koncentracijos pokyčiai yra glaudžiai susiję su atmosferos nusėdimu ir atsigavimu po rūgštėjimo netvarkomuose miškinguose baseinuose visoje Europoje (Forsius ir kt. 2021. Todėl gruntinio vandens cheminės sudėties pokyčiai gali labai paveikti maistinių medžiagų prieinamumą, dirvožemio rūgštėjimą ir toksinių elementų mobilumą. Tokie cheminiai pokyčiai gali pakeisti dirvožemio derlingumą, mikrobų aktyvumą ir medžių mitybą, taip paveikdami ilgalaikį ekosistemos stabilumą.

Tarptautinė bendradarbiavimo programa dėl integruoto oro taršos poveikio ekosistemoms stebėjimo (ICP IM) yra vienas iš išsamiausių ilgalaikių duomenų rinkinių, skirtų šiai sąveikai Europos miškų ekosistemose tirti. ICP KM tinklas integruoja standartizuotą atmosferos nusėdimo, meteorologijos, dirvožemio tirpalo, požeminio vandens, nuotėkio, augmenijos ir biogeocheminių procesų stebėjimą mažuose miškinguose baseinuose (Weldon ir kt.,2026). Šie ilgalaikiai stebėjimai leidžia įvertinti priežasties ir pasekmės ryšius tarp klimato kintamumo, hidrologinių pokyčių, oro taršos ir ekosistemų atsako. Todėl ICP KM požeminio vandens lygio ir cheminių medžiagų

matavimai yra būtini vertinant miško ekosistemos atsparumą, atsigavimą po rūgštėjimo, maistinių medžiagų dinamiką ir tvarumą didėjant ekstremalioms klimato sąlygoms ir vykdomi kas met Lietuvos KM stočių baseinuose. 2025 m. gruntinio vandens tyrimai atnaujinti ir Dzūkijos KM stotyje.

Rezultatai

Aukštaitijos KMS dėl sumažėjusios rūgštaus dirvožemio vandens prietakos, išaugo gruntinio vandens pH ir šarmingumas. 2001, 2007-2011, 2020 ir 2021 metais gruntinio vandens rūgštingumas buvo mažiausias, sekliuosiuose gręžiniuose artimas neutraliam, o 2020 ir 2025 metais giliajame gręžinyje (Nr. 1) tapo šarminiu, pH=8. Išimtį sudaro sekliausias gręžinys, kriame vandens rūgštumas po 201-2021 m. Reikšmingai padidėjo, pH vertei sumažėjus nuo 7,3 iki 6,1. Likusiuose trijuose gręžiniuose tokio vandens rūgštingumo padidėjimo nebuvo registruota.



7.3 pav. Gruntinio vandens cheminė sudėtis (1 iš 18).

2023 ir 2025 metais Aukštaitijos IMS sekliausiame gręžinyje (LT01_101), bei 2023 antrajame gręžinyje gruntinio vandens pH buvo mažiausi per visą matavimų laikotarpį.

Žemaitijos KMS gruntinio vandens rūgštumo kaitos sekoje išskiriami laikotarpiai kai rūgštingumas mažėjo, pH reikšmėms siekiant maksimalių verčių viršyjančių 7,5 gylesniuose grežiniuose ir 7,3 sekliausiame (Nr. 1) – laikotarpiu tarp 2004-2011 m., ir kai rūgštingumas reikšmingai didėjo, pH vertėms sumažėjus iki 7,3 gylesniuose gręžiniuose ir iki 6,8 sekliausiame – laikotarpiu tarp 2015-2019. Neįprastai žemas gruntinio vandens pH buvo 2 gręžinyje, 2021 metais siekęs 6,1 vertę (**7.3 pav.** 1 iš 18). Paskutiniaisiais 2022-2025 m. gruntinio vandens rūgštingumas Žemaitijos gręžiniuose išlieka stabiliame lygmenyje: sekliausiame apie 7,1 o gylesniuose apie 7,5. Išskitinis rodiklis pH vertės augimas giliausiame gręžinyje (Nr. 4), pH vertei didėjant nuo 6,8 iki 7,6, gruntinių vandenų maitinimui dirvožemio vandeniu ir debitui intensyvėjant (**7.3 pav.** 1 iš 18).

2020 – 2025 m. laikotarpiu nustayta, kad Aukštaitijos KMS baseino sekliausiame gręžinyje vandens rūgštingumas didėja, kaip ir dirvožemio vandenyje, gilesniuose gręžiniuose stebimas atvirkščias procesas: pH reikšmė palaipsniui auga ir tik giliausiame gręžinyje pH reikšmė išlieka stabili. Žemaitijos KMS, kaip ir dirvožemio vandens, gruntinio vandens rūgštingumas yra sumažėjęs lyginant su 2017-2019 m. laikotarpiu.

Dzūkijos KMS baseine pakartoti tyrimai po 26 metų parodė, kad gruntinio vandens rūgštingumas 1998-1999 ir 2026 m. reikšmingai nesiskyrė. Sekliausiame gręžinyje pH vertė buvo arti 6,8, o gilesniuose gręžiniuosse virš 7,5.

Apibendrinus, gruntinio vandens rūgštingumo kaita parodė, kad gilesni dirvožemio ir gruntinio vandens horizontai pasižymi gerokai didesne chemine buferine geba negu aktyvioji dirvožemio šaknų zona. Nors dirvožemio vandenyje paskutiniaisiais metais registruotas rūgštėjimas, gruntiniame vandenyje daugumoje gręžinių vyravo priešinga tendencija – pH didėjo arba išliko stabilus. Tai rodo, kad infiltruojantis dirvožemio vanduo, prieš pasiekdamas gruntinį horizontą, sąveikauja su mineraline dirvožemio dalimi, kur vyksta rūgščių neutralizavimas, katijonų mainai ir karbonatinių bei silikatinių mineralų dūlėjimas. Dėl šių procesų gruntinis vanduo pasižymi gerokai didesniu rūgščių neutralizavimo potencialu negu dirvožemio vanduo (De Vries et al., 2014; ICP Forests, 2024).

Aukštaitijos KMS ryškiausiai išsiskiria tai, kad daugumoje gilesnių gręžinių gruntinio vandens pH palaipsniui didėjo, o giliausiame gręžinyje atskirais metais pasiekė net silpnai šarminę reakciją (pH ≈ 8). Tokia kaita leidžia manyti, kad didėjant dirvožemio vandens infiltracijai ir gruntinio vandens papildymui, stiprėjo vandens sąveika su mineraliniu gruntu, todėl į gruntinį vandenį patekę rūgštūs infiltraciniai vandenys buvo efektyviai neutralizuojami. Tuo tarpu sekliausiame gręžinyje po

2020 m. nustatytas pH mažėjimas iki 6,1 gerai sutampa su tuo pačiu laikotarpiu registruotu dirvožemio vandens rūgštėjimu. Tai rodo, kad seklus gruntinis vanduo daug greičiau reaguoja į šaknų zonoje vykstančius procesus ir gali būti laikomas jautria pereinamąja grandimi tarp dirvožemio ir gilesnių požeminio vandens horizontų.

Žemaitijos KMS gruntinio vandens pH dinamika buvo stabilesnė. Po 2015–2019 m. rūgštėjimo paskutiniaisiais metais daugumoje gręžinių pH stabilizavosi, o giliausiame gręžinyje net padidėjo iki 7,6. Tai leidžia manyti, kad gilieji gruntiniai vandenys šiame baseine taip pat pasižymi pakankamai didele buferine geba ir nėra tiesiogiai veikiami trumpalaikių dirvožemio vandens rūgštėjimo epizodų. Tuo pačiu tai rodo, kad gruntinio vandens cheminę sudėtį vis labiau reguliuoja ne momentinė atmosferinių iškritų įtaka, bet ilgalaikė vandens cirkuliacija, mineralų dūlėjimas ir vandeningųjų sluoksnių geocheminės savybės.

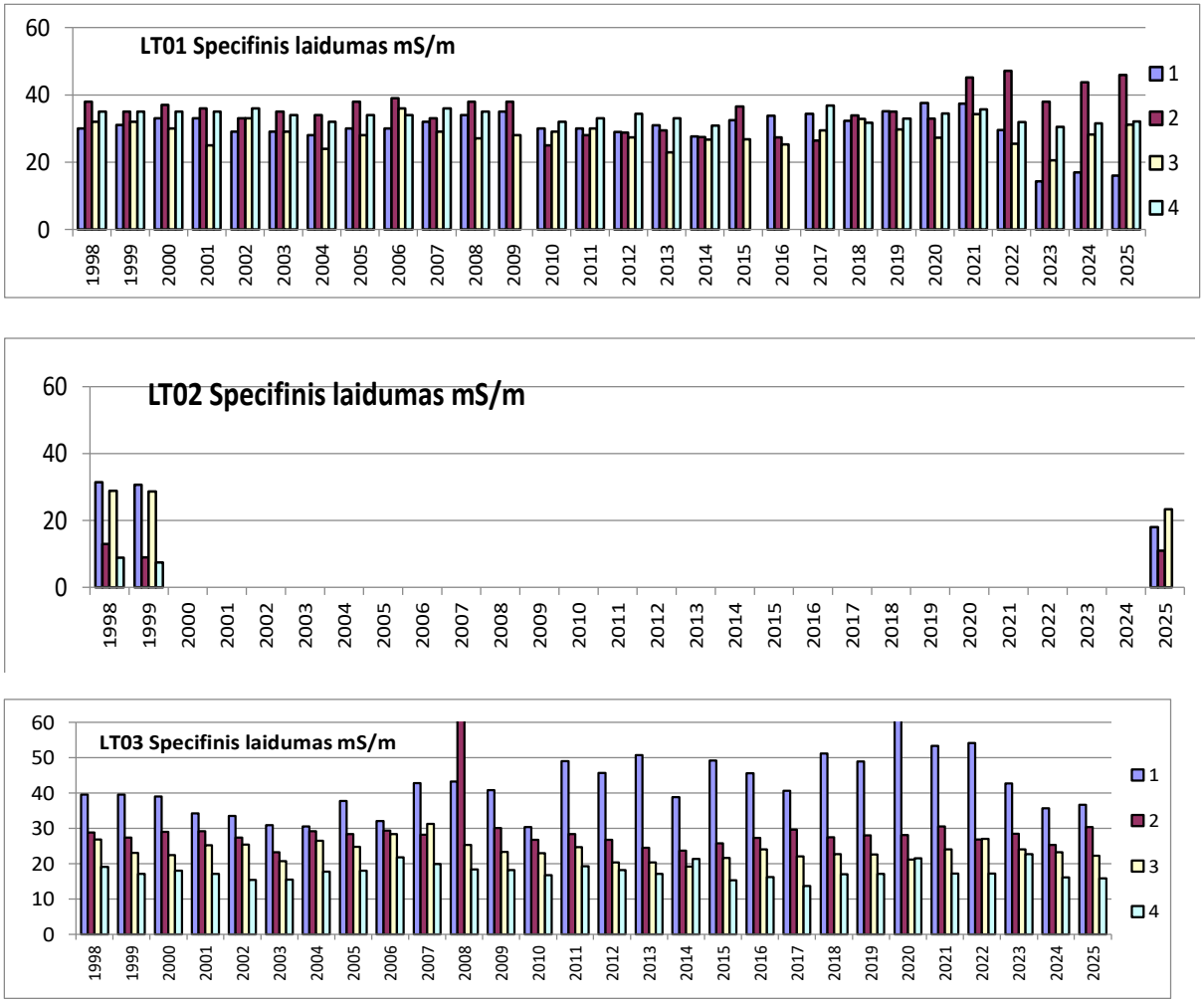
Dzūkijos KMS pakartotiniai tyrimai po 26 metų parodė itin didelį gruntinio vandens cheminės sistemos stabilumą. Panašios pH reikšmės 1998–1999 ir 2026 m. rodo, kad šiame baseine gruntinio vandens rūgštingumas išlieka vienu konservatyviausių hidrocheminių rodiklių. Toks stabilumas leidžia daryti prielaidą, kad ilgalaikiai klimato kaitos ir atmosferinių iškritų pokyčiai kol kas neviršijo šios hidrogeologinės sistemos buferinės gebos.

Tai rodo, kad tiriamų hemiborealinių miškų baseinuose gruntinis vanduo šiuo metu dar išlaiko pakankamą geocheminę buferinę gebą neutralizuoti iš dirvožemio patenkančius rūgščius infiltracinius vandenis. Tačiau sekliojo gruntinio vandens rūgštėjimo požymiai Aukštaitijos KMS leidžia manyti, kad ši buferinė sistema gali palaipsniui silpnėti, jei klimato kaitos sąlygomis intensyvės vandens infiltracija ir dirvožemio rūgštėjimo procesai.

Todėl galima teigti, kad ***gruntinio vandens rūgštingumo kaita atskleidžia didelį hemiborealinių miško baseinų požeminės hidrogeocheminės sistemos atsparumą ilgalaikiams aplinkos pokyčiams. Tuo tarpu sekliausi gruntiniai vandenys išlieka jautriausia grandimi, ankščiausiai reaguojančia į dirvožemio vandens rūgštėjimą ir hidrologinio režimo pokyčius. Todėl būtent sekliojo gruntinio vandens cheminė sudėtis gali būti vienas ankstyviausių klimato kaitos poveikio indikatorius miško ekosistemose.***

Dėl nevienodų gruntinio vandens mitybos ypatybių ir debito kaitos specifinis laidumas stebėjimo laikotarpiu Aukštaitijos ir Žemaitijos KMS turi skirtingas tendencijas; Aukštaitijos stotyje išliko stabilus ar kiek tai mažėjo (iki 2017-2019), 2021 m. pasiekė savo didžiausias reikšmes per visą tiriamąjį laikotarpį ir paskutiniais siais metais reikšmingai išsiskyrė: sekliausiame gręžinyje reikšmingai sumažėjo nuo 38 iki 17 mS/m., antrame padidėjo ir laikėsi stabiliame lygmenyje apie 40 mS/m., giliausiuose gręžiniuose taip pat turėjo tendencija mažėti, maždaug nuo 36 iki 31 mS/m.

Žemaitijos KMS baseine gruntinio vandens SEL buvo reikišmingiau sumažėjęs 2012-2014 metų laikotarpiu. Reikšmingas padidėjimas registruotas 2020-2022 m., o paskutiniaisiais metais sekliausiame gręžinyje SEL reikšmingai sumažėjo, kai likusiuose išliko stabilus ar net didėjo (7.3 pav. 2 iš 18).



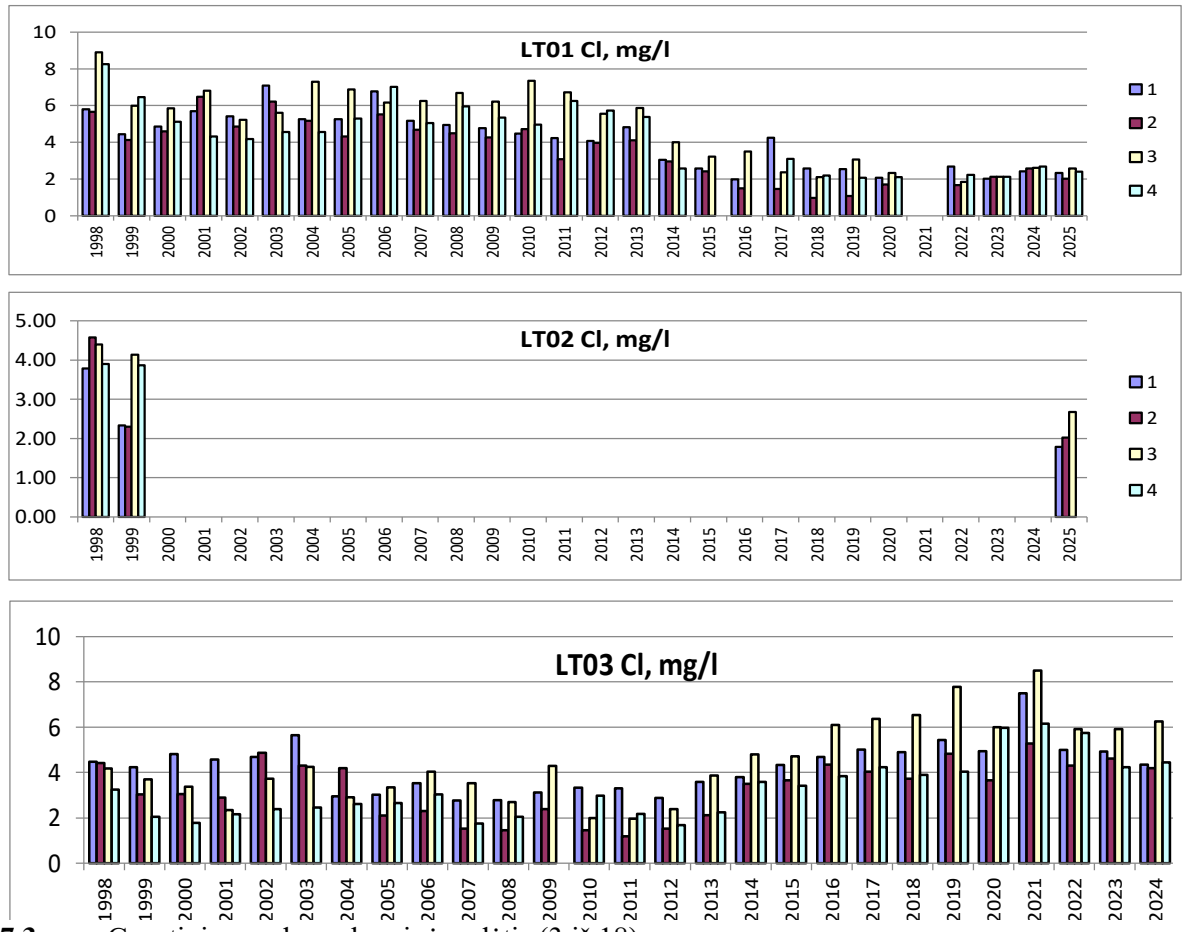
7.3 pav. Gruntinio vandens cheminė sudėtis (2 iš 18).

Išskirtinis laikotarpis : 2012-2014 m., kai specifinio laidumo reikšmės buvo artimos minimaliom, nustatytom per visą tiriamąjį laikotarpį, ***2020-2022 m*** . pasiekia savo maksimalias reikšmes, o 2023-2025 m. kaitos pobūdis išsiuskiria priklausomai nuo gruntinio vandens lygio.

Apibendrinant galima teigti, kad specifinio elektrinio laidumo kaita patvirtina didėjantį hidrologinio režimo vaidmenį formuojant gruntinio vandens cheminę sudėtį. Seklieji gruntiniai vandenys tampa jautriausiu klimato kaitos ir infiltracijos intensyvumo indikatoriumi, o gilesni vandeningieji sluoksniai išlieka stabilesni dėl didesnės geocheminės buferinės gebos ir ilgesnio vandens cirkuliacijos ciklo.

Analogiškai kito ir chloro koncentracijos gruntiniuose vandenyse. Jei Aukštaitijos KMS 2014-2020 m. gruntiniame vandenyje registruojama iki 2-3 kartų mažėjančios Cl koncentracija negu tyrimų pradžioje, tai priešingai, Žemaitijos KMS gruntiniame vandenyje Cl koncentracijos tokiu pat intensyvumu didėjo. Paskutiniuoju 2022-2025 m. laikotarpiu Cl koncetracija Aukštaitijos IMS išlieka minimaliame lygmenyje visuose gręžiniuose, apie 2 mg/l, o Žemaitijos IMS 2021 metais - ypač išaugo ir pasiekė msaksimalią reikšmę – viršijo 8 mg/l. 2022-2025 metais Cl koncentracijos mažėja.

Reikšmingas pokytis galintis turėti reikšmingos įtakos miško ekosistemų tvarumui – Cl koncentracijų kaita gruntiniuose vandenyse: nuo tyrimų pradžios iki 2013-2014 metų Aukštaitijos KMS koncentracijos svyravo apie 6, po šių metų iki 2025 sumažėjo ir svyruoja apie 2 mg/l; Žemaitijos KMS baseine gruntinio vandens Cl koncentracijos iki nustatyto laikotarpio svyravo apie 4, paskutiniuoju laikotarpiu padidėjo iki 6-8 mg/l, nors paskutiniaisiais metais turi tendenciją mažėti. ***Išskirtiniai metai tokiu būdu tapo 2013-2014 m. laikotarpis*** (**7.3 pav.** 3 iš 18).



7.3 pav. Gruntinio vandens cheminė sudėtis (3 iš 18).

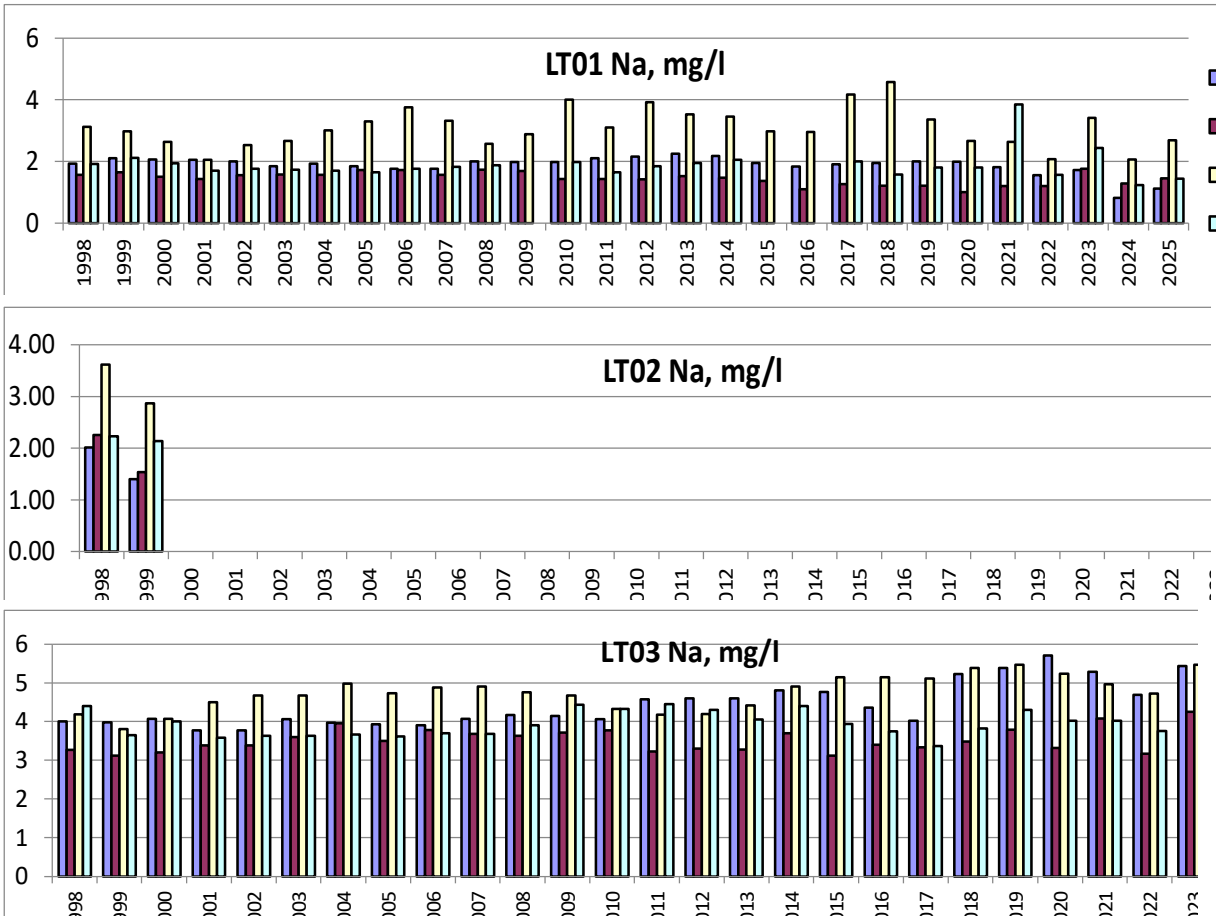
Dzūkijos KMS baseine Cl koncentracijos gruntiniuose vandenyse reikšmingai sumažėjo maždaug nuo 4 mg/l 1998-99 iki 2 mg/l 2025m.

Apibendrinus, gruntinio vandens chloridų (Cl^-) koncentracijų kaita atskleidė skirtingą Lietuvos hemiborealinių miško baseinų hidrogeocheminį atsaką į ilgalaikius aplinkos pokyčius. Chloridai laikomi vienais konservatyviausių požeminio vandens hidrocheminių rodiklių, nes natūraliomis sąlygomis jie beveik nedalyvauja biologiniuose procesuose, nėra reikšmingai sorbuojami dirvožemyje, todėl jų koncentracijas daugiausia lemia atmosferinės iškritos, vandens infiltracijos intensyvumas, vandens cirkuliacijos trukmė ir regioninės geografinės sąlygos (Appelo & Postma, 2005; Hem, 1985; Kaushal et al., 2023).

Išskirtinis visų stočių lūžio laikotarpis buvo 2013–2014 m. Po šio laikotarpio Aukštaitijos ir Dzūkijos KMS chloridų koncentracijos pradėjo nuosekliai mažėti, tuo tarpu Žemaitijos KMS – didėti. Toks skirtingas hidrocheminis atsakas rodo, kad gruntinio vandens cheminę sudėtį vis labiau lemia ne vien vietinės dirvožemio savybės, bet regioniniai hidroklimatiniai procesai, geografinė padėtis ir požeminio vandens maitinimo ypatumai.

Nustatytos chloridų koncentracijos nekelia tiesioginės grėsmės miško ekosistemoms, nes jos yra gerokai mažesnės už fitotoksiškumo ribas. Tačiau chloridų dinamika turi didelę diagnostinę reikšmę. Kadangi chloridai gruntinio vandens sistemoje elgiasi beveik konservatyviai, jų koncentracijų pokyčiai patikimai atspindi gruntinio vandens papildymo pobūdį, infiltracijos intensyvumą ir ilgalaikius vandens apytakos pokyčius. Todėl chloridų ilgalaikė stebėsena gali būti laikoma vienu jautriausių klimato kaitos poveikio požeminio vandens režimui indikatorių.

Apibendrinant galima teigti, kad ***chloridų koncentracijų kaita patvirtina dviejų skirtingų hidrogeocheminių regionų formavimąsi Lietuvos hemiborealiniuose miškuose. Aukštaitijos ir Dzūkijos KMS vyraujantis chloridų koncentracijų mažėjimas rodo didėjančią mažos mineralizacijos infiltracinių vandenų įtaką požeminio vandens cheminei sudėčiai, tuo tarpu Žemaitijos KMS didesnės chloridų koncentracijos atspindi stipresnę Baltijos jūros aerozolių, vakarinių oro masių pernašos ir regioninių hidroklimatinių sąlygų įtaką. Šis dėsningumas rodo, kad klimato kaitos sąlygomis gruntinio vandens cheminė evoliucija Lietuvoje tampa vis labiau regioniškai diferencijuota.***



7.3 pav. Gruntinio vandens cheminė sudėtis (8 iš 18).

Na koncentracijų kaitoje nustatytos panašios tendencijos. Aukštaitijos KMS baseine didžiausios Na koncentracijų reikšmės nustatytos 2011-2014 m. laikotarpiu. Paskutiniuoju laikotarpiu stebimas nereikšmingas koncentracijų sumažėjimas visuose gruntinio vandens lygiuose. 2024 m. Na koncentracijos buvo sumažėjusios iki mažiausių reikšmių per visą tiriamąjį laikotarpį ir priklausomai nuo gylio siekė nuo 0,8 iki 2,0 mg/l.

Žemaitijos KMS Na koncentracijos taip pat buvo išaugusios 2010-2014 metais, 2020 m. pasiekė savo didžiausias reikšmes per visą tiriamąjį laikotarpį ir tik paskutiniaisiais metais 2024-2025 nukrito iki mažiausių (**7.3 pav.** 8 iš 18). Tokiu būdu paskutiniaisiais metais Na koncentracijos abiejose stotyje turėjo tendenciją mažėti, kaip ir Dzūkijos KMS baseine, kur Na koncentracijos reikšmingai sumažėjo.

Palyginus Na koncentracijas tarp stočių, didžiausios apie 4 mg/l nustatytos Žemaitijos KMS baseine, reikšmingai mažesnės – apie 2 mg/l Aukštaitijos ir dzūkijos KMS baseinuose. Tai Baltijos jūros įtaka tokiai Na teritorinei sklaidai.

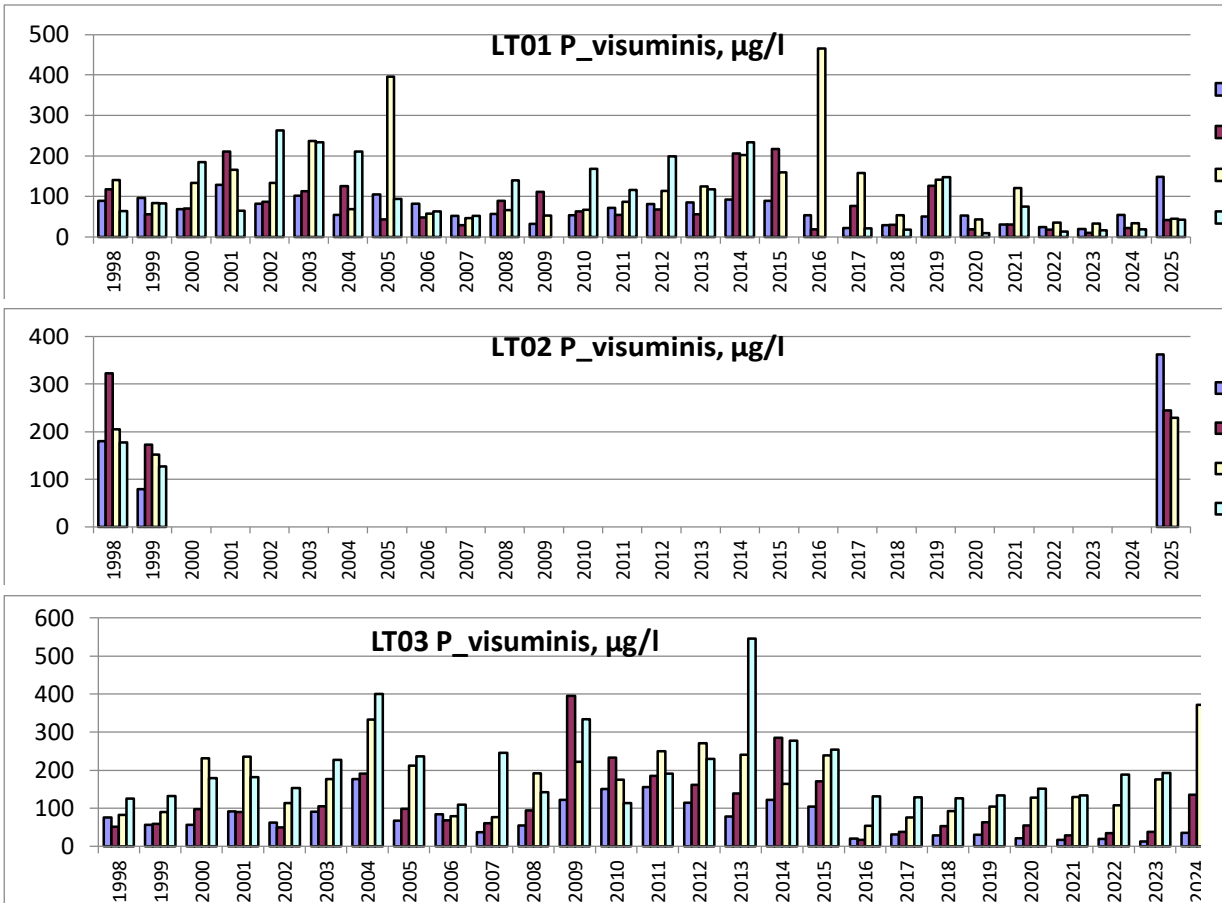
Išskirtinis laikotarpis : 2013-2014 m., kai šio parametro reikšmės keitė pobūdį

Apibendrinus, gruntinio vandens natrio (Na^+) koncentracijų kaita buvo panaši į chloridų dinamiką ir patvirtino, kad šio elemento pasiskirstymą pirmiausia reguliuoja hidrogeologiniai bei atmosferiniai procesai. Natris gruntiniame vandenyje laikomas santykinai konservatyviu katijonu, kurio koncentracijoms didžiausią įtaką daro atmosferinės iškritos, jūriniai aerozoliai, vandens ir mineralinio pagrindo sąveika bei gruntinio vandens papildymo intensyvumas (Appelo & Postma, 2005; Hem, 1985; Kaushal et al., 2023).

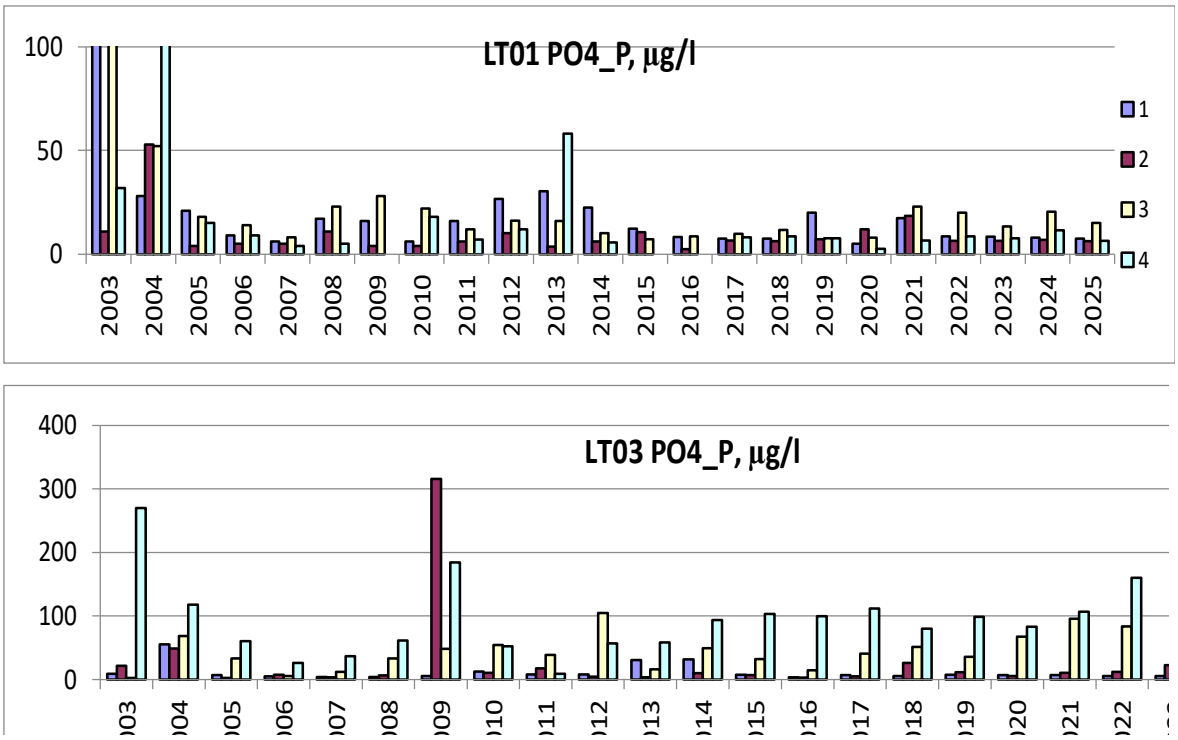
Tokie teritoriniai skirtumai gerai sutampa su chloridų pasiskirstymu ir rodo stipresnę Baltijos jūros jūrinių aerozolių bei vakarinių oro masių pernašos įtaką Žemaitijos regionui. Dėl artimesnės geografinės padėties Baltijos jūrai į gruntinio vandens sistemą patenka didesni Na ir Cl kiekiai, kurie ilgalaikėje perspektyvoje formuoja didesnį šių konservatyvių jonų foną. Tuo tarpu Aukštaitijos ir Dzūkijos KMS gruntinio vandens cheminę sudėtį labiau lemia kontinentinės klimato sąlygos ir mažesnis jūrinių aerozolių indėlis.

Nustatytos natrio koncentracijos yra būdingos natūralioms miško ekosistemoms ir nekelia tiesioginės grėsmės augalijai ar gruntinio vandens kokybei. Tačiau jų ilgalaikė dinamika turi svarbią diagnostinę reikšmę. Kadangi natris gruntiniame vandenyje mažai dalyvauja biologiniuose procesuose, jo koncentracijų pokyčiai patikimai atspindi vandens kilmės, infiltracijos intensyvumo ir regioninės atmosferinės pernašos pokyčius. Todėl Na, kartu su chloridais, gali būti laikomas vienu patikimiausių ilgalaikių hidroklimatinės kaitos indikatorių hemiborealinių miškų požeminio vandens sistemose.

Todėl galima teigti, kad ***natrio koncentracijų mažėjimas Aukštaitijos ir Dzūkijos KMS bei pastarųjų metų mažėjimo tendencija Žemaitijos KMS rodo didėjančią mažos mineralizacijos infiltracinių vandenų įtaką gruntinio vandens cheminei sudėčiai. Tuo tarpu nuosekliai didesnės Na koncentracijos Žemaitijos KMS patvirtina ilgalaikį Baltijos jūros aerozolių ir vakarinių oro masių pernašos poveikį šio regiono požeminio vandens hidrochemijai.***



7.3 pav. Gruntinio vandens cheminė sudėtis (4 iš 18).



7.3 pav. Gruntinio vandens cheminė sudėtis (5 iš 18).

Visuminio fosforo koncentracija abiejose KMS baseinuose kito sinchroniškai: pirmas koncentracijų padidėjimo laikotarpis registruotas tyrimų prodžioje – 2003-2005 m. laikotarpiu. Antrasis padiėjimo laikotarpis registruojamas 2014-2015 m. Koncentracijos šiais laikotarpiais Aukštaitijos KMS svyravo iki 200 µg/l, o Žemaitijos KMS baseine apie 300 µg/l. Paskutiniuoju laikotarpiu nuo 2017 m. Aukštaitijos KMS baseine visuminio P koncentracijos sumažėjo iki minimaliausių reikšmių 2023-2024 m., siekiančių tik apie 10-30 µg/l. Žemaitijos KMS šiuo laikotarpiu registruojamas visuminio P koncentracijų augimas visuose gyliuose ir upač nuo 2022 m., kai 2024 m. pasiekė vienas didžiausių reikšmių pere visą tiriamąjį laikotarpį, kas buvo siejama su padidėjusiu gruntinio vandens debitu ir oro temperatūra. Dzūkijos KMS baseine visuminio P koncentracijos turėjo tendencija padidėti, ypač pačiame sekliausiame gręžinyje.

Fosfatų koncentracijų gruntiniuose vandenyse kaitoje nuo 2012-2014 m. Aukštaitijos KMS stebimas reikšmingas sumažėjims, kuris išliko per visą likusį tiriamąjį laikotarpį iki 2025 m. kai koncentracijos svyravo tik apie 10 µg/l lygį ir tik trečiajame gręžinyje iki 20 µg/l .

Žemaitijos KMS baseine fosfatų koncentracijų pakankamai reikšmingas augimas registruojamas nuo 2014m. Kai 2024-2025 metais registruotos vienos didžiausių reikšmių.

Aukštaitijos KMS visų gręžinių bendras bruožas – visuminio P ir fosfatų koncentacijos gruntiniuose vandenyse 2015-2025 m. laikotarpiu buvo ženkliai mažesnės negu iki tol.

Dzūkijos IMS 1998-1999 metais fosfatų koncentracija nebuvo matuojama, o 2025 metais buvo 32,48; 95,29 ir 79,85 µg/l, t.y., daugiau, negu 2025 metais Aukštaitijos, bet mažiau negu Žemaitijos IMS (3 gręžinyje).

Išskirtinis laikotarpis : 2013-2014 m., kai šių parametro reikšmės keitė pobūdį.

Apibendrinus, gruntinio vandens visuminio fosforo (P) ir fosfatų (PO_4^{3-}) koncentracijų kaita atskleidė esminius skirtumus tarp Aukštaitijos ir Žemaitijos kompleksinio monitoringo stočių. Skirtingai nei chloridai ar natris, fosforas gruntiniame vandenyje nėra konservatyvus elementas. Jo judrumą reguliuoja fosfatų sorbcija į geležies ir aliuminio hidroksidus, organinių medžiagų mineralizacija, mikrobiologiniai procesai, redokso sąlygos bei gruntinio vandens debitas. Todėl ilgalaikiai fosforo koncentracijų pokyčiai atspindi ne vien vandens infiltracijos intensyvumą, bet ir visos dirvožemio–gruntinio vandens sistemos biogeocheminius procesus (Jarvie et al., 2013; Haygarth et al., 2014; Bol et al., 2016).

Visuminio fosforo koncentracijos abiejose KMS kito panašiai. Nustatyta ilgalaikė dinamika rodo, kad fosforo junginiai Aukštaitijos KMS tampa vis mažiau judrūs gruntinio vandens sistemoje. Tikėtina, kad tai susiję su efektyvesniu fosfatų sulaikymu mineraliniame dirvožemyje, didesne jų sorbcija arba intensyvesniu biologiniu pasisavinimu.

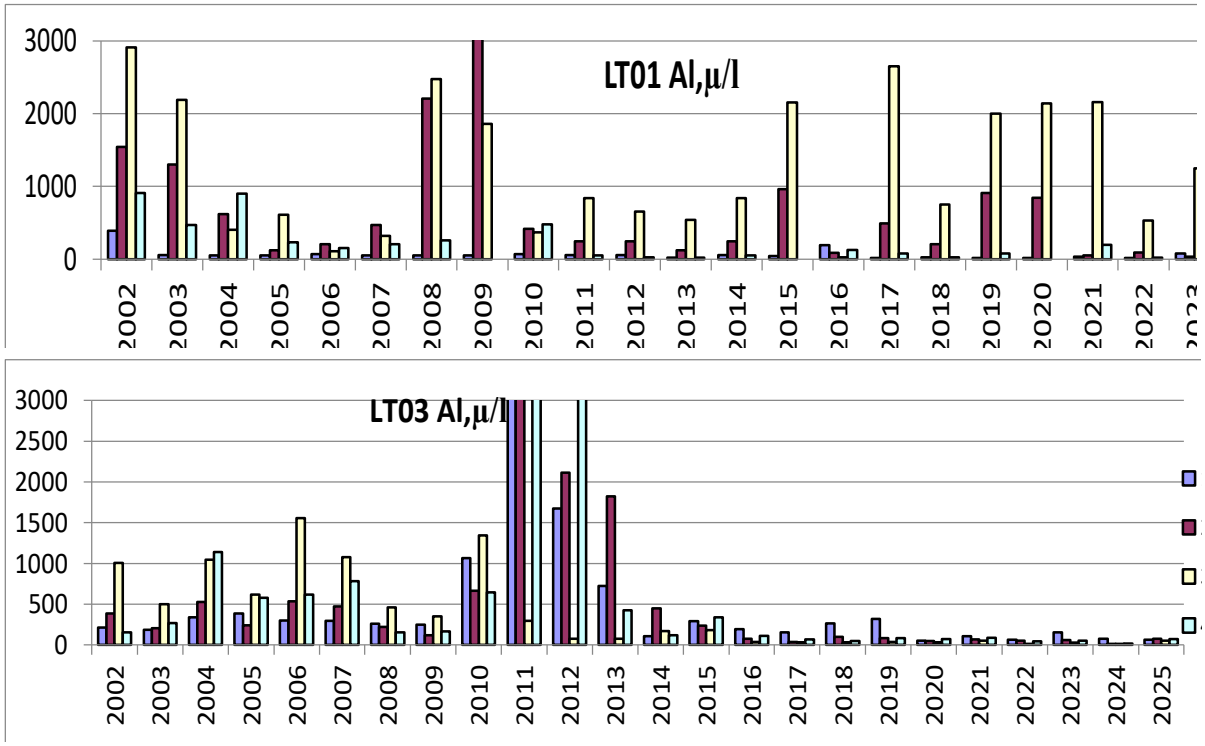
Žemaitijos KMS po nustatyta priešinga tendencija. Koncentracijų padidėjimas sutapo su didesniu gruntinio vandens debitu ir aukštesne oro temperatūra, todėl tikėtina, kad intensyvėjanti vandens cirkuliacija bei spartesnė organinės medžiagos transformacija padidino fosforo junginių mobilizaciją ir jų patekimą į gruntinius vandenis. Vis dėlto šiai hipotezei patvirtinti reikėtų papildomai įvertinti geležies, aliuminio, ištirpusios organinės anglies bei redokso sąlygų kaitą.

Dzūkijos KMS pakartotiniai tyrimai parodė, kad visuminio fosforo koncentracijos taip pat turėjo tendenciją didėti, ypač sekliausiame gręžinyje. Nustatyta, kad Dzūkijos KMS užima tarpinę padėtį tarp rytinės Lietuvos mažo fosforo judrumo ir vakarų Lietuvos aktyvesnės fosforo migracijos.

Išskirtiniu lūžio laikotarpiu tapo 2013–2014 m., kai fosforo junginių kaita visose stotyse pakeitė pobūdį. Aukštaitijos KMS nuo šio laikotarpio prasidėjo ilgalaikis visuminio fosforo ir fosfatų koncentracijų mažėjimas, tuo tarpu Žemaitijos KMS registruojamas nuoseklus jų didėjimas. Šis dėsningumas rodo, kad klimato kaitos sąlygomis gruntinio vandens fosforo ciklą vis labiau reguliuoja ne vien atmosferinės iškritos ar vandens infiltracija, bet ir vietinės biogeocheminės sąlygos, organinės medžiagos skaidymasis bei vandens ir dirvožemio mineralinės dalies sąveika.

Nustatyta, kad Aukštaitijos KMS gruntinio vandens fosforo koncentracijų mažėjimas gali rodyti efektyvesnį fosforo sulaikymą dirvožemyje ir mažesnius jo nuostolius iš baseino. Tuo tarpu Žemaitijos KMS didėjančios fosforo koncentracijos gali rodyti intensyvėjančią fosforo mobilizaciją ir didesnį jo eksportą iš dirvožemio į gruntinius vandenis. Ar šie procesai taps ilgalaike nauja tendencija, parodys tolesni kompleksinio monitoringo tyrimai.

Apibendrinant galima teigti, kad fosforo junginių kaita patvirtina skirtingą Lietuvos miško baseinų biogeocheminę raidą. Aukštaitijos KMS formuojasi vis efektyvesnis fosforo sulaikymas dirvožemio–gruntinio vandens sistemoje, tuo tarpu Žemaitijos KMS didėja fosforo judrumas, tikriausiai susijęs su intensyvėjančia vandens apytaka ir organinės medžiagos transformacija. Šie skirtumai rodo, kad ateityje fosforo ciklas gali tapti vienu jautriausių klimato kaitos poveikio indikatorių požeminio vandens sistemose.



7.3 pav. Gruntinio vandens cheminė sudėtis (6 iš 18).

Al koncentracijos Žemaitijos KMS baseino gruntiniuose vandenyse 2011-2013 m. pasiekė savo maksimalias reikšmes per visą tiriamąjį laikotartpį, viršijant 2011 m. net 5 mg/l ribą. 2014-2025 m. Al koncentracijos ypač reikšmingai sumažėjo ir pasiekė mažiausias reikšmes 2024-2025 m. per visą tiriamąjį laikotarpį – apie 60-70 µg/l**.** Lyginant su tyrimų pradžia, aliuminio koncentracija Žemaitijos KMS gruntiniuose vandenyse 2025 m. sumažėjo daugiau negu 4 kartus, o lyginant su 2010-2013 m. laikotarpio rezultatais daugiau nei 50 kartų.

Priešingai, Aukštaitijos KMS Al koncentracijų kaitoje aiškesnių, galinčių turėti reikšmingos įtakos miško ekosistemų būklei nenustatyta. Padidėjimai koncentracijų nustatyti 2002-2003, 2008-2009 ir 2017-2021 m. laikotarpiu ypač trečiajame gręžinyje, kuri buvo atnaujintas. 2024-2025 m, kaip ir žemaitijos KMS baseine čia nustatytos mažiausios Al koncentracijų reikšmės per visą tiriamąjį laikotarpį – vos 40-50 µg/l**.**

Al gręžinių vandenyje daugiausia buvo sausringiausiais laikotarpiais Aukštaitijos IMS 2002, 2008 metais 2 ir 3 gręžiniuose, o Žemaitijos IMS – 2011-2013 metais (**7.3 pav.** 6 iš 18).

Dzūkijos IMS 1998-1999 metais aliuminio koncentracija nebuvo matuojama, o 2025 metais buvo 572.86; 214.71 ir 107.71 µg/l, t.y., daugiau, negu 2025 metais Aukštaitijos ir Žemaitijos IMS.

Išskirtinis laikotarpis : 2013-2014 m., kai šio parametro reikšmės keitė pobūdį.

Apibendrinus rezultatus, gruntinio vandens aliuminio (Al) koncentracijų kaita atskleidė vieną ryškiausių ilgalaikių hidrogeocheminių pokyčių visose tirtose kompleksinio monitoringo stotyse. Aliuminis yra vienas jautriausių dirvožemio ir gruntinio vandens rūgštėjimo indikatorių, kurio judrumą pirmiausia reguliuoja vandens pH, organinių medžiagų kompleksavimas, geležies ir aliuminio hidroksidų tirpumas bei vandens–uolienų sąveika. Rūgščioje terpėje Al tirpumas didėja, o neutralėjant vandeniui jis linkęs būti sorbuojamas mineralinėje dirvožemio dalyje (Driscoll & Schecher, 1990; De Vries et al., 2014; Lawrence et al., 2015).

Ryškiausi pokyčiai nustatyti Žemaitijos KMS gruntiniuose vandenyse. Didžiausios Al koncentracijos registruotos 2011–2013 m., kai kai kuriuose gręžiniuose jos viršijo net 5 mg l^{-1}., kurios vėliau sumažėjo iki minamalių koncentracijų. Toks sumažėjimas rodo esminį gruntinio vandens geocheminės sistemos persitvarkymą ir ženkliai sumažėjusį tirpaus aliuminio judrumą.

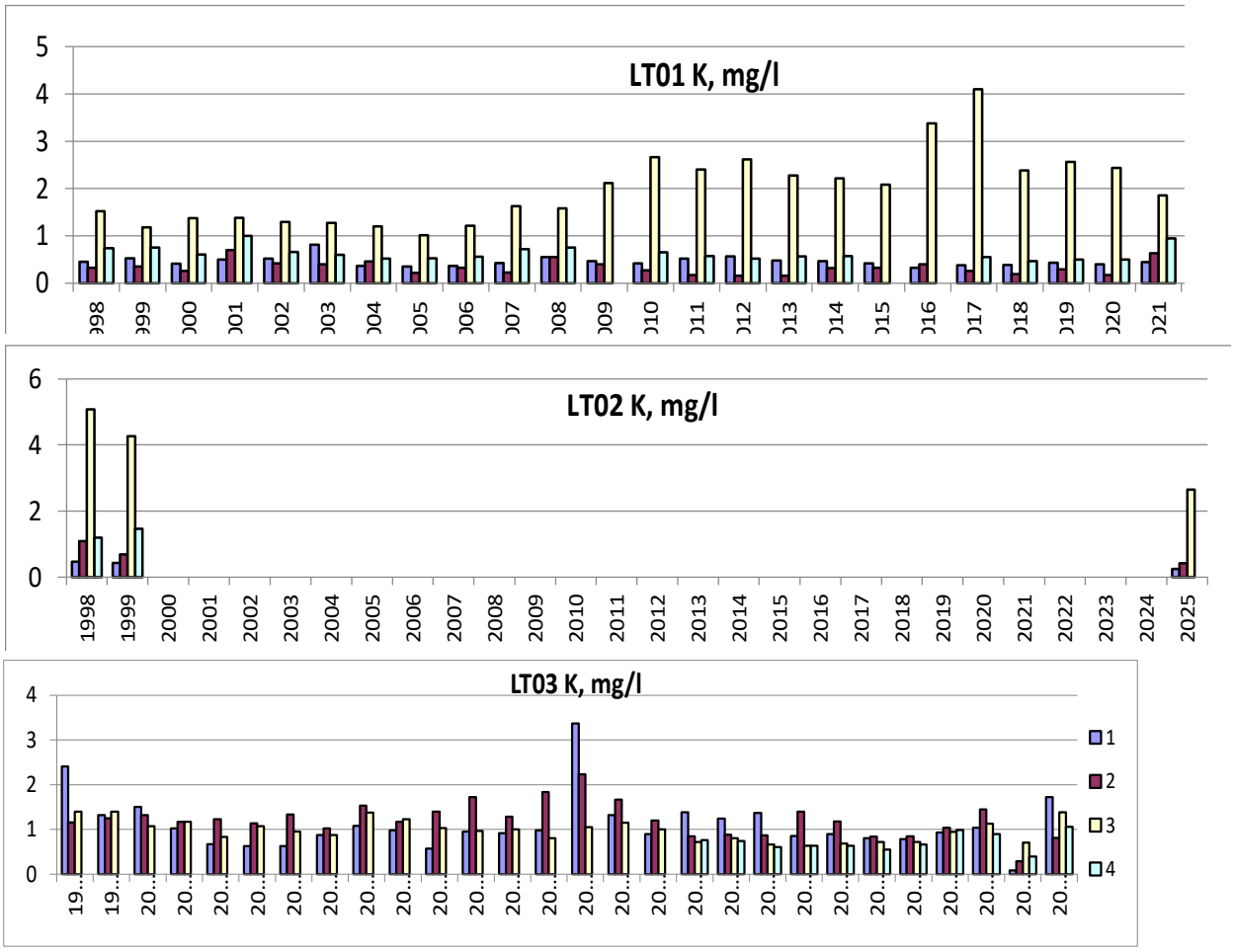
Aukštaitijos KMS aiškios ilgalaikės Al koncentracijų kaitos tendencijos nenustatyta. Tai rodo, kad nepriklausomai nuo skirtingų hidrogeologinių sąlygų abiejose stotyse ilgalaikėje perspektyvoje mažėjo aliuminio mobilumas gruntinio vandens sistemoje.

Didžiausios Al koncentracijos abiejose stotyse buvo registruojamos sausringais laikotarpiais – Aukštaitijos KMS 2002 ir 2008 m., o Žemaitijos KMS 2011–2013 m. Tikėtina, kad sausros metu sumažėjęs gruntinio vandens papildymas ir mažesnis praskiedimo efektas didino ištirpusio aliuminio koncentracijas. Vėlesnis kritulių kiekio didėjimas ir intensyvėjanti gruntinio vandens infiltracija galėjo skatinti gruntinio vandens neutralėjimą bei mažinti tirpaus aliuminio koncentracijas.

Dzūkijos KMS kadangi ankstesnių Al matavimų šiame baseine nėra, ilgalaikių tendencijų įvertinti negalima, tačiau gauti rezultatai rodo, kad Al Dzūkijos gruntiniuose vandenyse yra didesnis ir tikriausiai labiau priklauso nuo vietinių hidrogeologinių bei litologinių sąlygų.

Nustatyti pokyčiai vertintini kaip palankūs miško ekosistemoms. Tirpaus aliuminio koncentracijų mažėjimas mažina potencialų toksiškumą medžių šaknims ir dirvožemio mikroorganizmams, silpnina konkurenciją su baziniais katijonais ir sudaro palankesnes sąlygas maisto medžiagų įsisavinimui. Todėl ilgalaikis Al koncentracijų mažėjimas gali būti laikomas vienu svarbiausių gruntinio vandens cheminio atsikūrimo požymių Lietuvos miškų ekosistemose.

Apibendrinant galima teigti, kad aliuminio koncentracijų kaita patvirtina, jog po 2013–2014 m. gruntinio vandens hidrogeocheminėje sistemoje prasidėjo naujas vystymosi etapas, kuriam būdingas ryškus tirpaus aliuminio judrumo mažėjimas. Šis procesas tikėtina susijęs su klimato kaitos nulemtu hidrologinio režimo persitvarkymu, stiprėjančia gruntinio vandens infiltracija ir didesne požeminės sistemos geochemine buferine geba.



7.3 pav. Gruntinio vandens cheminė sudėtis (7 iš 18).

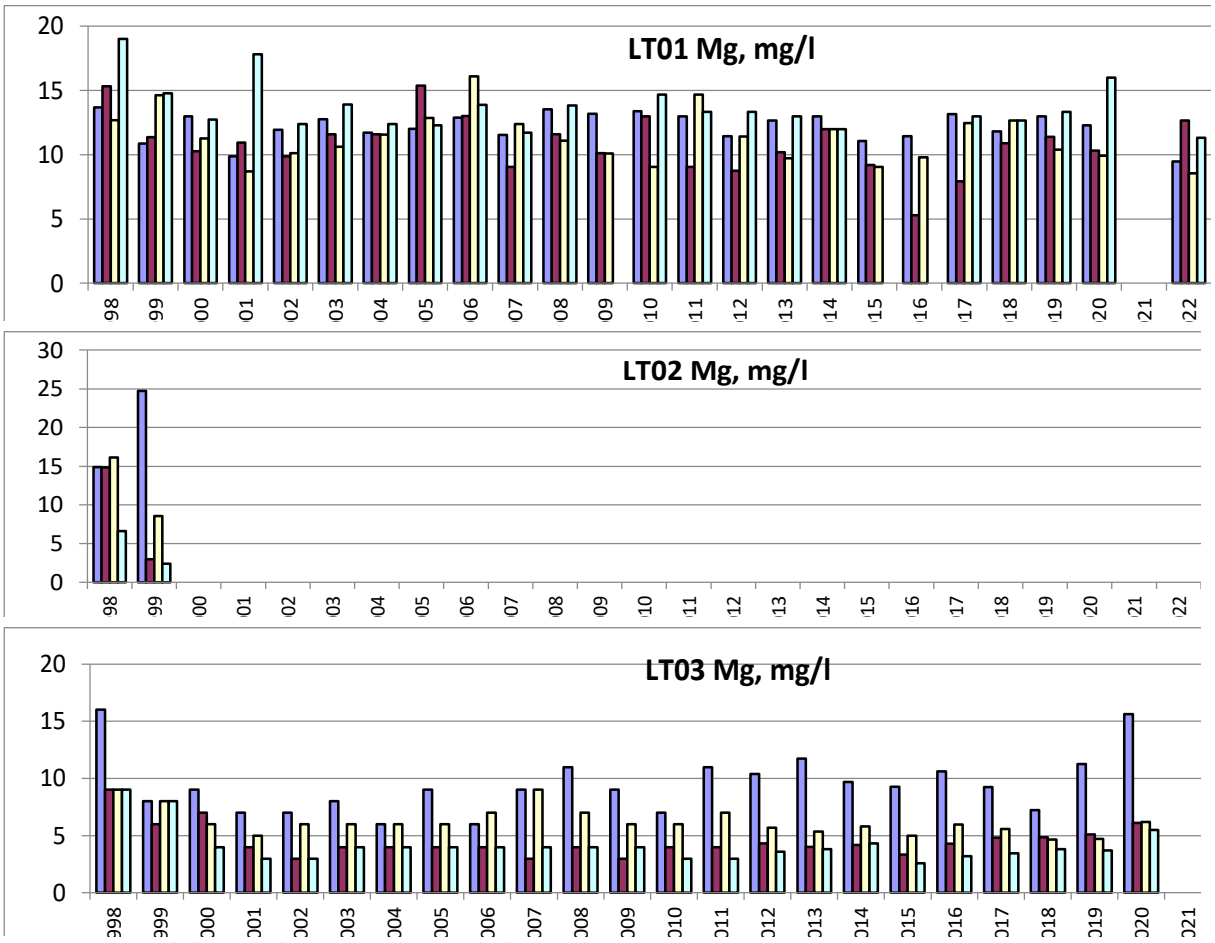
K koncentracijų kaitoje reikšmingos tendencijos iki 2021 m. nenustatyta. Išimtį sudaro trečio gręžinio duomenys, pagal kuriuos K koncentracija vandenyje didėjo iki 2017 m., o po jų iki paskutiniųjų mažėjo, 2024 m. pasiekęs savo minimalią reikšmę per visą tiriamąjį laikotarpį. Nepaisant įio fakto paskutiniuoju laikotarpiu 2021-2025 m. stebimas nežymus K koncentracijų gruntiniuose vandenyse didėjimas.

Žemaitijos KMS didžiausios K koncentracijos nustatytos 2011-2013 m. laikotarpiu. Po šių metų K koncentracijos praktiškai išlieka stabilio ir tik 2023-2025 stebimas jų padidėjimas.

Dzūkijos KMS palyginus 1998 ir 2025 m. K koncentracijas gruntiniuose vandenyse matyti, kad jos yra pakankamai reikšmingai sumažėjusiosir sekliausiuose gręžiniuose siekia vos 0,2-0,4 mg/l.

Palyginus tarp stočių, mažiausiomis koncentreacijomis išsiskiria Dzūkijos KMS baseinas, o likusiose KMS K koncentracijos svyruoja apie 1 mgt/l ir reikšmingai nesiskiria.

Išskirtinis laikotarpis : 2012 stebimas tik Žemaitijos KMS.

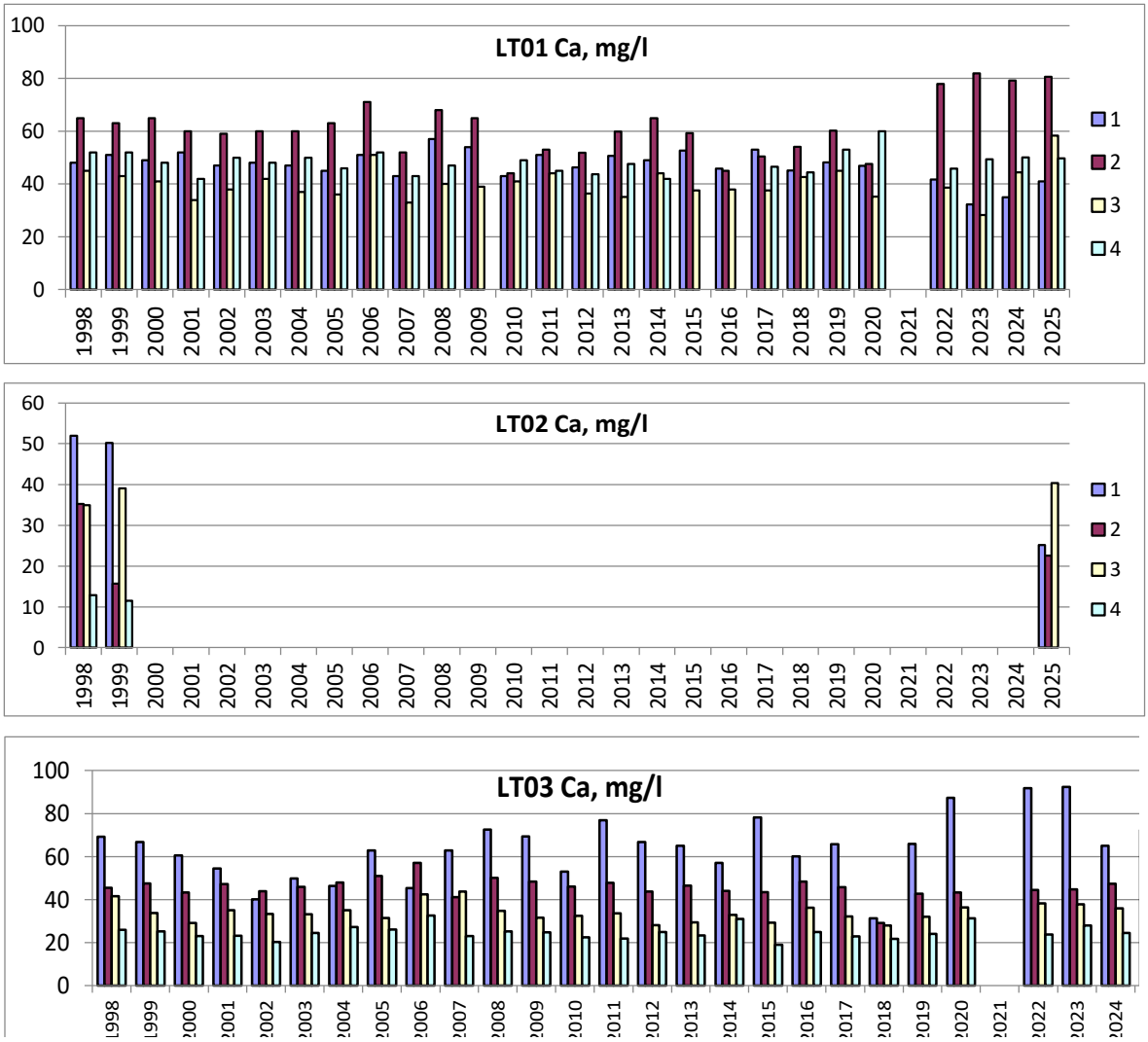


7.3 pav. Gruntinio vandens cheminė sudėtis (11 iš 18).

Mg koncentracijų kaita panaši į Ca koncentracijų kaitą. Stebima priklausomybė nuo kritulių kiekio. 2015 m. kai kritulių kiekis buvo vienas mažiausių per visą tiriamąjį laikotarpį, šio elemento koncentracijos taip pat buvo vienos mažiausių, o kai kritulių kiekis padidėjo, padidėjo ir Mg koncentracijos.

Palyginus Mg koncentracijas tarp stočių, nustatyta kad didžiausios koncentracijos būdingos Aukštaitijos KMS baseine – apie 12 mg/l, 2 kartus mažesnės Žemaitijos KMS baseine ir mažiausios iki 4-5 kartų Dzūkijos KMS baseine.

2010-2013 laikotarpis taip pat išliek išskirtinis. Šiuo laikotarpiu Aukštaitijos KMS gruntiniuose vandenyse Mg koncentracijos yra padidėjusios. Iki šio laikoparpio ir po jo stebimas sumažėjimas. Tik paskutiniuoju laikotarpiu Mg koncentracijos gruntiniuose vandenyse turi tendenciją didėti. Žemaitijos KMS gautas priešingas rezultatas: 2022-2025 m. laikotarpiu Mg koncentracijos gruntiniuose vandenyse turi tendenciją mažėti. Dzūkijos KMS Mg koncentracijos, kaip ir K yra sumažėjusios.



7.3 pav. Gruntinio vandens cheminė sudėtis (10 iš 18).

Aukštaitijos KMS registruojamas palaipsnis Ca koncentracijų mažėjimas visuose gręžiniuose. Išskirtinis rezultatas gautas II gręžinyje. Tokį koncentracijų padidėjimą šiame gręžinyje galėjo lemti ir faktas, kad šioje stotyje gręžiniai buvo atnaujinti, išgręžiant naujus, šalia senų buvusių.

Žemaitijos KMS pirmajame – seklaisusiame gręžinyje registruojama Ca augimo trendas, likusiuose gręžiniuose šio elemento koncentracijos išlieka stabiliame lygmenyje.

Dzūkijso KMS Ca koncentracijios 2025 m buvo žemesnės negu tyrimų pradžiojeir taip pat mažiausios, lyginant tarp tirtų stočių Ca koncentracijų **7.3 pav.** 10

2012-2013 laikotarpis taip pat išliek išskirtinis.

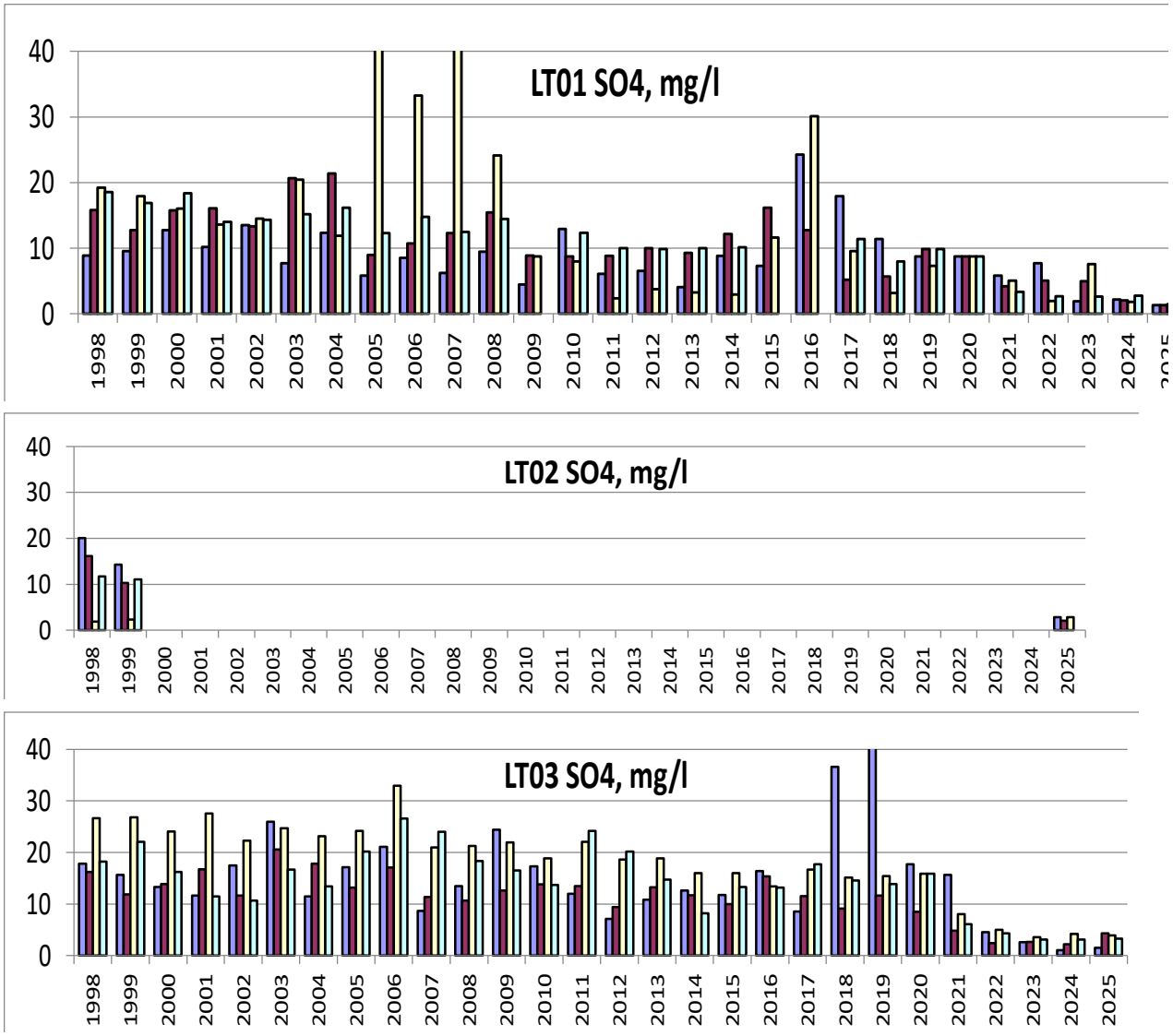
Apibendrinus rezultatus, Gruntinio vandens bazinių katijonų – kalcio (Ca^{2+}), magnio (Mg^{2+}) ir kalio (K^{+}) – koncentracijų kaita atspindėjo ilgalaikius miško baseinų hidrogeocheminius ir biogeocheminius procesus. Skirtingai nuo konservatyvių jonų (Na^{+} ir Cl^{-}), bazinių katijonų koncentracijas reguliuoja ne tik vandens infiltracija, bet ir mineralų dūlėjimas, katijonų mainai dirvožemyje, augalų pasisavinimas, organinių medžiagų mineralizacija bei atmosferinių iškritų sudėtis. Todėl jų dinamika laikoma vienu svarbiausių dirvožemio buferinės gebos ir maisto medžiagų ciklo rodiklių (De Vries et al., 2014; Likens & Bormann, 1995; Brady & Weil, 2017).

Visų trijų stočių duomenys parodė, kad bazinių katijonų koncentracijų kaitoje išryškėjo bendri regioniniai dėsningumai. Išskirtiniu laikotarpiu išliko 2010–2013 m., kai daugumoje gręžinių registruotos didžiausios Ca ir Mg koncentracijos. Po šio laikotarpio daugelyje stočių koncentracijos mažėjo, o paskutiniaisiais metais jų kaita tapo labiau priklausoma nuo vietinių hidrogeologinių sąlygų ir gruntinio vandens papildymo intensyvumo.

Palyginus visas tris kompleksinio monitoringo stotis nustatyta aiški teritorinė diferenciacija. Didžiausios Ca ir Mg koncentracijos būdingos Aukštaitijos KMS, vidutinės – Žemaitijos KMS, o mažiausios – Dzūkijos KMS. Toks pasiskirstymas greičiausiai atspindi skirtingą vandeningųjų sluoksnių litologiją, mineralų dūlėjimo intensyvumą ir požeminio vandens buferinę gebą. Tuo tarpu kalio koncentracijos tarp Aukštaitijos ir Žemaitijos reikšmingai nesiskyrė, o Dzūkijos KMS išliko mažiausios.

Tokiu būdu bazinių katijonų koncentracijos yra vienas svarbiausių ilgalaikio miško ekosistemų stabilumo rodiklių. Ca ir Mg palaiko dirvožemio buferinę gebą, reguliuoja rūgščių neutralizavimą ir yra būtini medžių mineralinei mitybai, o K atlieka svarbų vaidmenį vandens apykaitoje ir fiziologiniuose augalų procesuose. Todėl ilgalaikiai jų koncentracijų pokyčiai gruntiniame vandenyje atspindi ne tik požeminio vandens cheminės sudėties kaitą, bet ir visos dirvožemio–augalų sistemos maisto medžiagų balansą.

Apibendrinant galima teigti, kad ***bazinių katijonų koncentracijų kaita rodo skirtingą Lietuvos hemiborealinių miško baseinų geocheminį potencialą. Aukštaitijos KMS gruntinio vandens sistema pasižymi didžiausia bazine mineralizacija ir buferine geba, Žemaitijos KMS išsiskiria didesniu hidrocheminių procesų kintamumu, o Dzūkijos KMS – mažiausiomis bazinių katijonų koncentracijomis ir skurdžiausiu požeminio vandens mineraliniu fonu. Šie skirtumai yra svarbūs vertinant ilgalaikį miško ekosistemų atsparumą rūgštėjimui ir klimato kaitos sukeltiems hidrologinio režimo pokyčiams.***



7.3 pav. Gruntinio vandens cheminė sudėtis (9 iš 18).

Sulfatų koncentracijos gruntiniuose vandenyse abiejuose stotyse turėjo tendencija mažėti su nedidelaiais pakilimais 2005-2008 m. Padidėjimas buvo registruotas ir 2015-2017 m. Aukštaitijos KMS ir 2017-2019 Žemaitijos KMS. Sulfatų koncentracijos įiai laikotarpiais kylo iki 30 mg/l.

Išskirtinis šios komponentės tyrimų rezultatų bruožas yra paskutiniuoju laikotarpiu 2021-2025 m. reikšmingas, iki minimalių reikšmų sumažėsį sulfatų koncentracija visų stočių visų gylių gruntiniuose vandenyse, siekianti apie 1,2-2,0 mg/l Aukštaitijos KMS, 2,0-3,0 mg/l Dzūkijos KMS ir apie 3-4 mg/l Žemaitijos KMS. Tai reikšmingiausias teigiams poslinkis registruotas salygiškai natūralių miško ekosistemų gruntiniuose vandenyse, kuris turėtų turėti reikšmingos įtakos visos ekosistemos kaitai.

Palyginus sulfatų koncentracijas tarp stočių, nustatyta, kad didžiausios išliko Žemaitijos KMS – koncentracijos sumažėjo nuo 20 iki 4 mgS/l, kiek mažesnės Dzūkijos KMS – koncentraciojos sumažėjo nuo 15 iki 3 mgS/l ir mažiausios Aukštaitijos KMS – koncentracijos sumažėjo nuo 15 iki 1-2 mgS/l. Tai reikšmingiausias pagrindinės rūgštinančios komponentės sumažėjimas, rodantis, kad sulfatai yra **tiesioginis XX a. antros pusės atmosferinės taršos indikatorius**, o jų mažėjimas požeminiame vandenyje rodo, jog sumažėjo ne tik sieros iškritos, bet ir **pasikeitė visas sieros ciklas miško baseinuose**.

2012-2013 laikotarpis taip pat išliek išskirtinis, kai koncentracijos mažėjo tarp dviejų padidėjimo laikotarpiu: 2005-2007 m. ir 2015-2017 m.

Apibendrinant rezultatus, gruntinio vandens sulfatų (SO_4^{2-}) koncentracijų kaita yra vienas svarbiausių ilgalaikio miško ekosistemų cheminio atsikūrimo rodiklių. Sulfatai sudaro pagrindinę rūgštinančių atmosferinių iškritų komponentę, todėl jų koncentracijų dinamika požeminiuose vandenyse tiesiogiai atspindi ilgalaikius sieros emisijų, atmosferinių iškritų ir dirvožemio sieros ciklo pokyčius. Europos mastu pastaruosius tris dešimtmečius registruojamas nuoseklus sulfatų mažėjimas laikomas vienu ryškiausių oro taršos mažinimo politikos rezultatų ir vienu pagrindinių miško ekosistemų cheminio atsikūrimo požymių (De Vries et al., 2021; ICP Forests, 2024).

Tyrimų rezultatai parodė, kad visose trijose kompleksinio monitoringo stotyse sulfatų koncentracijos gruntiniuose vandenyse ilgalaikėje perspektyvoje nuosekliai mažėjo. Trumpalaikiai koncentracijų padidėjimai registruoti 2005–2008 m., o antrasis padidėjimo laikotarpis nustatytas Aukštaitijos KMS 2015–2017 m. ir Žemaitijos KMS 2017–2019 m., kai sulfatų koncentracijos kai kuriuose gręžiniuose laikinai padidėjo iki maždaug 30 mg l^{-1}. Tokie epizodai greičiausiai susiję su anksčiau dirvožemyje sukauptų sieros junginių mobilizacija, hidrologinio režimo svyravimais ir skirtingu gruntinio vandens papildymo intensyvumu.

Svarbiausias ilgalaikis pokytis nustatytas 2021–2025 m., kai visų stočių ir visų gruntinio vandens horizontų sulfatų koncentracijos sumažėjo iki mažiausių reikšmių per visą stebėjimų laikotarpį. Aukštaitijos KMS jos siekė tik apie 1,2–2,0 mg l^{-1}, Dzūkijos KMS – apie 2–3 mg l^{-1}, o Žemaitijos KMS – apie 3–4 mg l^{-1}. Palyginti su tyrimų pradžia, sulfatų koncentracijos sumažėjo maždaug dešimt kartų, todėl tai yra ryškiausias ir nuosekliausias teigiamas hidrocheminis pokytis, nustatytas Lietuvos kompleksinio monitoringo stočių gruntiniuose vandenyse.

Nors visose stotyse sulfatų koncentracijos reikšmingai sumažėjo, tarp jų išliko teritoriniai skirtumai. Didžiausios koncentracijos visą laiką buvo registruojamos Žemaitijos KMS, kur jos sumažėjo nuo maždaug 20 iki 4 mg l^{-1}. Dzūkijos KMS koncentracijos sumažėjo nuo maždaug 15 iki

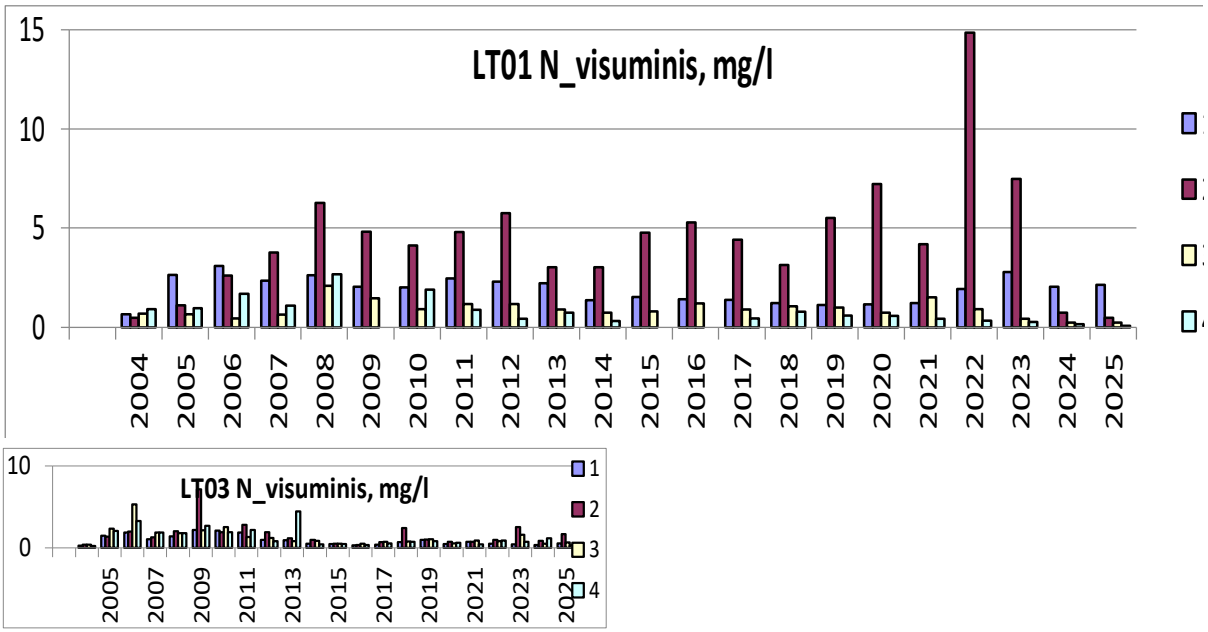
3 mg l^{-1}, o mažiausios galutinės reikšmės nustatytos Aukštaitijos KMS, kur sulfatų koncentracijos sumažėjo iki 1–2 mg l^{-1}. Šie skirtumai tikriausiai susiję su nevienoda atmosferinių iškritų apkrova, Baltijos jūros regiono oro masių pernaša, dirvožemio savybėmis ir skirtingu sieros junginių kaupimu dirvožemyje ankstesniais dešimtmečiais.

Išskirtiniu lūžio laikotarpiu išlieka 2012–2013 m., kai sulfatų koncentracijos buvo mažiausios tarp dviejų jų padidėjimo etapų (2005–2008 ir 2015–2019 m.). Tai rodo, kad sieros ciklas gruntinio vandens sistemoje nėra visiškai monotoniškas ir į jį vis dar įsiterpia laikini hidrologinių bei geocheminių procesų sukelti svyravimai. Tačiau bendra ilgalaikė kryptis išlieka aiškiai mažėjanti.

Tokiu būdu sulfatų koncentracijų mažėjimas yra vienas palankiausių pokyčių, nustatytų tiriamose miško ekosistemose. Mažėjant sulfatų kiekiui silpnėja dirvožemio rūgštėjimo procesai, mažėja bazinių katijonų išplovimo rizika ir sudaromos palankesnės sąlygos dirvožemio buferinės gebos atsikūrimui. Todėl ilgalaikis sulfatų koncentracijų mažėjimas gali būti laikomas patikimu požeminio vandens cheminio atsikūrimo rodikliu ir vienu svarbiausių įrodymų, kad Europos sieros emisijų mažinimo politika davė ilgalaikį teigiamą rezultatą ir Lietuvos hemiborealinių miškų ekosistemose.

Vis dėlto trumpalaikiai sulfatų koncentracijų padidėjimai po 2015 m. rodo, kad sieros ciklas dar nėra visiškai stabilizavęsis. Tikėtina, jog ateityje jo dinamiką vis labiau lems klimato kaitos nulemtas hidrologinio režimo kitimas, anksčiau dirvožemyje sukauptų sieros junginių mobilizacija bei pavieniai padidėjusios atmosferinės apkrovos epizodai. Pastaraisiais metais atmosferinių iškritų tyrimai Lietuvos kompleksinio monitoringo stotyse jau rodo padidėjusias sieros junginių koncentracijas, kurios siejamos su pasikeitusia regionine oro teršalų pernaša po karo Ukrainoje pradžios. Atsižvelgiant į tai, kad sieros junginių migracija per dirvožemį į gruntinius vandenis vyksta su tam tikru vėlavimu, negalima atmesti galimybės, jog šio reiškinio poveikis požeminio vandens cheminei sudėčiai išryškės tik po keleto metų. Ar tai taps ilgalaike nauja rūgštinančių junginių apkrovos tendencija ir kokią įtaką ji turės miško ekosistemų cheminiam stabilumui, galės parodyti tik tolesni ilgalaikiai kompleksinio monitoringo tyrimai.

Apibendrinant galima teigti, kad gruntinio vandens sulfatų koncentracijų mažėjimas yra ryškiausias ilgalaikis teigiamas hidrocheminis pokytis, nustatytas Lietuvos kompleksinio monitoringo stočių miško baseinuose. Šie rezultatai patvirtina, kad per pastaruosius tris dešimtmečius požeminio vandens sistemoje vyksta nuoseklus cheminis atsikūrimas, o sieros junginių įtaka gruntinio vandens cheminei sudėčiai tampa vis mažesnė.



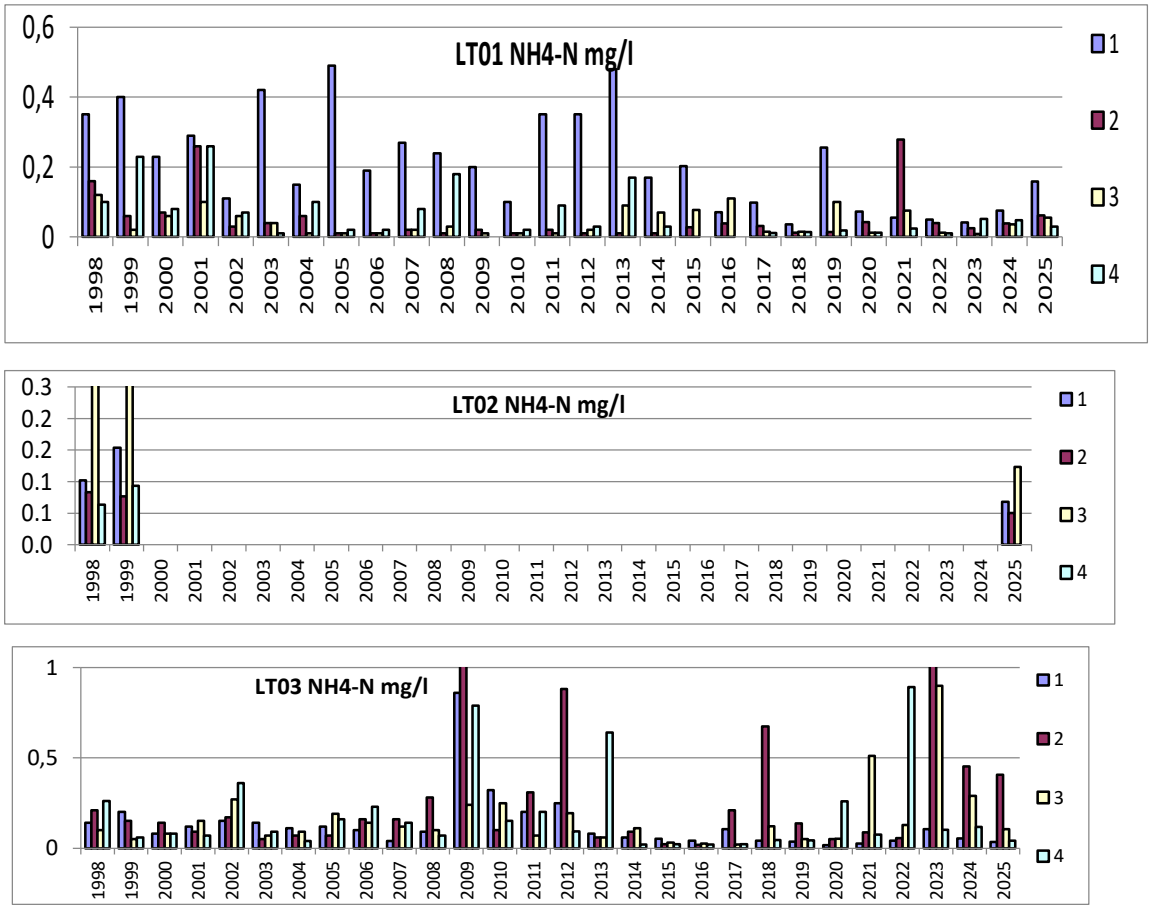
7.3 pav. Gruntinio vandens cheminė sudėtis (12 iš 18).

Dzūkijos IMS 1998-1999 metais visuminio azoto koncentracija nebuvo matuojama, o 2025 metais nustatytos tokios koncentracijos: 1,99; 0,49 ir 0,67 mg/l, t.y., panašiai, kaip Aukštaitijos KMS ir kiek mažesnės negu Žemaitijos KMS

Aukštaitijos KMS baseine visuminio N koncentracijų kaitoje vėl stebimos tos pačios tendencijos: 2007-2010 m. stebimas nežymus šio elemento koncentracijų padidėjimas. Nuo 2012 m. registruojamas sumažėjimas iki paskutiniųjų metų su išimtimi antrajame gręžinyje, kuriame visuminio N koncentracijos pradėjo didėti ir maksimalią reikšmę pasiekė 2022 m. paskutiniaisiais 2024-2025 m. šioje stotyje visuminio N koncentracijos svyruoja arti minimaliausių ribos.

Žemaitijos KMS visuminio N koncentracijos kito analogiškai tais pačiais laikotarpiais ir reikšmingai nesiskiriant tarp pačių koncentracijų reikšmių.

Paminėtina dar, kad azoto junginių koncentracija buvo išaugusi 2021-2023 metais, ryškiausi pokyčiai Aukštaitijos IMS 2022 metais (padaugėjo nitratų ir visuminio N 2 gręžinyje), o Žemaitijos IMS azoto junginių daugiausia buvo 2023 metais (**7.3 pav.** 12-14 iš 25).



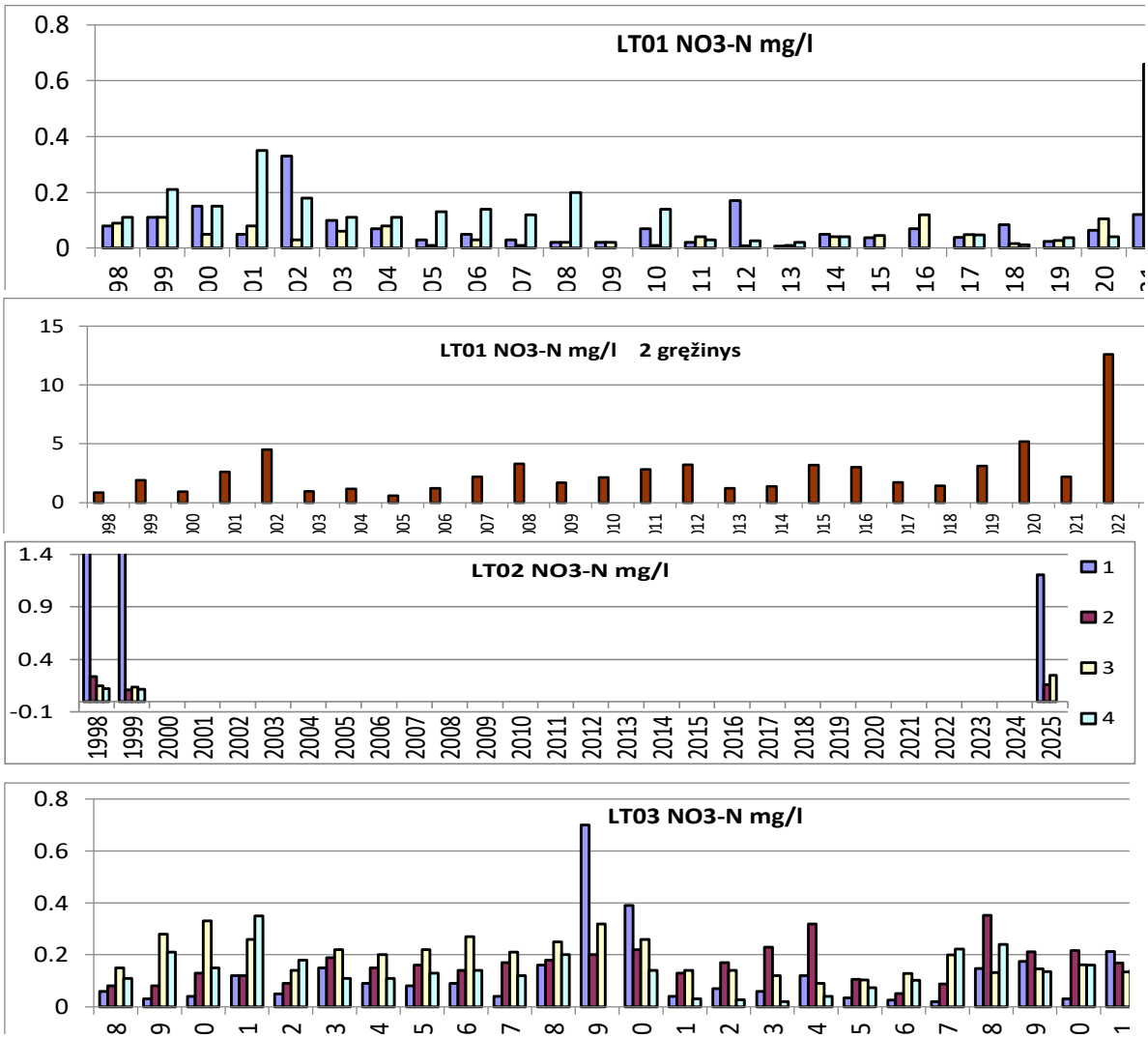
7.3 pav. Gruntinio vandens cheminė sudėtis (13 iš 18).

Amonio jonų koncentracijų kaitoje taip pat stebima mažėjimo tendencija Aukštaitijos KMS baseine, nors mažiausios reuikšmės buvo registruojamos 2018 ir 2022 m., kai siekė vos 0,1-0,2 mg/l.

Didesni kritulių kiekiai padidino šio junginio koncentracijas tik Žemaitijos KMS baseine. Reikšmingas padidėjimas buvo registruotas 20092012 m., po kurių sekė mažiausių koncentracijų laikotarpis 2015-2016m. Paskutiniuoju laikotarpiu amonio koncentracijos reikšmingai padidėjo ir ypač 2023 m, kai pasiekė 1mg/l ribą. Paskutiniaisiais metais, skirtingai nei Aukštaitijos KMS baseine, amonio koncentracijos turi tendenciją mažėti iki 0,2-0,4 mg/l ribos, Aukštaitijos KMS šiuo laikotarpiu amonio koncentracijos svyravo žemiau 0,1 mg/l ribos.

2012-2013 laikotarpis taip pat išliek išskirtinis ir amonio koncentracijų kaitoje. Aukštaitijos KMS tai laikotarpis kai dar paskutinį kartą buvo reistruojamos didesnės koncentracijos. Nuo šio laikotarpio iki 2025 amonio koncentracijos gruntiniuose vandenyse šioje stotyje mažėja ir 2022-2023 m. siekė savo minimalių reikšmių.

Žemaitijos KMS ši tendencija iki 2012-13 metų tai pat iš dalies pasitvirtino, tik paskutiniuoju laikotarpiu šiose stotyje registruojami amonio koncentracijų padidėjimas ypač 2022-2025 m.



7.3 pav. Gruntinio vandens cheminė sudėtis (14 iš 18).

Nitratų koncentracijų kaitoje Aukštaitijos KMS baseine išsiskiria 2 gręžinio gruntinio vandens tyrimų rezultatai. Šiame gręžinyje nitratų kiekis virš 20 kartų viršija nitratų koncentracijas likusių gręžinių vandenyse. Pakeitus gręžinį, koncentracijos reikšmingai sumažėjo, matyt, dėl gręžinio padėties ir lokalių sąlygų.

2011-2013 laikotarpis taip pat išliek išskirtinis ir nitratų koncentracijų kaitoje. Aukštaitijos KMS tai laikotarpis iki kurio nitratų koncentracija mažėjo. Vėliau koncentracijos pradėjo didėti ir 2021-2023 m. laikotarpiu pasiekė savo maksimalias vertes – apie 0,4 mg/l. Paskutiniaisiais metais registruojamas nitratų koncentracijų mažėjimo etapas.

Žemaitijos KMS vienos didžiausių koncentreacijų registruotų buvo 2009-2010 m. laikotarpis – iki 0,4 mg/l. 2015-2016 m. laikotarpis – mažiausių koncentracijų laikotarpis. Po šių metų nitratų koncentracijos taip pat reguliariai didėja ir savo maksimalias reikšmes pasiekė 2025 m.

Dzūkijos KMS gruntinio vandenyje nitratų kiekis keik tai sumažėjo, ypač sekliausiame gręžinyje, esančiame prie upelio.

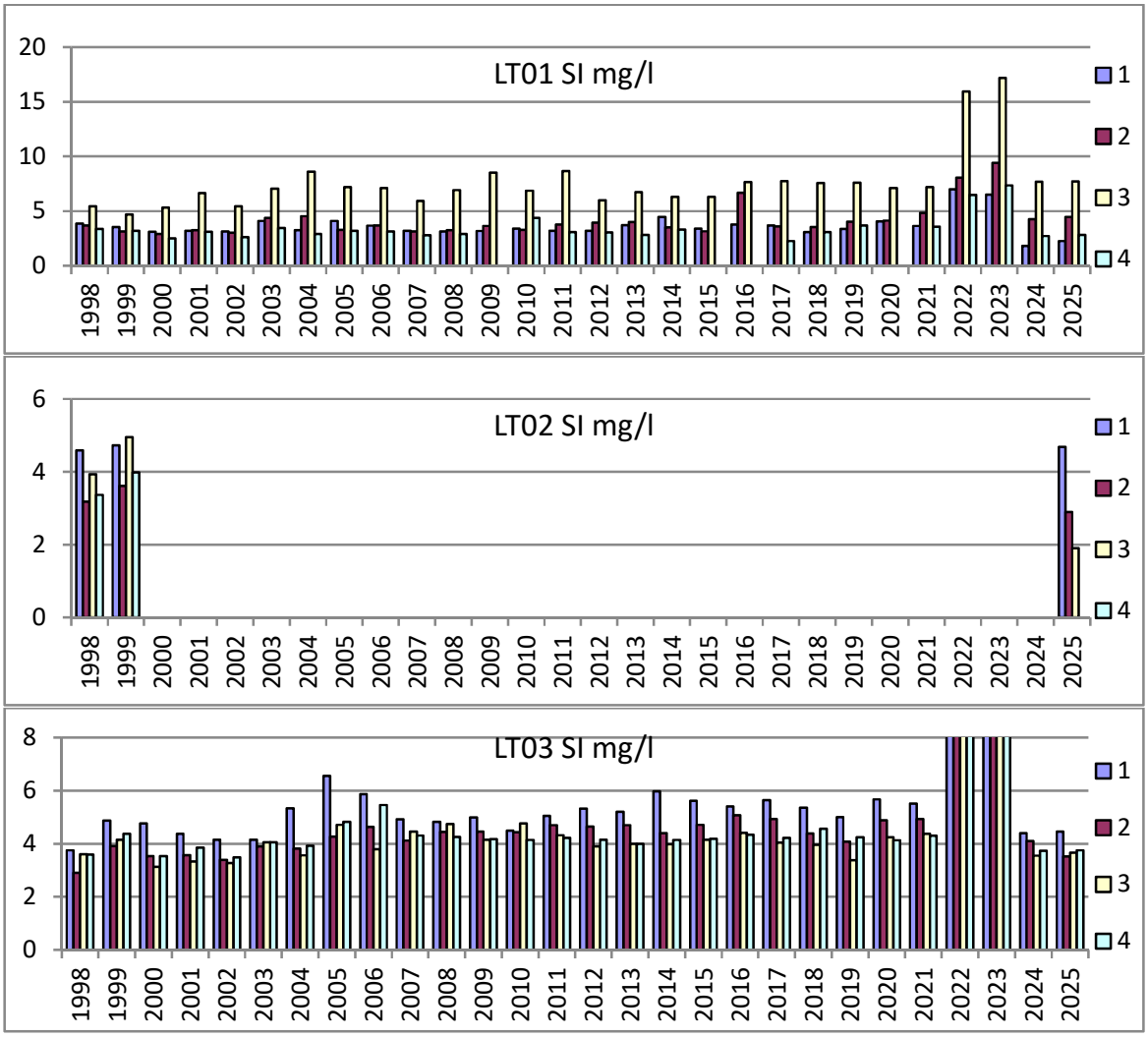
Apibendrinus rezultatus, Gruntinio vandens azoto junginių – visuminio azoto (N), amonio (NH_4^+) ir nitratų (NO_3^-) – koncentracijų kaita atspindėjo ilgalaikius azoto ciklo pokyčius Lietuvos hemiborealinių miškų ekosistemose. Skirtingai negu sulfatai ar konservatyvūs jonai, azoto junginių koncentracijas gruntiniame vandenyje reguliuoja sudėtinga biologinių ir hidrogeocheminių procesų sąveika. Mineralizacija, nitrifikacija, denitrifikacija, augalų ir mikroorganizmų azoto pasisavinimas bei gruntinio vandens papildymo intensyvumas lemia didesnį šių junginių laikinį kintamumą ir mažiau išreikštas ilgalaikes tendencijas (Aber et al., 1998; Gundersen et al., 2006; Dise et al., 2009; Lovett & Goodale, 2011).

Amonio jonų koncentracijų dinamika parodė skirtingą stočių reakciją į hidrologines sąlygas. Aukštaitijos KMS amonio koncentracijos ilgalaikėje perspektyvoje mažėjo ir 2018 bei 2022 m. pasiekė mažiausias reikšmes – tik apie 0,1–0,2 mg l^{-1}. Žemaitijos KMS amonio koncentracijų svyravimai buvo didesni. Po padidėjimo 2009–2012 m. sekė mažiausių koncentracijų laikotarpis 2015–2016 m., o 2022–2023 m. registruotas naujas koncentracijų padidėjimas iki maždaug 1 mg l^{-1}. Vėliau amonio koncentracijos vėl mažėjo ir 2025 m. stabilizavosi apie 0,2–0,4 mg l^{-1}.

Visų azoto junginių kaitoje išskirtiniu laikotarpiu išliko 2012–2013 m., po kurio pasikeitė koncentracijų kitimo pobūdis. Aukštaitijos KMS nuo šio laikotarpio vyrauja mažėjimo tendencijos, tuo tarpu Žemaitijos KMS kai kurių azoto formų koncentracijos paskutiniaisiais metais buvo linkusios didėti. Tikėtina, kad šie skirtumai susiję su nevienodu dirvožemio drėgmės režimu, organinės medžiagos mineralizacijos intensyvumu ir gruntinio vandens papildymo sąlygomis.

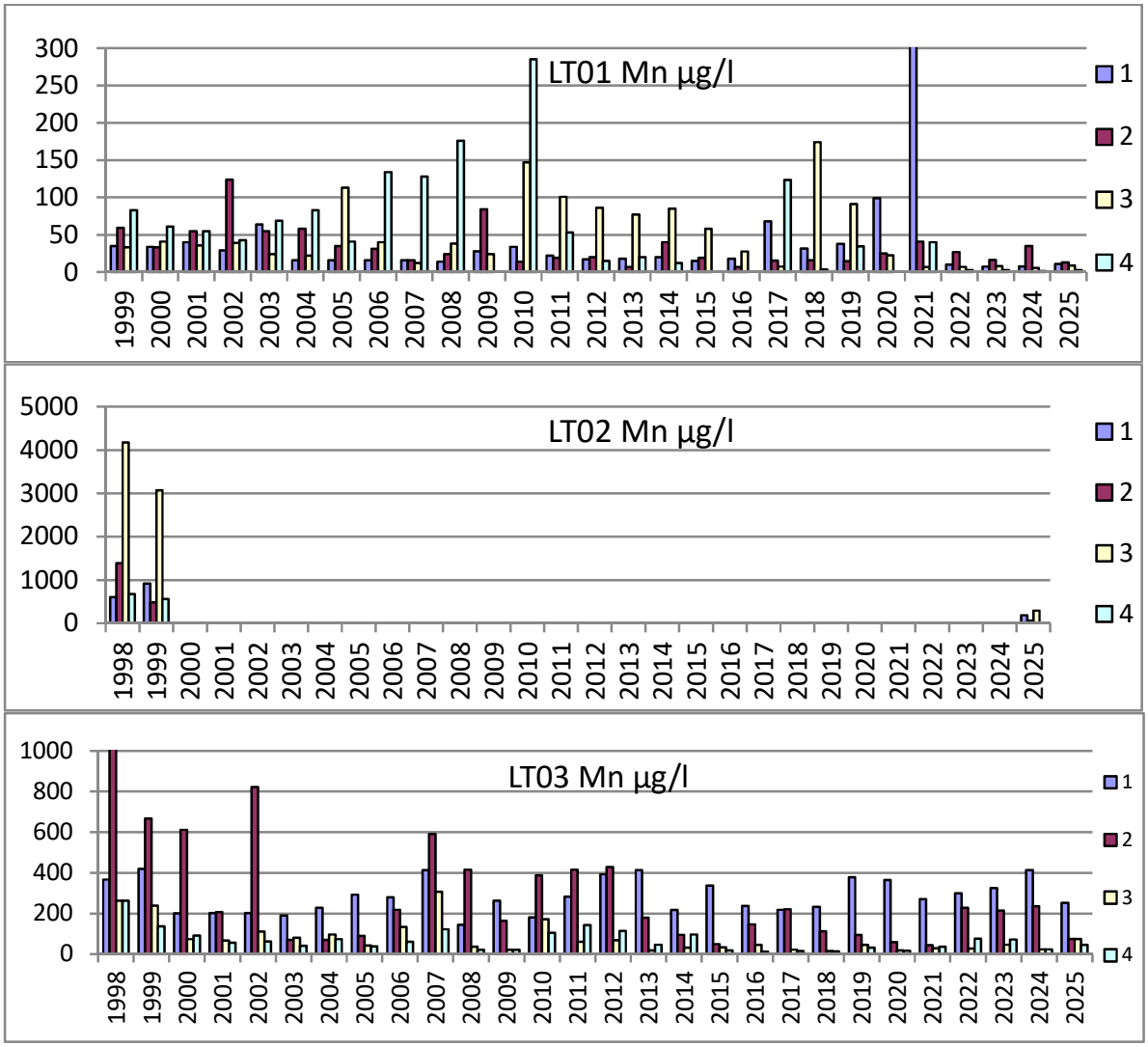
Tokiu būdu azoto junginių koncentracijos išliko mažos ir būdingos sąlyginai natūralioms miško ekosistemoms. Tai rodo, kad tirtuose baseinuose nepasireiškia ilgalaikis azoto prisotinimas, o biologiniai azoto sulaikymo mechanizmai išlieka veiksmingi. Trumpalaikiai azoto junginių koncentracijų padidėjimai greičiausiai atspindi natūralius hidrologinio režimo ir organinės medžiagos transformacijos svyravimus, o ne ilgalaikį antropogeninės azoto apkrovos didėjimą.

Apibendrinant galima teigti, kad ***gruntinio vandens azoto junginių kaita rodo pakankamai stabilų Lietuvos hemiborealinių miškų azoto ciklą. Nepaisant pavienių trumpalaikių koncentracijų padidėjimų, ilgalaikės azoto junginių koncentracijos išlieka nedidelės, o tai leidžia teigti, kad miško ekosistemos išlaiko didelį gebėjimą sulaikyti ir panaudoti azotą biologiniuose procesuose.***



7.3 pav. Gruntinio vandens cheminė sudėtis (16 iš 18).

Silicio koncentracija gruntiniame vandenyje linkusi didėti, ir 2022-2023 m. pasiekiant maksimalias vertes abiejose stotyse. 2024-2025 metais šio elemento koncentracijos gruntiniuose vandenyse buvo reikšmingai sumažėjusios net lyginant su prieš padidjimo laikotarpį, t.y. 2014-2021 m., dėl galimai gruntinio vandens nuotėkio sumažėjimas. Jo koncentracijos abiejose stotyse sumažejo žemiau 4 mg/l ribos (**7.3 pav.** 16 iš 18).

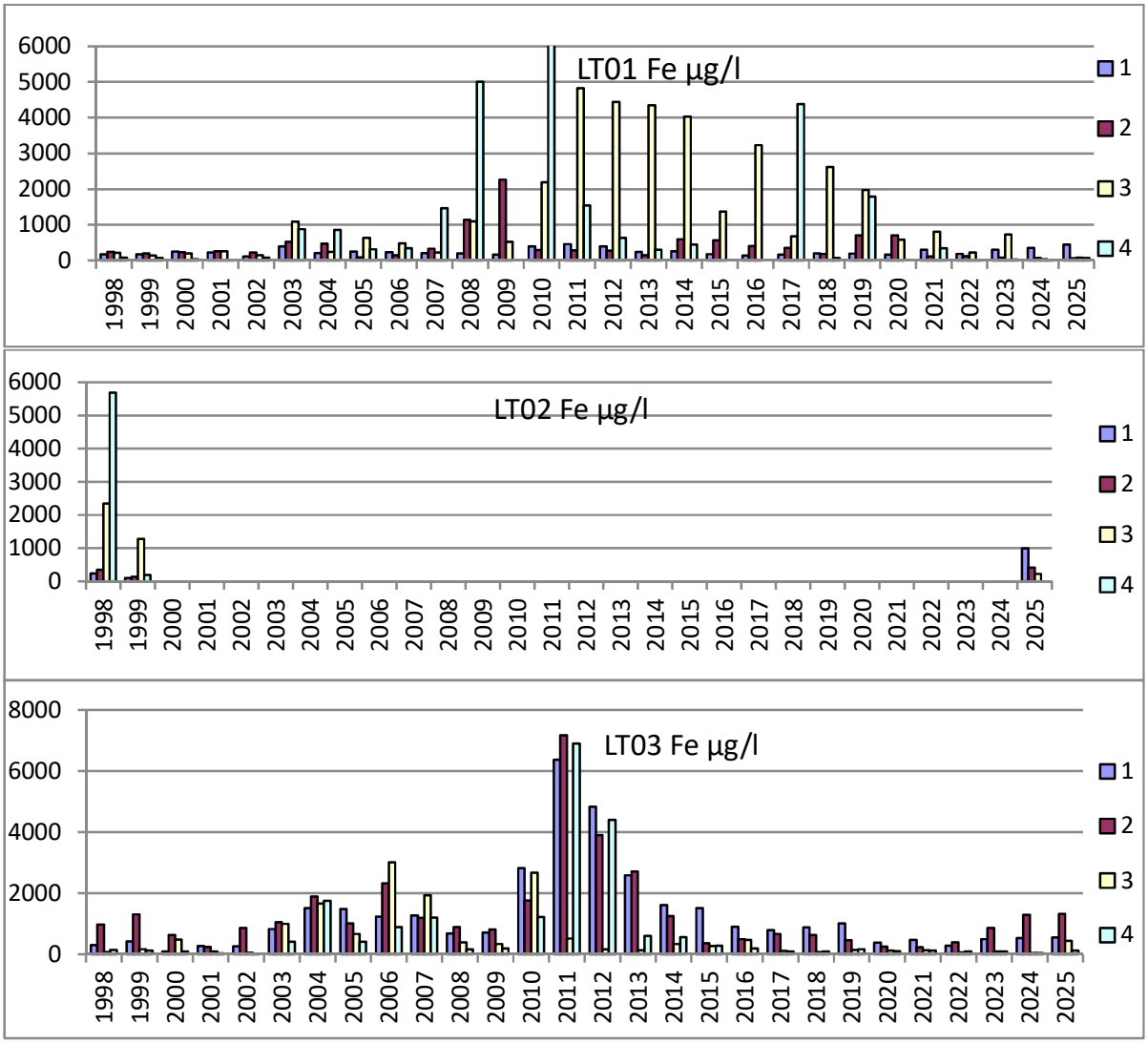


7.3 pav. Gruntinio vandens cheminė sudėtis (17 iš 18).

Mn koncentracijų kaitą apsukina metodologiniai aspektai. Paskutiniaisiais metais šio elemento koncentracija nustatoma tik iki 2 µg/l ribos, kuri yra didesnė nei koncentracijos nustatytos ankstesniais metais. 2018-2019 m. sausra neturėjo reikšmingos įtakos Mn koncentracijų kaitai gruntiniuose vandenyse. 2022-2025 Mn koncentracijos Aukštaitijos KMS gruntiniame vandenyje yra sumažėjusios iki savo minimalių reikšmių.

Stebimi tie patys kaitai būdingi laikotarpiai, kai 2008-2010 m. Stebimi koncentracijų padidėjimai, o 2014-2016 m. sumažėjimo laikotarpiai.

Paskutiniaisiais metais Aukštaitijos KMS Mn koncentracijos svyruoja apie savo minimalią ribą, kai tuo tarpu Žemaitijos KMS baseino seklesniuose gręžiniuose siekia net 0,2 mg/l ribą. Dzūkijos KMS baseine palyginus dvi apskaitas, nustatyta, kad Mn koncentracija paskutinaisiais metais yra ženkliai sumažėjusi, lyginant su tyrimų pradžia.



7.3 pav. Gruntinio vandens cheminė sudėtis (18 iš 18).

Didžiausios Fe koncentracijos gruntiniuose vandenyse nustatytos 2008-2011 m. abiejų stočių baseinų gruntiniuose vandenyse. Nuo šio laikotarpio iki 2019 m. Fe koncentracijos turi tendencija mažėti. Dzūkijos KMS gauti rezultatai vienareikšmiškai neleidžia atsakyti į klausimą ar fe koncentracijos šioje stotyrje didėja ar mažėja.

Išskirtinis laikotarpis : 2013-2014 m., kai šio parametro reikšmės keitė pobūdį iš dalies pasitvirtino. Šiuo laikotarpiu Fe koncentracijos Žemaitijos KMS buvo didžiausios. 2022-2025 m. Aukštaitijos KMS Fe koncentracijos minimaliame lygmenyje išliko stabilios, kai tuo tarpu Žemaitijos KMS turėjo tendenciją didėti.

Apiubendrinus silicio, mangano ir geležies koncentracijų kaitos ypatumus, nustatyta, kad gruntinio vandens silicio (Si), mangano (Mn) ir geležies (Fe) koncentracijų kaita atspindi vandens–uolienų sąveikos intensyvumą, redokso procesus ir gruntinio vandens cirkuliacijos ypatumus. Skirtingai nuo bazinių katijonų ar azoto junginių, šių elementų judrumą daugiausia reguliuoja mineralų dūlėjimas, oksidacijos–redukcijos reakcijos, organinių medžiagų kompleksavimas bei vandens buvimo laikas požeminėje sistemoje. Todėl jų ilgalaikiai pokyčiai leidžia vertinti ne tik gruntinio vandens cheminės sudėties kaitą, bet ir visos požeminės hidrogeocheminės sistemos stabilumą (Appelo & Postma, 2005; Hem, 1985; Stumm & Morgan, 1996).

Silicio koncentracijos abiejose kompleksinio monitoringo stotyse iki 2022–2023 m. turėjo tendenciją didėti ir tuo laikotarpiu pasiekė didžiausias reikšmes per visą stebėjimų laikotarpį. Tačiau 2024–2025 m. silicio koncentracijos reikšmingai sumažėjo ir tapo mažesnės net už iki padidėjimo laikotarpio (2014–2021 m.) reikšmes – daugumoje gręžinių jos sumažėjo žemiau 4 mg l^{-1}. Tikėtina, kad šie pokyčiai susiję su pasikeitusiu gruntinio vandens režimu, didesniu mažos mineralizacijos infiltracinių vandenų kiekiu ir trumpesniu vandens kontaktu su silikatiniais mineralais, todėl sumažėjo silicio išsiskyrimas į gruntinį vandenį.

Mangano koncentracijų interpretaciją apsunkina metodologiniai pokyčiai, nes pastaraisiais metais taikyta didesnė analitinio nustatymo riba negu ankstesniu stebėjimų laikotarpiu. Nepaisant to, bendros tendencijos išlieka aiškios. Didesnės Mn koncentracijos registruotos 2008–2010 m., o po 2014–2016 m. prasidėjo jų mažėjimo etapas. Aukštaitijos KMS 2022–2025 m. Mn koncentracijos sumažėjo iki mažiausių reikšmių per visą tyrimų laikotarpį, tuo tarpu Žemaitijos KMS sekliausiuose gręžiniuose jos išliko gerokai didesnės ir kai kur siekė apie 0,2 mg l^{-1}. Dzūkijos KMS pakartotiniai tyrimai taip pat parodė ryškų mangano koncentracijų sumažėjimą, palyginti su 1998–1999 m. rezultatais.

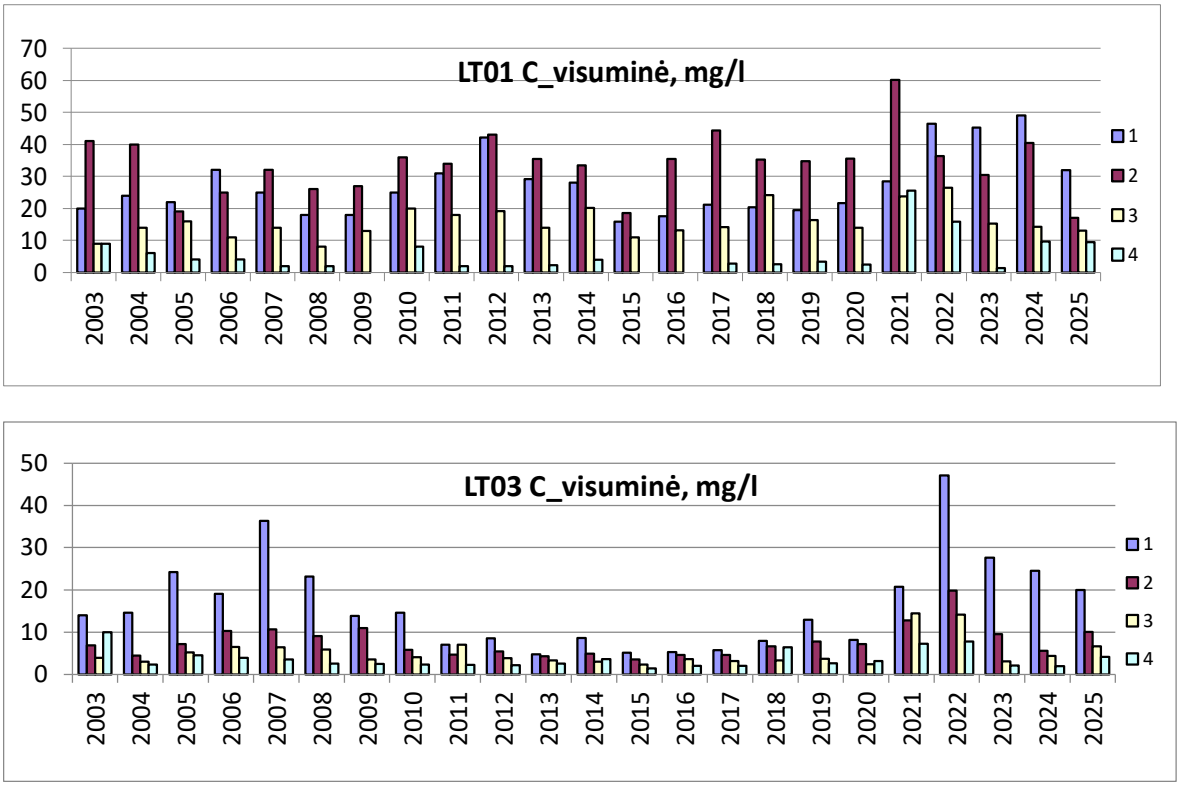
Didžiausios geležies koncentracijos abiejose stotyse nustatytos 2008–2011 m. Vėliau iki maždaug 2019 m. Fe koncentracijos nuosekliai mažėjo, o paskutiniaisiais metais stočių reakcija tapo nevienoda. Aukštaitijos KMS geležies koncentracijos išliko stabiliai mažos, tuo tarpu Žemaitijos KMS registruojama jų didėjimo tendencija. Dzūkijos KMS pakartotiniai tyrimai neleidžia vienareikšmiškai įvertinti ilgalaikės geležies koncentracijų kaitos krypties.

Visų trijų elementų kaitoje iš dalies pasitvirtino ir 2013–2014 m. lūžio laikotarpis. Po šio laikotarpio pasikeitė ne tik koncentracijų kitimo kryptis, bet ir stočių tarpusavio skirtumai. Aukštaitijos KMS vis ryškiau dominuoja mažėjančios arba stabiliai mažos Fe ir Mn koncentracijos, tuo tarpu Žemaitijos KMS kai kuriuose gruntinio vandens horizontuose išlieka didesnis šių elementų

judrumas. Tai rodo, kad klimato kaitos sąlygomis gruntinio vandens geocheminė evoliucija tampa vis labiau priklausoma nuo vietinių hidrogeologinių sąlygų ir redokso režimo.

Tokiu būdu nustatyti pokyčiai daugiausia atspindi natūralią požeminės hidrogeocheminės sistemos raidą. Mažėjančios Fe ir Mn koncentracijos gali rodyti stabilesnes oksidacines sąlygas bei mažesnį šių elementų mobilumą gruntiniame vandenyje, o silicio koncentracijų sumažėjimas gali būti siejamas su spartesniu gruntinio vandens atsinaujinimu ir mažesniu vandens kontaktu su mineraliniu pagrindu. Vis dėlto šių procesų priežastims galutinai įvertinti reikėtų papildomų hidrogeologinių ir hidrocheminių tyrimų.

Apibendrinant galima teigti, kad ***silicio, mangano ir geležies koncentracijų kaita patvirtina ilgalaikį gruntinio vandens hidrogeocheminio režimo persitvarkymą. Nors bendros koncentracijų mažėjimo tendencijos daugumoje stočių rodo mažėjantį šių elementų judrumą, tarp stočių išryškėję skirtumai leidžia manyti, kad ateityje jų dinamiką vis labiau reguliuos vietinės hidrogeologinės sąlygos, gruntinio vandens papildymo intensyvumas ir klimato kaitos nulemtas vandens režimo kitimas.***



7.3 pav. Gruntinio vandens cheminė sudėtis (15 iš 18).

Gruntiniame vandenyje ištirpusios organinės anglies koncentracija Aukštaitijos KMS sekliųjų gręžinių vandenyje 2012-2020 metais buvo stabili arba mažėjo, panaši tendencija būdinga ir visuminiam azotui. Tikėtina, kad anglies ir azoto koncentraciją gruntiniame vandenyje 2012 metais padidino gausūs krituliai, o vėliau, sumažėjus geosistemoje cirkuliuojančio vandens kiekiui, ypač 2018-2019 metais, įsivyravo aerobiniai destrukciniai procesai, kurių produktais, tame tarpe ir nitratais pildėsi gruntinis vanduo. Žemaitijos KMS baseino gruntiniame vandenyje organinės anglies iki 2017 m. laipsniškai mažėjo tendencija, nepriklausomai nuo kritulių kiekio. 2018-2019 m. sausros rezultatas – neženklus visuminės C padidėjimas ypač seklesniuose gręžiniuose. Didžiausia per stebėsenos laikotarpį visuminės anglies koncentracija gruntiniai vandenys pasižymėjo Aukštaitijos KMS 2021-2024 metais, o Žemaitijos KMS 2022 metai (**7.3 pav.** 15 iš 25).

Analogiška situaciją registruota ir Žemaitijos KMS. Čia paskutiniuoju laikotarpiu didžiausios koncentracijos registruotos 2022, kai eglynai buvo masiškai pažeisti kenkėjų. Nuo šių metų iki 2025 m. vyko reikšmingas C koncentracijų mažejimas.

Paskutiniaisiais metais 2023-2025 stebimas visuminės C mažėjimo etapas.

Dzūkijos IMS 2025 metais buvo 11,30; 4,69 ir 5,42 mg/l, t.y. mažiau nei Aukštaitijos ir Žemaitijos IMS.

Apibendrinus, ištirpusios organinės anglies (DOC) koncentracijų kaita gruntiniame vandenyje atspindi vieną svarbiausių miško ekosistemų biogeocheminių procesų – organinės medžiagos transformaciją ir jos ryšį su vandens apytaka. DOC koncentracijas gruntiniame vandenyje reguliuoja organinių medžiagų skaidymosi intensyvumas, dirvožemio drėgmės režimas, gruntinio vandens papildymas, mikrobiologinis aktyvumas bei organinių kompleksų susidarymas su geležimi ir aliuminiu. Todėl ištirpusi organinė anglis laikoma vienu jautriausių klimato kaitos ir hidrologinio režimo pokyčių indikatorių miško ekosistemose (Kalbitz et al., 2000; Köhler et al., 2020; Evans et al., 2023).

Aukštaitijos KMS sekliųjų gruntinių vandenų DOC koncentracijos 2012–2020 m. buvo gana stabilios arba turėjo tendenciją mažėti. Analogiška dinamika nustatyta ir visuminio azoto koncentracijoms. Tikėtina, kad didesnis kritulių kiekis 2012 m. padidino organinės anglies ir azoto pernašą į gruntinius vandenis, o vėliau, mažėjant geosistemoje cirkuliuojančio vandens kiekiui ir 2018–2019 m. vyravus sausringoms sąlygoms, susidarė palankesnės sąlygos aerobinei organinės medžiagos mineralizacijai. Po šio laikotarpio, didėjant gruntinio vandens papildymui, DOC koncentracijos vėl padidėjo ir 2021–2024 m. pasiekė didžiausias reikšmes per visą stebėjimų laikotarpį.

Žemaitijos KMS gruntiniuose vandenyse iki 2017 m. taip pat vyravo laipsniškas DOC koncentracijų mažėjimas. Sausringi 2018–2019 m. metai lėmė nedidelį DOC koncentracijų padidėjimą, ypač sekliausiuose gruntinio vandens horizontuose. Didžiausios koncentracijos registruotos 2022 m., kai šio regiono eglynuose buvo fiksuojami masiniai žievėgraužio tipografo pažeidimai ir padidėję medynų žūties mastai. Tikėtina, kad dėl intensyvėjusios organinės medžiagos transformacijos ir didesnio šviežios organinės medžiagos patekimo į dirvožemį padidėjo ir ištirpusios organinės anglies srautai į gruntinius vandenis. Vėliau, 2023–2025 m., registruotas nuoseklus DOC koncentracijų mažėjimas.

Dzūkijos KMS 2025 m. nustatytos DOC koncentracijos (11,30; 4,69 ir 5,42 mg l^{-1}) buvo mažesnės negu Aukštaitijos ir Žemaitijos KMS, o tai rodo mažesnį ištirpusios organinės anglies foną šiame baseine. Kadangi ankstesnių DOC matavimų nėra, ilgalaikių kaitos tendencijų įvertinti negalima, tačiau gauti rezultatai leidžia manyti, kad Dzūkijos KMS organinės medžiagos migracija į gruntinius vandenis yra silpnesnė.

Visose stotyse išryškėjo bendras dėsningumas – po didžiausių DOC koncentracijų registravimo prasidėjo jų mažėjimo etapas. Tai leidžia manyti, kad po laikino organinės anglies mobilizacijos padidėjimo gruntinio vandens sistema palaipsniui grįžta į stabilesnę hidrocheminę būseną. Tokia dinamika gerai sutampa su visuminio azoto bei kai kurių kitų biogeninių elementų kaita ir rodo glaudų anglies bei azoto ciklų ryšį.

Tokiu būdu DOC koncentracijų pokyčiai yra svarbūs ne tik kaip anglies apytakos rodiklis. Ištirpusi organinė anglis reguliuoja daugelio mikroorganizmų aktyvumą, dalyvauja maisto medžiagų pernašoje, formuoja kompleksus su geležimi ir aliuminiu bei lemia daugelio mikroelementų judrumą gruntiniame vandenyje. Todėl jos ilgalaikė stebėsena leidžia kompleksiškai vertinti klimato kaitos poveikį požeminės geosistemos funkcionavimui.

Apibendrinant galima teigti, kad ***ištirpusios organinės anglies koncentracijų kaita atspindi glaudžią hidrologinių ir biologinių procesų sąveiką. Trumpalaikiai DOC koncentracijų padidėjimai siejami su klimato sąlygų nulemtais organinės medžiagos transformacijos pokyčiais, o pastarųjų metų mažėjimo tendencija rodo, kad gruntinio vandens anglies ciklas po ankstesnių hidrologinių ekstremumų palaipsniui stabilizuojasi.***

7.2.1. Bendras gruntinio vandens cheminės sudėties kaitos apibendrinimas

Daugiau kaip tris dešimtmečius vykdyti kompleksinio monitoringo tyrimai parodė, kad gruntinio vandens cheminė sudėtis Lietuvos hemiborealiniuose miškuose nėra stabili, o nuosekliai kinta, reaguodama į atmosferinės taršos mažėjimą, klimato kaitą ir vandens apytakos pokyčius. Tyrimų rezultatai atskleidė, kad gruntinis vanduo yra ne pasyvus dirvožemio procesų produktas, bet aktyvi miško ekosistemų biogeocheminių procesų grandis, integruojanti ilgalaikius pokyčius visoje geosistemoje.

Vienas svarbiausių nustatytų dėsningumų – po 2012–2014 m. daugumos hidrocheminių rodiklių kaitoje išryškėjo naujas vystymosi etapas. Būtent šiuo laikotarpiu daugelyje parametrų pasikeitė koncentracijų kitimo kryptys arba jų intensyvumas, o tai leidžia manyti, kad klimato kaitos sąlygomis pradėjo formuotis naujas gruntinio vandens hidrogeocheminis režimas. Šį pokytį patvirtina pH, specifinio elektrinio laidumo, chloridų, natrio, sulfatų, fosforo, aliuminio, geležies, silicio bei ištirpusios organinės anglies koncentracijų sinchroniški ilgalaikiai pokyčiai.

Ryškiausias teigiamas pokytis nustatytas sieros junginių cikle. Sulfatų koncentracijos gruntiniuose vandenyse visose trijose kompleksinio monitoringo stotyse sumažėjo kelis kartus ir pasiekė mažiausias reikšmes per visą stebėjimų laikotarpį. Tai patvirtina, kad sumažėjus atmosferinei sieros apkrovai vyksta ilgalaikis miško ekosistemų cheminis atsikūrimas, silpnėja rūgštėjimo procesai ir mažėja rūgštinančių junginių poveikis požeminei hidrogeocheminei sistemai.

Kita vertus, tyrimai parodė, kad klimato kaita tampa vis svarbesniu gruntinio vandens cheminės sudėties formavimosi veiksniu. Didėjantis kritulių kiekis, besikeičiantis jų sezoniškumas ir intensyvėjanti infiltracija keičia konservatyvių jonų (Na ir Cl), bazinių katijonų, biogeninių elementų bei ištirpusios organinės anglies migraciją. Dėl to požeminio vandens cheminė sudėtis vis labiau priklauso nuo hidrologinio režimo, o ne vien nuo atmosferinių iškritų ar dirvožemio savybių.

Svarbus naujas rezultatas – išryškėję regioniniai skirtumai tarp stočių. Aukštaitijos ir Dzūkijos kompleksinio monitoringo stotys daugeliu parametrų pasižymi panašia ilgalaike raida, tuo tarpu Žemaitijos KMS vis dažniau išsiskiria didesniu hidrocheminių rodiklių kintamumu, didesnėmis Na, Cl, sulfatų ir kai kurių biogeninių elementų koncentracijomis. Tai rodo, kad vakarų Lietuvos miško ekosistemose ryškesnė Baltijos jūros oro masių pernašos, didesnio atmosferinių iškritų kiekio ir specifinių hidrogeologinių sąlygų įtaka gruntinio vandens cheminei sudėčiai.

Ne mažiau svarbu ir tai, kad daugumos biogeninių elementų koncentracijos išliko mažos. Tai leidžia daryti išvadą, kad tiriamos miško ekosistemos iki šiol išsaugojo veiksmingą maisto medžiagų sulaikymo mechanizmą, o aktyviojoje šaknų zonoje vykstantys biologiniai procesai vis dar efektyviai riboja azoto ir fosforo išplovimą į gruntinius vandenis. Tuo pat metu mažėjančios aliuminio

koncentracijos rodo silpnėjantį potencialų rūgštėjimo poveikį ir didesnį požeminės sistemos cheminį stabilumą.

Apibendrinant galima teigti, kad gruntinio vandens cheminės sudėties ilgalaikė stebėsena leido pirmą kartą Lietuvos hemiborealiniuose miškuose kompleksiškai parodyti, kaip vienu metu persitvarko sieros, anglies, azoto, fosforo ir bazinių katijonų ciklai bei jų ryšys su klimato kaitos nulemtais hidrologinio režimo pokyčiais. Gauti rezultatai rodo, kad požeminis vanduo tampa vienu jautriausių integruotų klimato kaitos ir oro taršos poveikio indikatorių, todėl jo ilgalaikė stebėsena yra būtina vertinant miško ekosistemų atsparumą ir prognozuojant jų tolesnę raidą.

IŠVADOS

1. Daugiametė (1994–2025 m.) gruntinio vandens cheminės sudėties stebėsena parodė, kad Lietuvos hemiborealinių miškų gruntinio vandens hidrogeocheminė sistema nėra stabili, o nuosekliai kinta reaguodama į atmosferinės taršos mažėjimą, klimato kaitą ir hidrologinio režimo pokyčius. Gruntinis vanduo veikia kaip integruotas ilgalaikių biogeocheminių procesų indikatorius.
2. Vienas svarbiausių tyrimo rezultatų – 2013–2014 m. nustatytas daugelio hidrocheminių rodiklių kaitos lūžis. Po šio laikotarpio pasikeitė pH, specifinio elektrinio laidumo, chloridų, natrio, sulfatų, fosforo, aliuminio, geležies, silicio, bazinių katijonų bei ištirpusios organinės anglies koncentracijų kitimo pobūdis, rodantis naujo gruntinio vandens hidrogeocheminio režimo formavimąsi.
3. Aukštaitijos KMS sekliausiuose gruntinio vandens horizontuose pastaraisiais metais nustatytas vandens rūgštėjimas, analogiškas dirvožemio vandeniui, tačiau gilesniuose horizontuose pH palaipsniui didėja, rodydamas didesnę požeminės sistemos buferinę gebą. Žemaitijos KMS gruntinio vandens rūgštingumas, palyginti su 2004–2012 m. laikotarpiu, išliko didesnis, nors paskutiniaisiais metais stabilizavosi.
4. Skirtinga specifinio elektrinio laidumo, chloridų ir natrio koncentracijų kaita parodė nevienodą gruntinio vandens maitinimo pobūdį skirtinguose regionuose. Aukštaitijos ir Dzūkijos KMS konservatyviųjų jonų koncentracijos mažėjo, tuo tarpu Žemaitijos KMS jos ilgą laiką didėjo. Tai rodo didesnę Baltijos jūros oro masių, regioninės atmosferinės pernašos ir skirtingų hidrogeologinių sąlygų įtaką vakarų Lietuvos gruntiniams vandenims.

5. Ryškiausias teigiamas pokytis nustatytas sieros cikle. Sulfatų koncentracijos gruntiniuose vandenyse sumažėjo nuo 15–20 mg l^{-1} iki 1–4 mg l^{-1} ir pasiekė mažiausias reikšmes per visą stebėsenos laikotarpį. Tai patvirtina ilgalaikį miško ekosistemų cheminį atsikūrimą, sumažėjus rūgštinančių atmosferinių iškritų apkrovai.
6. Bazinių katijonų (Ca ir Mg) koncentracijos Aukštaitijos KMS paskutiniaisiais metais išliko gana stabilios, o jų koncentracijų skirtumai tarp stočių atspindi skirtingą požeminio vandens buferinę gebą ir mineralinio pagrindo savybes. Dzūkijos KMS nustatytos mažiausios bazinių katijonų koncentracijos tarp visų tirtų stočių.
7. Azoto junginių koncentracijos gruntiniuose vandenyse išliko mažos ir būdingos natūralioms miško ekosistemoms. Visuminio azoto, nitratų ir amonio koncentracijų trumpalaikiai padidėjimai buvo registruoti Aukštaitijos KMS 2022 m. ir Žemaitijos KMS 2023 m., tačiau ilgalaikės didėjimo tendencijos nenustatytos, o tai rodo išlikusį efektyvų azoto sulaikymą miško ekosistemose.
8. Visuminio fosforo ir fosfatų koncentracijų kaita parodė skirtingą stočių reakciją. Aukštaitijos KMS po 2014 m. fosforo koncentracijos mažėjo, tuo tarpu Žemaitijos KMS 2024–2025 m. vėl pradėjo didėti. Tai rodo, kad fosforo migraciją gruntiniame vandenyje vis labiau reguliuoja vietiniai hidrogeocheminiai ir biologiniai procesai.
9. Aliuminio koncentracijos 2024–2025 m. visose stotyse sumažėjo iki mažiausių reikšmių per visą stebėjimų laikotarpį. Šis pokytis rodo mažėjantį potencialiai toksiško aliuminio judrumą ir gali būti laikomas vienu iš požeminio vandens cheminio atsikūrimo požymių.
10. Ištirpusios organinės anglies koncentracijų dinamika buvo glaudžiai susijusi su hidrologinio režimo ir organinės medžiagos transformacijos pokyčiais. Didžiausios DOC koncentracijos registruotos 2021–2024 m. Aukštaitijos KMS ir 2022 m. Žemaitijos KMS, o vėliau prasidėjo jų mažėjimo etapas, rodantis požeminės sistemos stabilizacijos tendenciją.
11. Dzūkijos KMS pakartotiniai tyrimai parodė, kad per 26 metus pH, visuminio fosforo, nitratų ir geležies koncentracijos reikšmingai nepakito, tuo tarpu SEL, chloridų, natrio, kalio, magnio, kalcio, sulfatų, amonio, silicio ir mangano koncentracijos sumažėjo. Tai rodo ilgalaikį požeminio vandens mineralizacijos mažėjimą šiame baseine.
12. Tyrimų rezultatai pirmą kartą Lietuvoje leido kompleksiškai parodyti ilgalaikę atmosferinių iškritų, dirvožemio vandens ir gruntinio vandens cheminių pokyčių sąveiką. Nustatyta, kad klimato kaitos sąlygomis gruntinio vandens cheminę sudėtį vis labiau reguliuoja hidrologinio režimo pokyčiai, o ilgalaikė požeminio vandens stebėsena tampa vienu jautriausių miško ekosistemų atsparumo ir jų biogeocheminės raidos indikatorių.

Galimos grėsmės

Ilgalaikiai gruntinio vandens cheminės sudėties tyrimai parodė, kad, nepaisant akivaizdaus miško ekosistemų cheminio atsikūrimo po sieros emisijų sumažėjimo Europoje, pastaraisiais metais pradeda ryškėti nauji veiksniai, galintys keisti požeminio vandens hidrocheminį režimą ir ilgainiui paveikti miško ekosistemų stabilumą.

Didžiausia ilgalaikė grėsmė siejama su klimato kaitos nulemtu hidrologinio režimo persitvarkymu. Dažnėjant sausroms, intensyvių kritulių epizodams ir didėjant sezoniniams gruntinio vandens lygio svyravimams, gali keistis mineralų dūlėjimo intensyvumas, tirpiųjų elementų migracija, organinės medžiagos transformacija ir biogeninių elementų pernaša. Dėl šių procesų gruntinio vandens cheminė sudėtis ateityje gali tapti gerokai labiau priklausoma nuo ekstremalių meteorologinių reiškinių negu nuo ilgalaikės atmosferinės taršos.

Nors sulfatų koncentracijos gruntiniuose vandenyse sumažėjo iki mažiausių reikšmių per visą stebėjimų laikotarpį, pastarųjų metų atmosferinių iškritų tyrimai rodo naują sieros junginių koncentracijų didėjimo tendenciją, siejamą su pasikeitusia regionine oro teršalų pernaša po karo Ukrainoje pradžios. Atsižvelgiant į tai, kad sieros junginių migracija iš atmosferinių iškritų per dirvožemį į gruntinius vandenis vyksta su kelerių metų vėlavimu, negalima atmesti galimybės, jog ateityje gruntiniuose vandenyse vėl pradės didėti sulfatų koncentracijos. Jeigu ši tendencija pasitvirtintų, galėtų sulėtėti iki šiol vykęs miško ekosistemų cheminis atsikūrimas ir sustiprėti dirvožemio rūgštėjimo procesai.

Tam tikrą susirūpinimą kelia ir regioniniai skirtumai tarp stočių. Žemaitijos KMS išlieka jautriausia vakarų oro masių ir Baltijos jūros regiono atmosferinės pernašos poveikiui, todėl čia dažniau registruojamos didesnės chloridų, natrio, sulfatų bei kai kurių biogeninių elementų koncentracijos. Tai rodo, kad vakarinės Lietuvos miško ekosistemos gali būti jautresnės būsimiems atmosferinės taršos ir klimato kaitos pokyčiams.

Papildoma rizika siejama su intensyvėjančiais miško pažeidimais. Masiniai eglynų pažeidimai dėl žievėgraužio tipografo ir klimato kaitos sukeltų sausrų gali didinti organinės medžiagos patekimą į dirvožemį, keisti anglies ir azoto ciklus bei didinti ištirpusios organinės anglies ir biogeninių elementų migraciją į gruntinius vandenis. Tokie procesai gali pakeisti ne tik gruntinio vandens cheminę sudėtį, bet ir visos miško ekosistemos biogeocheminį funkcionavimą.

Todėl ilgalaikė gruntinio vandens cheminės sudėties stebėsena išlieka viena svarbiausių integruoto miško ekosistemų monitoringo krypčių. Tik nuoseklūs daugiamečiai stebėjimai leis atskirti natūralų ekosistemų prisitaikymą nuo naujų antropogeninių ir klimatinių poveikių bei laiku nustatyti naujai besiformuojančias grėsmes Lietuvos hemiborealinių miškų ekosistemoms.

Prognozės

Jeigu išliks dabartinės klimato kaitos tendencijos, gruntinio vandens cheminė sudėtis Lietuvos hemiborealinių miškų ekosistemose ir toliau bus formuojama ne tik dėl mažėjančios atmosferinės taršos, bet vis labiau dėl hidrologinio režimo pokyčių. Prognozuojama, kad didėjantis kritulių sezoniškumas, dažnesnės sausros ir intensyvūs kritulių epizodai lems didesnį gruntinio vandens cheminės sudėties kintamumą bei spartesnę medžiagų migraciją tarp dirvožemio ir požeminio vandens.

Tikėtina, kad iki šiol stebėtas sulfatų koncentracijų mažėjimas gruntiniuose vandenyse artimiausiais metais lėtės. Atmosferinių iškritų tyrimai jau rodo padidėjusias sieros junginių koncentracijas, kurios siejamos su pasikeitusia regionine oro teršalų pernaša po karo Ukrainoje pradžios. Atsižvelgiant į kelių metų vėlavimą tarp atmosferinių iškritų, dirvožemio ir gruntinio vandens reakcijos, negalima atmesti galimybės, kad ateityje gruntiniuose vandenyse bus registruojami pirmieji sulfatų koncentracijų didėjimo požymiai. Ar šie pokyčiai žymės naują ilgalaikę sieros apkrovos fazę, galės parodyti tik tęstiniai kompleksinio monitoringo tyrimai.

Numatoma, kad didėjant klimato ekstremalumui didės ir regioniniai skirtumai tarp stočių. Žemaitijos KMS dėl didesnės Baltijos jūros oro masių įtakos bei intensyvesnių atmosferinių iškritų gali išlikti jautriausia naujiems cheminės sudėties pokyčiams, tuo tarpu Aukštaitijos ir Dzūkijos KMS gruntinio vandens cheminė sudėtis labiau priklausys nuo gruntinio vandens papildymo intensyvumo ir dirvožemio vandens režimo.

Jeigu išliks dabartinės atmosferinės taršos mažėjimo tendencijos, tikėtina, kad bazinių katijonų bei aliuminio koncentracijos gruntiniuose vandenyse išliks stabilios arba mažai kintančios, o tai sudarys palankias sąlygas tolesniam miško ekosistemų cheminiam atsikūrimui. Tačiau klimato kaitos nulemti hidrologiniai svyravimai gali periodiškai didinti biogeninių elementų, ištirpusios organinės anglies ir kai kurių mikroelementų migraciją.

Prognozuojama, kad vis didesnę reikšmę gruntinio vandens cheminei sudėčiai turės biologiniai procesai. Dažnėjant medynų pažeidimams dėl sausrų, karščio bangų ir žievėgraužio tipografo plitimo, gali stiprėti organinės medžiagos transformacija, keistis anglies, azoto ir fosforo ciklai bei didėti jų sezoninis kintamumas požeminėje vandens sistemoje.

Atlikti tyrimai rodo, kad gruntinis vanduo tampa vienu jautriausių integruotų klimato kaitos, oro taršos ir miško ekosistemų būklės indikatorių. Todėl ilgalaikė jo cheminės sudėties stebėsena turėtų išlikti viena svarbiausių ICP Integrated Monitoring programos krypčių, leidžianti anksti nustatyti naujai besiformuojančias ekosistemų kaitos tendencijas ir įvertinti jų galimą poveikį Lietuvos hemiborealinių miškų tvarumui.

7.3. Paviršinio (upelio) vandens reikšmė miško ekosistemų būklei vertinti

Paviršinis vanduo yra galutinė miško baseino hidrologinės ir biogeocheminės sistemos grandis, integruojanti atmosferinių iškritų, dirvožemio ir gruntinio vandens sąveikos rezultatus. Jų cheminė sudėtis atspindi ne tik vykstančius medžiagų transformacijos ir migracijos procesus baseine, bet ir bendrą miško ekosistemų funkcionavimo būklę. Todėl paviršinių vandenų cheminiai tyrimai plačiai naudojami vertinant rūgštėjimo procesus, maisto medžiagų apytaką, organinės anglies eksportą, dirvožemio–vandens sąveiką bei ilgalaikį klimato kaitos ir atmosferinės taršos poveikį miško ekosistemoms (Likens & Bormann, 1995; Neal et al., 2008; De Vries et al., 2021).

Skirtingai nuo dirvožemio ar gruntinio vandens, upelio vanduo apjungia visų hidrologinių srautų poveikį ir todėl yra vienas jautriausių viso baseino būklės indikatorių. Jo cheminė sudėtis priklauso nuo atmosferinių iškritų, dirvožemio ir gruntinio vandens cheminės sudėties, vandens debito, medžiagų sulaikymo dirvožemyje bei biologinių procesų intensyvumo. Dėl šios priežasties ilgalaikė paviršinių vandenų stebėsena yra viena svarbiausių ICP Integrated Monitoring programos dalių, leidžianti įvertinti medžiagų eksportą iš miško baseinų, ekosistemų atsparumą bei jų ilgalaikį cheminį atsikūrimą (UNECE ICP Forests, 2024; UNECE ICP Forests, 2025). Pastarųjų metų tyrimai rodo, kad klimato kaitos sąlygomis upelių vandens cheminė sudėtis tampa vienu jautriausių hidrologinio režimo pokyčių, ekstremalių meteorologinių reiškinių ir biogeocheminių ciklų transformacijos indikatorių. Todėl jų ilgalaikiai tyrimai leidžia ne tik vertinti dabartinę ekosistemų būklę, bet ir prognozuoti galimus jų pokyčius ateityje (Koch & O'Donnell, 2025; Fundira et al., 2025).

Klimato kaita keičia ne tik vandens balansą, bet ir jo cheminės sudėties formavimosi procesus. Didėjanti oro temperatūra, besikeičiantis kritulių sezoniškumas, dažnėjančios sausros ir intensyvūs kritulių epizodai keičia vandens pratakumą, dirvožemio ir gruntinio vandens papildymą bei medžiagų migraciją miško baseinuose. Dėl šių priežasčių upelių vandenyse keičiasi rūgštingumas, tirpiųjų jonų koncentracijos, organinės anglies eksportas, maisto medžiagų išplovimas ir mikroelementų judrumas (Kelley et al., 2025; Li et al., 2025; Koch & O'Donnell, 2025).

Europos ilgalaikiai monitoringo tyrimai rodo, kad sumažėjus sieros ir azoto iškritoms miško baseinuose vyksta paviršinių vandenų cheminis atsikūrimas, tačiau šį procesą vis labiau modifikuoja klimato kaita. Todėl dabartiniu laikotarpiu upelių vandens cheminę sudėtį lemia dviejų pagrindinių veiksnių sąveika – mažėjanti atmosferinė tarša ir didėjantis klimato kaitos poveikis. Šių veiksnių tarpusavio ryšio įvertinimas yra vienas svarbiausių ilgalaikio KMS uždavinių, leidžiančių suprasti medžiagų migraciją nuo atmosferinių iškritų iki jų eksporto iš miško baseinų bei prognozuoti tolesnę miško ekosistemų raidą (De Vries et al., 2021; UNECE ICP Forests, 2025; Fundira et al., 2025).

7.3.1. Upelio vandens cheminės sudėties kaita KMS baseinuose

Aukštaitijos KMS upelio nuotėkio vidutinis intensyvumas (debitas) buvo mažiausias 2009, 2015-2016 ir 2019-2020 metais. Žemaitijos KMS upelio debitas kinta beveik cikliškai, bet palyginus su Aukštaitijos KMS upelio nuotėkiu, metais „vėluoja“, mažiausias vidutinis Juodupio debitas buvo, ne 2009 metais (kaip Versminio), o 2010 metais. Vieneriais metais vėliau, negu Aukštaitijoje, Žemaitijos KMS būdavo stebimi ir kritulių kiekio padidėjimai.

Nuo 2014 metų upelio nuotėkis Žemaitijos KMS nustotas matuoti dėl įrangos (limnigrafo) gedimo. Įranga buvo sugedusi ir 2006, 2008-2012 metais, tuomet Žemaitijos KMS upelio nuotėkio intensyvumas buvo apskaičiuotas pagal dirvožemio vandens nuotėkį 170 cm gylyje, nes šie dydžiai yra susiję. Nustatyta, kad upelio nuotėkis 2012 metais galėjo būti ketvirtas pagal intensyvumą. Vėliau, 2015-2020 metais upelio debitas nebuvo modeliuojamas, laukiama įrangos atnaujinimo, kuris parodytų ar tebėra ryšys tarp vandens nuotėkio intensyvumo giliajame lizimetre ir upelyje.

2025 m. Buvo iš naujo sutvarkyta užtvanka Dzūkijos KMS ir pradėtas registruoti vandens lygis bei einamieji vandens parametrai.

Kai kurios cheminės upelio vandens savybės yra susijusios su upelių debitu. Kadangi Žemaitijos KMS duomenų nuo 2015 metų nėra, o Dzūkijos upelio duomenų dar yra per mažai, Todėl daugiausia bus aptariamos Aukštaitijos KMS upelio vandens cheminės savybės, kurio debitas per 32 tyrimo metus išliko stabilus su debitu sumažėjimu 2009, 2016 ir 2021 bei padidėjimu 2005-2006, 2013 ir 2024-2025. Tai išskirtiniai metai, į kuriuos privalu atkreipti dėmesį analizuojant pokyčius ekosistemoje ir aiškinat ateities grėsmes stabilumui.

Pagrindinis šio tyrimo rezultatas yra tas, kad upelio debitas yra vienas svarbiausių paviršinio vandens cheminės sudėties formavimosi veiksnių. Dauguma cheminių rodiklių kinta sinchroniškai su vandens nuotėkio intensyvumu, todėl hidrologinio režimo pokyčiai tampa pagrindiniu veiksniu, aiškinančiu ilgalaikę medžiagų migraciją iš miško baseinų klimato kaitos sąlygomis. Dėl šios priežasties 2005–2006, 2009, 2013, 2015–2016, 2019–2021 ir 2024–2025 m. laikotarpiai laikytini etapiniais metais, kurių hidrologinės sąlygos lėmė ryškiausius paviršinio vandens cheminės sudėties pokyčius ir yra svarbiausi vertinant miško ekosistemų raidą bei galimas būsimas grėsmes jų stabilumui.

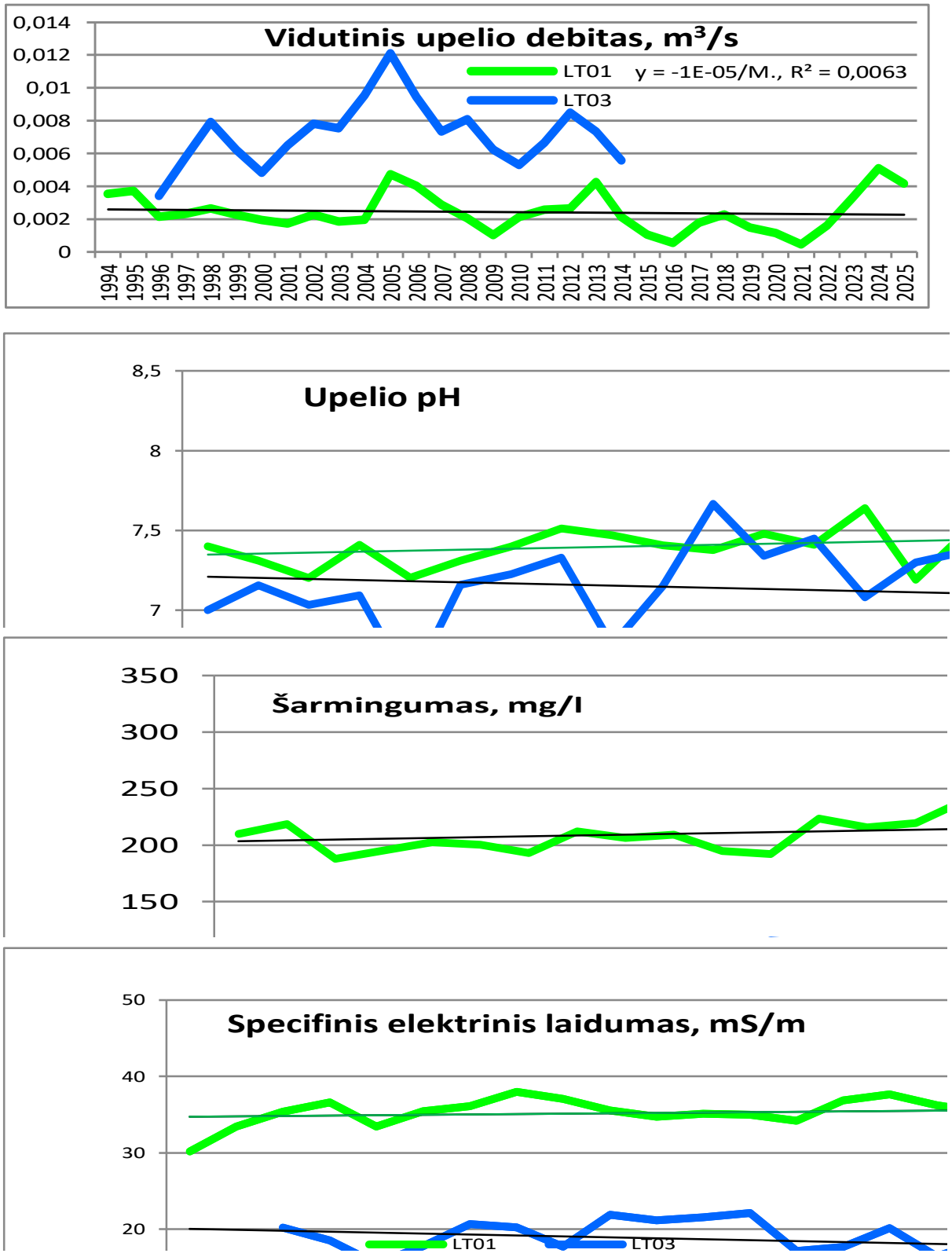
Daugiamečiai upelio rūgštingumo (pH) rezultatai rodo, kad per tiriamąjį laikotarpį upelio vandens rūgštingumas mažėjo Aukštaitijos KMS baseine siekdamas beveik po 0,006 pH per metus, o paskutiniaisiais metais pH vertė pradėjo viršyti ir 7,5 ribą. Jei dar iki 2020 m. Žemaitijos KMS upelio rūgštingumas mažėjo ir pagrinde iki 2004-2006 m., kai pH vertė padidėjo iki 7,7. Nuo šiuų metų iki 2019 upelio rūgtingumas reikšmingai nekito išlaikydamas labai silpną rūgštėjimo tendenciją. Išskirtinis laikotarpis prasideda nuo 2020 ir tęsiasi iki 2025, per kurį vandens rūgštingumas padidėjo pH reikšmėms sumažėjus iki 6,8. Tokio proceso rezultatas - Žemaitijos KMS upelio vandens rūgštingumas didėja po 0,007 pH per m. Tai reikšmingi rūgštingumo pokyčiai tirtų upelių vandenyse.

Kylanti vidutinė upelio vandens temperatūra galėjo lemti kai kurias chemines upelio vandens savybes. Dzūkijos IMS vidutinė upelio temperatūra 2025 metais buvo vidutiniškai 8,32°C, t.y., net 1°C aukštesnė nei Aukštaitijos ir Žemaitijos KMS upelių. Savitasis elektrinis laidis Dzūkijos IMS 1998 metais buvo 25,34, o 2025 metais - 26,7 mS/m (panašus į Žemaitijos IMS upelio vandens); pH vidutinė reikšmė Dzūkijos IMS 1998 metais buvo 7.86, o 2025 metais - 8,49, t.y. aukštesnė, negu kitose dviejose KMS.

Aukštaitijoje upelio vandens pH per stebėsenos laikotarpį išaugo ir tapo stabilesnis, rūgščiausias Aukštaitijos upelio vanduo buvo sausringiausiais 2008 metais. Žemaitijos IMS upelio vandens pH mažėja, 2022 metais vidutinis Žemaitijos upelio vandens rūgštingumas sumažėjo iki 1998 metų lygio (7.3 pav., 1 iš 9) – šiuo atveju, atvirkščiai: tiek 1998, tiek 2022 metais kritulių klimatinė norma buvo viršyta.

Šarmingumo ir specifinio elektrinio laidumo reikšmės per stebėjimų laikotarpį turi tendenciją augti Aukštaitijos KMS, o Žemaitijos KMS mažėti. Šie rezultatai reikšmingai siejasi su vandens rūgštingumą indikuojančio rodiklio kaitos ypatumais. Mažai kito ir Dzūkijos IMS vidutinis upelio vandens šarmingumas: 1998 metais buvo 143, o 2025 metais buvo 144 mg/l. Palyginus šarmingumo reikšmes tarp stočių, nustatyta kad Aukštaitijos upelio vandens šarmingumas viršija 200 mg/l, kai tuo tarpu Žemaitijos KMS upelio – 100 mg/l, t .y. dvigubai mažesnis.

Specifinio elektrinio laidumo reikšmių kaitoje stebimos skirtingos tendencijos: Aukštaitijos KMS upelio vandenyje šis parametras turi tendenciją didėti, o Žemaitijos KMS baseino upelio vandenyje – priešingai mažėti. Nepaisant šių kaitos skirtumu, nustatytas daugiametis kaitos intensyvumas nėra reikšmingas, o kritulių gausa neturi vienareikšmio poveikio. 2021 m. specifinis elektrinis laidumas Aukštaitijos KMS padidėjo iki vienų iš didžiausių reikšmių, kai tuo tarpu Žemaitijos KMS iki vienų iš mažiausių reikšmių. SEL reikšmių palyginimas trap stočių atskleidė tą patį dėsningumą: jei Aukštaitijos KMS upelio vandenyje jis svyravo apie 35 mS/m reikšmę, tai Žemaitijos KMS palaipsniui mažėja jau nesiekiant ir 20 mS/m reikšmę.



7.4 pav. Vidutiniai upelio vandens parametrai (1 iš 12). LT03 debitai 2007 ir 2009-2012 metais sumodeliuoti pagal dirvožemio vandens nuotėkį 170 cm gylyje.

Daugiametė paviršinio vandens stebėsena parodė, kad upelių rūgštingumo (pH), šarmingumo ir specifinio elektrinio laidumo (SEL) kaita skirtinguose kompleksinio monitoringo baseinuose vyko nevienoda kryptimi, atspindėdama baseinų hidrologinio režimo, vandens–uolienų sąveikos bei buferinės gebos skirtumus. Tai patvirtino rezultatus, kad ilgalaikę upelių hidrochemijos kaitą pirmiausia lemia hidrologinio ryšio tarp dirvožemio, gruntinio ir paviršinio vandens pokyčiai, o gruntinio vandens papildymo intensyvumas tampa vienu svarbiausių upelių cheminės sudėties formavimosi veiksnių klimato kaitos sąlygomis **(Stevenson et al., 2024; Ortega et al., 2025)**

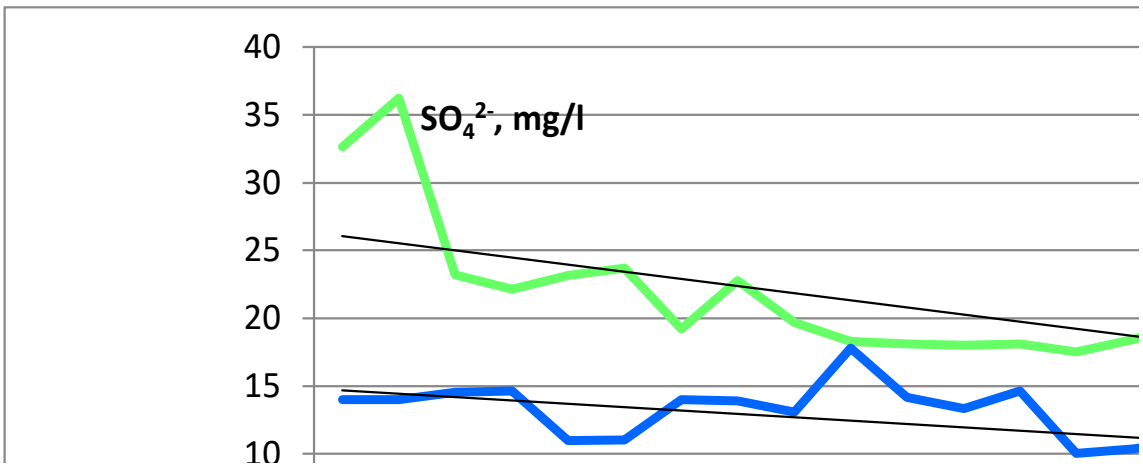
Aukštaitijos KMS Versminio upelyje per visą stebėjimų laikotarpį vandens pH nuosekliai didėjo, kartu didėjo vandens šarmingumas ir specifinis elektrinis laidumas, kas rodo stiprėjančią požeminio vandens įtaką upelio mitybai ir didesnę karbonatinės buferinės sistemos reikšmę formuojant paviršinio vandens cheminę sudėtį. Panašias tendencijas Europos miško baseinuose aprašo De Vries ir kt. (2021) bei ICP Forests (2025), kurie sieja didėjantį paviršinių vandenų pH su mažėjančia rūgštinančių atmosferinių iškritų apkrova ir didesniu gruntinio vandens indėliu.

Priešingos tendencijos nustatytos Žemaitijos KMS Juodupio upelyje. Upelio pH kaip ir šarmingumas bei SEWL mažėjo. Tokie pokyčiai rodo silpnėjančią upelio buferinę gebą ir didesnę dirvožemio bei paviršinių vandenų įtaką upelio cheminei sudėčiai. Klimato kaitos sąlygomis net nedideli vandens debito pokyčiai gali reikšmingai pakeisti upelių pH ir šarmingumą, todėl šie rodikliai laikomi jautriais hidrologinių pokyčių indikatoriais (Beierkuhnlein et al., 2024).

Dzūkijos KMS pakartotiniai tyrimai parodė, kad šio baseino upelio vanduo pasižymi didžiausiomis pH reikšmėmis iš visų tirtų stočių. Specifinis elektrinis laidumas taip pat išliko stabilus (25,3–26,7 mS m^{-1}), rodydamas didelį šio baseino hidrocheminį stabilumą ir mažą ilgalaikių aplinkos pokyčių poveikį paviršinio vandens cheminei sudėčiai.

Palyginus visas tris stotis nustatyti teritoriniai skirtumai. Aukštaitijos KMS upelio vanduo pasižymi didžiausiu šarmingumu (apie 200 mg l^{-1}) ir didžiausiu specifiniu elektriniu laidumu (apie 35 mS m^{-1}), Žemaitijos KMS šie rodikliai yra beveik du kartus mažesni, o Dzūkijos KMS užima tarpinę padėtį. Tai atspindi nevienodą baseinų geologinę sandarą, skirtingą gruntinio vandens indėlį į upelių mitybą bei nevienodą vandens–uolienų sąveikos intensyvumą (Stevenson et al., 2024).

Apibendrinant galima teigti, kad ***paviršinio vandens pH, šarmingumo ir SEL kaita atspindi ilgalaikius miško baseinų hidrogeocheminės raidos skirtumus. Aukštaitijos KMS formuojasi didesnio cheminio stabilumo požymiai, tuo tarpu Žemaitijos KMS registruojamos priešingos tendencijos rodo didėjantį šio baseino jautrumą klimato kaitos ir hidrologinio režimo pokyčiams.*** Šie rezultatai patvirtina, kad klimato kaita tampa svarbiu paviršinių vandenų cheminės sudėties formavimosi veiksniu (Stevenson ir kt., 2024; Ortega ir kt., 2025; ICP Forests, 2025).

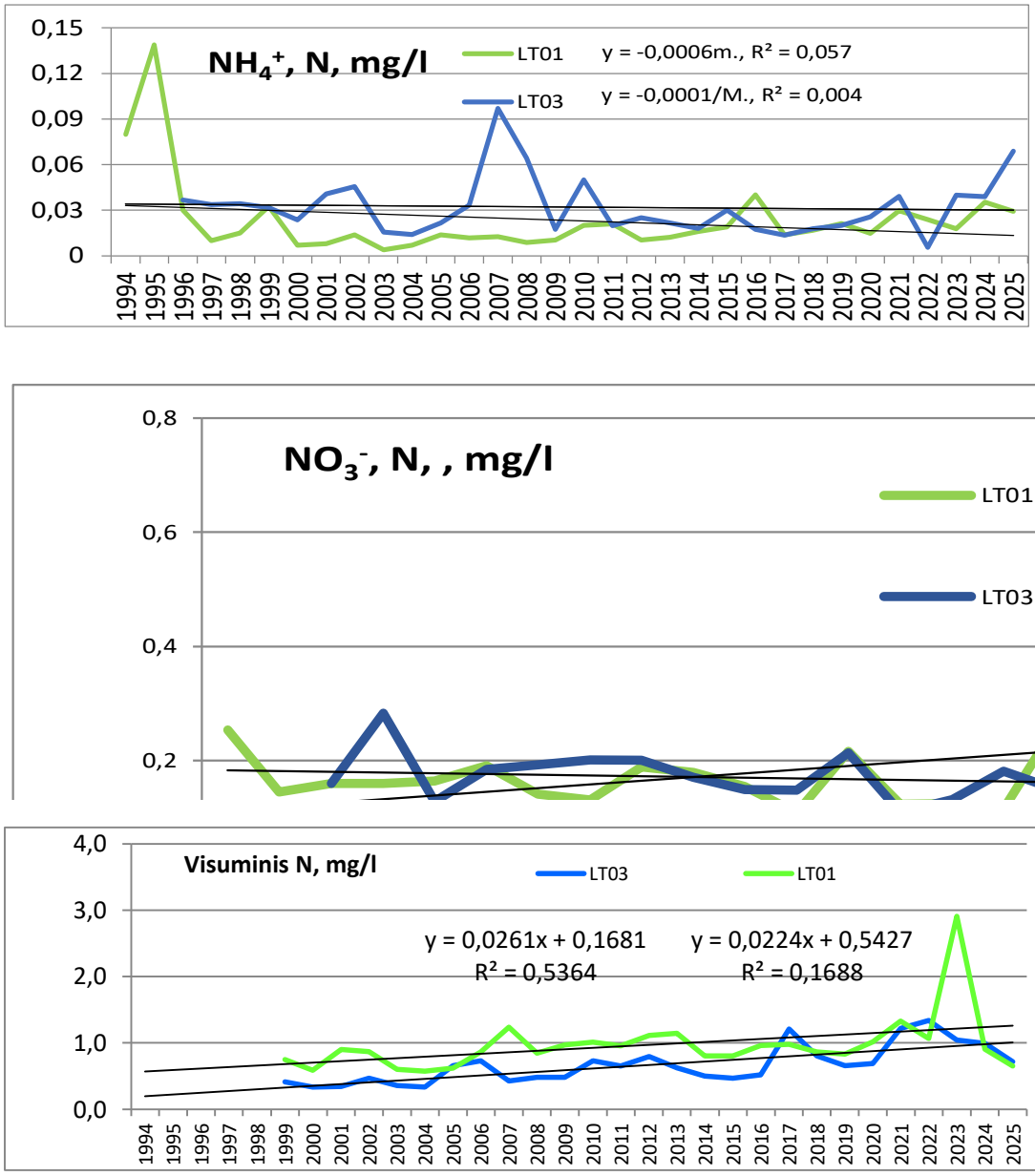


7.4 pav. Vidutiniai upelio vandens parametrai (2 iš 12).

Reikšmingiausia kaita abiejų KM stočių upelio vandenyse nustatyta sulfatų ir ypač Aukštaitijos KMS baseine. Čia sulfatų koncentracija mažėja po -0,6 mg/l per metus. Žemaitijos KMS upelio vandenyje sulfatų mažėjimo intensyvumas beveik 2 kartus silpnesnis ir siekia po -0,25 mg/l per metus. Didesnėmis koncentracijomis sulfatai pasižymi Aukštaitijos KMS upelio vandenyje. Tai bendros sulfatų koncentracijų ore, krituliuose, dirvožemio ir gruntinio vandenyse kaitos tendencijos rezultatas. Upelio vandenyje ištirpusių sulfatų kiekis reikšmingai mažėja ir Dzūkijos IMS, kur vidutinė sulfatų koncentracija upelio vandenyje 1998 metais buvo 15,5 mg/l, o 2025 metais daug mažesnė – 9,9 mg/l.

Gauti rezultatai rodo, kad sieros ciklo pokyčiai hemiborealiniuose Lietuvos miškuose vyksta nuosekliai visoje medžiagų migracijos grandinėje – nuo atmosferinių iškritų iki jų eksporto upeliais. Tai leidžia teigti, kad sulfatų koncentracijų mažėjimas yra ne lokalus reiškinys, bet integrali viso baseino atsako į mažėjančią atmosferinę sieros apkrovą išraiška. Tačiau trumpalaikiai sulfatų koncentracijų padidėjimai, registruoti pastaraisiais metais kituose ekosistemos komponentuose, leidžia manyti, kad sieros ciklas dar nėra visiškai stabilizavęsis. Todėl būtina tęsti ilgalaikę stebėseną, siekiant įvertinti, ar pastaruoju metu atmosferinėse iškritose registruojamas sieros junginių didėjimas, galimai susijęs su karo Ukrainoje pasekmėmis, ateityje atsispindės ir paviršinių vandenų cheminėje sudėtyje.

Pirmą kartą parodyta, kad ***ilgalaikis sieros apkrovos mažėjimas nuosekliai atsispindi visoje medžiagų migracijos grandinėje – nuo atmosferinių iškritų iki medžiagų eksporto iš miško baseino upeliais.***



7.4 pav. Vidutiniai upelio vandens parametrai (3 iš 12).

Nitratų (NO_3^- N) ir amonio (NH_4^+ N) kito beveik sinchroniškai. Nustatytas daugiametis trendas rodo, kad šių junginių koncentracijos upelio vandenyje turėjo tendenciją mažėti, bet tik iki 2020 metų. Paskutiniuoju laikotarpiu šių komponenčių koncentracijos upelio vandenyje pradėjo didėti ir ypač nitratų, kurios 2021-2022 m. Pasiekė savo maksimalias reikšmes per visą tiriamąjį laikotarpį, t.y. viršijo 0,6 mg.l ribą 3 kartus viršijusią daugiametę iki tol nustatytą reikšmę. Amonio koncentracija šiuo paskutiniuoju laikotarpiu išaugo nuo 0,02 iki 0,03 mg/l.

Žeėmaitijos KMS nustatytas amonio ir nitratų koncentracijų mažėjimo tendenciją per visą tiriamąjį laikotarpį nepaisant fakto, kad paskutiniuoju laikotarpiu šio komponenčių koncentracijos taip pat buvo linkusios didėti, ypač nitratų.

Nitratų ir amonio koncentracijos Aukštaitijos ir Žemaitijos KMS upelio vandenyje reikšmingai nesiskiria per visą tiriamąjį laikotarpį.

Dzūkijos IMS amonio azoto upelio vandenyje 2025 metais yra aukšta: metų vidurkis 1998 metais buvo 0,025 mg/l, o 2025 metais daug didesnis – 0,056 mg/l; nitratų azoto vidutinė reikšmė nekinta 1998 metais buvo 0,112 mg/l, o 2025 metais – 0,113 mg/l.

Apibendrinus rezultatus, nitratų (NO_3^--N) ir amonio (NH_4^+-N) koncentracijų kaita Aukštaitijos ir Žemaitijos KMS upelių vandenyje pasižymėjo panašiu ilgalaikiu pobūdžiu. Abiejų azoto formų koncentracijos iki maždaug 2020 m. turėjo tendenciją mažėti, atspindėdamos ilgalaikį atmosferinės azoto apkrovos mažėjimą bei efektyvų azoto sulaikymą miško ekosistemose. Panašias tendencijas Europos miško baseinuose kai mažėjanti azoto depozicija ilgainiui mažina nitratų išplovimą į paviršinius vandenis (Gundersen et al., 2006; Dise et al., 2009; De Vries et al., 2021).

Tačiau Aukštaitijos KMS nuo 2021 m. išryškėjęs naujas etapas amonio padidėjimas sutapo su nitratų koncentracijų didėjimu, kias gali rodyti intensyvėjančią organinės medžiagos mineralizaciją bei aktyvesnę azoto apytaką baseine.

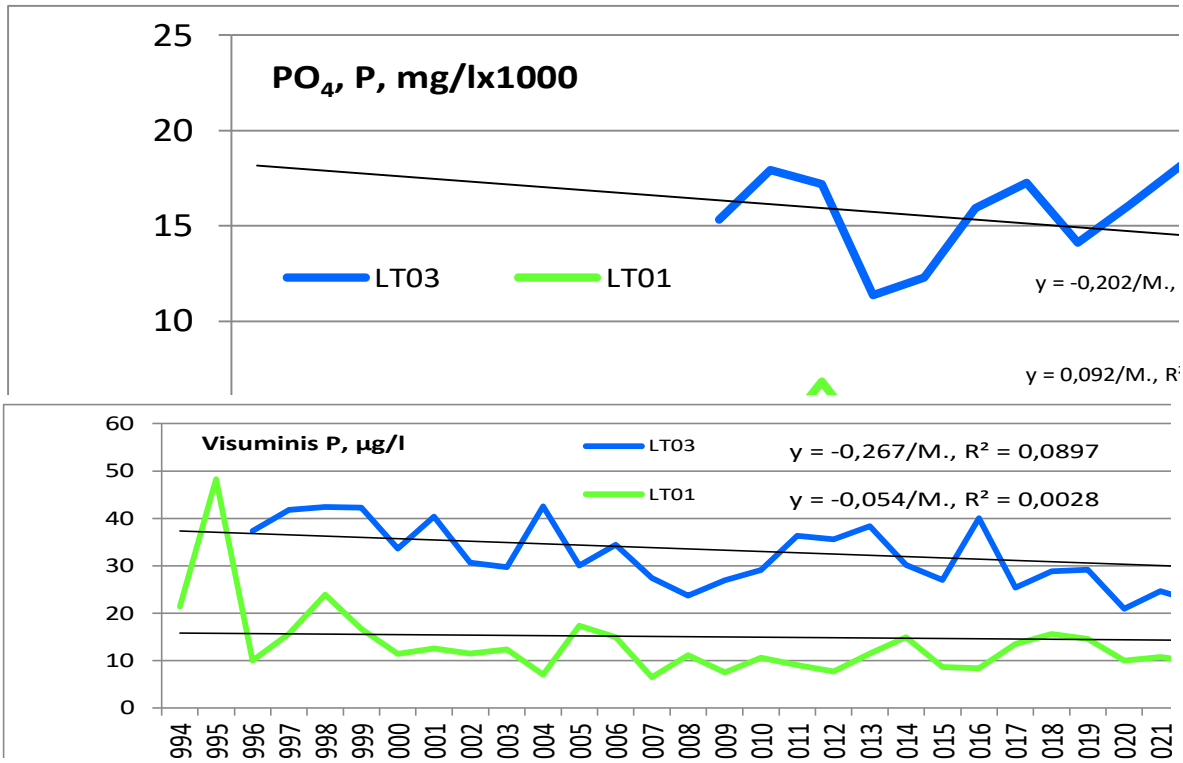
Žemaitijos KMS ilgalaikė nitratų ir amonio koncentracijų mažėjimo tendencija išliko ryškesnė negu Aukštaitijos KMS. Vis dėlto ir šiame baseine paskutiniaisiais stebėsenos metais registruotas nitratų koncentracijų didėjimas, nors jis buvo mažesnio intensyvumo. Tai leidžia manyti, kad pastarųjų metų pokyčiai nėra atsitiktiniai, bet gali atspindėti bendresnius azoto ciklo pokyčius hemiborealinių miškų ekosistemose.

Palyginus abi kompleksinio monitoringo stotis nustatyta, kad nitratų ir amonio koncentracijos upelių vandenyje visą stebėjimo laikotarpį reikšmingai nesiskyrė. Tai rodo, kad nepaisant skirtingų hidrologinių ir geocheminių sąlygų, azoto junginių migraciją abiejuose baseinuose reguliuoja panašūs biogeocheminiai procesai.

Dzūkijos KMS pakartotiniai tyrimai rodo, kad šiame baseine azoto ciklo pokyčiai kol kas nėra susiję su nitratų išplovimo didėjimu, tačiau gali atspindėti intensyvėjančius organinės medžiagos skaidymo procesus.

Visuminio N kaitoje stebima ta pati tendencija abiejose stotyse, kai N koncentracijos didėja po maždaug 0,025 mgN/l per m., koncentracijoms Aukštaitijos KMS upelio vandenyje viršijant koncentracija Žemaitijos KMS baseino upelyje apie 0,5 mg/l.

Naujausi tyrimai rodo, kad **klimato kaitos sąlygomis trumpalaikiai nitratų koncentracijų padidėjimai upeliuose vis dažniau siejami su sausrų ir gausių kritulių kaitos ciklais, medynų pažeidimais bei organinės medžiagos mineralizacijos suaktyvėjimu (Sardans and Peñuelas, 2021; Sardar et al., 2023; Du et al., 2025). Todėl Aukštaitijos ir Žemaitijos KMS paskutiniaisiais metais registruojamas nitratų koncentracijų didėjimas gali būti pirmasis signalas, rodantis, kad klimato kaitos poveikis azoto ciklui tampa stipresnis negu iki šiol dominavęs atmosferinės azoto apkrovos mažėjimo efektas. Ar ši tendencija taps ilgalaike, galės parodyti tik tolesni kompleksinio monitoringo tyrimai.**



7.4 pav. Vidutiniai upelio vandens parametrai (4 iš 12).

Fosfatų ir visuminio fosforo koncentracijos Aukštaitijos KMS upelio vandenyje keičiasi skirtingai: fosfatų koncentracijos, nors ir nereikšmingai turi tendenciją didėti, o visuminio P koncentracijos, nors taip pat nereikšmingai, turi tendenciją mažėti. Paskutiniaisiais metais šių junginių koncentracijos buvo padidėjusios ir 2024-2025 m. visuminio P koncentracija upelio vandenyje pasiekė savo maksimalią reikšmę, siekdama 40 µg/l ribą.

Žemaitijos KMS šių junginių koncentracijos pakankamai reikšmingai mažėja, nors 2024-2025 m. visuminio P koncentracijos taip pat pasiekė maksimalią reikšmę – virš 50 µg/l. Dzūkijos KMS upelio vandenyje fosfatai 1998 metais nebuvo matuojami, o 2025 metais buvo 50,3 µg/l; visuminio fosforo kiekis 1998 metais buvo 92,5 µg/l, o 2025 metais – 139,2 µg/l.

Palyginus rezultatus tarp stočių fosfatų ir visuminio P koncentracijos didžiausios nustatytos Dzūkijos KMS upelio vandenyje, 2-3 kartus mažesnės Žemaitijos KMS ir beveik iki 10 kartų mažesnės Aukštaitijos KMS upelio vandenyje (7.4 pav., 4 iš 12).

Fosfatų ir visuminio fosforo koncentracijų kaita parodė, kad P ciklas upelių baseinuose priklauso nuo vietinių hidrologinių ir biogeocheminių procesų. Aukštaitijos KMS fosfatų koncentracijos turėjo nežymią didėjimo, o visuminio P – nežymią mažėjimo tendenciją. Toks priešingas kitimo pobūdis gali rodyti fosforo formų persiskirstymą: santykinai didesnę tirpių reaktyviųjų fosfatų dalį ir mažesnį organinio P indėlį. Fosfatų ir visuminio P koncentracijos upeliuose gali kisti skirtingai, nes tirpiųjų ir dalelinių fosforo formų eksportą reguliuoja nevienodi vandens tėkmės keliai, debitas bei gruntinio vandens indėlis (Dupas et al., 2017; Mosquera et al., 2023).

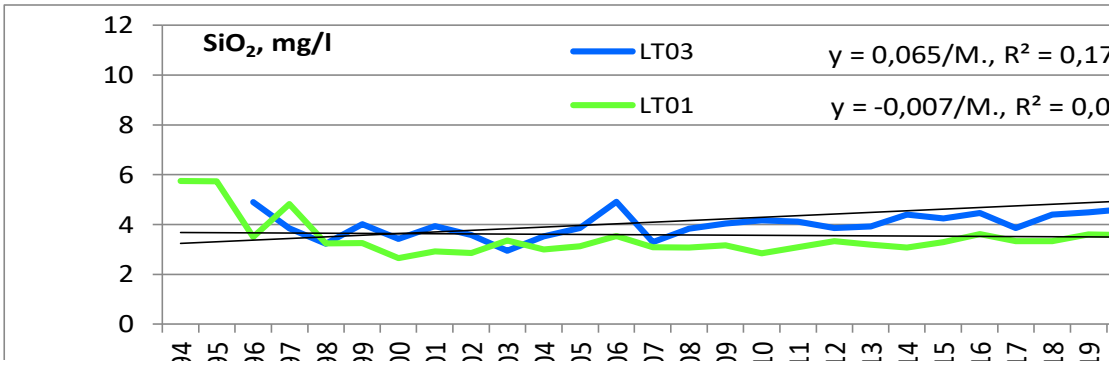
Nepaisant silpnų daugiamečių tendencijų, sinchroniškas koncentracijų padidėjimas abiejuose baseinuose gali būti siejamas su 2024–2025 m. hidrologinėmis sąlygomis, didesniu nuotėkiu, pakrančių ir dirvožemio horizontų hidrologiniu susijungimu bei organinių ir koloidinių P formų mobilizacija. Naujausi tyrimai patvirtina, kad fosforo koncentracijų šuolius upeliuose dažnai lemia ne pastovus foninis išplovimas, o trumpi didelio debito laikotarpiai, kai į upelį patenka anksčiau baseine sulaikytas fosforas (Mosquera et al., 2023; Meyer et al., 2024).

Nustatytaė, kad fosforo sulaikymą ir išlaisvinimą vandens sistemose reguliuoja ištirpusios organinės medžiagos kokybė, hidrologinis susietumas ir mikroorganizmų aktyvumas (Meyer et al., 2024). Todėl 2024–2025 m. nustatytas visuminio P padidėjimas galėjo apimti ne tik laisvus fosfatus, bet ir su organine medžiaga, Fe bei Al kompleksais arba koloidais pernešamas P formas. Dėl šios priežasties fosfatų ir visuminio P koncentracijų skirtumai turėtų būti vertinami kartu su upelio debitu, DOC, Fe, Al ir suspenduotųjų medžiagų kiekiu.

Dzūkijos KMS upelio vanduo išsiskyrė didžiausiomis fosforo koncentracijomis, rodančioms didesnis organinio, koloidinio arba dalelinio fosforo eksportą, kuris sietinas su baseino dirvožemio, hidrologinio susietumo bei nuosėdų savybėmis bei didžiausiu debitu. Tyrimai rodo, P biologinis prieinamumas ir eksportas labai skiriasi tarp baseinų ir sezonų, priklausomai nuo organinės medžiagos patekimo, vandens tėkmės bei P transformavimo (Rulli et al.,2022; Mosquera et al., 2023).

Tokiu būdu Aukštaitijos ir Žemaitijos KMS fosforo koncentracijos dažniausiai išlieka nedidelės, tačiau paskutiniųjų metų padidėjimas rodo galimą didėjančio P eksporto iš baseinų etapą. Dzūkijos KMS nustatytas gerokai aukštesnis visuminio P lygis gali skatinti dumblių ir mikroorganizmų produkciją, keisti deguonies režimą, maisto tinklus ir makrozoobentoso bendrijų struktūrą. Vis dėlto faktinis ekologinis poveikis priklausys nuo biologinio P prieinamumo, vandens temperatūros, šviesos, azoto kiekio, vandens užsilaikymo laiko ir ypač debito.

Ilgalaikės fosforo tendencijos Aukštaitijos ir Žemaitijos KMS iki šiol nerodė nuoseklaus didėjimo, tačiau sinchroniškas visuminio P šuolis 2024–2025 m. ir didelės Dzūkijos KMS koncentracijos rodo, kad fosforo eksportas tampa vis jautresnis hidrologiniams ekstremumams, upelio srovės intensyvumui ir organinių–mineralinių kompleksų mobilizacijai. Todėl tolesnėje analizėje fosforo koncentracijas būtina sieti su debitu ir skaičiuoti jo srautus, nes vien koncentracija neleidžia nustatyti, ar bendras fosforo išnešimas iš baseino iš tikrųjų padidėjo.



7.4 pav. Vidutiniai upelio vandens parametrai (5 iš 12).

Silicio koncentracija nuo 1999-2000 metų turi tendenciją didėti Žemaitijos KMS upeliyje, o Aukštaitijos KMS upelyje išlikti stabilus 2,6-2,8 mg/l lygyje. Išskirtinis bruožas 2022-2023 m. ženkliai išaugusios šio junginio koncentracijos abiejų stočių vandenyse. Tai gali būti susiję su susiję su gamtinio vandens cirkuliacijos išaugimu šiuo laikotarpiu ir mineralų dūlėjimo procesų intensyvėjimu. Dzūkijos IMS SiO2 vidutinė koncentracija nedaug keitėsi. 1998 metais buvo 3,54 mg/l, o 2025 metais – 3,61 mg/l. Palyginus tarp stočių didžiausios koncentracijos nustatytos Žemaitijos KMS upelio vandenyje, kiek mažesnės Aukštaitijos ir mažiausios Dzūkijos KMS.

Apibendrinus rezultatus, SiO_2 koncentracijų kaita upelių vandenyje buvo gerokai stabilesnė negu kitų pagrindinių cheminių komponentų. Abiejose stotyse išsiskyrė 2022–2023 m. laikotarpis, kai silicio koncentracijos reikšmingai padidėjo. Tikėtina, kad šį padidėjimą lėmė intensyvesnė vandens apytaka baseinuose, didesnis gruntinio vandens indėlis į upelių mitybą ir suaktyvėję silikatinių mineralų dūlėjimo procesai. Tirpiojo silicio koncentracija upeliuose priklauso nuo vandens buvimo laiko dirvožemyje ir gruntiniame horizonte (Hartmann et al., 2014; Moon et al., 2024).

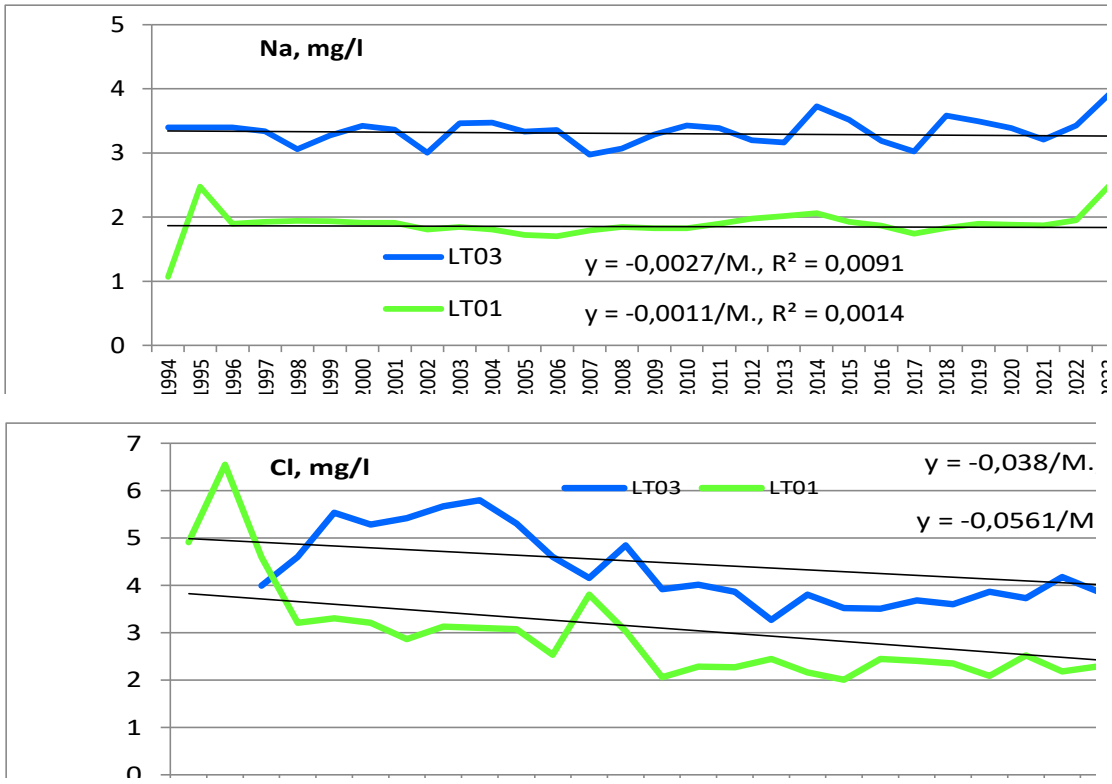
Dzūkijos KMS pakartotiniai tyrimai parodė kad ilgalaikiai silikatinių mineralų dūlėjimo procesai šiame baseine išliko praktiškai nepakitę. Skirtumai tarp stočių greičiausiai atspindi nevienodą baseinų geologinę sandarą, gruntinio vandens mitybos intensyvumą ir vandens kontaktavimo su mineraliniu gruntu trukmę. Tyrimų rezultatai rodo, kad tirpiojo silicio koncentracijos natūraliuose upeliuose daugiausia priklauso nuo silikatinių mineralų dūlėjimo

intensyvumo, hidrologinio režimo ir gruntinio vandens dalies bendrame nuotėkyje (Gaillardet et al., 1999; Hartmann et al., 2014; Moon et al., 2024).

Tokiu būdu tirpusis silicis nėra laikomas teršalu, tačiau jis yra svarbus biogeocheminių procesų indikatorius. Jo koncentracija atspindi ilgalaikį mineralų dūlėjimo intensyvumą, požeminio ir paviršinio vandens sąveiką bei medžiagų migraciją baseine. Be to, silicis būtinas diatominiams dumbliams, kurie sudaro svarbią upelių pirminės produkcijos dalį, todėl jo koncentracijos pokyčiai gali turėti įtakos ir vandens ekosistemų funkciniam stabilumui (Conley, 2002; Frings et al., 2020).

Tirpiojo silicio koncentracijos visuose trijuose kompleksinio monitoringo baseinuose išliko santykinai stabilios, tačiau trumpalaikis jų padidėjimas 2022–2023 m. rodo, kad šis rodiklis jautriai reaguoja į hidrologinio režimo pokyčius. Tai leidžia SiO_2 laikyti vienu patikimiausių natūralių vandens–uolienų sąveikos ir cheminio dūlėjimo intensyvumo indikatorių hemiborealinių miškų baseinuose.

Didžiausiu koncentracijų kaitos stabilumu pasižymi Na koncentracijos. Per tiriamąjį laikotarpį šių elementų koncentracijos iš esmės nesikeitė nei Aukštaitijos, nei Žemaitijos KMS upelių vandenyse. Tik Dzūkijos KMS upelio vandenyje šio elemento kioncentracijos buvo didžiausios (2025), kiek mažesnės Žemaitijos KMS upelio vandenyje ir iki 1,5 karto mažesnės Aukštaitijos KMS upelio vandenyje.



7.4 pav. Vidutiniai upelio vandens parametrai (6 iš 12).

Vieną iš reikšmingiausių kaitų demonstruoja Cl. Per visą tiriamąjį laikotarpio šio elemento koncentracijų daugiametė tendencija yra neigiama. Abiejų KM stočių upelio vandenyse chloro mažėja beveik vienodu intensyvumu, t.y. po 0,04-0,06 mg/l per metus. Tačiau nuo 2012-2013 m. ši tendencija jau ne tokia aiški. Paskutiniuoju laikotarpiu stebimas Cl koncentracijų upelių vandenyse augimas, ypač 2020-2025. Dėl Baltijos jūros įtakos Cl kjoncentracijos Žemaitijos KMS 1,5 karto didesnės negu Aukštaitijos KMS.

Natrio (Na^+) koncentracijos pasižymėjo didžiausiu stabilumu iš visų tirtų pagrindinių katijonų. Per visą stebėjimų laikotarpį reikšmingų daugiametių Na koncentracijų pokyčių nenustatyta nei Aukštaitijos, nei Žemaitijos KMS upelių vandenyse. Toks stabilumas rodo, kad natūraliomis sąlygomis natrio koncentraciją daugiausia reguliuoja baseino geologinė sandara, gruntinio vandens mityba ir atmosferinė jūrinių aerozolių pernaša, o biologiniai procesai šio elemento apytakai turi palyginti nedidelę įtaką. Tai vienais patikimiausių konservatyviųjų hidrocheminių indikatorių (Likens andr Bormann, 1995; Hem, 1985; Neal and Kirchner, 2000).

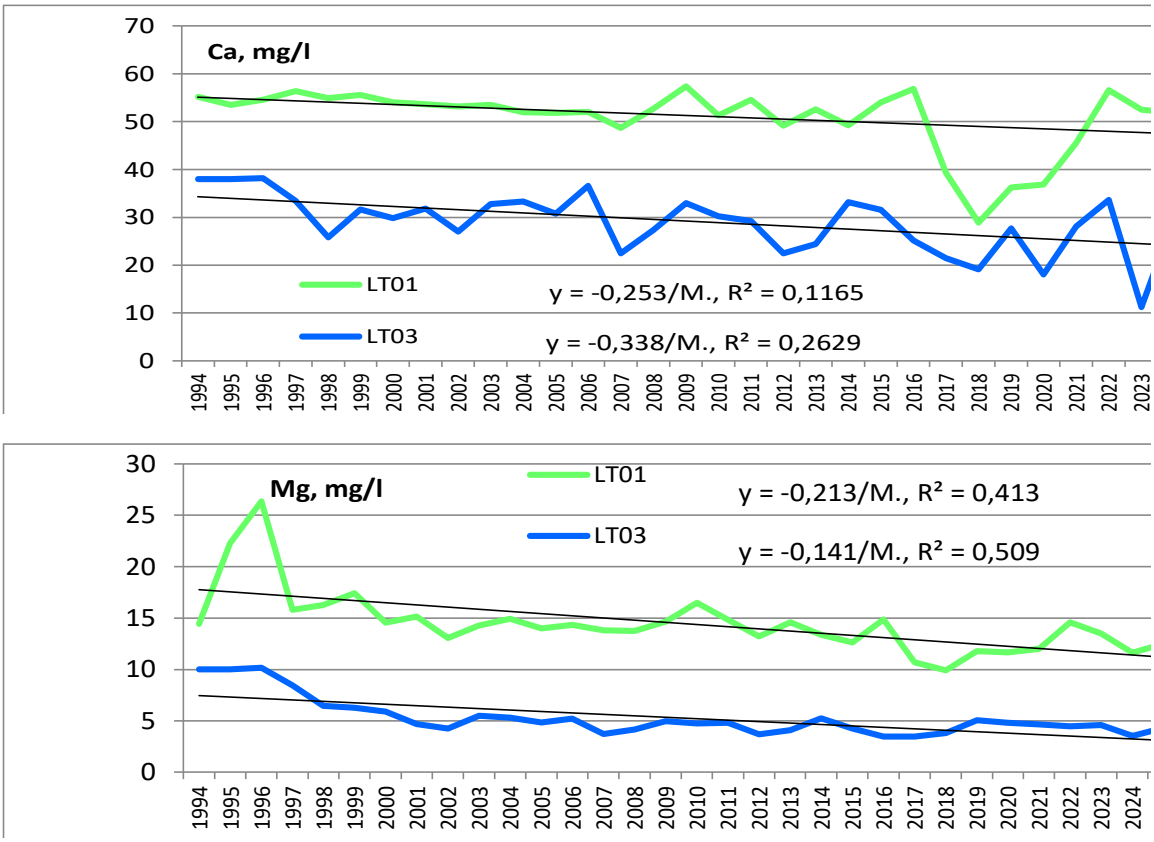
Palyginus tarp stočių nustatyta aiški teritorinė diferenciacija. Kadangi ilgalaikių koncentracijų pokyčių praktiškai nenustatyta, galima teigti, kad Na migracija šiuose baseinuose išliko stabili ir nepatyrė esminių klimato kaitos ar atmosferinės taršos poveikio.

Visai kitokį kaitos pobūdį parodė chloridų (Cl^-) koncentracijos. Per visą stebėjimų laikotarpį abiejų kompleksinio monitoringo stočių upeliuose nustatyta aiški ilgalaikė chloridų mažėjimo tendencija. Šis mažėjimas gerai sutampa su chloridų koncentracijų pokyčiais atmosferinėse iškritose, dirvožemio ir gruntiniame vandenyje, rodydamas nuoseklų visos baseino hidrologinės sistemos atsaką į mažėjančią atmosferinę apkrovą.

Vis dėlto nuo 2012–2013 m. ilgalaikė mažėjimo tendencija pradėjo silpnėti. Paskutiniaisiais stebėjimo metais (2020–2025 m.) abiejose stotyse registruotas chloridų koncentracijų didėjimas, ypač ryškus Žemaitijos KMS. Tokie pokyčiai gali būti susiję su klimato kaitos nulemtu hidrologinio režimo persitvarkymu, dažnesniais ekstremaliais kritulių epizodais ir intensyvesniu jūrinių oro masių pernašos poveikiu. Naujausi Europos tyrimai rodo, kad pastaraisiais metais chloridų koncentracijų kaita vis dažniau atspindi ne vien atmosferinę depoziciją, bet ir vandens apytakos pokyčius, gruntinio vandens papildymo intensyvumą bei klimato kaitos poveikį baseinų hidrologijai (Kaushal et al., 2018; Stevenson et al., 2024).

Palyginus tarp stočių nustatyta, kad dėl Baltijos jūros artumo Žemaitijos KMS upelio vandenyje chloridų koncentracijos buvo vidutiniškai apie 1,5 karto didesnės negu Aukštaitijos KMS. Tai patvirtina, kad regioninė jūrinių aerozolių pernaša ir geografinė padėtis išlieka vienais svarbiausių chloridų pasiskirstymą lemiančių veiksnių vakarų Lietuvos miško baseinuose.

Galiausiai natrio koncentracijos visuose tirtuose baseinuose išliko stabilios ir patvirtino jų konservatyvų pobūdį, tuo tarpu chloridų koncentracijos atspindėjo ilgalaikius hidrologinius pokyčius. Iki 2012–2013 m. vyravusį chloridų mažėjimą pastaraisiais metais pakeitė koncentracijų didėjimas, kuris gali būti vienas pirmųjų požymių, rodančių klimato kaitos įtaką vandens apytakai ir medžiagų migracijai miško baseinuose.

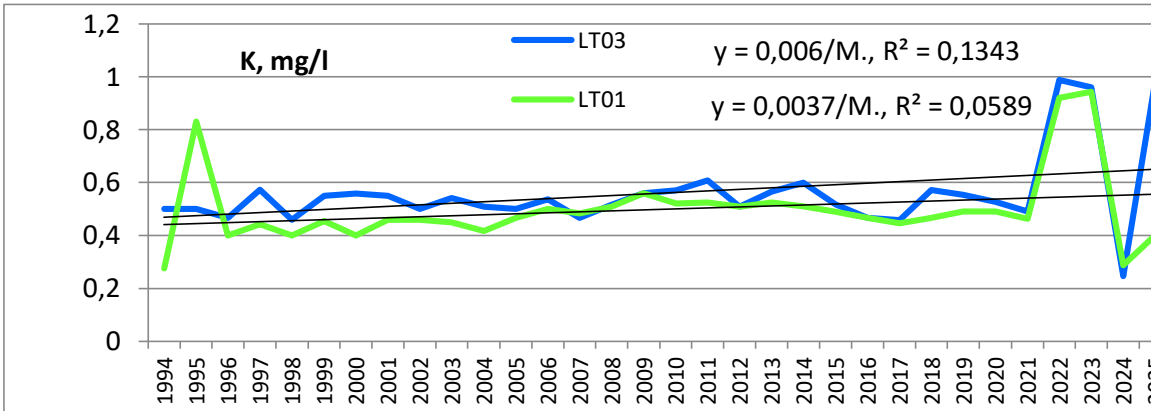


7.4 pav. Vidutiniai upelio vandens parametrai (7 iš 12).

Kalcis ir magnis kaip ir sulfatai susiję, nes kartu formuoja mažai tirpias druskas, todėl jų koncentracijų pokyčiai upelio vandenyje yra panašūs. Abiejose stotyse Ca, Mg bei sulfatų koncentracija upelių vandenyje palaipsniui mažėjo nuo tyrimų pradžios iki 2015 metų sausros, kada kritulių kiekis buvo reikšmingai mažesnis negu daugiametis vidurkis. Per 2016-2018 metų laikotarpį lyginant su stebėsenos pradžia, sulfatų, Ca ir Mg koncentracija upelio vandenyse sumažėjo apie 2 kartus. 2018-2025 m. laikotarpiu Ca koncentracijos Aukštaitijos upelio vandenyje vėl pradėjo didėti iki maksimalios reikšmės – 60 mg/l, kai tuo tarpu Žemaitijos upelyje stabilizavosi ties 30 mg/l riba.

Paskutiniuoju laikotarpiu nuo 2018 m Mg koncentracijos Aukštaitijos KMS stabilizavosi ties 12-13 mg/l riba, o Žemaitijos KMS ties 4 mg/l riba. Dzūkijos KMS magnio koncentracijos upelio vandenyje 1998 metais buvo 10,0 mg/l, o 2025 metais sumažėjo iki 5,7 mg/l.

Didžiausiu koncentracijų kaitos stabilumu pasižymi ir K koncentracijos. Per tiriamąjį laikotarpį šių elementų koncentracijos iš esmės nesikeitė nei Aukštaitijos, nei Žemaitijos KMS upelių vandenyse. K koncentracijos abiejų KM stočių upelių vandenyse buvo tokios pačios ir svyravo apie 0,5 mg/l. Dzūkijos IMS 1998 metais kalio buvo 0,43 mg/l, o 2025 metais – 0,84 mg/l.



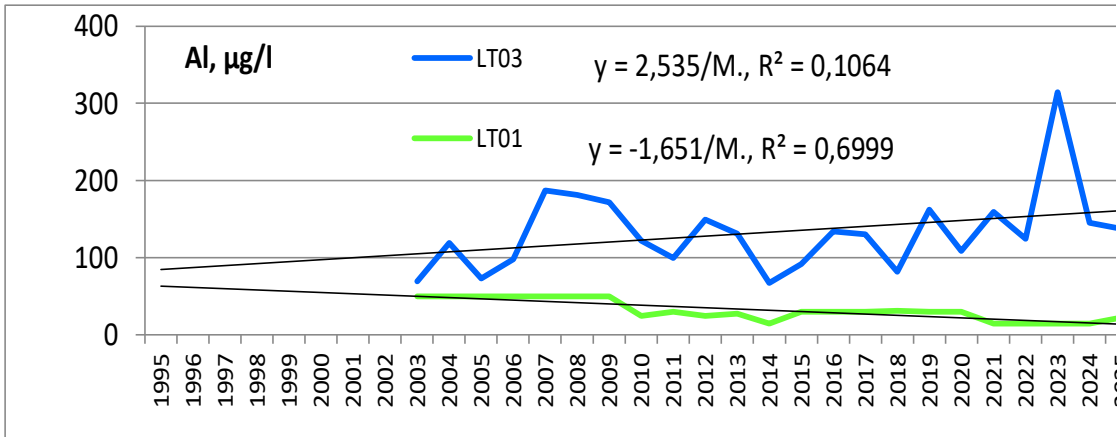
7.4 pav. Vidutiniai upelio vandens parametrai (8 iš 12).

Apibendrinus nustatyta, kad kalcio ir magnio koncentracijų kaita upelių vandenyje buvo glaudžiai susijusi su sulfatų koncentracijų pokyčiais. Mažėjant atmosferinei sieros iškritai silpnėjo sulfatų išplovimas iš dirvožemio, kartu mažėjo ir bazinių katijonų išplovimas į paviršinius vandenis. Tokios tendencijos nustatytos Likens and Bormann, 1995; De Vries et al., 2021; ICP Forests, 2025.

Abiejose kompleksinio monitoringo stotyse Ca, Mg ir sulfatų koncentracijos palaipsniui mažėjo tačiau po 2018 m. stočių raida išsiskyrė. Aukštaitijos KMS kalcio koncentracijos vėl pradėjo didėti ir paskutiniaisiais stebėsenos metais pasiekė apie 60 mg l^{-1}, tuo tarpu Žemaitijos KMS jos stabilizavosi ties maždaug 30 mg l^{-1} riba. Magnio koncentracijos taip pat stabilizavosi. Tokie skirtumai greičiausiai atspindi nevienodą gruntinio vandens indėlį į upelių mitybą, skirtingą baseinų geologinę sandarą ir vandens–dirvožemio sąveikos intensyvumą Hem, 1985; Appelo ir Postma, 2005. Dzūkijos KMS pakartotiniai tyrimai taip pat patvirtino ilgalaikį bazinių katijonų koncentracijų mažėjimas yra būdingas visiems tirtiems hemiborealiniams baseinams.

Skirtingai negu kalcio ir magnio, kalio koncentracijos pasižymėjo dideliu stabilumu. Kadangi kalis intensyviai dalyvauja biologinėje medžiagų apytakoje ir yra greitai recirkuliuojamas augalijoje, jo koncentracijos natūraliuose upeliuose paprastai kinta mažiau negu kalcio ar magnio (Likens and Bormann, 1995; Augusto ir kt., 2017).

Tokiu būdu bazinių katijonų kaita patvirtina ilgalaikį miško baseinų atsikūrimą po rūgštėjimo laikotarpio. ***Sinchroniškas Ca, Mg ir SO_4^{2-} koncentracijų mažėjimas rodo mažėjančią rūgštinančių junginių įtaką, o po 2018 m. Aukštaitijos KMS registruojamas kalcio koncentracijų didėjimas gali rodyti stiprėjančią gruntinio vandens įtaką upelio mitybai ir aktyvesnę karbonatinių mineralų dūlėjimo reikšmę formuojant vandens cheminę sudėtį.***



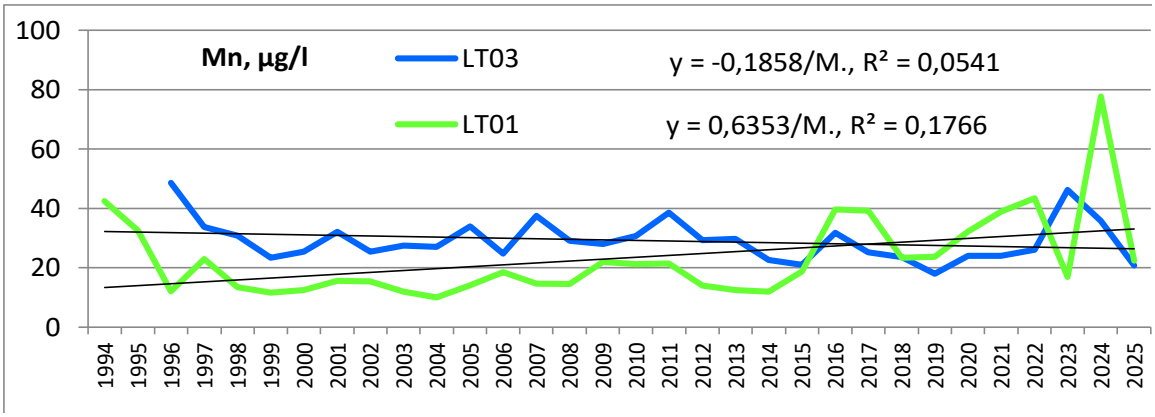
7.4 pav. Vidutiniai upelio vandens parametrai (9 iš 12).

Al koncentracijų kaitoje išsiskiria priešingos tendencijos. Aukštaitijos KMS upelio vandenyje Al koncentracija neviršija mažiausios nustatymo ribos ir mažėja po -1,65 µg/l per m., tai Žemaitijos upelio vandenyje didėja po 2,5 µg/l per m. ir 2019-2025 m. laikotarpiu viršija net 100 µg/l ribą. Šie procesai tikėtina, kad yra susiję su upelio vandens rūgštumu bei visuminiu organiniu anglingumu, dėl organinių mineralinių kompleksinių tirpių vandenyje junginių susiformavimo.

Dzūkijos IMS Al koncentracija upelio vandenyje 1998 metais nebuvo matuojama, o 2025 metais buvo 29,7 µg/l. Paskutiniuoju laikotarpiu Žemaitijos KMS upelio vandenyje – apie 150 µg/l, Aukštaitijos KMS upelyje – apie 20 µg/l. Toks ryškus skirtumas rodo nevienodą baseinų rūgštėjimo lygį, organinės medžiagos įtaką bei skirtingą vandens–dirvožemio–gruntinio vandens sąveikos intensyvumą.

Tokiu būdu didžiausią reikšmę turi ne bendrojo Al koncentracija, o jo cheminė forma. Gensemer and Playle (1999) bei Driscoll et al., (2001) pabrėžia, kad didžiausią pavojų vandens organizmams kelia neorganinis (laisvasis) aliuminis, o su organine medžiaga susijusios Al formos yra gerokai mažiau toksiškos. Todėl Žemaitijos KMS nustatytas bendrojo aliuminio koncentracijų didėjimas gali būti laikomas ankstyvu rūgštėjimo proceso indikatoriumi, tačiau jo ekologinei rizikai galutinai įvertinti reikėtų nustatyti neorganinio ir organiškai kompleksuoto aliuminio santykį.

Todėl ***aliuminio koncentracijų kaita aiškiai atspindi skirtingą tirtų baseinų hidrogeocheminę raidą. Aukštaitijos KMS registruojamas labai mažas ir toliau mažėjantis Al kiekis rodo pakankamą vandens buferinę gebą, tuo tarpu Žemaitijos KMS nustatytas ilgalaikis ir ryškus aliuminio koncentracijų didėjimas gali būti vienas jautriausių stiprėjančio rūgštėjimo ir organinių–mineralinių kompleksų formavimosi indikatorių vakarų Lietuvos miško baseinuose.***



7.4 pav. Vidutiniai upelio vandens parametrai (11 iš 12).

Mn koncentracijų kaitoje stebimos skirtingos taip pat tendencijos tendencijos: Aukštaitijos KMS upelio vandenyje Mn didėja po 0,64 µg/l, kai tuo tarpu Žemaitijos KMS upelyje jo koncentracijos praktiškai išlieka mažai kintančios 25 µg/l ribose.

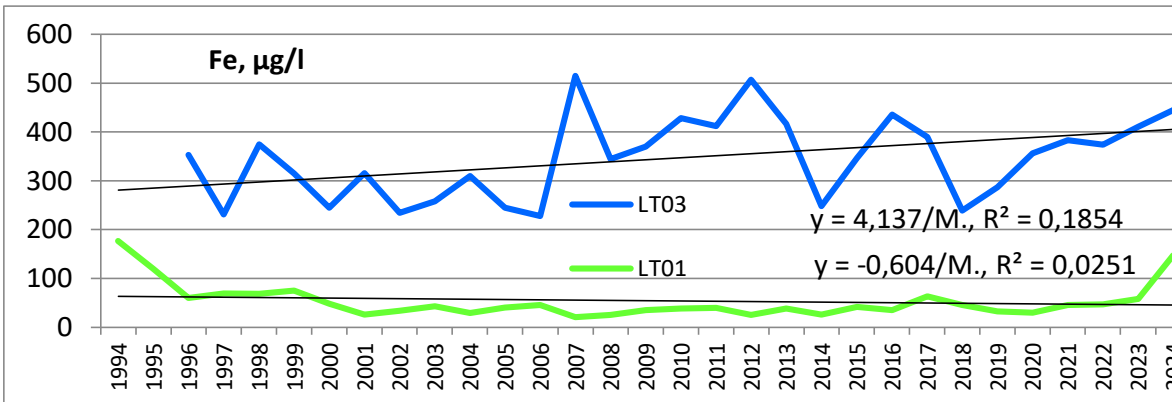
2015 m. sausra, kurios rezultatas – mažiausias upelio nuotėkis Aukštaitijos KMS 2016 m. lėmė reikšmingai padidėjusias Mn koncentracijas upelio vandenyje 2016-2017 m. Analogiški procesai buvo registruojami ir Žemaitijos KMS upelio vandenyje. 2022-2025 m. registruojamas šio elemento koncentracijų padidėjimas abiejose stotyse.

Dzūkijos KMS mangano kiekis 1998 metais buvo 26,1 µg/l, o 2025 metais – 14,6 µg/l; Tai mažiausia koncentracija lyginant su likusiomis stotimis.

Apibendrinus nustatyta, kad abiejose Mn koncentracijų pokyčius lėmė ne vien vandens rūgštingumas, bet pirmiausia dirvožemio drėgmės ir redokso sąlygų kaita. Sausrų metu sumažėjus dirvožemio drėgmei intensyvėja organinės medžiagos mineralizacija ir keičiasi mangano oksidacijos–redukcijos pusiausvyra. Vėliau, atsistačius kritulių kiekiui ir padidėjus upelio debitui, iš dirvožemio į upelius intensyviau išplaunami mangano bei kitų metalų organiniai–mineraliniai kompleksai. Dzūkijos KMS pakartotiniai tyrimai parodė santykinai stabilias hidrogeochemines sąlygas ir mažesnį mangano mobilumą šiame baseine.

Tokiu būdu Mn reakcijos į sausras ir didelio nuotėkio laikotarpius rodo, kad jis gali būti vienas tinkamiausių rodiklių vertinti klimato kaitos poveikį medžiagų migracijai miško baseinuose.

Todėl ***mangano koncentracijų pokyčius daugiausia reguliuoja hidrologinio režimo svyravimai ir redokso procesai, o ne vien vandens rūgštingumas. Todėl Mn koncentracijos gali būti laikomos jautriu natūralių miško baseinų hidrologinių ekstremumų indikatoriumi.***



7.4 pav. Vidutiniai upelio vandens parametrai (12 iš 12).

Geležies (Fe) koncentracijos Aukštaitijos KMS upelio vandenyje neturi reikšmingos kaitos tendencijos per visą tiriamąjį laikotarpį. Padidėjusios koncentracijos iki 150 µg/l buvo nustatytos tik tyrimų pradžioje ir paskutiniaisiais 2024-2025 m. Tai irgi gali būti susiję su kritulių pertekliumi, nors geležies jonai, taip pat, kaip ir mangano gali sudaryti stabilius kompleksinius junginius su organinėmis medžiagomis, dėl ko upelio vandens sudėtyje Fe koncentracijos pokyčiai labai maži.

Žemaitijos KMS upelio vandenyje geležies koncentracijos yra iki 10 kartų didesnės negu Aukštaitijos KMS upelio vandenyje – siekė 500 µg/l ribą. Reikšmingas koncentracijų padidėjimas registruotas tik 2007 m. 2018-2019 m. kritulių trūkumas matyt, kad turėjo reikšmingos įtakos ir šio elemento koncentracijų sumažėjimui šiame tirtame upelio vandenyje, dėl sumažėjusio Fe išplovimo iš dirvožemio intensyvumo. 2018-2025 m. laikotarpiu registruojamas ženklus Fe koncentracijų augimas Žemaitijos KMS upelio vandenyje.

Dzūkijos KMS Fe kiekis 1998 m. buvo 80,0 µg/l, o 2025 m. – 82,7 µg/l. Tai ženkliai mažiau negu Žemaitijoks KMS, bet daugiau negu Aukštaitijos KMS baseino upelio vandenyje.

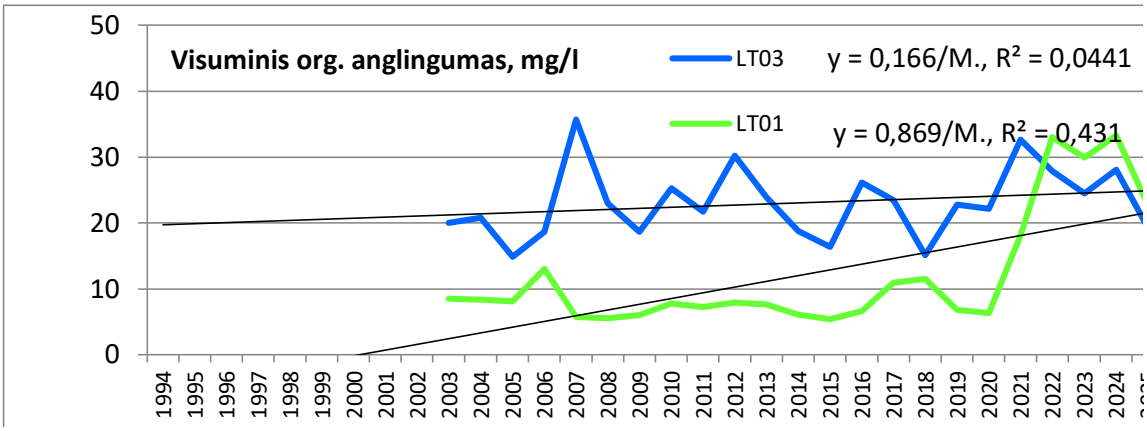
Apibendrinus nustatyta, kad geležies (Fe) koncentracijų kaita upelių vandenyje buvo gerokai stabilesnė negu daugelio kitų mikroelementų. Trumpalaikiai padidėjimai greičiausiai susiję su didesniu kritulių kiekiu ir intensyvesniu vandens nutekėjimu iš organinių dirvožemio horizontų. Natūraliuose miško upeliuose geležis dažniausiai migruoja ne laisvųjų jonų, o organinių–mineralinių kompleksų bei koloidų pavidalu, todėl net ir esant kintančioms hidrologinėms sąlygoms jos koncentracijos dažnai išlieka gana stabilios (Hem, 1985; Neal et al., 2008; Knorr, 2013).

Žemaitijos KMS upelio vandenyje geležies koncentracijos buvo gerokai didesnės negu Aukštaitijos KMS. Tikėtina, kad sumažėjęs dirvožemio drėgnumas ir silpnesnis paviršinio bei gruntinio vandens ryšys sumažino Fe išplovimą iš organinių dirvožemio horizontų, o didėjant kritulių kiekiui ir atsikuriant vandens apytakai baseine, vėl registruotas ryškus geležies koncentracijų didėjimas. Tai įrodo, kad Fe eksportą iš miško baseinų pirmiausia reguliuoja hidrologinis režimas ir ištirpusios organinės anglies pernaša (Neal et al., 2008; De Wit et al., 2016).

Dzūkijos KMS pakartotiniai tyrimai parodė didelį geležies koncentracijų stabilumą, todėl per beveik tris dešimtmečius reikšmingų pokyčių nenustatyta.

Nustatyta aiški teritorinė diferenciacija rodo nevienodą organinių dirvožemių įtaką, skirtingą gruntinio vandens mitybos pobūdį ir skirtingą Fe–organinių kompleksų susidarymo intensyvumą.

Todėl ***geležies koncentracijų kaitą upeliuose daugiausia reguliuoja hidrologinis režimas ir organinės medžiagos pernaša. Didžiausios Fe koncentracijos nustatytos Žemaitijos KMS, kur jos buvo kelis kartus didesnės negu kituose baseinuose, tuo tarpu Aukštaitijos ir ypač Dzūkijos KMS išsiskyrė gerokai stabilesniu geležies režimu.***



7.4 pav. Vidutiniai upelio vandens parametrai (10 iš 12).

Visuminio organinio anglingumo kaita rodo, stabilumą iki 2020 m. Tik Žemaitijos KMS upelyje organinės anglies yra apie 2 kartus daugiau negu Aukštaitijos KMS upelio vandenyje, dėl didesnio organinės medžiagos dūlėjimo intensyvumo. Paskutiniaisiais metais gausūs krituliai padidino organinės anglies išplovimą iš miško ekosistemų ir ypač Aukštaitijos KMS, kur šio elemento koncentracija išaugo iki 3 kartų ir susilygino ir net viršijo jos lygį Žemaitijos KMS.

Dzūkijos IMS iki 2003 metų upelio vandens visuminis organinis anglingumas (DOC) nebuvo matuojamas, o 2025 metais vidutiniškai buvo 7,54 mg/l, didžiausias, 31,6 mg/l, 2025 metų rugsėjo mėnesį, kas rodo kad upelio DOC buvo panašus į Aukštaitijos upelio DOC iki 2020 m.

Visuminės ištirpusios organinės anglies (DOC) koncentracijų kaita iki 2020 m. pasižymėjo santykiniu stabilumu abiejų kompleksinio monitoringo stočių upelių vandenyje, nors Žemaitijos KMS upelio vandenyje DOC koncentracijos buvo maždaug du kartus didesnės negu Aukštaitijos KMS. Tikėtina, kad tai lėmė intensyvesnis organinių medžiagų skaidymasis, didesnis organinių dirvožemių indėlis ir aktyvesnė organinės anglies migracija į upelį. Nuo 2020 m. situacija iš esmės pasikeitė. Gausūs krituliai ir padidėjęs upelių debitas reikšmingai padidino organinės anglies išplovimą iš miško ekosistemų, ypač Aukštaitijos KMS. Tokie pokyčiai rodo, kad klimato kaitos sąlygomis didėjantis hidrologinis aktyvumas tampa vienu svarbiausių organinės anglies eksporto iš miško baseinų veiksnių (De Wit et al., 2016; Frigstad et al., 2020; Weyhenmeyer et al., 2024).

Šis organinės anglies padidėjimas gerai paaiškina ir anksčiau aptartus geležies bei aliuminio koncentracijų pokyčius. Daugelis tyrimų rodo, kad natūraliuose miško upeliuose didelė geležies ir aliuminio dalis migruoja ne laisvųjų jonų pavidalu, bet sudaro stabilius organinius–mineralinius kompleksus su ištirpusia organine anglimi (Driscoll et al., 2001; De Wit et al., 2016; Hruška et al., 2023). Todėl registruotas DOC koncentracijų padidėjimas galėjo skatinti didesnį Fe ir Al pernašos intensyvumą, ypač Žemaitijos KMS baseine, kur šių elementų koncentracijos buvo didžiausios. Dzūkijos KMS DOC trumpalaikius didelius DOC šuolius taip pat reguliuoja hidrologiniai įvykiai.

Tokiu būdu DOC yra vienas svarbiausių miško upelių biogeocheminių rodiklių, nes jis reguliuoja ne tik anglies eksportą iš baseino, bet ir metalų (Fe, Al, Mn), fosforo bei daugelio mikroelementų judrumą, vandens spalvą, šviesos skvarbą ir mikroorganizmų aktyvumą. Todėl nustatytas DOC koncentracijų didėjimas po 2020 m. gali būti laikomas vienu reikšmingiausių pastarųjų metų hidrocheminių pokyčių Lietuvos hemiborealinių miškų upeliuose.

Galiausiai **- *iki 2020 m. DOC koncentracijos upeliuose buvo gana stabilios ir atspindėjo natūralius skirtumus tarp baseinų. Tačiau paskutiniaisiais metais dėl padidėjusio vandens nuotėkio organinės anglies eksportas ypač sustiprėjo Aukštaitijos KMS. Šie pokyčiai greičiausiai lėmė ir didesnę organinių–mineralinių Fe bei Al kompleksų migraciją, todėl DOC tampa vienu svarbiausių integruotų hidrogeocheminių procesų indikatorių miško ekosistemose.***

7.3.2. Paviršinio vandens cheminės sudėties pokyčių apibendrinimas

Daugiametė paviršinio vandens kokybės analizė parodė, kad upelių cheminė sudėtis jautriai atspindi ilgalaikius miško baseinuose vykstančius hidrogeocheminius procesus. Kadangi paviršinis vanduo integruoja atmosferinių iškritų, dirvožemio, gruntinio vandens ir biologinių procesų poveikį, jo cheminės sudėties pokyčiai yra vienas patikimiausių miško ekosistemų būklės ir jų kaitos rodiklių (Likens & Bormann, 1995; Neal ir kt., 2008; ICP Forests, 2025).

Vienas svarbiausių paviršinio vandens kokybės pokyčių buvo reikšmingas sulfatų koncentracijų sumažėjimas visų trijų kompleksinio monitoringo stočių upeliuose. Šis rezultatas rodo, kad paviršinio vandens kokybė per pastaruosius tris dešimtmečius gerėjo dėl mažėjančios atmosferinės sieros apkrovos ir silpnėjančių rūgštėjimo procesų. Kartu su sulfatais mažėjo ir kalcio bei magnio koncentracijos, atspindėdamos ilgalaikį vandens cheminės sudėties persitvarkymą po rūgščiosios depozicijos laikotarpio.

Paviršinio vandens kokybė azoto junginių atžvilgiu iki 2020 m. taip pat gerėjo – nitratų ir amonio koncentracijos daugiausia mažėjo. Tačiau paskutiniaisiais metais visose stotyse registruotas nitratų, o kai kur ir amonio koncentracijų didėjimas rodo, kad azoto ciklas tampa jautresnis klimato kaitos nulemtoms hidrologinėms sąlygoms ir organinių medžiagų mineralizacijos procesams.

Fosforo junginių pokyčiai parodė, kad paviršinio vandens kokybė nėra vienareikšmė. Nors ilgalaikės tendencijos daugelyje stočių buvo stabilios arba mažėjančios, 2024–2025 m. registruoti ryškūs visuminio fosforo koncentracijų padidėjimai leidžia manyti, kad intensyvesni vandens srautai ir dažnėjantys hidrologiniai ekstremumai gali didinti fosforo eksportą iš miško baseinų.

Svarbiu paviršinio vandens kokybės pokyčiu tapo ištirpusios organinės anglies (DOC) koncentracijų didėjimas po 2020 m. Ypač ryškus DOC koncentracijų augimas Aukštaitijos KMS rodo, kad didėjantis vandens nuotėkis sustiprino organinės anglies išplovimą iš miško ekosistemų. Tai turėjo tiesioginės įtakos paviršinio vandens cheminei sudėčiai, nes kartu intensyvėjo geležies ir aliuminio migracija organinių–mineralinių kompleksų pavidalu.

Mikroelementų pokyčiai taip pat atspindėjo paviršinio vandens kokybės skirtumus tarp baseinų. Aukštaitijos KMS upelio vanduo pasižymėjo labai mažomis aliuminio koncentracijomis ir didesniu cheminiu stabilumu, tuo tarpu Žemaitijos KMS registruotas nuoseklus aliuminio bei geležies koncentracijų didėjimas ir ryškesnis vandens rūgštėjimas. Mangano koncentracijų svyravimai buvo glaudžiai susiję su hidrologinio režimo pokyčiais, ypač sausros ir vėlesnio intensyvaus nuotėkio laikotarpiais.

Palyginus visas tris kompleksinio monitoringo stotis nustatyta, kad paviršinio vandens kokybė formuojasi nevienodomis sąlygomis. Aukštaitijos KMS upelio vanduo pasižymėjo didžiausiu

šarmingumu ir savituoju elektriniu laidumu, rodančiais didesnę požeminio vandens įtaką ir didesnę buferinę gebą. Žemaitijos KMS išsiskyrė didesnėmis DOC, Fe ir Al koncentracijomis bei ryškesniais rūgštėjimo požymiais. Dzūkijos KMS daugumos cheminių rodiklių požiūriu išliko stabiliausias baseinas, kuriame per beveik tris dešimtmečius didelių paviršinio vandens kokybės pokyčių nenustatyta.

Apibendrinant galima teigti, kad paviršinio vandens kokybė Lietuvos kompleksinio monitoringo miško baseinuose per pastaruosius tris dešimtmečius iš esmės gerėjo dėl mažėjančios atmosferinės taršos, ypač sieros junginių. Tačiau po 2020 m. pradėjo ryškėti nauji pokyčiai – didėja organinės anglies eksportas, kai kurių maisto medžiagų bei metalų migracija ir stiprėja hidrologinio režimo įtaka vandens cheminei sudėčiai. Tai rodo, kad ateityje paviršinio vandens kokybę vis labiau lems ne atmosferinės taršos mažėjimas, o klimato kaitos nulemti vandens apytakos pokyčiai.

IŠVADOS

1. **Paviršinio vandens kokybė** tirtuose kompleksinio monitoringo baseinuose per 32 metų stebėsenos laikotarpį reikšmingai keitėsi, atspindėdama ilgalaikius atmosferinės taršos mažėjimo ir klimato kaitos nulemtus hidrogeocheminius procesus.
2. Reikšmingiausias teigiamas pokytis nustatytas **sulfatų koncentracijų mažėjime** visų trijų stočių upelių vandenyje. Aukštaitijos KMS sulfatų koncentracijos sumažėjo iki 1–2 mg/l, Dzūkijos KMS – iki 3 mg/l, Žemaitijos KMS – iki 4 mg/l. Tai patvirtina ilgalaikį paviršinio vandens kokybės gerėjimą dėl mažėjančios atmosferinės sieros apkrovos.
3. **Upelių rūgštingumo pokyčiai** buvo nevienodi. Aukštaitijos ir Dzūkijos KMS upelių vanduo tapo šarmingesnis, tuo tarpu Žemaitijos KMS nuo 2020 m. registruojamas ryškėjantis rūgštėjimas, kartu mažėjant šarmingumui ir savitajam elektriniam laidumui.
4. **Bazinių katijonų (Ca ir Mg)** koncentracijos ilgą laiką mažėjo kartu su sulfatais, tačiau po 2018 m. Aukštaitijos KMS kalcio koncentracijos vėl pradėjo didėti, rodydamos stiprėjančią gruntinio vandens įtaką upelio mitybai.
5. **Azoto ir fosforo junginių** koncentracijos iki 2020 m. daugiausia mažėjo arba išliko stabilios, tačiau paskutiniaisiais metais registruotas nitratų bei visuminio fosforo koncentracijų didėjimas rodo intensyvėjančią maisto medžiagų migraciją klimato kaitos sąlygomis.

6. Vienas ryškiausių pastarojo laikotarpio pokyčių – **ištirpusios organinės anglies (DOC)** koncentracijų padidėjimas, ypač Aukštaitijos KMS. Šis procesas sustiprino geležies ir aliuminio migraciją organinių–mineralinių kompleksų pavidalu ir tapo svarbiu paviršinio vandens kokybės formavimosi veiksniu.
7. **Žemaitijos KMS upelio vanduo** išsiskyrė didžiausiomis geležies ir aliuminio koncentracijomis bei ryškiausiais rūgštėjimo požymiais, o **Aukštaitijos KMS** pasižymėjo didesniu cheminiu stabilumu ir didesne buferine geba. **Dzūkijos KMS** dauguma tirtų cheminių rodiklių išliko stabilūs ir patvirtino šio baseino hidrocheminį pastovumą.
8. **Išskirtiniu laikotarpiu** galima laikyti **2020–2025 m.**, kai daugumos cheminių rodiklių kaita pakeitė ankstesnes ilgalaikes tendencijas. Tai rodo, kad paviršinio vandens kokybę miško ekosistemose vis labiau pradeda lemti ne atmosferinės taršos mažėjimas, bet klimato kaitos nulemti hidrologinio režimo pokyčiai.

Reikšmingiausią įtaką upelio vandens cheminės sudėties kaitai pastaraisiais metais turi sausringi metai bei klimato šiltėjimas. Sausringais metais padidėjusį organinių medžiagų skaidymąsi rodo nuoseklus Mn, amonio bei nitratų azoto koncentracijų upelio vandenyje išaugimas, nors ir ne visada lydimas visuminės organinės anglies bei geležies koncentracijos padidėjimo. Silicio koncentracijų didėjimas liudija apie mineralinės ekosistemos dalies dūlėjimo intensyvėjimą. Medžiagų išplovimo upelio vandeniu skyriuje šie dėsningumai turėtų būti ryškesni.

GALIMOS GRĖSMĖS PAVIRŠINIO VANDENS KOKYBEI IR MIŠKO EKOSISTEMOMS

Didžiausia naujai ryškėjanti grėsmė yra klimato kaitos poveikis paviršinio vandens kokybei. Po 2020 m. daugumos tirtų cheminių rodiklių kaita pakeitė iki tol vyravusias ilgalaikes tendencijas. Didėjantis ekstremalių sausrų ir intensyvių kritulių dažnis keičia upelių debitą, vandens mitybos šaltinius ir medžiagų migracijos intensyvumą. Dėl to paviršinio vandens cheminė sudėtis tampa vis labiau priklausoma nuo hidrologinių ekstremumų.

Žemaitijos KMS nustatytas upelio vandens rūgštėjimas gali tapti viena svarbiausių grėsmių vakarų Lietuvos miško vandens ekosistemoms. Mažėjantis pH, kartu su didėjančiomis aliuminio koncentracijomis, gali mažinti vandens telkinių buferinę gebą ir didinti jautriausių vandens organizmų pažeidžiamumą.

Didėjantis ištirpusios organinės anglies (DOC) eksportas iš miško baseinų gali iš esmės pakeisti paviršinio vandens cheminę sudėtį. Organinė anglis didina geležies, aliuminio, fosforo ir kitų elementų pernašą organinių–mineralinių kompleksų pavidalu, todėl ateityje gali keistis maisto medžiagų prieinamumas, vandens skaidrumas ir biogeocheminių procesų intensyvumas.

Pastaraisiais metais registruojamas nitratų ir visuminio fosforo koncentracijų didėjimas rodo galimą maisto medžiagų eksporto intensyvėjimą iš miško baseinų. Nors nustatytos koncentracijos tebėra būdingos natūralioms miško ekosistemoms, jų augimo tendencijos gali būti ankstyvas signalas apie spartėjančią biogeocheminių ciklų kaitą.

Nepaisant ilgalaikio sulfatų koncentracijų mažėjimo, trumpalaikiai jų padidėjimai rodo, kad sieros ciklas dar nėra visiškai stabilizavęsis. Ateityje sulfatų dinamiką gali lemti ne tik klimato kaitos nulemtas vandens režimas ir anksčiau dirvožemyje sukauptų sieros junginių mobilizacija, bet ir regioniniai atmosferos taršos šaltiniai. Papildomą riziką kelia karo Ukrainoje padariniai – padidėję sieros junginių išmetimai jau registruojami atmosferinėse iškritose. Atsižvelgiant į medžiagų migracijos vėlavimo efektą, jų poveikis paviršiniams vandenims gali išryškėti tik po keleto metų.

Didėjant hidrologinių ekstremumų dažniui gali stiprėti metalų (Fe, Al ir Mn) migracija iš dirvožemio į paviršinius vandenis. Tai gali keisti vandens cheminę pusiausvyrą, skatinti organinių–mineralinių kompleksų susidarymą ir turėti įtakos vandens organizmų buveinių kokybei.

Didėjantis paviršinio vandens temperatūros ir cheminės sudėties kintamumas gali mažinti upelių ekologinį stabilumą. Tokie pokyčiai pirmiausia gali paveikti jautriausias makrobestuburių, dumblių ir kitų vandens organizmų bendrijas, kurios yra vieni svarbiausių natūralių miško upelių ekologinės būklės bioindikatorių.

Klimato kaita pradeda keisti vandens kokybę greičiau negu ją gerina mažėjanti atmosferinė tarša.

PAVIRŠINIO VANDENS KOKYBĖS RAIDOS PROGNOZĖS

Jeigu atmosferinės sieros junginių emisijos Europoje išliks mažos, ilgalaikė sulfatų koncentracijų mažėjimo tendencija paviršiniuose vandenyse turėtų išlikti. Tačiau trumpalaikiai sulfatų koncentracijų padidėjimai gali kartotis dėl klimato kaitos nulemtos anksčiau dirvožemyje sukauptos sieros mobilizacijos bei padidėjusios regioninės atmosferinės taršos. Papildomą neapibrėžtumą kelia karo Ukrainoje padariniai – atmosferinėse iškritose jau registruojamas sieros junginių padidėjimas, kurio poveikis paviršiniams vandenims dėl hidrologinio vėlavimo gali pasireikšti tik po keleto metų.

Klimato kaitos sąlygomis paviršinio vandens kokybę vis labiau lems hidrologinio režimo pokyčiai. Dažnėjančios sausros ir intensyvūs kritulių epizodai didins vandens debitų svyravimus, todėl stiprės medžiagų išplovimas iš dirvožemio ir gruntinio vandens į upelius.

Tikėtina, kad didės ištirpusios organinės anglies (DOC) eksportas iš miško baseinų. Dėl to gali intensyvėti organinių–mineralinių geležies ir aliuminio kompleksų migracija, keistis vandens spalva, skaidrumas bei mikroelementų judrumas. DOC taps vienu svarbiausių paviršinio vandens kokybės kaitos rodiklių.

Jeigu išliks dabartinės klimato kaitos tendencijos, didės azoto ir fosforo junginių sezoniniai svyravimai. Tai gali sustiprinti maisto medžiagų eksportą iš miško baseinų, ypač po ilgalaikių sausrų ir vėlesnių gausių kritulių laikotarpių.

Žemaitijos KMS tikėtinas tolesnis paviršinio vandens rūgštėjimo ir aliuminio koncentracijų didėjimo pavojus, jei išliks dabartinės hidrologinės ir klimatinės tendencijos. Todėl vakarų Lietuvos miško baseinai ateityje gali tapti jautriausiu regionu klimato kaitos poveikiui paviršinio vandens kokybei.

Aukštaitijos KMS tikėtina išliks didesnė paviršinio vandens buferinė geba, tačiau didėjantis organinės anglies eksportas gali keisti geležies, fosforo ir kitų elementų migraciją. Todėl net ir chemiškai stabilesniuose baseinuose gali pradėti ryškėti nauji hidrogeocheminiai procesai.

Dzūkijos KMS, remiantis dabartiniais duomenimis, turėtų išlikti hidrochemiškai stabiliausiu tirtu baseinu, tačiau trumpa naujųjų stebėjimų seka dar neleidžia patikimai prognozuoti ilgalaikės paviršinio vandens kokybės kaitos. Tolesnė nepertraukiama stebėsena yra būtina.

Tikėtina, kad artimiausiais dešimtmečiais pagrindinis paviršinio vandens kokybės kaitos veiksnys bus nebe atmosferinės taršos mažėjimas, o klimato kaitos nulemti hidrologiniai procesai. Todėl paviršinio vandens cheminės sudėties pokyčiai vis labiau atspindės vandens apytakos intensyvumą, organinės anglies migraciją ir ekstremalių meteorologinių reiškinių poveikį miško ekosistemoms.

7.4. Medžiagų balanso išnešimo sudedamosios kaita 1994-2025 m.

Cheminių elementų išnešimas upelio vandeniu geriausiai atspindi viso baseino medžiagų balanso išlaidų dalį, tuo pačiu procesus ir elementų bei junginių transformacijas skirtinguose ekosistemos komponentuose. Tai rodiklis iš esmės lemiantis visą miško ekosistemų būklę.

Išnešamas upelio vandeniu medžiagas ir elementus pagal jų prigimtį ir savybes galima suskirstyti į dvi pagrindines kategorijas. Pirmoji – tai vandenyje gerai tirpstančios, dažniausiai tirpias arba silpnai tirpias druskas sudarantys ir joninius tirpalus formuojantys elementai – chloras, natris, kalis, magnis, siera (sulfatų jonai) ir antroji grupė – elementai, susiję su organinių medžiagų skilimo produktų išnešimu iš ekosistemos – tai visuminė organinė anglis, azotas ir fosforas bei tirpieji pilnai mineralizuotos organinės medžiagos produktai – amonio, nitratų azotas.

Visų pirmos grupės tirpiųjų elementų išnešimas iš ekosistemos stebėsenos laikotarpiu turi ryškią tendenciją mažėti, o kai kurių medžiagų, susijusių su organinių medžiagų skilimu, organinio azoto, nitratų ir amonio azoto, nepriklausomai nuo jų tirpumo, turi tendenciją augti.

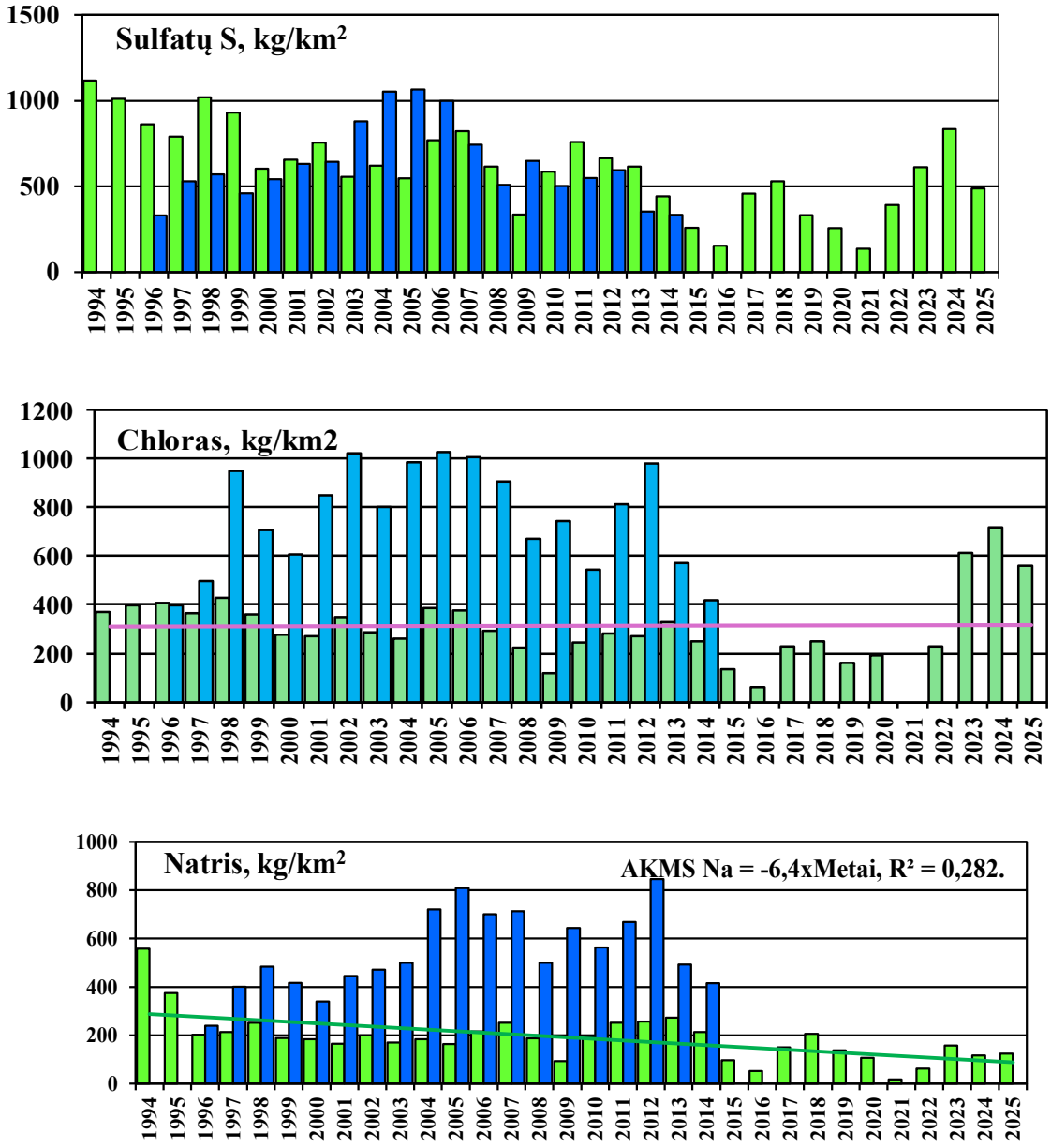
Sulfatų išplovimas iš miško ekosistemų turi reikšmingą trendą mažėti. Per tiriamąjį laikotarpį Aukštaitijos KMS baseine sulfatų išplovimas iš miško ekosistemų mažėjo nuo 1000 kg iš km^2 1994 m. iki 250 kg iš km^2 paskutiniaisiais 2020 m., t.y. per tiriamąjį laikotarpį sumažėjo 4 kartus arba mažėjo po -25 kg iš km^2. Tokį išplovimo intensyvumą sąlygojo reikšmingai mažėjančios SO_2 ir SO_4^{2-} koncentracijos ore, mažėjantys SO_4^{2-} srautas su polajiniais krituliais ir SO_4^{2-} koncentracijų mažėjimas juose. Daugianarės regresijos modelio rezultatas parodė, kad upelio debitas, sulfatų srautas su krituliais, praėjęs pro medžių lapiją ir iš dalies SO_2 koncentracija ore lėmė iki 76 % sulfatų išplovimo iš ekosistemos kintamumo. Tokiam sulfatų išplovimui jokios įtakos neturėjo kylanti oro temperatūra ir gausesni krituliai, sulfatų koncentracijos dirvožemio vandenyje 20 ir 40 cm gylyje ir sulfatų koncentracijų kaita gruntiniame įvairaus gylio vandenyse.

Toks ryškus sulfatų išnešimo sumažėjimas tiesiogiai atspindi ilgalaikį atmosferinės sieros taršos mažėjimą. Kartu mažėjo SO_2 koncentracijos ore, sulfatų koncentracijos atmosferinėse iškritose, sulfatų srautai polajiniais krituliais bei sulfatų koncentracijos upelio vandenyje. Todėl paviršinio vandens išnešami sieros kiekiai patvirtina nuoseklų visos miško ekosistemos atsikūrimą po ilgalaikio rūgščiosios depozicijos poveikio (Likens & Bormann, 1995; De Vries ir kt., 2021; ICP Forests, 2025).

Paskutiniuoju 2023-2025 m. laikotarpiu sulfatų išnešimas upelio vandeniu pasiekė reikšmes artimas maksimalioms, t.y. 800 kg/km^2.

Cl išplovimo iš miško ekosistemų Aukštaitijos KMS baseine rezultatai parodė analogišką išnešimo mažėjimą kaip ir S junginių. Per tiriamąjį laikotarpį Cl išnešimas sumažėjo nuo 400 iki 200 kg/ km^2, t.y. apie 2 kartus arba mažėjimo intensyvumas sudarė beveik po -9 kg iš km^2 per metus.

Tačiau ši tendencija reikšmingai pasikeitė paskutiniuoju laikotarpiu, kai 2023-2025 m. Cl išnešimas upelio vandeniu pasiekė savo maksimalią reikšmę, viršydamas 600 kg/km^2. Na išnešime padidėjimo tendencija paskutiniaisiais metais nenustatyta. Per visą tiriamąjį laikotarpį Na išnešimas Aukštaitijos KMS baseine siekė -6,4 kg/km2 per metus intensyvumą.



7.5 pav. Sulfatų, chloro ir Na išplovimas upelio vandeniu.

Vis dėlto paskutiniaisiais 2023–2025 m. stebėsenos metais nustatytas reikšmingas sulfatų ir Cloridų išnešimo padidėjimas gali būti siejamas su naujos raidos etapu, kuriame didesnę reikšmę įgyja klimato kaitos nulemti hidrologiniai procesai, intensyvesnis medžiagų išplovimas iš baseino bei didėjanti atmosferinė iškritos dėl karo veiksmų Ukrainoje.

Tikėtina, kad prie šių pokyčių prisideda ne tik dažnėjantys intensyvūs krituliai ir didesnis upelio debitas, bet ir pastaraisiais metais atmosferinėse iškritose registruojamas sulfatų koncentracijų didėjimas. Ar šis sulfatų ir chloridų išnešimo padidėjimas yra trumpalaikė hidrologinė anomalija, ar naujai besiformuojanti tendencija, galės parodyti tik tolesni kompleksinio monitoringo tyrimai.

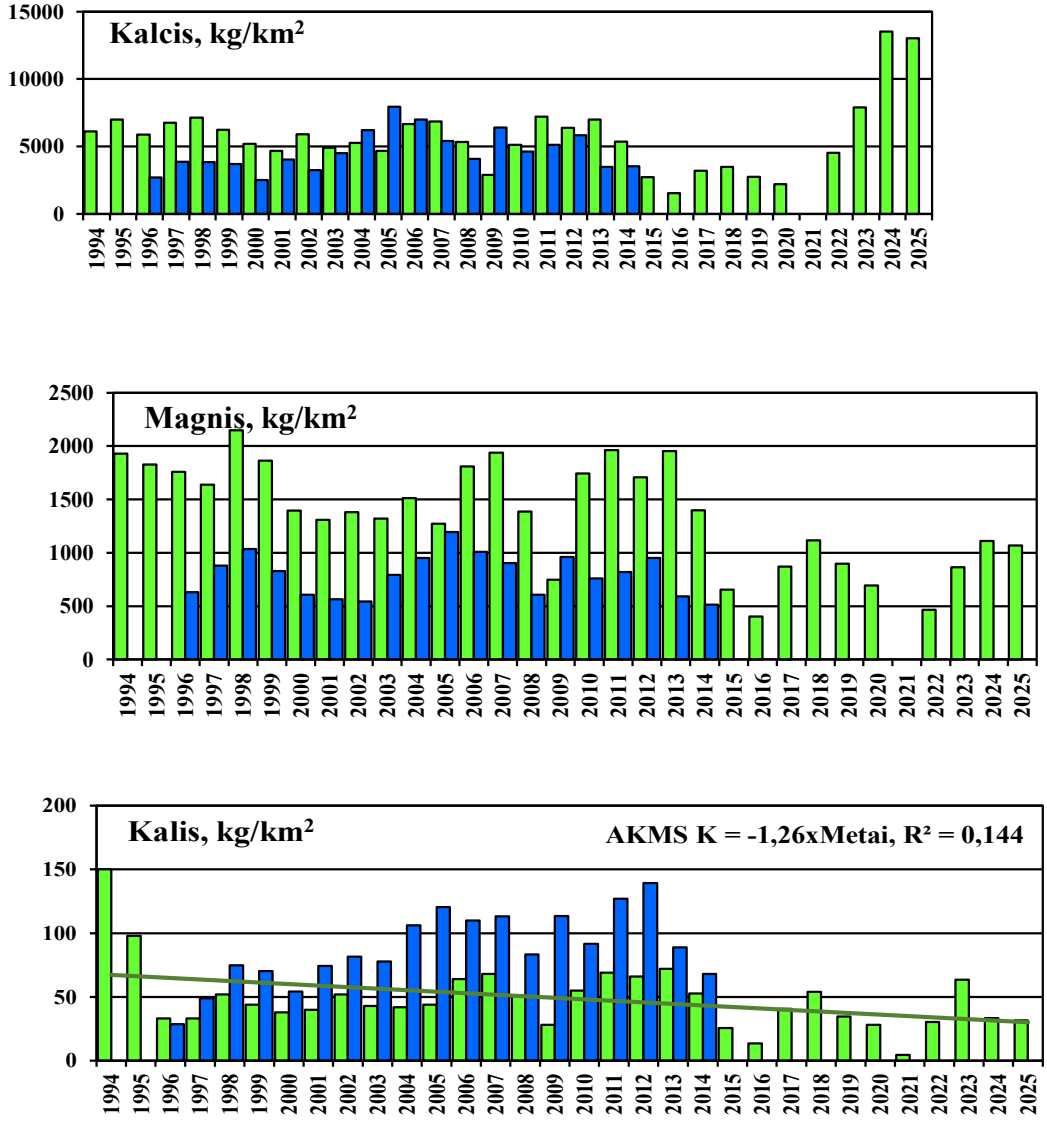
Todėl – nors per visą stebėsenos laikotarpį sulfatų išnešimas iš miško ekosistemos sumažėjo keturis kartus, paskutiniųjų metų rezultatai rodo, kad sieros ciklas dar nėra visiškai stabilizavęsis, dėl ko ilgalaikė šio proceso stebėsena išlieka būtina vertinant klimato kaitos ir besikeičiančios atmosferinės taršos poveikį miško ekosistemų medžiagų balansui.

Nuo stebėsenos pradžios mažėja Ca, Mg bei K išplovimas upelio vandeniu (**7.5 pav.**), ypač iki 2020 m. Reikšmingiausia kaita būdinga Ca ir Mg išplovimui iš miško ekosistemų. Per tiriamąjį laikotarpį šių elementų išplovimas mažėja po 135 ir 37 kg iš km^2 per metus. Mažiausiai reikšmingas yra K išplovimas, kuris siekia po -1,3 kg iš km^2 per metus.

Paskutiniuoju 2022-2025 m. laikotarpiu tirtų katijonų išplovimas reikšmingai pasikeitė. Reikšmingiausiai padidėjo Ca išplovimas iš Aukštaitijos KMS baseino, kuris pasiekė savo maksimalią reikšmę per visą tiriamąjį laikotarpį, t.y. beveik 14 t/km2, kad beveik du kartus viršijo išplovimo lygį 2005 ar 2011 m. ir 4 karus 2016-2020 m. lygį. Mg ir K išplovimas paskutiniuoju laikotarpiu reikšmingai nepakito ir buvo toks pat kaip ir 2015-2020 m. laikotarpiu.

Šios tendencijos atitinka ilgalaikį rūgščiųjų iškritų mažėjimą Europoje. Silpnėjant sulfatų apkrovai mažėjo bazinių katijonų išplovimas iš dirvožemio, todėl mažėjo ir jų išnešimas upelio vandeniu. Tokie dėsningumai laikomi vienu svarbiausių miško ekosistemų atsikūrimo po rūgštėjimo požymių (Likens & Bormann, 1995; De Vries et al., 2021; ICP Forests, 2025).

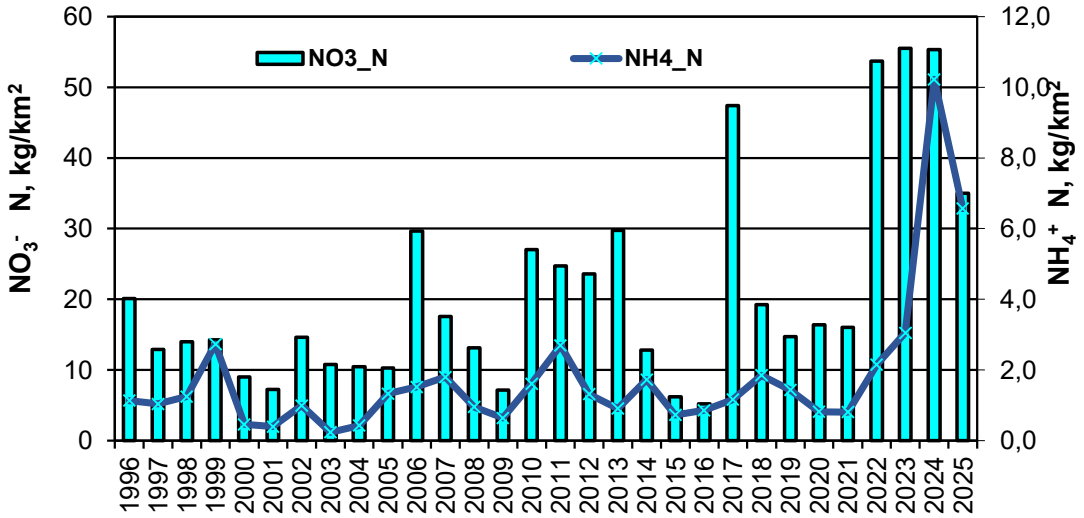
Toks selektyvus tik kalcio išnešimo padidėjimas leidžia manyti, kad paskutiniaisiais metais suaktyvėjo procesai, susiję su intensyvesniu karbonatinių mineralų dūlėjimu, didesniu gruntinio vandens indėliu į upelio mitybą arba padidėjusiu vandens pratekėjimu per kalciu turtingus dirvožemio horizontus. Kadangi magnio ir kalio išnešimas analogiškai nepadidėjo, mažai tikėtina, kad šį procesą lėmė vien bendras dirvožemio išplovimo intensyvėjimas. Greičiau jis atspindi pasikeitusį vandens migracijos kelią baseine ir didesnę gilesnių geocheminių horizontų įtaką upelio vandens cheminei sudėčiai (Appelo & Postma, 2005; Neal ir kt., 2008).



7.6 pav. Kalcio, magnio, natrio ir kalio išplovimas upelio vandeniu.

Nustatyta, kad iki 2020 m. mažėjantis bazinių katijonų išnešimas patvirtino ilgalaikį miško ekosistemos atsikūrimą po rūgštėjimo laikotarpio. Tačiau paskutiniaisiais metais užfiksuotas išskirtinis kalcio išnešimo padidėjimas rodo, kad klimato kaitos sąlygomis keičiasi vandens apytaka ir medžiagų migracija baseine. Šis reiškinys gali būti vienas pirmųjų požymių, kad bazinių katijonų balansas hemiborealiniuose miško baseinuose pereina į naują raidos etapą.

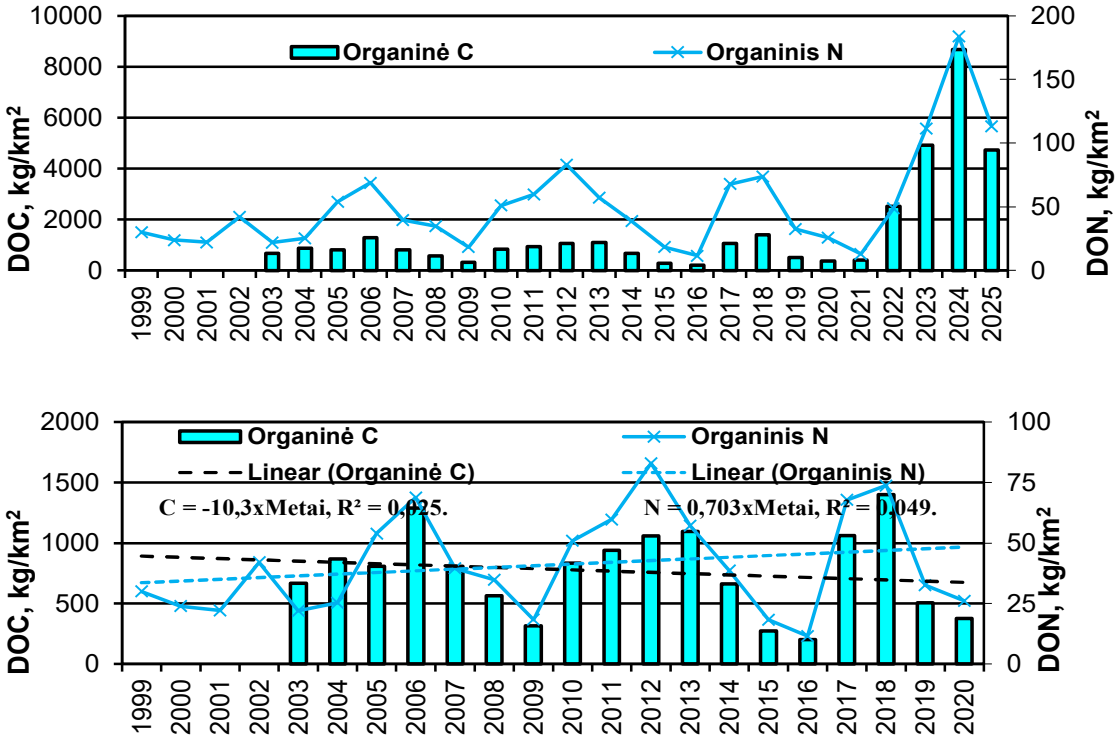
Nepaisant to, kad upelio nuotėkio modulis per stebėsenos laikotarpį Aukštaitijos KMS baseine mažėja, ir organinių, ir mineralinių azoto junginių išplovimas turi tendenciją didėti (**7.7 pav.**).



7.7 pav. Nitratų ir amonio išplovimas upelio vandeniu Aukštaitijos KMS baseine.

Nitratų didėjantį išplovimą pirmoje eilėje reikšmingai sąlygojo nitratų koncentracija upelio vandenyje bei upelio debitas. Šiems parametrams didėjant nitratų išnešimas iš miško ekosistemos taip pat didėjo. Atvirkštinis poveikis nustatytas nitratų koncentracijų polajiniuose krituliuose ir dirvožemio 20 cm gylio vandenyje. Šiems parametrams mažėjant nitratų išnešimas iš ekosistemos didėja. Šie išaiškinti veiksniai paaiškino net iki 91 % nitratų išnešimo iš ekosistemos kintamumo.

Amonio išnešimo kaitoje aiškesnės tendencijos neregistruota iki 2021 m. Intensyviausias išnešimas buvo registruojamas 2006, 2010-2013 ir ypač gausiais krituliais pasižyminčiais 2017 m. Reikšmingiausi veiksniai sąlygojantys tokią amonio išnešimo kaitą buvo upelio debitas ir amonio koncentracijos upelio vandenyje. Taip pat įtakos turėjo ir amonio koncentracijos dirvožemio ir gruntiniame vandenyje. Šie veiksniai lėme, kad paskutiniuoju laikotarpiu amonio išnešimas upelio vandenių reikšmingai padidėjo, pasiekdamas didžiausias reikšmes, t.y net 10kg/km2 ribą. 2022-2024 m. buvo registruojamas ir didžiausias nitratų išnešimas iš Aukštaitijos KMS baseino, kai jis siekė taip pat didžiausias reikšmes – apie 55 kg/km2. Tai iki 5 kartų didesni išnešimai, negu buvo registruoti iki 2020 metų.



7.7 pav. Mineralinio bei organinio azoto (DON) bei organinės anglies (DOC) išplovimas upelio vandeniu Aukštaitijos KMS baseine.

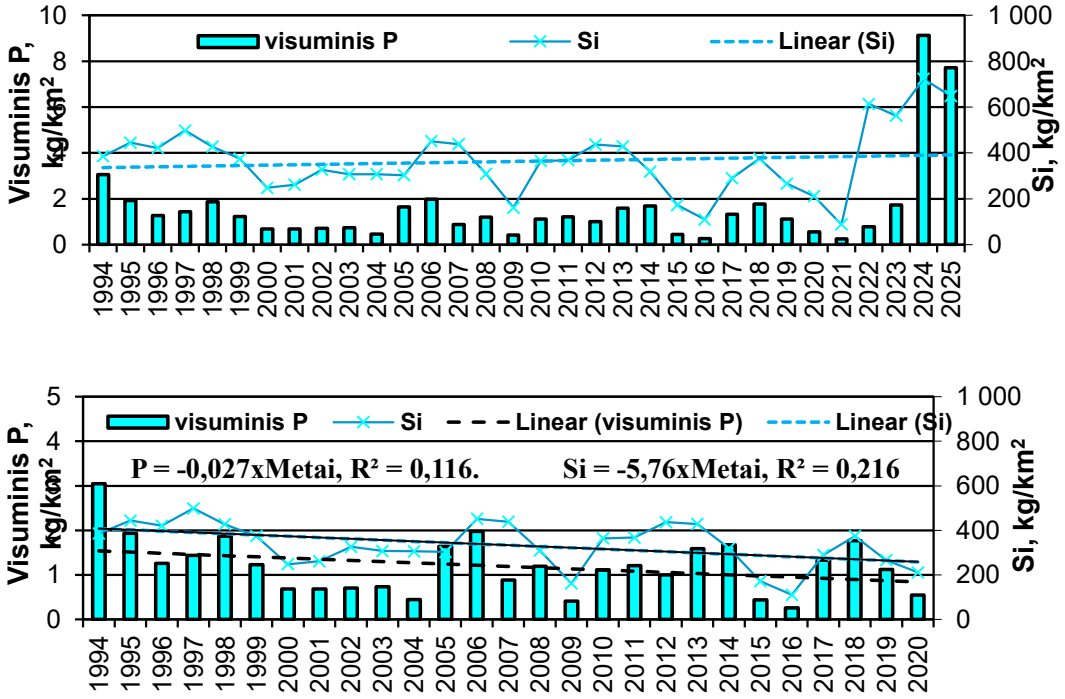
Tokį azoto junginių išplovimą patvirtina ir organinio azoto išplovimo kaitos tendencija. Per 1999-2020 m. organinio azoto išplovimas iš Aukštaitijos KMS baseino siekė -0,7 kg iš km^2 per metus, nors ši tendencija nebuvo reikšminga. Paskutiunysis laikotarpis pakeitė šią tendenciją ypač didelių organinio N išnešimu iš baseino.

Tokiu būdu pasikeitė ne tik atskirų azoto formų koncentracijos, bet ir **visas azoto eksporto iš miško ekosistemos intensyvumas**. Tikėtina, kad tai lėmė klimato kaitos sąlygomis sustiprėjusi organinės medžiagos mineralizacija po sausrų, o vėliau – intensyvesnis susidariusių mineralinių ir organinių azoto junginių išplovimas gausesnių kritulių ir didesnio upelio debito laikotarpiais.

Todėl galima teigti, kad iki 2020 m. miško ekosistema efektyviai sulaikė azoto junginius, tačiau po 2021 m. užfiksuotas staigus nitratų, amonio ir organinio azoto išnešimo padidėjimas rodo, kad azoto ciklas tampa jautresnis klimato kaitos nulemtiems hidrologiniams procesams. Todėl didėjantis azoto eksportas gali būti vienas ankstyviausių signalų apie prasidedančius medžiagų balanso pokyčius hemiborealinių miško ekosistemų baseinuose.

Organinės anglies išnešime nustatyta panašį tendenciją. Iki 2020 m organinės C išnešimas palaipsniui mažėjo po -10,3 kg/km2 per metus. Paskutiniuoju laikotarpiu išnešimas taip pat drastiškai išaugo iki maksimalių reikšmių, t.y. 8,5 t/km2.

Visuminio fosforo ir Si išplovimas iš Aukštaitijos KMS baseino miško ekosistemų vyko taip pat analogiškai ir vidutiniškai reikšmingai. Per 1994-2021 laikotarpį visuminio P išplovimo intensyvumas mažėjo po -0,027 kg iš km^2 per metus, o Si – po -5,76 kg iš km^2 per metus.



7.8 pav. Visuminio fosforo ir silicio, išplovimas upelio vandeniu Aukštaitijos KMS.

Išnešimas reikšmingai pasikeitė 2023-2025 m. kai visuminis P bei Si išbešimas pasiekjė savo maksimalias reikšmes 9 kg/km2 ir 9 t/km2 atitinkamai.

Tikėtina, kad toks ryškus DOC eksporto padidėjimas buvo susijęs su klimato kaitos nulemtais hidrologinio režimo pokyčiais. Po ankstesnių sausrų išaugęs kritulių kiekis ir padidėjęs upelio debitas sustiprino organinių medžiagų išplovimą iš dirvožemio organinių horizontų bei paviršinių durpingų sluoksnių. Kartu su organine anglimi intensyviau migruoja fosforas, geležis, aliuminis ir kiti mikroelementai, sudarydami tirpius organinius–mineralinius kompleksus.

Vienu metu padidėjęs organinės anglies, fosforo, silicio, azoto junginių, kalcio ir sulfatų išnešimas rodo, kad 2023–2025 m. miško baseine įvyko ne pavieniai atskirų elementų svyravimai, bet bendras medžiagų eksporto suaktyvėjimas, kurį pirmiausia nulėmė padidėję vandens srautai ir pasikeitęs hidrologinis režimas.

Todėl organinės anglies eksportas tampa vienu jautriausių klimato kaitos poveikio indikatorių. Kadangi DOC reguliuoja daugelio biogeninių elementų ir metalų migraciją, jo didėjantis išnešimas gali būti vienas svarbiausių veiksnių, lemiančių būsimus miško ekosistemų ir paviršinių vandenų biogeocheminius pokyčius.

Papildomai prie šių pokyčių galėjo prisidėti didėjantis ištirpusios organinės anglies (DOC) eksportas, nustatytas tuo pačiu laikotarpiu. Organinės medžiagos skaidymosi produktai didina fosforo judrumą, o intensyvesnė vandens infiltracija kartu spartina silicio išplovimą iš dūlėjančių mineralų. Todėl vienu metu padidėjęs P, Si ir DOC išnešimas rodo ne atsitiktinius atskirų elementų svyravimus, bet bendrą medžiagų migracijos suaktyvėjimą miško baseine.

Todėl – staigus fosforo ir silicio išnešimo padidėjimas 2023–2025 m. greičiausiai atspindi naują klimato kaitos sąlygomis susiformavusį hidrogeocheminį etapą, kai medžiagų eksportą iš miško ekosistemų vis labiau reguliuoja ne jų koncentracijos dirvožemyje, bet vandens srautų intensyvumas.

Pirmosios elementų grupės išnešimo mažėjimas gali būti susijęs su globalių pernašų mažėjimu, o antrosios grupės, nitratų, amonio, išnešimo didėjimas – su klimato kaita. Vandens apykaitos cirkuliacijos sulėtėjimas ir temperatūros kaita sudaro palankesnes sąlygas cirkuliuoti tirpiems azoto junginiams. Tai reikšminga bioelementų kata sąlygojanti bendrą miško ekosistemų skirtingų biotos komponentų, būklę, produktyvumą, rūšių įvairovę ir gausą.

IŠVADOS

1. Upelio vandeniu išnešamų medžiagų srautai parodė ilgalaikius miško ekosistemų biogeocheminių ciklų pokyčius, kurių ne visada galima nustatyti vien pagal koncentracijų kaitą. Medžiagų srautų analizė leido įvertinti realų cheminių elementų eksportą iš miško baseinų.
2. 1994–2020 m. laikotarpiu daugumos cheminių elementų išnešimas iš Aukštaitijos KMS baseino nuosekliai mažėjo. Ryškiausiai sumažėjo sulfatų, kalcio, magnio, silicio, organinės anglies ir visuminio fosforo eksportas. Tai patvirtina ilgalaikį miško ekosistemos atsikūrimą po rūgščiosios atmosferinės taršos poveikio.
3. Ryškiausias teigiamas pokytis nustatytas sieros cikle. Sulfatų išnešimas sumažėjo nuo maždaug 1000 iki 250 kg km^{-2}, t. y. keturis kartus. Šį procesą daugiausia lėmė sumažėjusi atmosferinė sieros apkrova, mažesni sulfatų srautai su polajiniais krituliais ir mažėjančios SO_2 koncentracijos ore.

4. Iki 2020 m. mažėjo ir bazinių katijonų (Ca, Mg ir K) eksportas, rodydamas silpnėjantį dirvožemio rūgštėjimą ir mažesnį bazinių katijonų išplovimą iš miško ekosistemų.
5. Esminis hidrogeocheminės sistemos pokytis nustatytas po 2022 m. Šiuo laikotarpiu vienu metu padidėjo sulfatų, chloridų, kalcio, nitratų, amonio, organinio azoto, fosforo, silicio ir ištirpusios organinės anglies išnešimas. Daugelio komponentų srautai pasiekė didžiausias reikšmes per visą daugiau kaip tris dešimtmečius trukusį stebėjimo laikotarpį.
6. Padidėjęs medžiagų eksportas pirmiausia buvo susijęs su hidrologinio režimo pokyčiais. Po ilgalaikių sausrų sekę gausūs krituliai ir padidėjęs upelio debitas sustiprino medžiagų migraciją iš dirvožemio ir gruntinio vandens į paviršinius vandenis. Todėl pagrindiniu medžiagų išnešimą reguliuojančiu veiksniu tapo ne koncentracijų pokyčiai, o vandens srautų intensyvumas.
7. Vienu metu padidėjęs organinės anglies, fosforo, silicio, azoto junginių, kalcio ir sulfatų eksportas rodo, kad po 2022 m. pasikeitė visa medžiagų eksporto sistema miško baseine. Šis reiškinys gali būti laikomas nauju ilgalaikių hidrogeocheminių procesų etapu, kuriame klimato kaitos nulemti hidrologiniai procesai tampa svarbesni už atmosferinės taršos mažėjimo poveikį.
8. Gauti rezultatai rodo, kad klimato kaitos sąlygomis pagrindiniu miško ekosistemų medžiagų balanso reguliatoriumi tampa vandens apytakos intensyvumas. Todėl ateityje ilgalaikė medžiagų srautų stebėsena turės ne mažesnę reikšmę negu cheminių koncentracijų analizė vertinant miško ekosistemų būklę ir jų atsparumą globaliems aplinkos pokyčiams.

GALIMOS GRĖSMĖS MIŠKO EKOSISTEMOMS, ATSIŽVELGIANT Į MEDŽIAGŲ IŠNEŠIMO POKYČIUS

Didžiausia naujai išryškėjusi grėsmė yra spartėjantis medžiagų eksportas iš miško ekosistemų. Jeigu iki 2020 m. daugumos cheminių elementų išnešimas mažėjo, tai 2022–2025 m. vienu metu padidėjo sulfatų, chloridų, kalcio, azoto junginių, fosforo, silicio ir ištirpusios organinės anglies srautai. Tokia vienakryptė daugelio elementų reakcija rodo, kad klimato kaitos sąlygomis gali būti pažeidžiama ilgalaikė miško ekosistemų medžiagų pusiausvyra.

Didėjantis bazinių katijonų, ypač kalcio, eksportas gali ilgainiui mažinti dirvožemio buferinę gebą. Nors šiuo metu nustatyti pokyčiai dar neleidžia kalbėti apie dirvožemio nualinimą, ilgalaikis intensyvesnis kalcio išplovimas gali sumažinti dirvožemio gebėjimą neutralizuoti rūgštinančius procesus ir neigiamai paveikti medžių mitybą.

Didėjantis nitratų, amonio ir organinio azoto išnešimas rodo silpnėjančią azoto retenciją miško baseinuose. Tai gali reikšti, kad klimato kaitos sąlygomis po ekstremalių meteorologinių

reiškinių ekosistemos vis sunkiau išlaiko azotą biologiniame cikle, todėl didėja jo eksportas į paviršinius vandenis.

Staigus organinės anglies (DOC) eksporto padidėjimas gali keisti visą paviršinių vandenų biogeochemiją. DOC didina geležies, aliuminio ir fosforo migraciją organinių–mineralinių kompleksų pavidalu, todėl gali keistis vandens spalva, šviesos skvarba, maisto medžiagų prieinamumas ir vandens organizmų buveinių sąlygos.

Padidėjęs fosforo eksportas gali didinti maisto medžiagų nuostolius iš miško ekosistemų. Nors absoliučios koncentracijos tebėra būdingos natūraliems baseinams, ilgalaikis šio proceso stiprėjimas gali keisti maisto medžiagų balansą ir skatinti didesnį jų patekimą į žemiau esančius vandens telkinius.

Padidėjęs silicio eksportas rodo intensyvėjančią vandens ir mineralinės dirvožemio dalies sąveiką. Jei ši tendencija tęsis, ji gali rodyti spartesnį mineralų dūlėjimą ir aktyvesnę geocheminių elementų migraciją visame baseine.

Nors ilgalaikė sulfatų išnešimo tendencija išlieka mažėjanti, paskutiniaisiais metais registruotas reikšmingas jo padidėjimas rodo, kad sieros ciklas dar nėra visiškai stabilizavęsis. Klimato kaitos nulemta hidrologinio režimo kaita, dirvožemyje sukauptų sieros junginių mobilizacija bei pastaruoju metu atmosferinėse iškritose registruojamas sulfatų didėjimas, galimai susijęs ir su karo Ukrainoje padariniais, ateityje gali skatinti pakartotinį sieros eksporto didėjimą.

Visų pagrindinių medžiagų srautų sinchroniškas padidėjimas po 2022 m. gali būti ankstyvas naujo hidrogeocheminio režimo formavimosi požymis. Jei ši tendencija tęsis, pagrindine grėsme taps ne pavienių cheminių elementų pokyčiai, o vis spartėjantis medžiagų išnešimas iš miško ekosistemų, galintis mažinti jų ilgalaikį produktyvumą, atsparumą ir biogeocheminį stabilumą.

PROGNOZĖS

Jeigu išliks dabartinės klimato kaitos tendencijos, medžiagų išnešimas iš hemiborealinių miško ekosistemų upelių vandeniu ateityje didės. Pagrindiniu šio proceso veiksniu taps ne cheminių medžiagų koncentracijos, o dažnėjantys hidrologiniai ekstremumai – ilgalaikės sausros, po kurių seka intensyvūs krituliai ir padidėję upelių debitai.

Tikėtina, kad organinės anglies (DOC) eksportas taps vienu svarbiausių miško ekosistemų kaitos indikatorių. Didėjantis DOC išnešimas skatins fosforo, geležies, aliuminio ir kitų elementų migraciją organinių–mineralinių kompleksų pavidalu, todėl gali iš esmės keistis paviršinių vandenų biogeocheminis režimas.

Azoto ir fosforo eksportas iš miško baseinų gali išlikti padidėjęs, ypač po ekstremalių meteorologinių reiškinių. Dėl to didės sezoniniai maisto medžiagų srautų svyravimai ir mažės miško ekosistemų gebėjimas efektyviai sulaikyti biogeninius elementus.

Bazinių katijonų, ypač kalcio, išnešimo didėjimas gali tapti ilgalaike tendencija, jeigu išliks padidėjęs vandens pratakumas per dirvožemio ir gruntinio vandens sistemas. Ilgainiui tai gali mažinti dirvožemio bazinių katijonų atsargas ir jo buferinę gebą.

Nors ilgalaikė sulfatų išnešimo tendencija išlieka mažėjanti, trumpalaikis sulfatų srautų padidėjimas 2023–2025 m. rodo, kad sieros ciklas dar nėra visiškai stabilizavęsis. Klimato kaitos nulemtas vandens režimo kitimas, anksčiau dirvožemyje sukauptų sieros junginių mobilizacija ir padidėję sieros srautai atmosferinėse iškritose, galimai susiję ir su karo Ukrainoje padariniais, gali lemti pakartotinius sulfatų eksporto padidėjimus ateityje.

Tikėtina, kad ateityje didės metiniai medžiagų srautų svyravimai. Todėl vienkartiniai koncentracijų matavimai taps vis mažiau informatyvūs, o ilgalaikė medžiagų srautų stebėsena taps pagrindiniu miško ekosistemų būklės vertinimo įrankiu.

Jeigu po 2022 m. nustatytos tendencijos išliks, miško baseinai pereis į naują hidrogeocheminės raidos etapą. Šiame etape medžiagų balansą lems nebe mažėjanti atmosferinė tarša, o klimato kaitos nulemti hidrologiniai procesai, reguliuojantys vandens apytaką ir cheminių elementų migraciją.

Todėl galima prognozuoti, kad artimiausiais dešimtmečiais didžiausias iššūkis hemiborealinių miško ekosistemų tvarumui bus ne nauji atmosferinės taršos šaltiniai, o klimato kaitos sukeltas medžiagų eksporto intensyvėjimas. Ilgalaikėje perspektyvoje tai gali lemti dirvožemio maisto medžiagų atsargų mažėjimą, spartesnę organinės anglies apytaką ir didesnį biogeocheminių ciklų nepastovumą.

7.5. Dirvožemio cheminė sudėtis ir jos kaitos svarba miško ekosistemų būklei

Dirvožemis yra pagrindinis miško ekosistemų biogeocheminių procesų reguliatorius, kuriame vyksta ilgalaikis anglies, azoto, fosforo, sieros ir bazinių katijonų kaupimas, transformacija bei migracija. Skirtingai nei atmosfera ar įvairūs vandens komponentai, dirvožemis pasižymi didele inercija, todėl jo cheminės sudėties pokyčiai atspindi ne trumpalaikius aplinkos svyravimus, bet ilgalaikę ekosistemų raidą, susijusią su atmosferinės taršos mažėjimu, klimato kaita ir biologinių procesų intensyvumo pokyčiais (Likens & Bormann, 1995; De Vries et al., 2021).

Pastaraisiais metais vis daugiau dėmesio skiriama ne pavienių dirvožemio cheminių rodiklių analizei, bet jų tarpusavio sąveikai, reguliuojant visos ekosistemos medžiagų balansą. Dirvožemio rūgštingumas, bazinių katijonų atsargos, katijonų mainų kompleksas, organinės anglies bei azoto kiekiai lemia ne tik augalų mitybos sąlygas, bet ir mikrobiologinių procesų intensyvumą, organinių medžiagų skaidymąsi, mineralų dūlėjimą bei cheminių elementų migraciją į dirvožemio, gruntinius ir paviršinius vandenis. Todėl dirvožemio cheminė sudėtis laikoma vienu svarbiausių miško ekosistemų atsparumo ir ilgalaikio tvarumo rodiklių (Appelo & Postma, 2005; ICP Forests, 2024).

Viena svarbiausių yra organinės anglies dinamika dirvožemyje. Nustatyta, kad klimato šiltėjimas, dažnėjančios sausros ir pakitęs kritulių režimas keičia ne tik organinės anglies kaupimąsi, bet ir jos tirpios frakcijos (DOC) migraciją dirvožemio profilyje. Didėjantis DOC judrumas daro tiesioginę įtaką fosforo, geležies, aliuminio ir kitų mikroelementų transportui, todėl keičiasi ne tik dirvožemio, bet ir gruntinio bei paviršinio vandens cheminė sudėtis (Qin et al., 2024; Liu et al., 2023).

Ne mažiau svarbūs yra dirvožemio azoto ir bazinių katijonų pokyčiai. Nors rūgščiosios atmosferinės depozicijos mažėjimas daugelyje Europos miškų sumažino sieros apkrovą ir sulėtino dirvožemio rūgštėjimą, klimato kaitos sąlygomis spartėjanti organinių medžiagų mineralizacija ir intensyvesnė vandens apytaka gali didinti azoto, kalcio, magnio bei kitų elementų migraciją iš dirvožemio į vandens sistemas. Todėl ilgalaikiai dirvožemio cheminės sudėties pokyčiai tampa vienu svarbiausių rodiklių, leidžiančių prognozuoti būsimas miško ekosistemų reakcijas į globalius aplinkos pokyčius (Gundersen et al., 2006; De Vries et al., 2021).

Šiuolaikinė miško ekosistemų stebėsena vis dažniau grindžiama ne atskirų aplinkos komponentų analize, bet vientisu medžiagų apytakos vertinimu. Dirvožemio cheminės sudėties pokyčiai turi būti interpretuojami kartu su atmosferinių iškritų chemine sudėtimi, dirvožemio, gruntinio ir paviršinio vandens cheminiais rodikliais bei medžiagų srautais iš baseino. Tik toks integruotas požiūris leidžia nustatyti, ar stebimi cheminių elementų pokyčiai atspindi jų kaupimąsi dirvožemyje, ar, priešingai, didėjantį eksportą iš miško ekosistemos (Likens & Bormann, 1995; ICP Forests, 2024; ICP Waters, 2024).

Todėl šiame skyriuje dirvožemio cheminės sudėties pokyčiai vertinami kaip pagrindinė grandis, jungianti atmosferines iškritas, vandens cheminę sudėtį ir medžiagų išnešimą iš miško ekosistemų. Toks požiūris leidžia kompleksiškai įvertinti ilgalaikę hemiborealinių miškų biogeocheminių ciklų raidą ir nustatyti, ar pastaraisiais metais vis ryškiau pasireiškiantys klimato kaitos nulemti hidrologiniai procesai jau pradėjo keisti dirvožemio medžiagų atsargas bei visos ekosistemos funkcionavimą.

7.5.1. KMS dirvožemio ėminių rinkimo sąlygų aprašymas ir metodika

Dirvožemio tyrimai pagal UN ECE kompleksiško monitoringo programą vykdomi kas 5 metų laikotarpį. Paskutiniaisiais metais tyrimai buvo atlikti 2015 m.

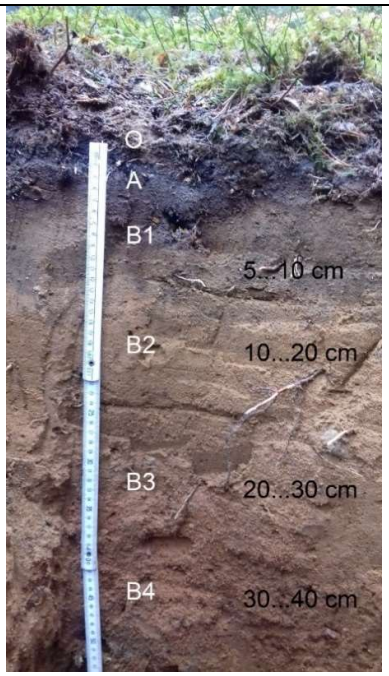
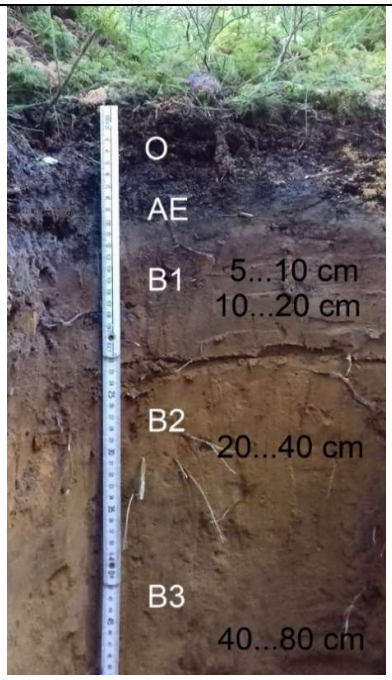
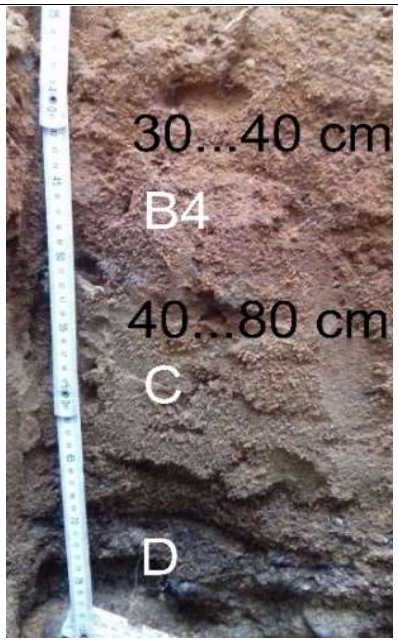
Dirvožemio paviršinio horizonto ėminiai, iš 0...5 cm gylio renkami kas 5 metus, pastovioje teritorijoje, dirvožemio tyrimų kvadrate ir iš. gilesniųjų 5...10, 10...20, 20...40 ir 40...80 cm vidurio, neatsižvelgiant į genetinius horizontus. Dirvožemio ėminiai buvo renkami vegetacijos laikotarpio pabaigoje, rugsėjo mėnesio pabaigoje - spalio mėnesio pirmoje pusėje. Dirvožemio paviršinių horizontų (0...5 cm) pavyzdžiai (ėminiai) surinkti iš pastovaus dirvožemio tyrimų kvadrato, apibrėžto monitoringo darbų pradžioje, 1993 ir 1994 metais. Vėliau ėminiai iš kvarato rinkti 2000, 2005 ir 2020 metais. 2000 metais buvo analizuojami tik visuminis (bendrasis) sunkiųjų metalų kiekis ir granuliometrinė sudėtis. Dirvožemio gilesniųjų horizontų ėminiai surinkti 1993-1994, 2005 ir 2020 metais, dirvožemio profilio horizontų ir dirvožemio pavadinimai nustatyti pagal tarptautinę klasifikaciją (WRB). Dirvožemio tipas nepasikeitė nuo stebėjimų laikotarpio pradžios, nes stengiamasi profilį kasti tokioje vietoje, kurioje dirvodaros sąlygos yra panašios, sąlyginai lygus reljefas ir netoli buvusiųjų kasinių ir dirvožemio paviršinio horizonto tyrimų kvadrato. 2020 metais dirvožemio profilio koordinatės Aukštaitijos KMS buvo 55.43736 laipsniai šiaurės platumos, 26,06877 rytų ilgumos o Žemaitijos 56.00622 šiaurės platumos ir 21.87536 rytų ilgumos. Nuo 2025 metų atnaujinti tyrimai Dzūkijos Skroblaus rezervate, dirvožemio profilio koordinatės atitinkamai 54.08547 ir 24.29356 laipsniai.

Dirvožemių tyrimo kvadrate yra 16 gardelių, iš kurių dirvožemio pavyzdžiai rinkti naudojant 4 cm diametro, 50 cm^3 tūrio cilindrą. Dirvožemio tyrimų kvadratai tyrimų teritorijoje pažymėti plastikiniais reperiais.

Dirvožemio ėminių pradinis drėgnis nustatytas pagal masės nuostolių procentą, išdžiovinus žinomo tūrio dirvožemio ėminį 105°C temperatūroje iki pastovios masės, kuris vadinamas sausu mėginiu. Pagal išdžiovinto ėminio svorį nustatomas dirvožemio horizontų tankis, kuris gali būti panaudojamas potencialiai teršiančių medžiagų inventorizacijai, išreiškiamai mg/m^2.

Aukštaitijos KMS **Dzūkijos KMS** **Žemaitijos KMS**

7.9 pav. Dirvožemių profilių bendras vaizdas

Aukštaitijos KMS	Žemaitijos KMS
	
	

7.10 pav. Dirvožemio profilių apibūdinimas. Balta spalva pažymėti dirvožemio horizontų simboliai, o juoda - nurodyti standartizuoti gyliai nuo mineralinio horizonto paviršiaus. Apačioje kairėje, pavaizduota Aukštaitijos KMS profilio apatinė dalis, kur giliau 72 cm dirvožemio gimtoji uoliena, horizontas C, ribojasi su žvirgždo sluoksniu, dirvožemio horizontu D – paklotine uoliena. Dešinėje demonstruojamas dirvožemio pavyzdžių ėmimas naudojant 5 cm diametro cilindrus, iš paviršinių dirvožemio horizontų A+E Žemaitijos KMS dirvožemių tyrimų kvadrate.

Nepaisant drėgnų 2025 metų dirvožemio ėminių drėgniai 2025 m. profilyje mažai skyrėsi nuo 2020 metų. Dirvožemio ėminių pradinis drėgnis Aukštaitijos KMS kvadrate buvo 10,2±3,2%, o Žemaitijos KMS kvadrate buvo 30,9±10,3%. Dzūkijos KMS atnaujintame dirvožemio kvadrate drėgnis buvo 10,1±3,2%, t. y., labai panašus į Aukštaitijos KMS dirvožemio kvadrato, beveik identiški drėgniai buvo ir dirvožemio mėginių profiliuose.

Dirvožemio tankis Aukštaitijos KMS buvo mažiausias ir mažiausiai kintantis 1,15±0,07 g/cm^3; Dzūkijos KMS – didžiausias, 1,30±0,10 g/cm^3, o Žemaitijos KMS – vidutinis ir labiausiai kintantis 1,18±0,17 g/cm^3.

7.5.2. Dirvožemių fizikinės ir cheminės savybės

Kompleksinio miško ekosistemų monitoringo stotyse ėminiai iš dirvožemio renkami kas 5 metus. Nustatomos dirvožemio savybės susijusios su kietosios dirvožemio fazės gebėjimu sorbuoti medžiagas patenkančias su krituliais. Dirvožemio savybės gali būti skirstomos į 3 pagrindines grupes:

1) Dirvožemio koloidų savybės – dirvožemių koloidų sistemą ir sorbcinį pajėgumą apibūdinančios (pH (vandenyje ir $CaCl_2$, mainų rūgštingumas, judrieji šarminiai metalai (Na, K, Ca ir Mg), judrieji geležis ir aliuminis).

2) Organogeniniai elementai – visuminiai kiekiai elementų, daugiausia randami dirvožemio organinėse medžiagose (visuminė organinė anglis, azotas, fosforas ir siera).

3) Visuminiai (bendrieji) metalų kiekiai (Fe, Mn, Zn, Pb, Ni, Cu, Cr ir Cd).

Šios trys pagrindinės dirvožemio savybių grupės yra tarpusavyje susijusios, nes, pavyzdžiui, didesnis sorbcinis talpumas gali sutapti su didesniais įvairių metalų bei su organine medžiaga susijusių elementų visuminiais kiekiais. Dirvožemių savybių nustatymo ir jų aprašymo įvairiais stebėjimo metais tikslas yra išaiškinti ir pagrįsti, kurios dirvožemio savybės pasikeitė ir nustatyti galimas pokyčių priežastis. Visų savybių sąrašas, matavimo vienetai, santrumpos bei sutartiniai ženklai pateikti lentelėje (Lentelė 7.1).

Iš viso 2020 metais buvo tiesiogiai nustatytos 22 dirvožemio fizinės ir cheminės savybės, apskaičiuotos dirvožemio charakteristikos, apibūdinančios dirvožemio koloidų gebėjimą sorbuoti katijonus (katijonų sorbcinė talpa, CEC) šarminių ir rūgštinių savybių balansą (pasotinimas bazėmis, BASA). Judrusis aliuminis dirvožemyje atsiranda dėl rūgščių kritulių, tirpinančių kompleksinius junginius, kuriuos sudaro įvairūs metalai susigrupavę su organinėmis rūgštimis, judrus aliuminis ir geležis konkuruoja dalyvaudami mainų reakcijose dirvožemio hidroksidų paviršiuose, formuodami sorbcines dirvožemio savybes, kurios kinta keičiantis rūgštumui (Yaping Xie *et al*, 2020). Šios savybės vadinamos dirvožemių koloidų sistemos charakteristikoms.

7.1 lentelė. Dirvožemių cheminių savybių sąrašas.

Savybės	Matavimo vienetas	Santrumpa	Pastabos
1. Dirvožemio koloidų savybės			
pH vandens ištraukoje	pH vienetai	pH_EW	
pH 0,01 M $BaCl_2$ ištraukoje	pH vienetai	pH_EB	
Judrus Na	mekv/kg	Na_E	
Judrus K	mekv/kg	K_E	
Judrus Mg	mekv/kg	Mg_E	
Judrus Ca	mekv/kg	Ca_E	
Efektyvus mainų rūgštumas	mekv/kg	ACI_ET	
Efektyvioji katijonų sorbcijos talpa	mekv/kg	CEC_E	Na_E+K_E+MG_E+CA_E+ACI_ET
Pasotinimas bazėmis	%	BASA	(Na_E+K_E+MG_E+CA_E/CEC_E)*100%
Judrus Al	mekv/kg	Al_E	
Judri Fe	mekv/kg	Fe_E	
Judraus Al ir geležies santykis	santykinis dydis	Al/Fe	Elementų ekvivalentinių masių santykinis dydis
2. Organogeniniai elementai (visuminiai, bendras kiekis)			
Organinė anglis	mg/kg	COR_T	
Visuminis azotas	mg/kg	N	
Visuminių organinės anglies ir azoto santykis	santykinis dydis	C/N	Elementų ekvivalentinių masių santykinis dydis
Visuminis fosforas	mg/kg	P	
Visuminė siera	mg/kg	S	
3. Metalai (visuminis, bendras kiekis)			
Geležis	mg/kg	FE	
Manganas	mg/kg	MN	
Kadmis	mg/kg	CD	
Chromas	mg/kg	CR	
Varis	mg/kg	CU	
Nikelis	mg/kg	NI	
Švinas	mg/kg	PB	
Cinkas	mg/kg	ZN	
Pastaba: grafikuose ir tekste aprašytos ir grafikuose parodytos ne visos savybės, bet tik pagrindiniai rodikliai. Visos neaprašytos savybės naudotos išvestinių charakteristikų skaičiavimuose ir yra duomenų bazėje.			

Apibūdinant organinės medžiagos būklę, apskaičiuoti dirvožemio elementų atominiai santykiniai koeficientai. Organinės anglies ir azoto atominis santykis (C/N) rodo organinės medžiagos susiskaidymo laipsnį, o C/N rodiklio mažėjimas – dirvožemio organinės medžiagos brandumo didėjimą (Michalzik, Kalbitz, Park *et al.*2001).

7.5.3. Dirvožemio cheminės sudėties kaitos palyginimas KMS dirvožemio tyrimų stacionaruose

Klimato ir globalių pernašų pokyčiai lemia, kad dirvožemių išplovimas ir rūgštėjimas slopsta. Dirvožemio pH ir koloidų savybių kiekybiniai rodikliai rodo, kad dirvožemio rūgštingumas reikšmingai visame horizonte nekinta. Viršutiniame dirvožemio sluoksniuose Aukštaitijos KMS dirvožemio rūgštingumas išlieka stabilus ir svyruojantis 4,5 – 5,0 ribose. Žemaitijos KMS dirvožemis viršutiniuose sluoksniuose darosi mažiau rūgštus ir pradeda viršyti pH 4 ribą. Šioje stotyje dirvožemis stipriau paveiktas jaurėjimo, todėl natūraliai yra rūgštesnis.

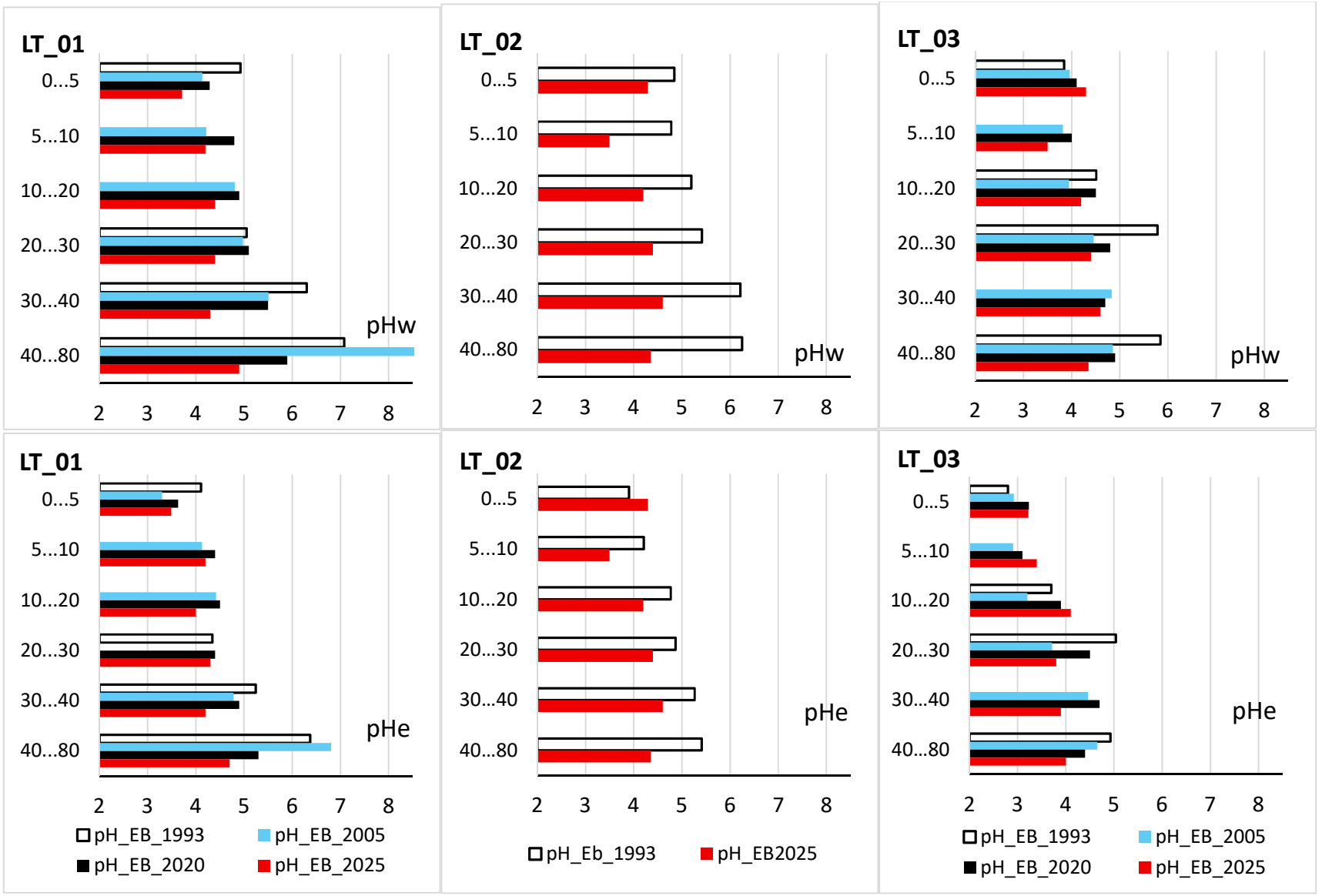
Gilesniuose sluoksniuose stebimas dirvožemio rūgštingumo didėjimas. Dažnesni tyrimai galėtų paaiškinti tokią dirvožemio rūgštingumo kaitą.

2025 metais dirvožemio profilio pH reikšmė vandens ištraukoje (pHw) buvo mažesnė, negu 1993, 2005 ir 2020 metais analogiškuose dirvožemio pavydžiuose. Išimtis - Žemaitijos IMS dirvožemio kvadratas ir 10…20 cm gylis, kur nustatytas pH padidėjimas, t.y. rūgštumo sumažėjimas. Silpno elektrolito tirpalo ištraukoje (pHe) rūgštumo padidėjimas rečiau stebimas, negu vandens ištraukoje ir matomi pokyčiai nėra tokie kryptingi. Žemaitijos IMS 0-20 cm gylyje stebimas pH reikšmės augimas, o giliau 20 cm pH mažėja, t.y. dirvožemis rūgštėja, kaip ir Aukštaitijos bei Dzūkijos IMS.

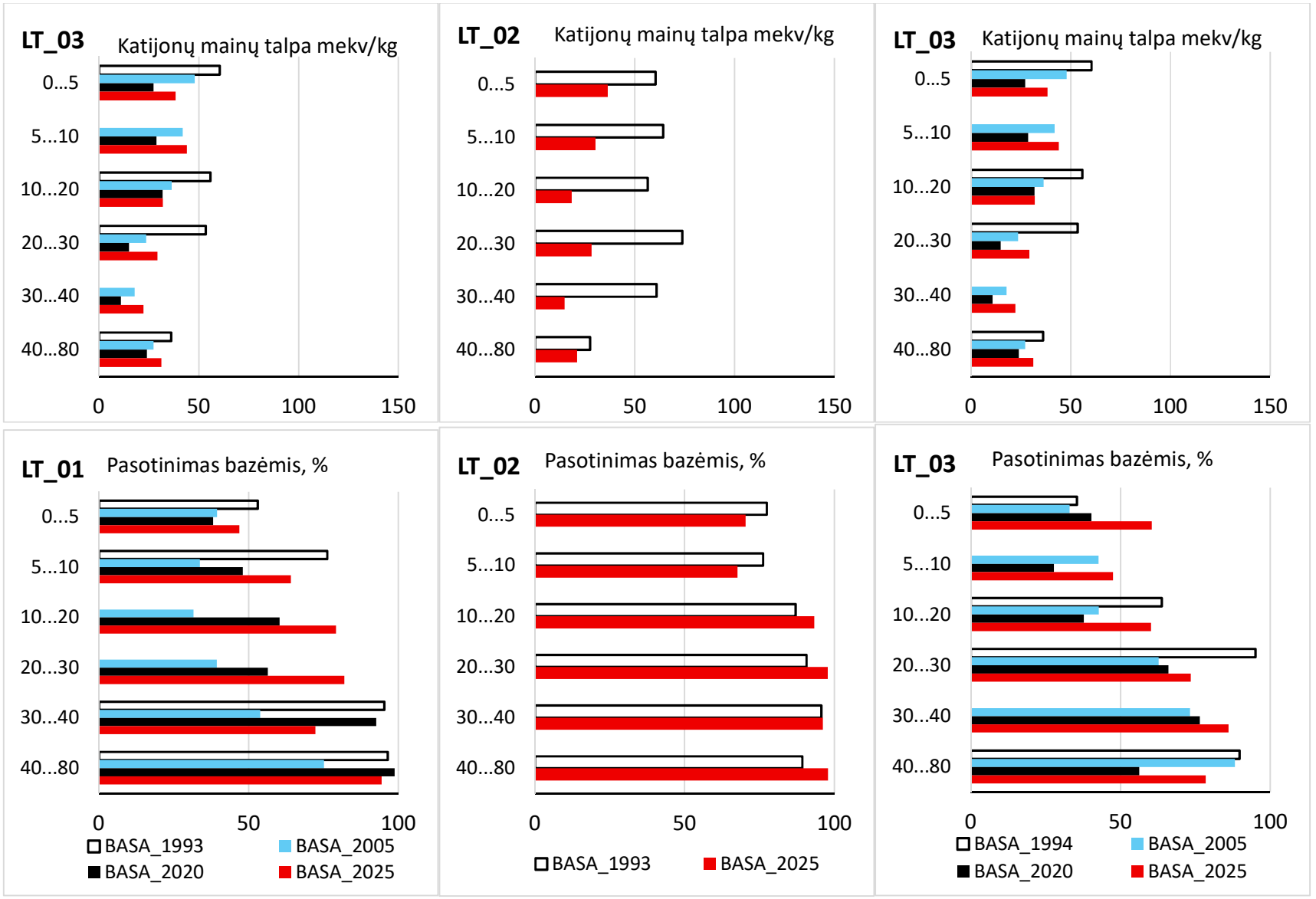
2025 metais nustatyta didesnė katijonų mainų talpa, negu 2020 metais, artima 2005 metų, bet mažesnė negu 1993 metais, o sorbuojančio dirvožemio komplekso pasotinimas bazėmis daugumoje mėginių padidėjo.

Organinės anglies, visuminio azoto bei fosforo kiekio dirvožemyje dinamika patvirtina ir atskleidžia koloidų savybių kaitos priežastį: biogeninių elementų kaupimąsi. Skirtingų IMS dirvožemiuose nevienodas kaupimosi pobūdis: Aukštaitijos ir Dzūkijos IMS biogeninės medžiagos linkę kauptis giliau negu 10 ar 20 cm sluoksnyje, o Žemaitijos IMS – arba viršutiniame, arba giliausiame stebimame 60-80 cm gylyje. Skirtingą kaupimosi pobūdį lemia dirvožemio tipas. Stebimas Žemaitijos dirvožemis nuo kitų IMS dirvožemių skiriasi rūgštesniu paviršiniu horizontu, todėl biogeniniai elementai, o ypač fosfatai nėra judrūs ir kaupiasi paviršiniame horizonte.

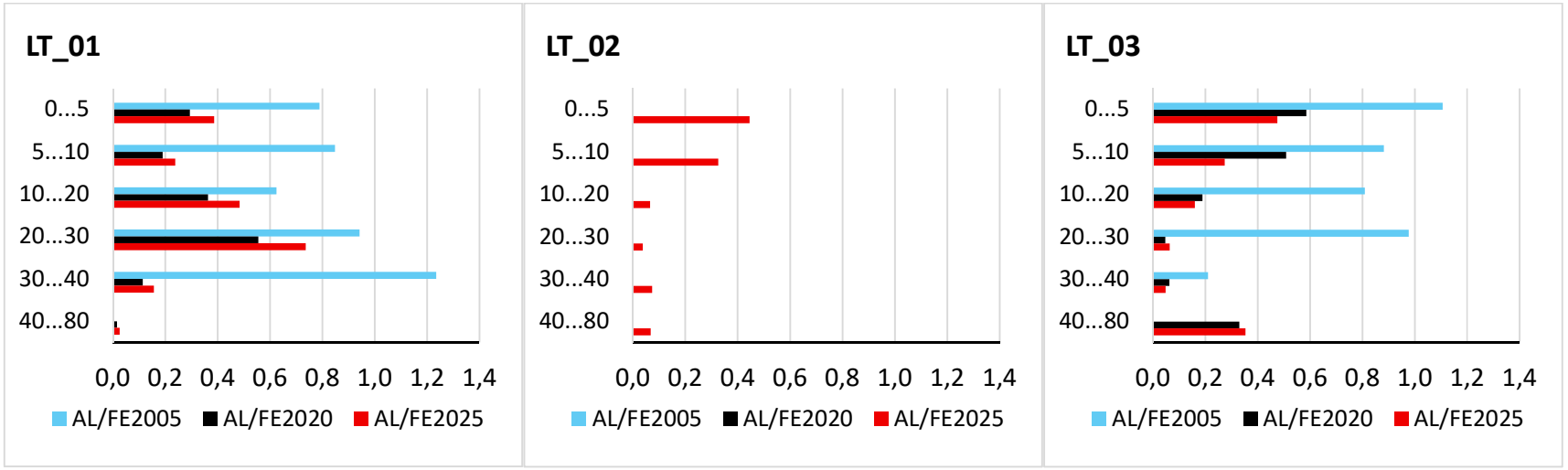
Anglies ir azoto santykio padidėjimas taip pat rodo, kad dirvožemis pasipildė šviežiomis organinėmis medžiagomis. Tik visuminės sieros Aukštaitijos KMS dirvožemyje 2020 metais 0...10 cm gylyje padaugėjo, o >10 cm gylyje žymiai sumažėjo, nors visuose geosistemos komponentuose stebimas reikšmingas šio elemento sumažėjimas. Nepakankamas kritulių kiekis galėjo sąlygoti susilpnėjusi S išplovimą iš anksčiau užterštos S junginiais miško ekosistemos.



7.11. pav. Dirvožemio pH kitimas profilyje.

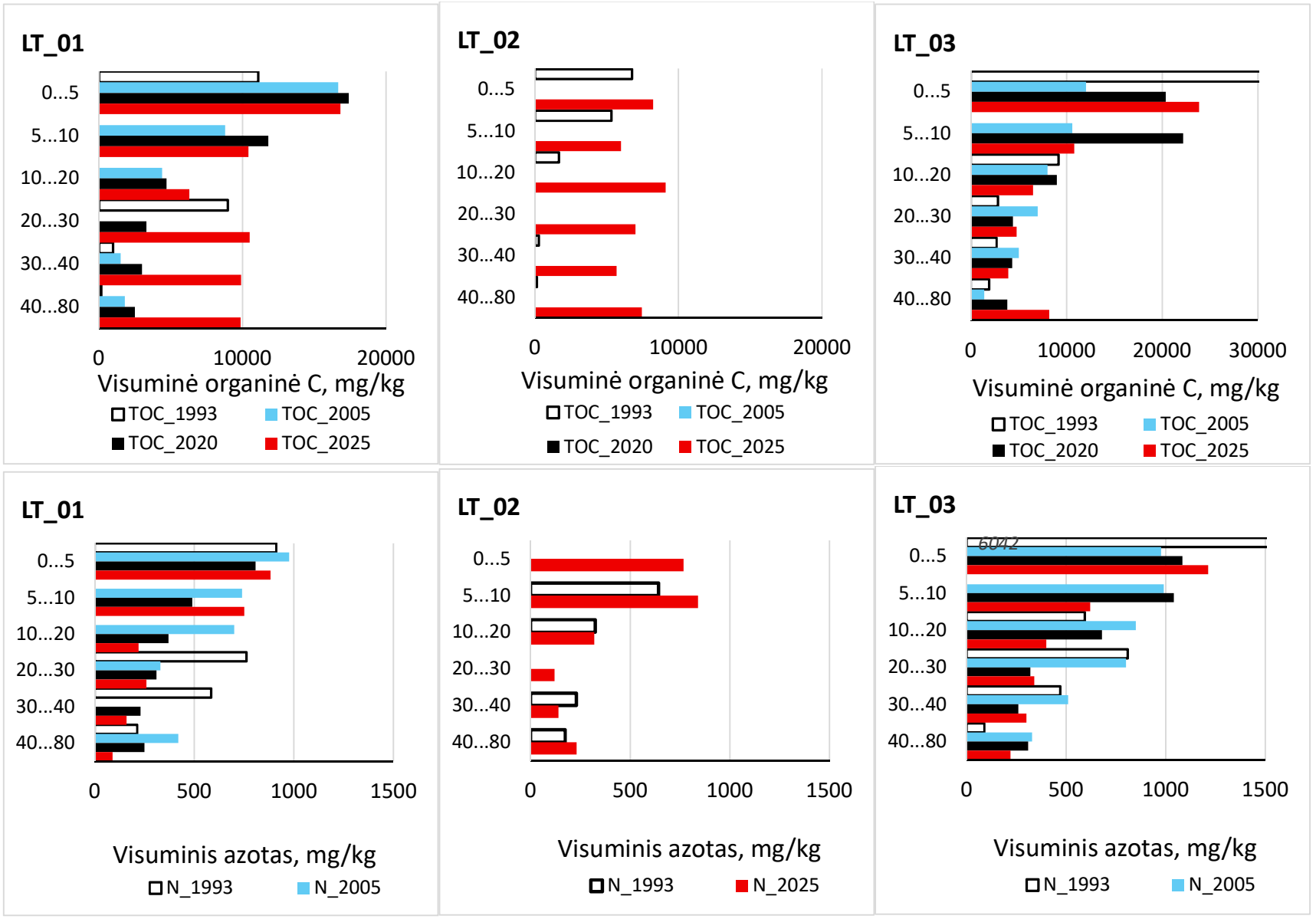


7.12 pav. Katijonų sorbcinio komplekso savybių kitimas dirvožemio profilyje.

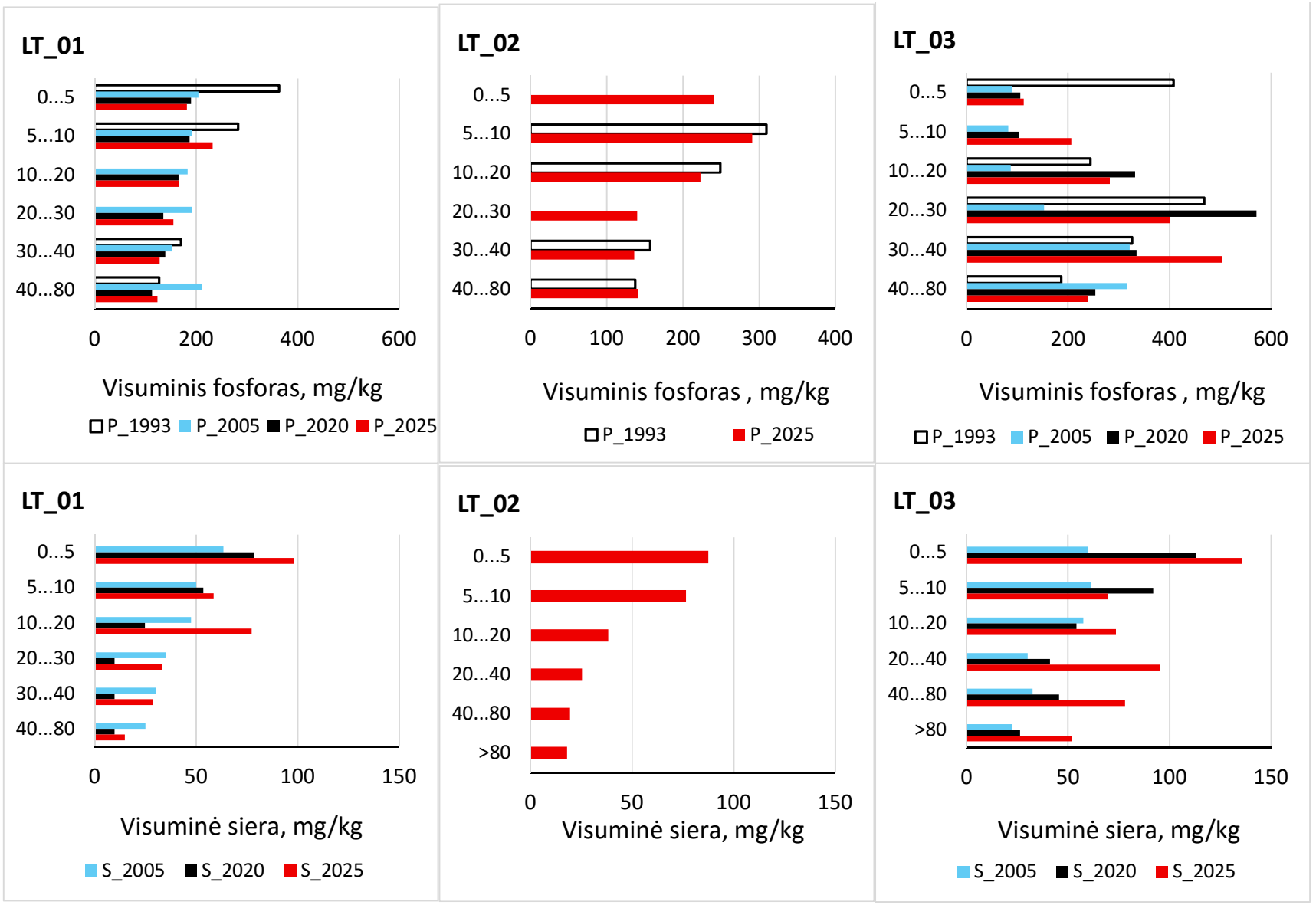


7.13 pav. Dirvožemio hidroksidų sorbcinio komplekso characteristikos, judraus aliuminio ir geležies kitimas profilyje.

7.14 pav. Cinko ir aliuminio-geležies koncentracijų kitimas dirvožemių profiliuose.



7.15 pav. Visuminės anglies ir visuminio azoto kitimas dirvožemių profiliuose.



7.16 pav. Visuminio fosforo ir sieros kitimas dirvožemių profiliuose.

Dirvožemio hidroksidų sorbcinio komplekso savybes apibūdina judriųjų geležies ir aliuminio santykis, kuris abiejose monitoringo stotyse sumažėjo tiek paviršiniuose horizontuose (0...40 cm gylyje), tiek giliau (40...80 cm ir >80 cm gylyje). Žemaitijos KMS dirvožemiui būdingas didesnis pusantrinių oksidų kiekis viršutiniuose horizontuose, o Aukštaitijos KMS daugiausia hidroksidų sukaupė virš karbonatinio geocheminio barjero, giliau 30 cm. 2020 metais, lyginant su 2005 Al/Fe santykiniai dydžiai abiejose stotyse sumažėjo tiek paviršiniuose, tiek giluminiuose dirvožemių horizontuose (7.11 pav.). Judraus aliuminio sumažėjimas judrios geležies atžvilgiu patvirtina anksčiau darytą prielaidą, kad dirvožemio rūgštumas mažėja.

Al/Fe santykis turi skirtingas kaitos tendencijas Aukštaitijos IMS dirvožemyje, kur buvo didesnis negu 2020, bet mažesnis, negu 2005, o Žemaitijos KMS tiek kvadrato, tiek profilio dirvožemyje 2005-2020-2025 metais turi tendenciją mažėti, išskyrus 40...80 cm sluoksnį.

Apibendrinant sorbuojančiojo dirvožemio komplekso savybių kaitą, reikia pažymėti, kad dirvožemio rūgštėjimas ir mainų komplekso savybių bei Al/Fe santykio augimas, labiausiai pasireiškiantis Aukštaitijos IMS dirvožemyje, rodo dirvožemio evoliuciją, kaičių paviršinių savybių turinčių koloidų paviršių augimą. Natūraliai rūgštesnis ir giliau dirvodaros procesų paveiktas Žemaitijos IMS dirvožemio savybės stebėsenos laikotarpiu mažiau keičiasi.

Žemaitijos KMS organinės anglies koncentracijos dirvožemyje, kaip ir Aukštaitijos KMS baseine turi tendenciją didėti ir ypač viršutiniuose dirvožemio sluoksniuose. Neturint patikimu C išplovimo duomenų, galima tik teigti, kad organinės C koncentracijų kaita atskiruose geosistemos komponentų vandenyse neturėjo reikšmingos įtakos C koncentracijų augimui, Pagrindinė C sankaupų didėjimo priežastimi reiktų laikyti intensyvų eglės medžių žuvimą dėl žievėgraužio tipografo žalos ir nuvirtusių medžių dūlėjimo intensyvumo šylant klimatui ir gausėjant krituliams.

Fosforo koncentracijų augimas gruntiniuose vandenyse ir mažėjantis išplovimas dėl paskutiniuoju laikotarpiu mažėjančių kritulių kiekio buvo pagrindiniai veiksniai lemiantis didėjančias P koncentracijas dirvožemyje ir ypač gilesniuose jo horizontuose.

Dirvožemis yra pastoviausias miško ekosistemos komponentas, kurio cheminės sudėties pokyčiai pasireiškia tik po ilgalaikių atmosferos, hidrologinio režimo ir medžiagų srautų pokyčių.

Iki 2020 m. tyrimų rezultatai rodė, kad klimato ir globalių pernašų pokyčiai lemė, kad dirvožemių išplovimas ir rūgštėjimas slopsta. Paskutinieji rezultatai rodo priešingą procesą.

Apibendrinant galima teigti, kad ***ilgalaikiai dirvožemio cheminės sudėties tyrimai atskleidė naują miško ekosistemų raidos etapą. Iki 2020 m. dirvožemio cheminiai rodikliai rodė laipsnišką ekosistemų atsikūrimą po intensyvios atmosferinės taršos laikotarpio – mažėjo rūgštėjimo požymiai, stabilizavosi sorbuojančiojo komplekso savybės, mažėjo judriojo aliuminio santykinė reikšmė, o organinės anglies ir biogeninių elementų kaupimasis didėjo. Tačiau 2025 m. pakartotiniai tyrimai parodė, kad dalis šių tendencijų pradeda keistis. Vėl registruojamas rūgštėjimas, didėja katijonų mainų talpa ir bazinis prisotinimas, keičiasi organinės anglies, azoto ir fosforo pasiskirstymas dirvožemio profilyje, o tai rodo aktyvėjančius biogeocheminius procesus. Šie pokyčiai gerai dera su ankstesniuose skyriuose nustatytais dirvožemio, gruntinio ir paviršinio vandens cheminės sudėties bei medžiagų srautų pokyčiais. Didėjantis organinės anglies, azoto, fosforo ir kai kurių bazinių katijonų eksportas iš miško baseinų leidžia manyti, kad klimato kaitos nulemti hidrologiniai procesai pradeda daryti didesnę įtaką dirvožemio cheminių savybių raidai negu mažėjanti atmosferinė tarša. Todėl dirvožemio cheminė sudėtis tampa integraliu rodikliu, atspindinčiu ne tik ilgalaikį atmosferinių iškritų poveikį, bet ir vis stiprėjančią klimato kaitos įtaką medžiagų apytakai bei miško ekosistemų stabilumui.***

IŠVADOS

1. Ilgalaikė dirvožemio cheminės sudėties stebėsena parodė, kad iki 2020 m. miško ekosistemų dirvožemiuose vyravo atsikūrimo po atmosferinės taršos laikotarpis. Dirvožemio rūgštėjimas silpnėjo, mažėjo sorbuojančiojo komplekso aktyvumas, judriojo aliuminio ir geležies santykis, o dauguma dirvožemio cheminių rodiklių rodė stabilizuojančias tendencijas.
2. 2025 m. pakartotiniai tyrimai atskleidė naują dirvožemio raidos etapą. Daugumoje tirtų dirvožemio profilių vėl registruojamas rūgštėjimo stiprėjimas, ypač gilesniuose horizontuose. Katijonų mainų talpa, nors išlieka mažesnė negu stebėsenos pradžioje, palyginti su 2020 m. vėl didėja, o bazinis prisotinimas išlieka pakankamai stabilus.
3. Judriojo aliuminio ir geležies santykis visuose monitoringo baseinuose toliau mažėjo, rodydamas mažesnį judriojo aliuminio aktyvumą sorbciniame komplekse ir patvirtindamas, kad ilgalaikio atmosferinės taršos poveikio pėdsakai dirvožemyje toliau silpnėja.
4. Organinės anglies kaupimasis dirvožemyje tapo vienu ryškiausių pastarojo laikotarpio pokyčių. Aukštaitijos ir Dzūkijos KMS didžiausias organinės C padidėjimas nustatytas gilesniuose dirvožemio sluoksniuose, o Žemaitijos KMS organinės C kiekis išliko artimas 2020 m. lygiui. Šie pokyčiai tikėtina susiję su didesniu negyvos organinės medžiagos kaupimusi dėl eglynų pažeidimų ir klimato kaitos sąlygomis pakitusio organinių medžiagų skaidymosi intensyvumo.

5. Biogeninių elementų dinamika atskleidė skirtingą dirvožemių reakciją į besikeičiančias aplinkos sąlygas. Visuminio azoto kiekis išliko stabilus Aukštaitijos ir Dzūkijos KMS dirvožemiuose, tačiau mažėjo Žemaitijos KMS. Visuminio fosforo koncentracijos reikšmingiau nekito Aukštaitijos ir Dzūkijos KMS, tačiau Žemaitijos KMS pradėjo mažėti, rodydamos galimus šio elemento migracijos pokyčius.
6. Sieros junginių dinamika išsiskyrė iš kitų tirtų elementų. Nepaisant to, kad atmosferinė sieros apkrova, jos koncentracijos krituliuose, dirvožemio ir gruntiniame vandenyje bei sulfatų srautai išlieka vieni mažiausių per visą stebėsenos laikotarpį, 2025 m. dirvožemyje vėl nustatytas bendrosios sieros kiekio didėjimas. Ryškiausiai šis procesas pasireiškė Žemaitijos KMS, o Aukštaitijos KMS – paviršiniame horizonte. Tai rodo, kad sieros ciklas miško dirvožemiuose dar nėra visiškai stabilizavęsis.
7. Dirvožemio cheminės sudėties pokyčiai gerai dera su ankstesniuose skyriuose nustatytais dirvožemio, gruntinio ir paviršinio vandens bei medžiagų srautų pokyčiais. Tai leidžia daryti išvadą, kad po 2020 m. klimato kaitos nulemti hidrologiniai procesai pradeda daryti vis didesnę įtaką dirvožemio cheminėms savybėms, palaipsniui pakeisdami ilgą laiką dominavusį atmosferinės taršos mažėjimo efektą.

Iki 2020 m. dirvožemis rodė atsikūrimą po rūgščiosios atmosferinės taršos, tačiau 2025 m. pirmą kartą nustatyti požymiai rodo, kad klimato kaitos nulemti hidrologiniai procesai pradeda keisti ir paties dirvožemio cheminę sudėtį.

GALIMOS GRĖSMĖS

2025 m. pirmą kartą nustatytas dirvožemio rūgštėjimo atsinaujinimas visuose tirtuose monitoringo baseinuose gali rodyti naujo dirvožemio cheminių savybių kaitos etapo pradžią. Jei ši tendencija išliks, ilgainiui gali mažėti dirvožemio buferinė geba ir blogėti augalų mitybos sąlygos.

Didėjanti katijonų mainų talpa kartu su mažėjančiu pH rodo sorbuojančiojo komplekso persitvarkymą. Tokie pokyčiai gali keisti maisto medžiagų prieinamumą augalams ir didinti kai kurių cheminių elementų judrumą dirvožemyje.

Nevienoda organinės anglies, azoto ir fosforo dinamika skirtinguose dirvožemio horizontuose rodo, kad klimato kaitos sąlygomis keičiasi biogeninių elementų kaupimosi ir migracijos procesai. Ilgainiui tai gali pakeisti dirvožemio derlingumą bei mikrobiologinių procesų intensyvumą.

Pakartotinai didėjantis bendrosios sieros kiekis dirvožemyje, ypač Žemaitijos KMS, gali būti ankstyvas sieros biogeocheminio ciklo pokyčių požymis. Atsižvelgiant į pastaraisiais metais atmosferinėse iškritose stebimus sieros srautų svyravimus, galimai susijusius ir su karo Ukrainoje padariniais, šis procesas gali tapti papildoma grėsme Vakarų Lietuvos miško ekosistemoms.

Nors dauguma dirvožemio cheminių rodiklių tebėra artimi ilgalaikio stabilumo būsenai, 2025 m. nustatyti pokyčiai rodo didėjantį dirvožemio jautrumą klimato kaitos sukeliamiems hidrologinio režimo svyravimams. Todėl ilgalaikė dirvožemio cheminės sudėties stebėsena išlieka būtina siekiant anksti nustatyti galimus neigiamus miško ekosistemų pokyčius.

PROGNOZĖS

Jeigu 2025 m. nustatytos tendencijos išliks, artimiausiais metais dirvožemio rūgštėjimas gali palaipsniui stiprėti visuose monitoringo baseinuose, pirmiausia gilesniuose dirvožemio horizontuose. Tai rodytų, kad klimato kaitos sąlygomis dirvožemio cheminė pusiausvyra tampa jautresnė hidrologinio režimo pokyčiams.

Dirvožemio sorbuojančiojo komplekso savybės ir toliau keisis. Katijonų mainų talpos bei bazinio prisotinimo pokyčiai gali lemti naują maisto medžiagų kaupimosi ir migracijos pusiausvyrą, priklausomai nuo kritulių režimo ir organinių medžiagų skaidymosi intensyvumo.

Organinės anglies kaupimasis dirvožemyje gali išlikti viena svarbiausių ilgalaikių tendencijų, ypač medynuose, kuriuose dėl klimato kaitos didėja medžių žūtis ir negyvos organinės medžiagos kiekis. Tačiau dažnėjant intensyviems krituliams dalis šios anglies gali būti vis aktyviau mobilizuojama ir išplaunama į dirvožemio bei paviršinius vandenis.

Azoto ir fosforo kaupimosi bei persiskirstymo procesai dirvožemyje ateityje gali tapti dar labiau priklausomi nuo klimato kaitos nulemtų hidrologinių sąlygų. Todėl skirtinguose dirvožemio tipuose gali ryškėti vis didesni biogeninių elementų pasiskirstymo skirtumai dirvožemio profilyje.

Jeigu bendrosios sieros kiekio didėjimas dirvožemyje pasitvirtins ir ateinančiais metais, tai gali reikšti naują sieros biogeocheminio ciklo etapą. Šiam procesui įtakos gali turėti ne tik klimato kaita ir hidrologinio režimo pokyčiai, bet ir periodiškai didėjanti atmosferinė sieros apkrova, kurios poveikis dirvožemyje dėl uždelsto atsako gali pasireikšti tik po kelerių metų.

Ateityje dirvožemio cheminė sudėtis išliks vienu patikimiausių ilgalaikių miško ekosistemų būklės indikatorių. Kadangi dirvožemis į aplinkos pokyčius reaguoja lėčiau negu atmosfera ar vandens sistemos, jo cheminių savybių stebėsena leis įvertinti, ar pastaraisiais metais nustatyti pokyčiai yra trumpalaikės klimatinės anomalijos, ar naujos ilgalaikės hemiborealinių miško ekosistemų raidos pradžia.

7.6. Dirvožemio ir dirvožemio, gruntinio, bei paviršinio vandens cheminės sudėties kaitos rezultatų apibendrinimas

Aukštaitijos KMS geosistemos dirvožemiui būdingos mažesnės organinės medžiagos atsargos todėl vandens apykaitos pokyčiai ir įtaka ekosistemai ryškiau matyti, negu Žemaitijos KMS geosistemoje, kur organinės medžiagos, pasižyminčios buferinėmis savybėmis ir didele sorbuojančiąja galia, neutralizuoja vykstančius pokyčius.

Abiejose KMS dėl vandens apytakos sulėtėjimo, ilgesnio kontakto tarp dirvožemio skystosios ir kietosios fazių, didėja dirvožemio, gruntinio ir upelio vandens rūgštumas.

Vienas svarbiausių pokyčių Aukštaitijos KMS baseine yra dirvožemio vandens atsargų reikšmingas didėjimas nuo 2018 m., kuris turėjo turėti reikšmingos įtakos visiems bio-, geo sisteminiams procesams vykstantiems ekosistemoje.

Aukštaitijos KMS dirvožemio vandens pH 2004-2013 metais buvo neutralus, bet augant dirvožemio drėgnumui 2015-2025 metais rūgštėjo. Žemaitijos KMS dirvožemio vanduo buvo rūgštus nuo stebėsenos pradžios, bet tapo dar rūgštesnis 2025 metais, pasiekdamas žemiausias pH reikšmes nuo stebėsenos pradžios 20 cm gylyje. Tai galimai ***nauja grėsmė Lietuvos vakarinės dalies miško ekosistemoms, KURIĄ GALĖJO SĄLYGOTI KARO VEIKSMAI UKAINOJE.***

Besikeičiančios aplinkos sąlygos ir tolimųjų oro teršalų kaita per visą tiriamąjį laikotarpį turi didinantį dirvožemio vandens rūgštėjimą poveikį. Tai reikšmingas veiksnys galintis ateityje turėti esminės įtakos miško ekosistemų bendram tvarumui.

Toks vandens rūgštingumo didėjimas ir SiO_2 koncentracijos mažėjimas Aukštaitijos KMS gali sustiprinti globalios aplinkos kaitos naujų grėsmių poveikį šio regiono miško ekosistemoms, kuris gali pasireikšti per rūšių įvairovės nykimą, miškų atsparumo nepalankiems veiksniams mažėjimą bei jų bendros būklės ir produktyvumo mažėjimą. ***Tai nauja registruojama grėsmė Aukštaitijos KMS miško ekosistemoms***

Išskirtinai palankus ekosistemoms reiškinys yra sulfatų kiekio reikšmingas sumažėjimas dirvožemio vandenyje. Aukštaitijos KMS beveik 4-5 kartus, Žemaitijos KMS net iki 10 kartų mažiau negu tyrimų pradžioje. ***Paskutiniuoju laikotarpiu Aukštaitijos KMS 2021 ir 2024 metais registruotas pakankamai ženklus sulfatų padidėjimas vandenyje, o Žemaitijos KMS jau nuo 2020 m. sulfatų kaitą galima būtų vertinti kaip didėjančią. Ar tai naujai besiformuojančios grėsmės pradžia*** parodys ateities tyrimai.

Dirvožemio vandens didėjanti rūgštingumą galėjo sąlygoti Ca, K ir Mg koncentracijų mažėjimo tendencija, kuri reikšmingiausiai pasireiškė Ca – Aukštaitijos KMS, o Mg ir K abiejų stočių

dirvožemio vandenyje. ***Tai nepageidautinas reiškinys, kuris gali sąlygoti reikšmingesnius neigiamus pokyčius miško ekosistemoje per dirvožemio ir jo vandens rūgštingumo tolesnį didėjimą.***

Kalio koncentracijų mažėjimas dirvožemio vandenyje gerai siejasi ir su jo koncentracijų mažėjimu lapijoje. Pagrindinių priežasčių, lemiančių K jonų mažėjimo tendencijas reiktų ieškoti kritulių cheminės analizės rezultatuose, bei bendrame šio elemento srauto kaitoje.

Tokie beprasidedantys nauji neigiami pokyčiai miško ekosistemose galėjo turėti reikšmingos įtakos visuminio N ir P pokyčiams, kurie jau kai kuriuose dirvožemio gyliuose pradėjo mažėti, ką būtų galima sieti su gyvųjų organizmų veiklos intensyvėjimo mažėjimu, pedobijontų rūšinės sudėties ir gausumo mažėjimu. Tik Žemaitijos KMS visuminio V koncentracija paviršinio sluoksnio vandenyje 201-2025 m. laikotarpiu reikšmingai didėja.

Azoto, fosforo bei tirpios organinės anglies koncentracijų sumažėjimą dirvožemio vandenyse galėjo sąlygojo po sausrų gausūs kritulių kiekiai, dėl ko dirvožemiai tapo drėgnesni.

Na koncentracija dirvožemio vandenyje toliau didėja abiejose stotyse. Mn koncentracijos per visą tiriamąjį laikotarpį ženkliai mažėja nepriklausomai nuo kritulių kiekio.

Paskutiniuoju laikotarpiu Fe ir Al koncentracijos dirvožemio vandenyje reikšmingai nekinta, išlikdamos pakankamai stabiliame lygmenyje.

Nustatytas dėsningumas: iki 2020 m. medžiagų koncentracijos dirvožemio vandenyje turi nevienodas tendencijas. Tirpiausius junginius sudarančių elementų koncentracijos Cl, K, Na turi tendenciją mažėti, o mažai tirpius arba gebančius formuoti kompleksinius junginius su organinių medžiagų skilimo produktais (Si, Al fosfatų P)– augti. 2025 m. Tyrimų rezultatai parodė priešingas tendencijas. Toks ryškus pasikeitimas galėjo sąlygoti neigiamus pokyčious miško ekosistemose, ypač Aukštaitijos KMS baseine.

2020 – 2025 m. laikotarpiu nustayta, kad sekliausiame vandens rūgštingumas didėja, kaip ir dirvožemio vandenyje. gilesniuose gręžiniuose stebimas atvirkščias procesas, pH reikšmė palaipsniui auga ir tik giliausiame gręžinyje pH reikšmė išlieka stabili. Žemaitijos KMS, kaip ir dirvožemio vandens, gruntinio vandens rūgštingumas yra padidėjęs lyginant su 2004-2012 m.

Dėl nevienodų gruntinio vandens mitybos ypatybių ir debito kaitos specifinis laidumas stebėjimo laikotarpiu Aukštaitijos ir Žemaitijos KMS turi skirtingas tendencijas; Aukštaitijos stotyje mažėjo (iki 2017-2019), o Žemaitijos didėjo.

Reikšmingas pokytis galintis turėti reikšmingos įtakos miško ekosistemų tvarumui – Cl koncentracijų kaita gruntiniuose vandenyse: nuo tyrimų pradžios iki 2013-2014 metų Aukštaitijos KMS koncentracijos svyravo apie 6, po šių metų iki 2025 sumažėjo ir svyruoja apie 2 mg/l;

Žemaitijos KMS baseine iki nustatyto laikotarpio svyravo apie 4, paskutiniuoju laikotarpiu padidėjo iki 6-8 mg/l, nors paskutiniaisiais metais turi tendenciją mažėti.

Visuminio fosforo ir fosfatų koncentracija gruntiniuose vandenyse 2003-2013 metais buvo pakilusi, o vėliau sumažėjo. 2024-2025 metais Žemaitijos KMS vėl fosfatų koncentracija ėmė didėti – tai dėsningai sutapo su mažesniu gruntinio vandens rūgštingumu, būdingu tiems laikotarpiams.

Al koncentracijos Žemaitijos KMS gruntiniuose vandenyse 2014-2020 m. pasiekė mažiausias reikšmes per visą laikotarpį**.** Priešingai, pastaraisiais metais Aukštaitijos KMS, ypač trečiajame gręžinyje nustatytos didžiausios aliuminio koncentracijos, tikėtina dėl pastaraisiais metais fiksuojamo augančio gruntinio vandens debito trečiajame gręžinyje ir su tuo susijusio padidėjusio mineralų dūlėjimo. 2024-2025 m. Al koncentracijos abiejose stotyje pasiekė savo minimaliausias reikšmes.

Gruntiniame vandenyje ištirpusios organinės anglies koncentracija Aukštaitijos KMS sekliųjų gręžinių vandenyje 2012-2020 metais buvo stabili arba mažėjo. Didžiausia per stebėsenos laikotarpį visuminės anglies koncentracija gruntiniai vandenys pasižymėjo Aukštaitijos KMS 2021-2024 metais, o Žemaitijos KMS 2022 metais, kai eglynai buvo masiškai pažeisti kenkėjų.

Palyginus sulfatų koncentracijas tarp stočių, nustatyta, kad didžiausios išliko Žemaitijos KMS – koncentracijos sumažėjo nuo 20 iki 4 mgS/l, kiek mažesnės Dzūkijos KMS – koncentracijos sumažėjo nuo 15 iki 3 mgS/l ir mažiausios Aukštaitijos KMS – koncentracijos sumažėjo nuo 15 iki 1-2 mgS/l. Tai reikšmingiausias pagrindinės rūgštinančios komponentės sumažėjimas.

Paskutiniuoju laikotarpiu Ca ir Mg koncentracijos Aukštaitijos KMS išlieka stabilios.

Nitratų ir amonio jonų kaitos ***rezultatas, bendrojo azoto kiekio mažėjimas KMS baseinų gruntiniuose vandenyse. Padidėjimas Aukštaitijos KMS gruntiniuose vandenyse registruojamas 2022 m., o Žemaitijos KMS gruntiniame vandenyje 2023 m.***

Medžiagų koncentracijų kaita gruntiniame vandenyje stebėsenos laikotarpiu pagal rūgštumo kaitos tendenciją panaši į dirvožemio vandens: vandens rūgštumas šiek tiek didėja, Žemaitijos KMS gruntiniame vandenyje rūgštumo pokytis yra ryškesnis. Tirpiųjų elementų koncentracijų kaitos tendencijos Aukštaitijos ir Žemaitijos stotyse skiriasi: Žemaitijos gruntiniame vandenyje yra augimo tendencijos (Cl, SEl), o Aukštaitijos KMS gruntiniame vandenyje, ypač gilesniųjų gręžinių, tirpiųjų elementų koncentracijos mažėja.

Dzūkijos KMS gruntiniuose vandenyse pH reikšmė, visuminio P, NO3, Fe koncentracijos liko nepakitusios, kai tuo tarpu SEL, Cl, K, Na, SO4, Ca, Mg, NH4, Si, Mn sumažėjo.

Išskirtinis laikotarpis: 2013-2014 m., kai tirtų komponenčių koncentracijų kaita gruntiniuose vandenyse keitė pobūdį ar kai šiuo laikotarpiu buvo registruojamas koncentracijų ar padidėjimas, ar priešingai sumažėjimas.

Aukštaitijos KMS upelio nuotėkio vidutinis intensyvumas (debitas) buvo mažiausias 2009, 2015-2016 ir 2019-2020 metais, o didžiausias: ***2005-2006, 2013 ir 2024-2025. Tai išskirtiniai metai, į kuriuos privalu atkreipti dėmesį analizuojant pokyčius ekosistemoje ir aiškinat ateities grėsmes stabilumui.***. Žemaitijos KMS upelio debitas kinta beveik cikliškai, bet palyginus su Aukštaitijos KMS upelio nuotėkiu, metais „vėluoja“

Upelio vandens rūgštingumas mažėjo Aukštaitijos KMS baseine siekdamas beveik po 0,006 pH per metus. Žemaitijos KMS upelio rūgštingumas paskutiniuoju laikotarpiu priešingai pradėjo didėti po 0,007 pH per m. Ypač rūgštingumas šioje stotyje padidėjo 2020-2025 m. laikotarpiu.

Šarmingumo ir specifinio elektrinio laidumo reikšmės per stebėjimų laikotarpį turi tendenciją augti Aukštaitijos KMS, o Žemaitijos KMS mažėti. Šie rezultatai reikšmingai siejasi su vandens rūgštingumą indikuojančio rodiklio kaitos ypatumais. Mažai kito ir Dzūkijos KMS vidutinis upelio vandens šarmingumas: 1998 metais buvo 143, o 2025 metais buvo 144 mg/l.

Specifinio elektrinio laidumo reikšmių kaitoje stebimos skirtingos tendencijos: Aukštaitijos KMS upelio vandenyje šis parametras turi tendenciją didėti, o Žemaitijos KMS baseino upelio vandenyje – priešingai mažėti.

Reikšmingiausia kaita abiejų KM stočių upelio vandenyse nustatyta sulfatų ir ypač Aukštaitijos KMS baseine. Čia sulfatų koncentracija mažėja po -0,6 mg/l per metus. Žemaitijos KMS upelio vandenyje sulfatų mažėjimo intensyvumas beveik 2 kartus silpnesnis ir siekia po -0,25 mg/l per metus.

Upelio vandenyje ištirpusių sulfatų kiekis reikšmingai mažėja ir Dzūkijos KMS, kur vidutinė sulfatų koncentracija upelio vandenyje 1998 metais buvo 15,5 mg/l, o 2025 metais daug mažesnė – 9,9 mg/l. Tai ekosistemų išsivalymo nuo S junginių rezultatas.

Nitratų (NO_3^- N) ir amonio (NH_4^+ N) kito beveik sinchroniškai. Nustatytas daugiametis trendas rodo, kad šių junginių koncentracijos upelio vandenyje turi tendenciją mažėti, išskyrus tik nitratus Aukštaitijos KMS upelio vandenyje.

Dzūkijos KMS amonio azoto upelio vandenyje 2025 metais yra aukšta: metų vidurkis 1998 metais buvo 0,025 mg/l, o 2025 metais daug didesnis – 0,056 mg/l; nitratų azoto vidutinė reikšmė nekinta 1998 metais buvo 0,112 mg/l, o 2025 metais – 0,113 mg/l.

Fosfatų ir visuminio fosforo koncentracijos Aukštaitijos KMS upelio vandenyje keičiasi skirtingai: fosfatų koncentracijos, nors ir nereikšmingai turi tendenciją didėti, o visuminio P koncentracijos, nors taip pat nereikšmingai, turi tendenciją mažėti. Paskutiniaisiais metais šių junginių koncentracijos buvo padidėjusios.

Dzūkijos KMS upelio vandenyje fosfatai 1998 metais nebuvo matuojami, o 2025 metais buvo 50,3 µg/l; visuminio fosforo kiekis 1998 metais buvo 92,5 µg/l, o 2025 metais – 139,2 µg/l.

Visuminio fosforo koncentracijos tirtų upelių vandenyje mažėja, tik 2024-2025 metais abiejose stotyse išaugo visuminio P iki didžiausių reikšmių nuo 1998 metų.

Išskirtinis SiO2 koncentracijos bruožas 2022-2023 m. ženkliai išaugusios šio junginio koncentracijos abiejų stočių vandenyse.

Per visą tiriamąjį laikotarpio Cl elemento koncentracijų daugiametė tendencija yra neigiama. Abiejų KM stočių upelio vandenyse chloro mažėja beveik vienodu intensyvumu, t.y. po 0,04-0,06 mg/l per metus. Tačiau paskutiniuoju laikotarpiu stebimas Cl koncentracijų upelių vandenyse augimas, ypač 2021 ir 2022 m.

KM stotyse kalcio, magnio bei sulfatų koncentracija upelių vandenyje palaipsniui mažėjo nuo tyrimų pradžios iki 2015 metų sausros, 2018-2025 m. laikotarpiu Ca koncentracijos Aukštaitijos upelio vandenyje vėl pradėjo didėti, kai tuo tarpu Žemaitijos KMS upelyje toliau palaipsniui mažėjo.

Didžiausiu koncentracijų kaitos stabilumu pasižymi Na ir K koncentracijos. Per tiriamąjį laikotarpį šių elementų koncentracijos iš esmės nesikeitė nei Aukštaitijos, nei Žemaitijos KMS upelių vandenyse.

Dzūkijos KMS natrio vidutinė koncentracija 1998 metais buvo 3,54 mg/l, o 2025 metais – 3,61 mg/l; magnio upelio vandenyje 1998 metais buvo 10,0 mg/l, o 2025 metais buvo 5,7 mg/l; 1998 metais kalio buvo 0,43 mg/l, o 2025 metais – 0,84 mg/l.

Aukštaitijos KMS upelio vandenyje aliuminio koncentracija neviršija mažiausios nustatymo ribos ir mažėja po -1,65 ug/l per m., tai Žemaitijos upelio vandenyje didėja po 2,5 ug/l per m. ir 2019-2025 m. laikotarpiu viršija net 100 ug/l ribą.

Dzūkijos KMS aliuminio koncentracija upelio vandenyje 2025 metais buvo 29,7 µg/l; mangano kiekis 1998 metais buvo 26,1 µg/l, o 2025 metais – 14,6 µg/l; geležies kiekis 1998 metais buvo 80,0 µg/l, o 2025 metais – 82,7 µg/l. Tai kiekiai panašūs į nustatytus Žemaitijos KMS upelyje.

Visuminio organinio anglingumo kreivės rodo, kad šio elemento kaitoje jokios ryškesnės kaitos tendencijos nenustatytos iki 2020 m. Paskutiniaisiais metais gausūs krituliai padidino organinės anglies išplovimą iš miško ekosistemų ir ypač Aukštaitijos KMS, kur šio elemento koncentracija išaugo iki 3 kartų.

Dzūkijos KMS iki 2003 metų upelio vandens visuminis organinis anglingumas (DOC) nebuvo matuojamas, o 2025 metais vidutiniškai buvo 7,54 mg/l, didžiausias, 31,6 mg/l, 2025 metų rugsėjo mėnesį. Tai yra Dzūkijos KMS upelio DOC buvo panašus į Aukštaitijos upelio vidutinį DOC 2007-2016, 2019 ir 2020 metais.

Geležies (Fe) koncentracijos Aukštaitijos KMS upelio vandenyje neturi reikšmingos kaitos tendencijos per visą tiriamąjį laikotarpį. Didžiausias geležies koncentracijos padidėjimas registruojamas tik paskutiniaisiais 2024-2025 m. Žemaitijos KMS upelio vandenyje geležies koncentracijos yra iki 10 kartų didesnės negu Aukštaitijos KMS upelio vandenyje. Reikšmingas koncentracijų padidėjimas registruotas tik 2007 m. 2018-2025 m. laikotarpiu registruojamas ženklus Fe koncentracijų augimas Žemaitijos KMS upelio vandenyje.

Reikšmingiausią įtaką upelio vandens cheminės sudėties kaitai pastaraisiais metais turi sausringi metai bei klimato šiltėjimas. Sausringais metais padidėjusį organinių medžiagų skaidymąsi rodo nuoseklus Mn, amonio bei nitratų azoto koncentracijų upelio vandenyje išaugimas, nors ir ne visada lydimas visuminės organinės anglies bei geležies koncentracijos padidėjimo. Silicio koncentracijų didėjimas liudija apie mineralinės ekosistemos dalies dūlėjimo intensyvėjimą. Medžiagų išplovimo upelio vandeniu skyriuje šie dėsningumai turėtų būti ryškesni.

Organinės anglies, azoto ir fosforo junginių koncentracijų staigų išaugimą dirvožemio, gruntiniame ir upelio vandenyje lemia po sausrų atėjusių lietingų laikotarpių vandens srautų tirpdomoji veikla. Tų pačių metų rudenį arba kitų metų pavasarį išauga organinės anglies koncentracija, o vėliau, vykstant tolimesniam atsparių organinių junginių skilimui padidėja visuminio azoto ir nitratų bei fosforo koncentracija ir išnešimas upelio vandeniu. Sausros poveikyje organinės anglies, azoto ir fosforo koncentracija dirvožemio ir gruntiniame vandenyje padidėja du ir daugiau kartų. 2020 metais, palyginus su 2019 daugiau kaip du kartus padidėjo visuminio azoto ir fosforo koncentracija dirvožemio vandenyje.

Nors upelio nuotėkio modulis per stebėsenos laikotarpį mažėjo, bet ir organinių, ir mineralinių azoto junginių išplovimas turi tendenciją augti. Didėjantį azoto junginių išplovimą iš Aukštaitijos KMS ekosistemos patvirtina ir visuminio azoto kiekio sumažėjimas visame dirvožemio profilyje - tai gali liudyti apie nepalankią ekosistemai organinės dirvožemio dalies transformaciją, mažinančią sorbuojančią dirvožemio galią.

2025 m. rodo naujų procesų miško dirvožemyje pradžią.

Dirvožemio rūgštingumas pradėjo didėti visose stotyse ir dirvožemio profilio visuose gyliuose. Katijonų mainų talpa taip pat yra sumažėjusi lyginant su tyrimų pradžia, nors paskutiniuoju laikotarpi lyginant su 2020 m. turi tendencija didėti. Prisotinimas bazėmis laipsnis per visą tiriamąjį laikotarpį išliko pakankamai stabiliame lygmenyje, o judraus aliuminio ir geležies santykis reikšmingai sumažėjo. Visuminės organinės anglies reikšmingai padidėjo Aukštaitijos ir Dzūkijos

dirvožemio gilesniuose sluoksniuose, o Žemaitijos KMS dirvožemyje išliko panašiame lygmenyje kaip ir 2020 m. Visuminio azoto mažėjo Aukštaitijos KMS dirvožemyje išliko panašiame lygmenyje Dzūkijos KMSir kiek tai mažėjo Žemaitijos KMS dirvožemyje. Visuminio P koncentracijos mažai pakito Aukštaitijos ir Dzūkijos KMS dirvožemiuose bet pradėjo mažėti Žemaitijos KMS dirvožemyje.. Priešingai sieros koncentracijų kaitoje nustatyta, kad šio elemento vėl pradėjo didėti Aukštaitijoje, nors S srautas su krituliais šioje stotyje minimalus ir ypač reikšmingai Žemaitijos KMS, kas būtų galima jau vardinti kaip galima ateities grėsmė Vakarų Lietuvos miškų ekosistemoms.

IŠVADOS

1. Klimato kaita tampa pagrindiniu hemiborealinių miško ekosistemų biogeocheminių procesų reguliatoriumi. Per daugiau kaip tris dešimtmečius vykdyta kompleksinė stebėsena parodė, kad atmosferinės taršos mažėjimo poveikį palaipsniui keičia klimato kaitos nulemti hidrologiniai procesai. Todėl ekosistemų raidą vis labiau lemia ne teršalų apkrovos, o vandens apytakos intensyvumas, kritulių pasiskirstymas ir ekstremalių meteorologinių reiškinių dažnėjimas.

2. Skirtingi ekosistemos komponentai į aplinkos pokyčius reaguoja nevienodu greičiu. Atmosfera ir kritulių cheminė sudėtis į taršos mažėjimą reagavo pirmiausia, po to sekė dirvožemio, gruntinio ir paviršinio vandens cheminės sudėties pokyčiai, o dirvožemis išliko konservatyviausiu ekosistemos komponentu. Tik naujausi tyrimai rodo, kad ilgalaikiai hidrologiniai pokyčiai pradeda keisti ir pačias dirvožemio chemines savybes.

3. Iki maždaug 2020 m. daugumoje geosistemos komponentų dominavo ekosistemų atsikūrimo procesai po rūgščiosios atmosferinės taršos laikotarpio. Reikšmingai sumažėjo sieros junginių koncentracijos atmosferoje, iškritose, dirvožemio, gruntiniuose ir paviršiniuose vandenyse, silpnėjo rūgštėjimo procesai ir mažėjo sulfatų eksportas iš miško baseinų.

4. Po 2020–2022 m. stebėjimuose užfiksuotas kokybiškai naujas hidrogeocheminės sistemos etapas. Vienu metu padidėjo organinės anglies, azoto, fosforo, silicio, kalcio, chloridų ir sulfatų srautai, pasikeitė vandens cheminė sudėtis ir atsirado pirmieji dirvožemio cheminių savybių persitvarkymo požymiai. Tai rodo ne pavienių elementų svyravimus, o visos medžiagų apytakos sistemos pokyčius.

5. Pagrindiniu medžiagų migracijos reguliatoriumi tampa hidrologinis režimas. Ilgalaikės sausros, po kurių seka gausūs krituliai, spartina organinių ir mineralinių medžiagų išplovimą iš dirvožemio, didina jų patekimą į gruntinius bei paviršinius vandenis ir intensyvina eksportą iš miško baseinų.

6. Organinė anglis tampa centrine grandimi, jungiančia dirvožemio, vandens ir medžiagų migracijos procesus. Didėjantis ištirpusios organinės anglies judrumas lemia fosforo, geležies, aliuminio ir kitų elementų transportą organinių–mineralinių kompleksų pavidalu, todėl organinės anglies dinamika tampa vienu jautriausių klimato kaitos poveikio indikatorių.

7. Ilgalaikė kompleksinė stebėsena parodė, kad vien pavienių cheminių rodiklių analizės nepakanka miško ekosistemų būklei įvertinti. Tik integruojant atmosferinių iškritų, dirvožemio, dirvožemio vandens, gruntinio vandens, paviršinio vandens, medžiagų srautų ir dirvožemio cheminės sudėties duomenis galima patikimai nustatyti ilgalaikius ekosistemų pokyčius ir jų priežastis.

Ilgalaikė kompleksinė stebėsena atskleidė, kad hemiborealinių miško ekosistemų biogeocheminė raida pereina į naują etapą. Jeigu XX a. pabaigoje ir XXI a. pradžioje pagrindinis ekosistemų būklę lemiantis veiksnys buvo atmosferinės taršos mažėjimas, tai pastaraisiais metais vis didesnę įtaką įgauna klimato kaitos nulemti hidrologiniai procesai. Jie keičia medžiagų migraciją visoje geosistemoje – nuo atmosferinių iškritų iki dirvožemio cheminių savybių – ir tampa pagrindiniu ilgalaikės miško ekosistemų raidos reguliatoriumi. Ši nuosekli atmosferos, vandens ir dirvožemio komponentų sąveika rodo, kad hemiborealinių miškų stabilumą ateityje lems ne pavieniai aplinkos veiksniai, o jų kompleksinis poveikis visai biogeocheminei sistemai.

T.y.: Klimato kaita keičia ne atskirus miško ekosistemos komponentus, o jų tarpusavio ryšius ir medžiagų apytakos struktūrą.

Svarbiausios galimos grėsmės hemiborealinių miško ekosistemų stabilumui

Klimato kaitos nulemti hidrologinio režimo pokyčiai tampa pagrindine ilgalaike grėsme miško ekosistemų biogeocheminiam stabilumui. Dažnėjančios sausros, po kurių seka intensyvūs krituliai, keičia vandens apytakos intensyvumą, spartina cheminių elementų migraciją ir didina jų eksportą iš miško baseinų. Tai gali sutrikdyti ilgalaikę maisto medžiagų pusiausvyrą ekosistemose.

Po 2020–2022 m. nustatytas sinchroniškas organinės anglies, azoto, fosforo, bazinių katijonų ir kitų elementų išnešimo didėjimas rodo galimą naujo hidrogeocheminio režimo formavimąsi. Jei ši tendencija tęsis, miško ekosistemos gali palaipsniui pereiti iš medžiagas efektyviai sulaikančių sistemų į sistemas, kuriose vyrauja intensyvesnis jų eksportas.

Daugelyje geosistemos komponentų registruojamas dirvožemio rūgštėjimo atsinaujinimas ir sieros ciklo pokyčiai rodo, kad ankstesnis ekosistemų atsikūrimas po rūgščiosios atmosferinės taršos dar nėra galutinai stabilizavęsis. Ypač svarbu stebėti Vakarų Lietuvos miško ekosistemas, kuriose šie požymiai ryškėja labiausiai.

Intensyvėjanti organinės anglies migracija gali pakeisti visos biogeocheminės sistemos funkcionavimą. Kartu su organine anglimi aktyviau migruoja fosforas, geležis, aliuminis ir kiti elementai, todėl gali keistis dirvožemio, gruntinio ir paviršinio vandens cheminė sudėtis bei biologinis prieinamumas.

Didžiausia ilgalaikė grėsmė yra ne pavienio cheminio elemento pokyčiai, o visos biogeocheminės sistemos persitvarkymas. Nustatyti pokyčiai rodo, kad klimato kaitos sąlygomis keičiasi ryšiai tarp atmosferos, iškritų, dirvožemio, vandens ir medžiagų srautų. Todėl hemiborealinių miško ekosistemų stabilumą ateityje lems ne vienas aplinkos veiksnys, bet jų kompleksinė sąveika.

SVARBIAUSIOS PROGNOZĖS

Klimato kaitai intensyvėjant, hidrologinis režimas taps pagrindiniu hemiborealinių miško ekosistemų biogeocheminių procesų reguliatoriumi. Dažnėjančios sausros, po kurių seks intensyvūs krituliai, lems vis didesnius cheminių elementų migracijos ir išnešimo svyravimus, todėl vandens apytaka taps svarbiausiu ekosistemų cheminės pusiausvyros veiksniu.

Didės organinės anglies, azoto, fosforo ir bazinių katijonų sezoniniai srautų svyravimai. Dėl to ilgalaikis miško ekosistemų medžiagų balansas taps nepastovesnis, o maisto medžiagų kaupimosi ir išplovimo procesai vis labiau priklausys nuo hidrologinių ekstremumų.

Dirvožemio cheminės sudėties pokyčiai ir toliau vyks lėčiau negu vandens sistemose, tačiau būtent jie parodys ilgalaikį klimato kaitos poveikį ekosistemoms. Todėl dirvožemio cheminė sudėtis išliks vienu svarbiausių ilgalaikio miško ekosistemų stabilumo indikatorių.

Sieros biogeocheminis ciklas dar nėra visiškai stabilizavęsis. Nors ilgalaikė atmosferinės sieros apkrova išlieka maža, trumpalaikiai sulfatų padidėjimai atmosferinėse iškritose, dirvožemyje ir vandens sistemose leidžia prognozuoti periodinius sieros ciklo svyravimus. Šiems procesams įtakos gali turėti tiek klimato kaita, tiek regioniniai emisijų šaltiniai, įskaitant galimą uždelstą karo Ukrainoje poveikį atmosferinei depozicijai.

Tikėtina, kad skirtingų geosistemos komponentų tarpusavio ryšiai stiprės. Atmosferos, iškritų, dirvožemio, dirvožemio vandens, gruntinio ir paviršinio vandens bei medžiagų srautų pokyčiai vis dažniau vyks sinchroniškai, todėl jų vertinimas atskirai taps vis mažiau informatyvus.

Ilgalaikė kompleksinė stebėsena taps dar svarbesnė negu iki šiol. Tik integruotas visų geosistemos komponentų monitoringas leis laiku nustatyti naujų biogeocheminių procesų pradžią, įvertinti klimato kaitos poveikį ir prognozuoti hemiborealinių miško ekosistemų atsparumo pokyčius.

1. LITERATŪRA

Baužienė I. Aukštaitijos kompleksinio monitoringo stoties geosistemos teršimo siera dinamika. Geografijos metraštis, 2005, 38(1), 73–80

Baužienė I., Bauža D., Pivoras G. Comprehensive assessment of factors influencing the flow of water and substances in soils of natural forest ecosystems. *Ekologija*. 2009, Vol. 55(2), p. 105–111.

Dėl ekstremalių įvykių kriterijų patvirtinimo, Žin., 2006, Nr. 29-1004

Dirvožemių, dirvožemio vandens, gruntinio vandens ir upelių vandens monitoringas kompleksinėse monitoringo stotyse, (2001). Geografijos instituto 2001 metų darbų ataskaita (temos vadovas dr. Z. Gulbinas).

Dirvožemių, dirvožemio vandens, gruntinio vandens ir upelių vandens monitoringas kompleksinėse monitoringo stotyse, (2002). Geologijos ir geografijos instituto 2002 metų darbų ataskaita (temos vadovas dr. M. Samuila).

Dobkevičius M. 2001. Hidrogeodinamika. Vilnius, Enciklopedija, 358 p.

Gruntinio, dirvožemio bei paviršinio vandens ir dirvožemio tyrimai pagal ICP KM programą, (2007). Geologijos ir geografijos instituto 2007 metų darbų ataskaita (temos vadovė dr. I. Baužienė).

Yaping Xie, Zengfu Guan, Jixia Cheng, Yuxuan Zhou, Mingquan Yan (2020) Competition between Al(III) and Fe(III) for binding onto natural organic matter: In situ monitoring by UV–Vis absorbance spectroscopy, Chemosphere, 128655.

Kadūnas, V., Budavičius, R., Gregorauskienė, V., Katinas, V., Kliaugienė, E., Radzevičius, A. & Taraškevičius, R. (1999). Geochemical atlas of Lithuania. Vilnius. 537 Institute of Geology, Geological Survey of Lithuania.

Manual for integrated monitoring (1998). ICP KM programe centre, Finish enivronment institute, Helsinki.

Manual for Integrated Monitoring. Programme Phase 1993–1996. Environment Data Centre, National Board of Waters and the Environment. Helsinki, (1993).

Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests. http://www.icp-forests.org/pdf/FINAL_soil.pdf.

Michalzik, B., Kalbitz, K., Park, JH. *et al.* Fluxes and concentrations of dissolved organic carbon and nitrogen – a synthesis for temperate forests. *Biogeochemistry* **52,** 173–205 (2001).

Ruseckas J. (2008). Vandens balansas miške ir jį lemiantys veiksniai. Miškas ir vanduo. Vilnius, "Enciklopedija". 93-109.

Сакалаускене Д. И. Динамические запасы и подземный сток грунтовых вод территории Литовской ССР. Вопросы взаимосвязи подземных и поверхностных вод Южной Прибалтики, выпуск 20. Вильнюс, 1969.

VIII. SUNKIŲJŲ METALŲ SRAUTAI, KONCENTRACIJOS IR KAUPIMASIS MIŠKO EKOSISTEMOSE

Sunkieji metalai yra svarbi ilgalaikės aplinkos stebėsenos dalis, nes, skirtingai nuo daugelio organinių teršalų, jie aplinkoje nesuyra, bet kaupiasi, persiskirsto tarp ekosistemos komponentų ir, pasikeitus fizikinėms bei cheminėms sąlygoms, gali būti pakartotinai mobilizuojami. Nors terminas „sunkieji metalai“ plačiai vartojamas aplinkos tyrimuose, ekologiniu požiūriu tikslingiau vertinti ne vien elementų tankį ar bendrąją koncentraciją, bet jų toksiškumą, cheminę formą, biologinį prieinamumą ir gebėjimą migruoti dirvožemio–vandens–biotos sistemoje. Todėl šiuolaikinėje literatūroje vis dažniau vartojama platesnė sąvoka „potencialiai toksiški elementai“, apimanti ne tik Cd, Pb, Hg, Ni ir Cr, bet ir As bei padidėjusiomis koncentracijomis toksinį poveikį galinčius sukelti Cu, Zn, Mn, Fe ir Al (Alloway, 2013; Peijnenburg, 2025).

Miško ekosistemos yra ypač svarbios sunkiųjų metalų ilgalaikio kaupimosi ir transformacijos tyrimams. Didelis medžių lajų paviršius efektyviai sulaiko atmosferos aerozolius, dulkes ir kitus dalelių pavidalo teršalus, todėl metalų srautai su polajiniais krituliais gali reikšmingai skirtis nuo jų srautų atviroje vietoje. Ant lajų nusėdę elementai nuplaunami kritulių, patenka į miško paklotę su polajiniais krituliais, kamienų nuotėkiu ir nuokritomis, o vėliau kaupiasi organiniuose dirvožemio horizontuose arba migruoja į mineralinį dirvožemį, dirvožemio vandenį, gruntinius ir paviršinius vandenis (Kabata-Pendias, 2011; Alloway, 2013; ICP Forests, 2024).

Miško paklotė ir organiniai dirvožemio horizontai dėl didelio organinės medžiagos kiekio ir sorbcinio pajėgumo gali veikti kaip ilgalaikiai ankstesnės atmosferos taršos archyvai. Juose metalai gali išlikti dešimtmečius net ir reikšmingai sumažėjus dabartinėms emisijoms bei jų patekimui su atmosferinėmis iškritomis. Todėl dabartinė metalų koncentracija miško dirvožemyje atspindi ne tik šiuolaikinius taršos srautus, bet ir ankstesnių dešimtmečių pramonės, energetikos, transporto bei tarpvalstybinės oro taršos poveikį (Kabata-Pendias, 2011; Alloway, 2013; ICP Forests, 2024).

Pastaraisiais dešimtmečiais Europoje sumažinus pramonės, energetikos ir transporto sektorių emisijas, daugelyje ilgalaikės stebėsenos vietų nustatytas Cd, Pb ir kai kurių kitų metalų koncentracijų arba jų srautų mažėjimas. Tačiau metalų koncentracijų kaita dirvožemyje paprastai yra gerokai lėtesnė negu atmosferinėse iškritose, nes dirvožemyje išlieka ankstesniais laikotarpiais sukauptos jų atsargos. Tai rodo, kad sumažėjusi dabartinė atmosferos tarša dar nereiškia visiško ekologinės rizikos išnykimo: ilgalaikį poveikį gali lemti dirvožemyje išlikusi paveldėtoji tarša ir jos pakartotinis mobilizavimas kintant aplinkos sąlygoms (ICP Forests, 2024; Michel et al., 2025).

Metalų toksiškumą lemia ne vien bendroji jų koncentracija, bet pirmiausia cheminė forma ir biologinis prieinamumas. Didelė dalis elementų dirvožemyje gali būti adsorbuota molio mineralų, humuso, geležies ir mangano oksidų paviršiuje, susieta su organiniais junginiais, arba įtraukta į mineralų kristalinę struktūrą. Tokios formos gali būti santykinai nejudrios ir menkai prieinamos organizmams. Tačiau pasikeitus dirvožemio pH, organinės medžiagos sudėčiai, katijonų mainų gebai, drėgmei arba oksidacijos–redukcijos sąlygoms, dalis sukauptų metalų gali pereiti į dirvožemio tirpalą ir tapti lengviau pasisavinama organizmų (Kabata-Pendias, 2011; Alloway, 2013; Peijnenburg, 2025).

Todėl šiuolaikinis ekologinės rizikos vertinimas negali būti grindžiamas vien bendrosiomis elementų koncentracijomis. Vertinant galimą poveikį ekosistemoms būtina atsižvelgti į tirpiąsias, mainų, su karbonatais, organine medžiaga, Fe ir Mn oksidais bei kitomis dirvožemio sudedamosiomis dalimis susijusias metalų frakcijas. Būtent biologiškai prieinama elemento dalis geriausiai apibūdina jo galimybę patekti į augalus ir kitus organizmus arba sukelti toksinį poveikį (Peijnenburg, 2025).

Vienas svarbiausių metalų judrumą reguliuojančių veiksnių yra dirvožemio rūgštingumas. Mažėjant pH, didėja vandenilio jonų konkurencija su metalų katijonais dėl sorbcijos vietų, keičiasi dirvožemio dalelių paviršiaus krūvis, todėl Cd, Ni, Zn, Mn ir kt. tirpumas bei išplovimo rizika dažniausiai didėja. Pb ir Cu dažnai stipriau susiejami su organine medžiaga, tačiau ir jų judrumas gali padidėti dėl rūgštėjimo arba pakitusio hidrologinio režimo (Kabata-Pendias, 2011; Alloway, 2013; Peijnenburg, 2025).

Rūgštėjimas taip pat skatina Al išsiskyrimą iš dirvožemio mineralų ir jo patekimą į dirvožemio tirpalą. Nors Al nepriskiriamas klasikiniams sunkiesiems metalams, rūgščiuose miško dirvožemiuose jis yra vienas svarbiausių potencialiai toksiškų elementų. Judrusis neorganinis Al gali pažeisti smulkiąsias šaknis, slopinti šaknų ilgėjimą, trikdyti Ca ir Mg pasisavinimą ir mažinti augalų gebėjimą apsirūpinti vandeniu bei maisto medžiagomis. Dėl to medžiai gali tapti jautresni sausroms, šalčiui, patogenams ir vabzdžių pažeidimams (Cronan & Grigal, 1995; Driscoll et al., 2001; de Vries et al., 2014).

Šios sąsajos ypač reikšmingos Lietuvos kompleksinio monitoringo stotyse, kur jau nustatyti dirvožemio rūgštingumo, sorbcinio komplekso pajėgumo, bazinių katijonų ir su organinėmis medžiagomis susijusių elementų pokyčiai. Dirvožemio tapimas mažiau rūgščiu tam tikrais stebėsenos etapais galėjo mažinti dalies metalų tirpumą. Tačiau kartu nustatytas sorbcinio komplekso pajėgumo mažėjimas gali silpninti dirvožemio gebėjimą sulaikyti metalų katijonus ir mažinti jo buferinį stabilumą. Dėl šios priežasties metalų ekologinė rizika negali būti vertinama vien pagal pH kaitos kryptį. Būtina kartu analizuoti katijonų mainų gebą, organinės anglies kiekį, bazinių katijonų atsargas, Fe ir Mn junginių dinamiką bei elementų koncentracijas dirvožemio tirpale.

Svarbų vaidmenį sunkiųjų metalų migracijoje atlieka dirvožemio organinė medžiaga ir ištirpusi organinė anglis. Organinių medžiagų funkcinės grupės gali stipriai surišti Cu, Pb, Hg ir kai kuriuos kitus elementus, taip sumažindamos jų laisvųjų jonų aktyvumą ir tiesioginį biologinį prieinamumą. Kita vertus, susidarę tirpūs metalo kompleksai gali padidinti bendrą elemento judrumą bei jo pernašą iš organinių horizontų į mineralinį dirvožemį, gruntinius ar paviršinius vandenis (Ashworth & Alloway, 2008; Alloway, 2013).

Organinė medžiaga taip pat dalyvauja elektronų perdavimo reakcijose ir veikia Fe bei Mn oksidų stabilumą. Fe ir Mn oksidai pasižymi dideliu reaktyviu paviršiumi, todėl gali sulaikyti Cd, Pb, Ni, Zn, Co, Cu, As ir kitus elementus. Redukuojantis šiems oksidams, dalis adsorbuotų gali būti išlaisvinta į dirvožemio tirpalą. Atkūrus oksidacines sąlygas ir naujai susidarant Fe bei Mn oksidams, dalis elementų gali būti pakartotinai adsorbuota arba nusodinta (Alloway, 2013; Ponting et al., 2021).

Šiame kontekste Aukštaitijos ir Žemaitijos kompleksinio monitoringo stotyse nustatyta ištirpusios organinės anglies kaita yra tiesiogiai susijusi su potencialiai toksiškų elementų judrumu. Po sausringų laikotarpių arba pakartotinai sudrėkus išdžiūvusiam dirvožemiui padidėjus DOC koncentracijai, gali sustiprėti su organiniais kompleksais susijusi Cu, Pb, Zn, Ni ir kitų elementų pernaša. Priešingai, ilgalaikis DOC mažėjimas gali sumažinti tirpių kompleksų srautą, tačiau kartu gali rodyti mažėjantį organinių sorbcijos vietų kiekį ir silpnėjantį metalų imobilizavimą organiniuose horizontuose. Todėl DOC ir metalų koncentracijų ryšys nėra vienakryptis ir turi būti vertinamas atsižvelgiant į konkretaus elemento chemines savybes, dirvožemio pH, Fe bei Mn koncentracijas ir hidrologinį režimą (Ashworth & Alloway, 2008; Alloway, 2013; Peijnenburg, 2025).

Klimato kaita sunkiųjų metalų elgseną veikia ne tik per ilgalaikius temperatūros ir kritulių pokyčius, bet ir per dažnėjančius ekstremalius meteorologinius reiškinius. Aukštesnė temperatūra gali spartinti organinės medžiagos mineralizaciją, mikroorganizmų veiklą, mineralų dūlėjimą ir biogeochemines transformacijas, todėl gali keisti metalų pasiskirstymą tarp kietosios ir skystosios dirvožemio fazių. Eksperimentiniai tyrimai rodo, kad klimato sąlygų pokyčiai per dirvožemio pH, mikrobiomos ir maisto medžiagų apytakos kaitą gali padidinti Cd koncentraciją dirvožemio poriniame vandenyje, ypač rūgščiuose dirvožemiuose (Drabesch et al., 2024).

Sausrų metu dėl sumažėjusio vandens srauto ir išplovimo metalai gali laikinai kauptis viršutiniuose dirvožemio horizontuose. Kartu didėjanti temperatūra ir dirvožemio aeracija gali skatinti organinės medžiagos skaidymąsi bei kai kurių sulfidų ir kitų redukuotų junginių oksidaciją. Dirvožemiui sudrėkus, galimi trumpalaikiai DOC, pH, Fe, Mn ir tirpiųjų metalų koncentracijų pokyčiai. Dėl to didžiausia metalų migracija gali vykti ne pačios sausros metu, bet po jos prasidėjus intensyviems krituliams ir atkūrus hidrologinius srautus (Ponting et al., 2021; Drabesch et al., 2024).

Perteklinio drėkinimo laikotarpiais mažėja dirvožemio oksidacijos–redukcijos potencialas. Redukuojantis Fe ir Mn oksidams, gali būti išlaisvinami jų paviršiuje adsorbuoti arba kartu nusodinti Cd, Pb, Ni, Zn, Co, As ir kiti elementai. Kartu padidėjęs ištirpusios organinės medžiagos kiekis gali skatinti jų kompleksavimą ir pernašą. Dirvožemiui išdžiūvus ir vėl įsivyravus oksidacinėms sąlygoms, Fe bei Mn oksidai gali susidaryti iš naujo ir dalį elementų pakartotinai surišti. Todėl metalų koncentracijoms dirvožemio vandenyje gali būti būdingos ne tik nuoseklios ilgalaikės tendencijos, bet ir ryškūs sezoniniai bei epizodiniai svyravimai (Ponting et al., 2021).

Lietuvos kompleksinio monitoringo rezultatai rodo reikšmingą oro temperatūros kilimą, dirvožemio įšalo silpnėjimą ir hidrologinio režimo kaitą. Aukštaitijos ir Dzūkijos regionuose nustatytas didesnis kaip 0,6 °C oro temperatūros augimas per dešimtmetį, o Aukštaitijos stotyje registruotas paviršinių dirvožemio sluoksnių temperatūros didėjimas ir po 2014 m. sumažėjęs dirvožemio įšalo gylis. Šie pokyčiai gali ilginti biogeochemiškai aktyvų laikotarpį, spartinti organinės medžiagos transformaciją ir keisti metalų sorbcijos, desorbcijos bei kompleksavimo procesus.

Po 2018 m. didėjnačios dirvožemio vandens atsargos Aukštaitijos stotyje, ypač 2021, 2023 ir 2025 m., galėjo keisti Fe ir Mn oksidų stabilumą, organinių kompleksų susidarymą bei su jais susijusių elementų migraciją. Pasitaikę sausringi ir karšti laikotarpiai galėjo lemti metalų kaupimąsi paviršiniuose horizontuose ir jų impulsinį išplovimą po intensyvaus sudrėkimo. Dėl šios priežasties metalų kaitos duomenys turėtų būti analizuojami kartu su kritulių kiekiu, oro ir dirvožemio temperatūra, dirvožemio drėgme, vandens atsargomis, įšalo gyliu, DOC, pH ir SEL.

Atmosferinės iškritos išlieka vienu svarbiausių antropogeninės kilmės metalų patekimo į miško ekosistemas kelių. Metalų koncentracijoms ir srautams įtaką daro ne tik emisijų intensyvumas, bet ir oro masių kilmė, kritulių kiekis, jų rūgštingumas, aerozolių dalelių dydis, paviršiaus šiurkštumas bei medynų lajų struktūra. Polajinių ir atviros vietos kritulių palyginimas leidžia įvertinti, ar konkretus elementas papildomai sulaikomas ir nuplaunamas nuo lajų paviršiaus, ar dalis jo absorbuojama, perskirstoma arba išplaunama iš augalų audinių (Parker, 1983; ICP Forests, 2024).

Sumažėjus sieros ir azoto junginių iškritoms, Europoje silpnėjo vienas pagrindinių miško dirvožemio rūgštėjimo veiksnių. Tačiau ilgalaikį metalų judrumą gali veikti ne tik dabartinis rūgščiųjų iškritų lygis, bet ir istoriškai išplauti baziniai katijonai, sumažėjęs dirvožemio buferingumas, organinės medžiagos kaita ir sukauptos metalų atsargos. Be to, nauji arba atsinaujinantys oro taršos šaltiniai, tolimosios pernašos pokyčiai, miškų gaisrai ir geopolitinių konfliktų sąlygotos emisijos gali keisti aerozolių sudėtį ir atskirų elementų patekimą į miško ekosistemas. Todėl sunkiųjų metalų stebėsena išlieka aktuali net ir bendram antropogeninių emisijų lygiui Europoje sumažėjus (ICP Forests, 2024; Michel et al., 2025).

ICP Forests programa atmosferines iškritas, dirvožemį, dirvožemio tirpalą, nuokritas, lapijos cheminę sudėtį, prieaugį ir medžių lajų būklę vertina kaip tarpusavyje susijusius miško ekosistemos komponentus. Programos 2024–2030 m. strategijoje pabrėžiama daugiafunkcio ilgalaikio monitoringo svarba nustatant kompleksinį oro taršos, klimato kaitos, biologinės įvairovės pokyčių ir kitų stresorių poveikį Europos miškams (ICP Forests, 2024). Dėl to metalų duomenys turėtų būti interpretuojami kartu su meteorologiniais, hidrologiniais, cheminiais ir biologiniais rodikliais.

Sunkiųjų metalų tyrimai tiesiogiai siejasi su anksčiau atlikta medžių būklės, lapijos cheminės sudėties, prieaugio ir augalijos kaitos analize. Kai kurie elementai, pavyzdžiui, Cu, Zn, Mn ir Fe, yra augalams būtini mikroelementai, dalyvaujantys fermentų veikloje, fotosintezėje, kvėpavime, elektronų pernašoje ir antioksidacinės apsaugos procesuose. Tačiau jų trūkumas arba perteklius gali sutrikdyti fiziologinius procesus ir maisto medžiagų pusiausvyrą. Cd, Pb ir Hg žinomų būtinų biologinių funkcijų neatlieka ir biologiškai prieinamomis formomis gali sukelti oksidacinį stresą, pažeisti ląstelių membranas, slopinti fermentų veiklą ir šaknų augimą (Alloway, 2013).

Metalai gali konkuruoti su augalams būtinais elementais dėl sorbcijos vietų dirvožemyje ir dėl membraninių pernašos sistemų šaknyse. Pavyzdžiui, Cd gali sąveikauti su Zn, Ca ir Fe apykaita, o didesnis Ni, Cu arba Zn kiekis gali trikdyti kitų mikroelementų pasisavinimą. Al poveikis rūgščiuose dirvožemiuose dažnai pasireiškia sumažėjusiu Ca ir Mg pasisavinimu bei smulkiųjų šaknų pažeidimais. Todėl potencialiai toksiškų elementų poveikis medžiams gali būti susijęs ne tik su tiesioginiu toksiškumu, bet ir su antriniu mineralinės mitybos disbalansu (Cronan & Grigal, 1995; Alloway, 2013).

Šaknų pažeidimas ir rizosferos procesų slopinimas gali mažinti medžių atsparumą vandens trūkumui, riboti maisto medžiagų įsisavinimą ir prisidėti prie lajų defoliacijos, prieaugio sumažėjimo bei didesnio jautrumo antriniams pažeidimams. Vis dėlto lajų būklės arba prieaugio pokyčių negalima tiesiogiai priskirti metalų poveikiui vien pagal jų bendrąją koncentraciją dirvožemyje. Tam būtina nustatyti, ar elementai yra biologiškai prieinamų formų ir ar jų koncentracijų svyravimai sutampa su šaknų mitybos, lapijos cheminės sudėties, defoliacijos, prieaugio arba medžių žūties pokyčiais.

Kompleksinio monitoringo duomenys suteikia galimybę tokias sąsajas tirti atskiriant galimą metalų poveikį nuo temperatūros, sausros, užmirkimo, vėjo, vabzdžių ir patogenų poveikio. Pavyzdžiui, Aukštaitijos ir Žemaitijos stotyse nustatyta intensyvi eglių žūtis pirmiausia siejama su žievėgraužio tipografo pažeidimais, sausromis ir medžių fiziologiniu nusilpimu. ***Tačiau rūgštėjimo, bazinių katijonų mažėjimo, Al mobilizacijos arba kitų elementų mitybos disbalanso procesai gali veikti kaip papildomi stresoriai, mažinantys medžių atsparumą klimato ekstremumams ir biologiniams pažeidimams.***

Ne mažiau svarbus yra sunkiųjų metalų poveikis dirvožemio biologiniams komponentams. Padidėjęs biologiškai prieinamų metalų kiekis gali slopinti mikroorganizmų fermentinį aktyvumą, keisti bakterijų ir grybų bendrijų struktūrą, lėtinti nuokritų skaidymą ir maisto medžiagų mineralizaciją. Metalų poveikis mikrobiomai priklauso nuo pH, organinės medžiagos, drėgmės, temperatūros ir kitų stresorių sąveikos. Naujausi eksperimentiniai tyrimai rodo, kad būsimo klimato sąlygos ir metalų poveikis gali veikti dirvožemio mikroorganizmų bendrijas sinergiškai, o vienas pagrindinių šias reakcijas reguliuojančių veiksnių yra dirvožemio pH (Drabesch et al., 2024).

Jautriausiai į toksiškų elementų poveikį gali reaguoti dirvožemio mikroartropodai, sliekai ir kiti pedobiontai, tiesiogiai kontaktuojantys su dirvožemio tirpalu, organinėmis dalelėmis ir mikroorganizmais. Jų gausumas, rūšinė sudėtis ir trofinė struktūra atspindi bendrą dirvožemio buveinės kokybę. Todėl Aukštaitijos, Žemaitijos ir Dzūkijos stotyse nustatyti mikroartropodų gausumo svyravimai turėtų būti vertinami ne tik meteorologinių ir drėgmės sąlygų, bet ir dirvožemio rūgštingumo, organinės medžiagos, maisto medžiagų bei toksiškų elementų kaitos kontekste.

Sunkiųjų metalų kaita taip pat gali būti susijusi su miško augalijos ir epifitinių organizmų būkle. Samanos ir kerpės neturi išplėtotos šaknų sistemos, todėl didelę mineralinių medžiagų ir teršalų dalį gauna tiesiogiai iš atmosferos. Dėl to jos plačiai naudojamos Cd, Pb, Hg, Cu, Zn, Ni ir kitų elementų atmosferinės taršos biomonitoringui. Kerpių bei samanų cheminė sudėtis gali padėti atskirti atmosferinės kilmės metalų signalą nuo geogeninio jų kiekio dirvožemyje. Vis dėlto rūšinę sudėtį ir gausumą kartu veikia oro tarša, azoto iškritos, temperatūra, drėgmė, medžių žievės savybės ir medyno struktūra, todėl biologinis atsakas turi būti interpretuojamas kompleksiškai.

Metalų migracija į gruntinius ir paviršinius vandenis sudaro tiesioginę jungtį tarp sausumos ir vandens ekosistemų. Net palyginti nedidelės koncentracijos gali būti ekologiškai reikšmingos, jeigu elementai yra tirpių arba lengvai biologiškai prieinamų formų ir vandens organizmus veikia ilgą laiką. Ypač svarbūs gali būti trumpalaikiai koncentracijų šuoliai per pavasarinį sniego tirpsmą, po sausrų, intensyvių liūčių, potvynių arba užmirkimo laikotarpių (Ponting et al., 2021).

Metalai vandenyje gali būti pernešami laisvųjų jonų pavidalu, susiję su DOC, koloidais, Fe ir Mn oksidų dalelėmis arba suspenduotomis mineralinėmis ir organinėmis nuosėdomis. Laisvųjų jonų formos dažniausiai laikomos lengviausiai biologiškai prieinamomis, tačiau tikrasis toksiškumas priklauso nuo vandens cheminės sudėties. Vandens pH, kietumas, Ca ir Mg koncentracija, DOC bei suspenduotų dalelių kiekis gali reikšmingai keisti metalų speciaciją ir poveikį vandens organizmams (Paquin et al., 2002; Alloway, 2013).

Mažėjant pH ir vandens kietumui, daugelio katijoninių metalų laisvųjų jonų aktyvumas ir biologinis prieinamumas paprastai didėja. DOC gali sumažinti tiesioginį toksiškumą, kompleksiškai surišdamas metalus, tačiau kartu gali padidinti bendrą jų pernašą baseine. Fe, Mn ir Al dalelės gali adsorbuoti kitus elementus, o pakitus pH arba redokso sąlygoms – juos išlaisvinti. Todėl metalų poveikio Versminio ir Juodupio upelių biologinei būklei vertinimas turi būti siejamas su pH, DOC, bazinių katijonų, Fe, Mn, Al, suspenduotų medžiagų ir hidrologinio režimo kaita.

Upelių makrobentoso rodiklių blogėjimas, gerėjimas arba stabilizavimasis savaime nėra tiesioginis sunkiųjų metalų poveikio įrodymas. Makrofauną vienu metu veikia vandens temperatūra, deguonies režimas, srovės greitis, hidromorfologinės sąlygos, organinės medžiagos kiekis, maisto medžiagos, rūgštingumas ir toksiniai junginiai. Tačiau kompleksinė vandens chemijos ir biologinių rodiklių analizė gali padėti nustatyti, ar potencialiai toksiškų elementų koncentracijų arba jų biologinio prieinamumo pokyčiai sutampa su vandens organizmų bendrijų kaita.

Atsižvelgiant į šias sąveikas, sunkiųjų metalų stebėsenos tikslas kompleksinio monitoringo stotyse neturėtų apsiriboti taršos lygio arba atskirų elementų koncentracijų nustatymu. Pagrindinis uždavinys yra įvertinti, kaip atmosferinės ir geogeninės kilmės elementai patenka, kaupiasi ir persiskirsto miško ekosistemoje, kaip jų judrumą keičia klimatas, dirvožemio rūgštingumas, organinė medžiaga ir hidrologinis režimas bei ar šie pokyčiai gali būti susiję su miško augalijos, dirvožemio organizmų, medžių būklės ir vandens ekosistemų biologinės įvairovės kaita.

Todėl šiame tyrimų skyriuje sunkiųjų metalų koncentracijų ir srautų pokyčiai vertinami kaip integrali bendros miško ekosistemų kaitos dalis. Jų analizė siejama su oro ir dirvožemio temperatūros bei kritulių pokyčiais, dirvožemio drėgme ir įšalu, atmosferinėmis iškritomis, dirvožemio pH, sorbcinio komplekso pajėgumu, bazinių katijonų, DOC, Fe, Mn ir Al dinamika, lapijos chemine sudėtimi, nuokritomis, medžių lajų būkle, prieaugiu, pedobiontais ir upelių makrofauna.

Toks kompleksinis vertinimas leidžia atskirti tiesioginį dabartinės atmosferos taršos poveikį nuo ankstesniais dešimtmečiais dirvožemyje sukauptos paveldėtosios taršos. Jis taip pat sudaro sąlygas nustatyti, ar klimato kaita, dažnėjantys hidrologiniai ekstremumai ir dirvožemio cheminės būklės pokyčiai neskatina pakartotinės potencialiai toksiškų elementų mobilizacijos ir ar ji nepradeda kelti naujos grėsmės hemiborealinių miško ekosistemų stabilumui.

Anksčiau atlikti sunkiųjų metalų koncentracijos ore bei krituliuose, o taip pat ir samanose stebėjimai parodė, kad antropogeninės kilmės metalų emisija pačioje Lietuvos teritorijoje yra nedidelė. Skaičiavimai parodė, kad maždaug 70 – 90% teršalų yra atnešama tolimosios oro masių pernašos keliu iš Vakarų bei Centrinės Europos ir tik apie 10-30 % teršalų kiekio yra išplaunama krituliais Lietuvos teritorijoje. Pažangesnių technologijų bei valymo įrenginių gamyboje įdiegimas Vakarų Europoje turėjo didelės įtakos teršalų koncentracijos sumažėjimui Lietuvos oro baseine, ką rodo ir sunkiųjų metalų koncentracijos samanose mažėjimo tendencijos.

8.1. Sunkiųjų metalų srautai su krituliais miško ekosistemose (*FTMC Aplinkotyros skyrius, m.d. Inga Garbarienė).*

Sunkiųjų metalų srautai su krituliais yra vienas pagrindinių jų patekimo į miško ekosistemas kelių, ypač regionuose, kuriuose reikšmingą poveikį daro tolimosios oro teršalų pernašos. Metalai į ekosistemą patenka su šlapiomis ir sausosiomis atmosferinėmis iškritomis, o jų kiekį bei pasiskirstymą keičia kritulių intensyvumas, oro masių kilmė, aerozolių sudėtis, kritulių rūgštingumas ir medyno lajų struktūra. Medžių lajos dalį metalų sulaiko ant spyglių, lapų ir žievės paviršiaus, todėl polajiniuose krituliuose jų koncentracijos ir srautai gali būti didesni negu atviroje vietoje; kita dalis elementų gali būti absorbuojama lajų arba priešingai – išplaunama iš augalų audinių (Parker, 1983; Kabata-Pendias, 2011; ICP Forests, 2024). Su polajiniais krituliais, kamienų nuotėkiu ir nuokritomis sunkieji metalai patenka į miško paklotę bei viršutinius dirvožemio horizontus, kuriuose jie gali ilgai kauptis, būti imobilizuojami organinės medžiagos ir Fe bei Mn oksidų arba, pakitus pH, drėgmės ir redokso sąlygoms, pakartotinai mobilizuojami ir išplaunami į dirvožemio bei paviršinius vandenis (Alloway, 2013; Ponting et al., 2021; Peijnenburg, 2025). Todėl ilgalaikė sunkiųjų metalų srautų su krituliais stebėsena leidžia vertinti ne tik dabartinį atmosferinės taršos lygį, bet ir galimą jos kaupimąsi, persiskirstymą bei ekologinį poveikį visai miško ekosistemai.

Metalai į atmosferą patenka ir iš antropogeninių ir iš natūralių šaltinių. Daugelis metalų pasižymi toksinėmis savybėmis, todėl yra pavojingi žmogui ir gyvajai gamtai. Iš bendro antropogeninės kilmės sunkiųjų metalų kiekio, nusėdusio Lietuvos teritorijoje ant žemės paviršiaus, 70÷90 % jų nusėda su krituliais [1]. Sunkiųjų metalų koncentracijos ore bei krituliuose, o taip pat ir samanose stebėjimai parodė, kad antropogeninės kilmės metalų emisija pačioje Lietuvos teritorijoje yra nedidelė – maždaug 70÷90 % teršalų yra atnešama tolimosios oro masių pernašomis iš Vakarų bei Centrinės Europos ir tik apie 10÷30 % teršalų kiekio, esančio ore, yra išplaunama krituliais Lietuvos teritorijoje [1,2,3].

Pažangesnių technologijų bei valymo įrenginių gamyboje įdiegimas Europoje turi didelės įtakos teršalų koncentracijos sumažėjimui Lietuvos oro baseine, ką rodo ir sunkiųjų metalų koncentracijos samanose mažėjimo tendencijos [4].

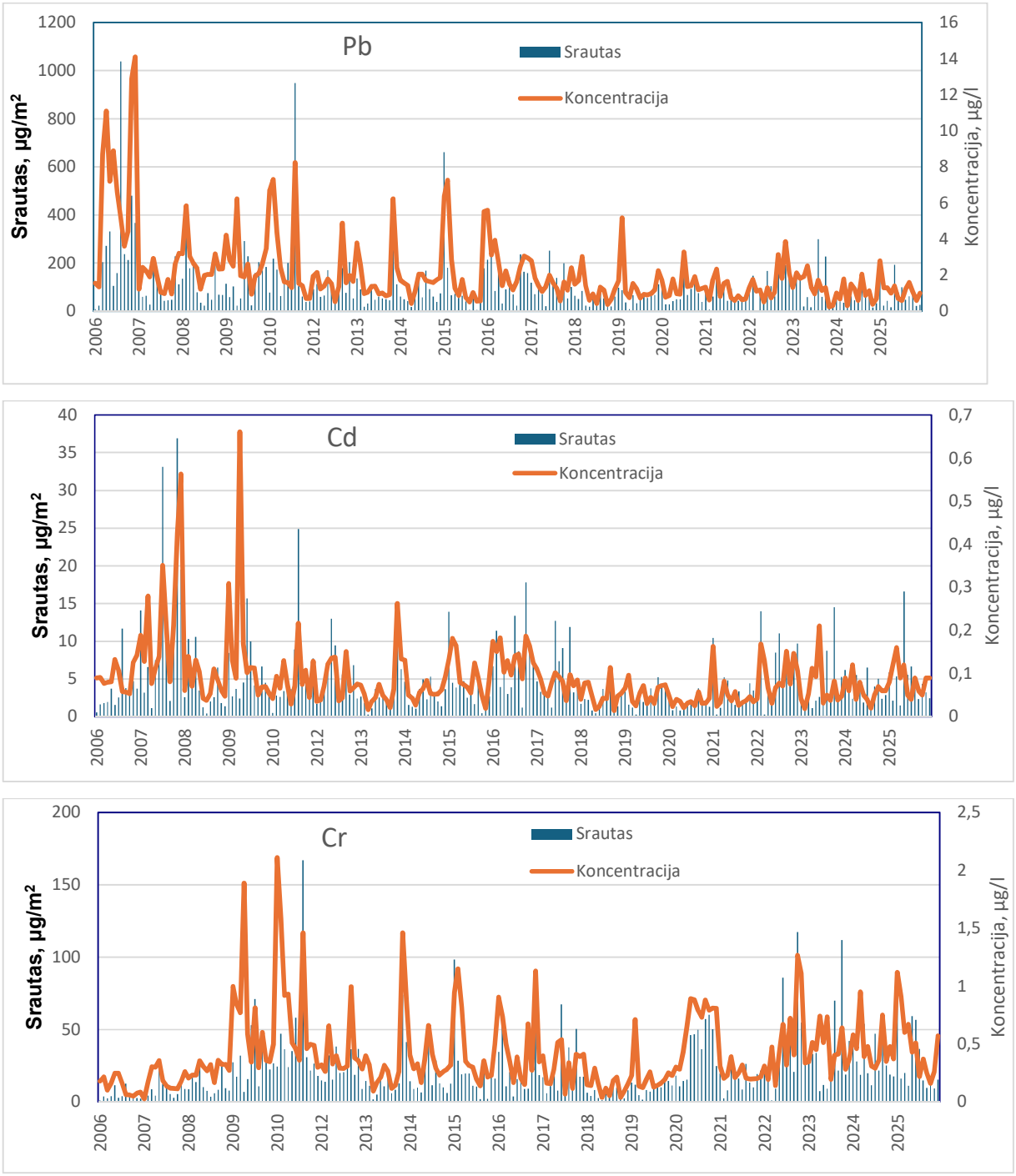
Krituliai dėl savo nereguliarumo nors ir ne visiškai, bet iš dalies atspindi ir atmosferos užterštumą, tačiau tiriant teršalų koncentraciją krituliuose, galima žymiai tiksliau nei iš jų koncentracijos ore įvertinti jų srautą į žemės paviršių.

Literatūra:

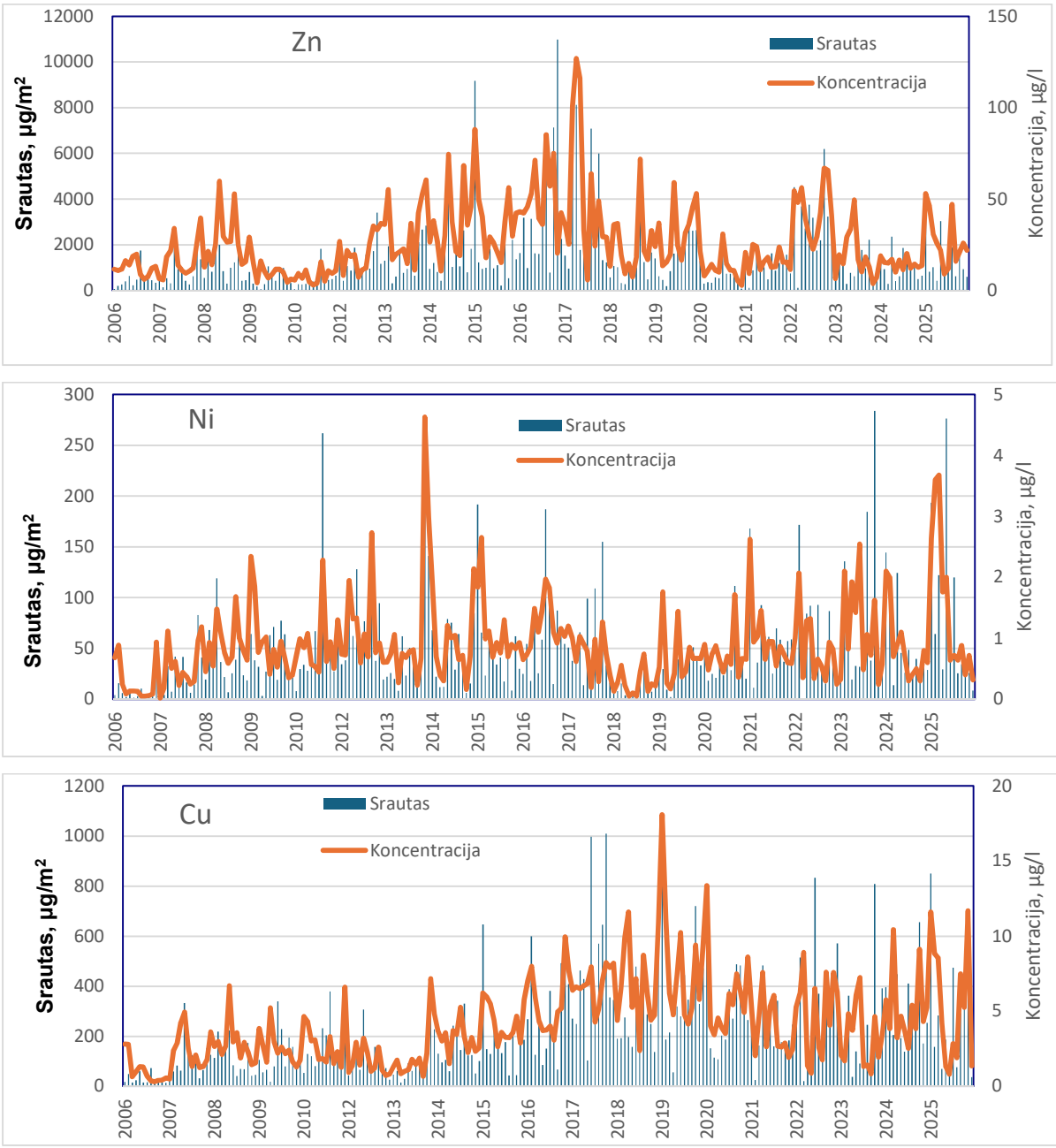
1. D.Čeburnis. (1999) Atmospheric trace metal deposition in Lithuania: metods and estimation // Ed. D. A. Lovejoy. Heavy Metals in the Environment: an Integrated Approach, Vilnius, Lithuania, 5-15.
2. D.Čeburnis, D.Valiulis, J.Šakalys. (1999) The influence of local processes on trace metal concentrations in long-range transported air masses. Environmental and Chemical Physics, (Vilnius), 21 (1), 31-36.
3. Čeburnis D., Ruhling A. and Kvietkus K. (1997) Extended study of atmospheric heavy metal deposition in Lithuania based on moss analysis. Environmental Monitoring & Assessment, 47**,** 135-152.
4. J.Šakalys, K.Kvietkus, J.Sucharova, I.Suchara, D.Valiulis. (2009) Changes in total concentrations and assessed background concentrations of heavy metals in moss in Lithuania and the Czech Republic between 1995 and 2005. Chemosphere, Vol. 76(1), 91-97.

8.1.1. Sunkiųjų metalų koncentracijos krituliuose ir jų srautas Aukštaitijos KM stotyje

Aukštaitijos KMS nuo 2006 m. krituliuose FMTC Fizikos instituto mokslininkai tyrė šių sunkiųjų metalų koncentracijas: Pb, Cd, Cr Ni, Zn ir Cu. Jų srautai su krituliais panaudoti sunkiųjų metalų transformacijoms ir kaupimuisi ekosistemos įvairiose komponentėse tirti.



8.1. pav. Pb, Cd ir Cr mėnesinės koncentracijos krituliuose ir srautai su krituliais Aukštaitijos KMS



8.2. pav. Zn, Ni ir Cu mėnesinės koncentracijos krituliuose ir srautai su krituliais Aukštaitijos KMS

Per 19 m. laikotarpį FMTC Fizikos instituto mokslininkų atliktų tyrimų rezultatai rodo, kad Pb koncentracija krituliuose ir šio elemento srautas su krituliais pasiekiantis miško paklotę turi aiškią tendenciją mažėti, o mažėjimo intensyvumas siekia atitinkamai -0,019 µg/l per mėn. ir -0,76 µg/m^2 per mėn. Reikšmingiau mažėja šio elemento koncentracijos krituliuose negu jo srautas su krituliais, kuris papildomai priklauso ir nuo kritulių kiekio, kuris turi tendenciją didėti (I skyrius).

Cd koncentracija krituliuose ir šio elemento srautas su krituliais pasiekiantis miško paklotę turi taip pat aiškia tendencija mažėti, o mažėjimo intensyvumas siekia atitinkamai -0,0006 µg/l per mėn. ir -0,025 µg/ m^2 per mėn. Reikšmingiau mažėja šio elemento srautas su krituliais, nors kaip minėta kritulių kiekis per tiriamąjį laikotarpį turi tendenciją didėti (I skyrius).

Cr koncentracija krituliuose ir šio elemento srautas su krituliais pasiekiantis miško paklotę neturi jokios aiškios tendencijos. Išsiskiria tik sausros laikotarpis 2018-2019 m., kai šio elemento koncentracijos Aukštaitijos KMS buvo vienos iš mažiausių. Antra vertus padidėjusios koncentracijos buvo nustatytos 2009-2010 m. Išskirtinis ir 2020 metų vegetacijos laikotarpis, kai Cr koncentracijos krituliuose nuo 0,3 µg/l staiga pakilo iki 0,8 µg/l, o srautas su krituliais pakilo nuo 10 µg/ m^2 iki 50 µg/ m^2. ir tokiame lygmenyje išsilaikė iki metų pabaigos. Tai vienas ilgiausiai trunkantis kritulių žymus užterštumas Cr per visą tiriamąjį laikotarpį. ***Tai galimai nauja grėsmė miško ekosistemoms.***

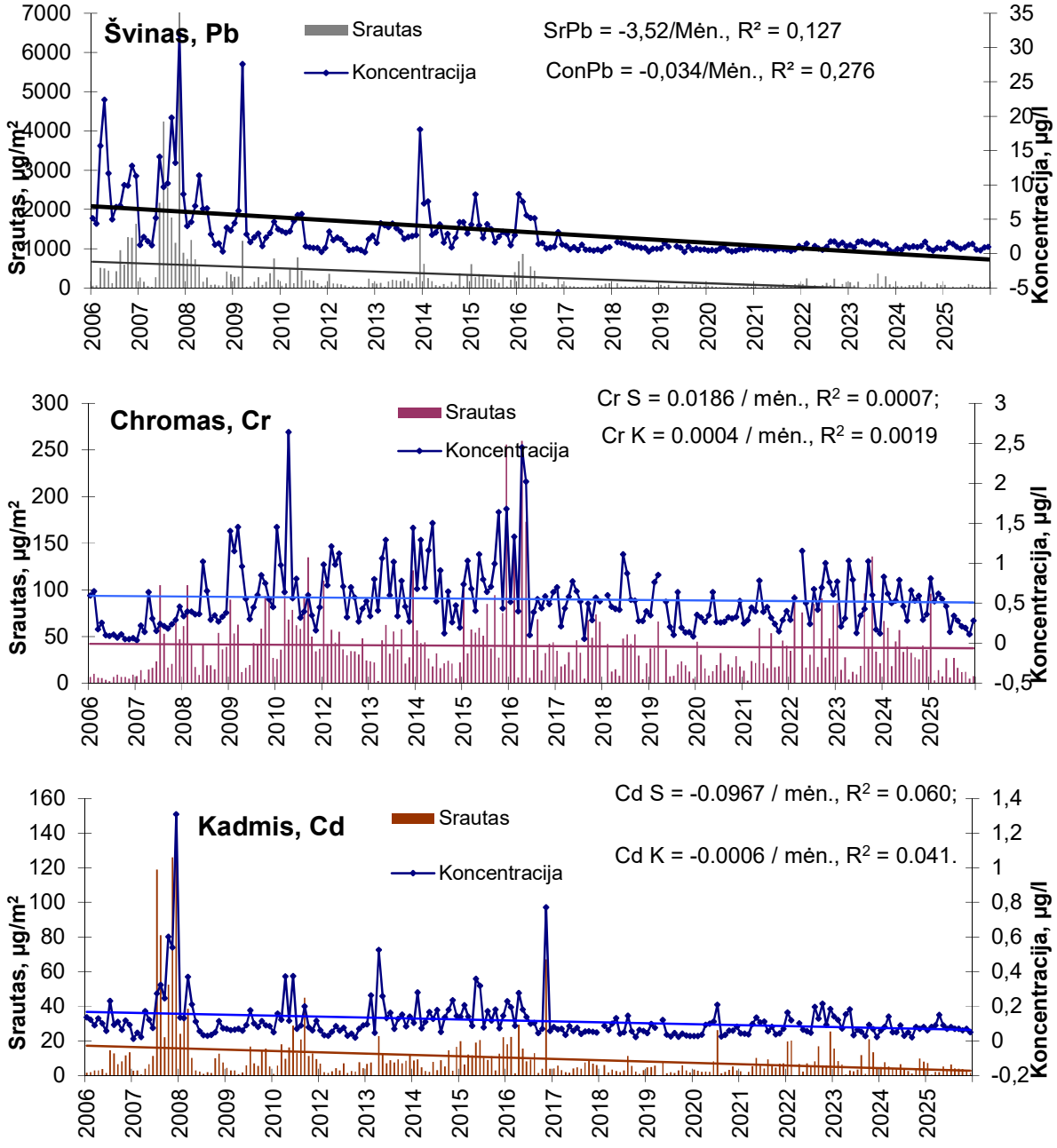
Zn koncentracijų ir jo srauto kaitoje nustatinėti tendencijos intensyvumą netikslinga, kadangi jis reikšmingai didėjo iki 2016 m. pabaigos ir 2017 m. vidurio, kai viršijo 100 µg/l ir 1300 µg/ m^2. Po šio laikotarpio koncentracija ir srautas šio elemento pradėjo reikšmingai mažėti ir 2020 m. pabaigoje pasiekė vienas iš mažiausių reikšmių per visą tiriamąjį laikotarpį: koncentracija krituliuose nukrito iki 10-15 µg/l, o srautas su krituliais sudarė tik 400-5500 µg/ m^2.

Ni koncentracijų ir srautų kaitoje atsispindėjo labai pačios tendencijos kaip ir Zn kaitose.. Iki 2014 m. Ni koncentracija ir srautai į miško paklotę didėjo reikšmingai. Po šių metų jos pradėjo mažėti ir minimaliausias reikšmes pasiekė 2018 m. vasarą. Išskirtinis šio elemento kaitos bruožas – reguliarus koncentracijų krituliuose ir srautų augimas. ***Ar tai nauja grėsmė miško ekosistemoms parodys ateities tyrimai.***

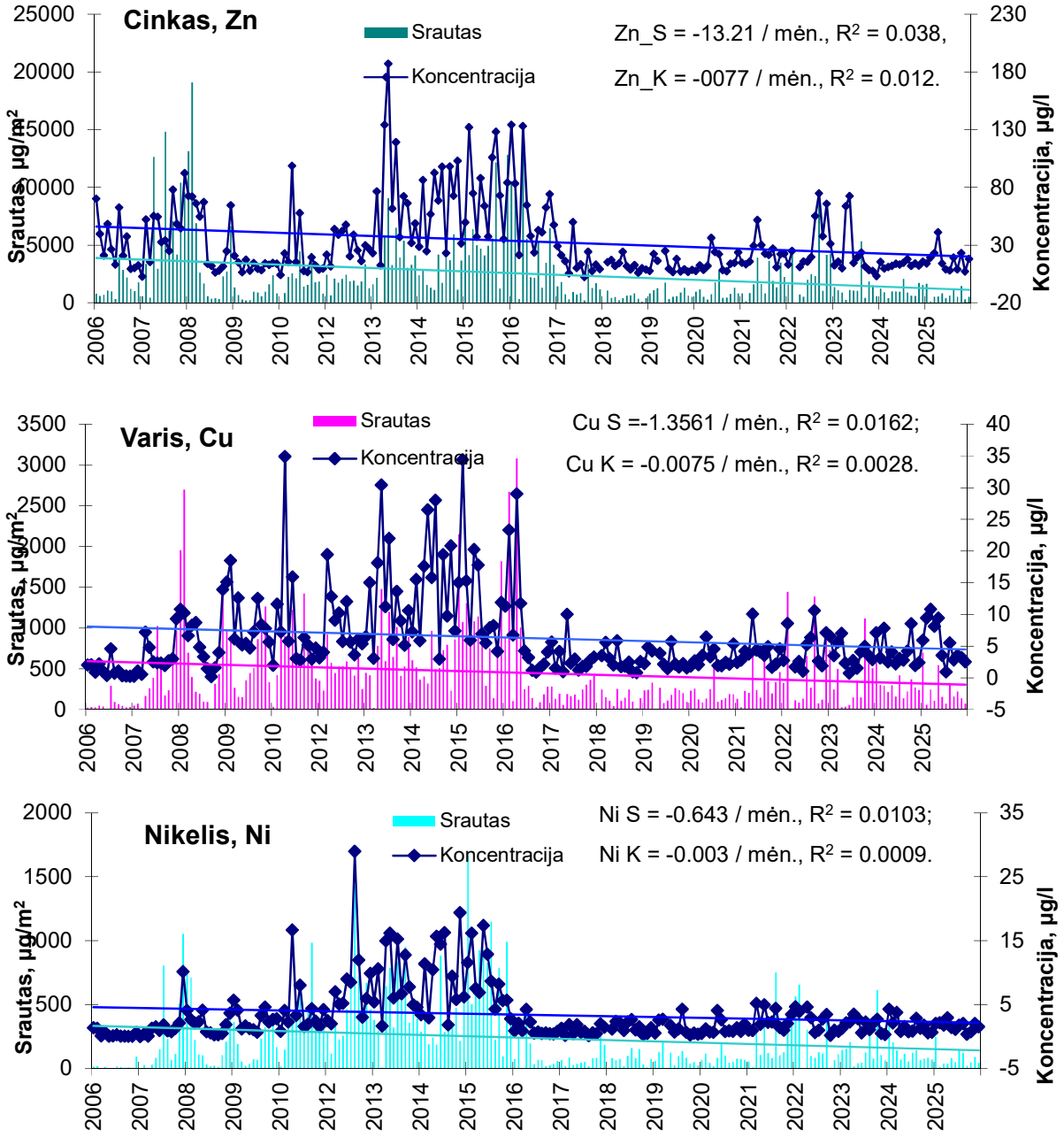
Cu koncentracija krituliuose ir šio elemento srautas su krituliais pasiekiantis miško paklotę kita visiškai priešingai negu Zn ir Ni. Jei iki 2013 m. šio elemento koncentracijos krituliuose ir srautai buvo stabilūs, tai nuo šių metų ir ypač iki 2019 registruojamas šių parametrų reikšmingas didėjimas, kuris tik paskutiniaisiais metais stabilizavosi ir pradėjo mažėti. Nepaisant tokios kaitos Cu koncentracija krituliuose ir jo srautas su krituliais į miško paklotę Aukštaitijos KMS turi reikšmingiausią augimo trendą, kuris siekia atitinkamai 0,04µg/l per mėn. ir 2,17 µg/ m^2 per mėn. ***Kokią grėsmę šis sunkusis metalas gali sukelti miško ekosistemos bus galima nustatyti tik tęsiant tyrimus ateityje.***

8.1.2. Žemaitijos kompleksiško monitoringo stotis

Žemaitijos KMS taip pat nuo 2006 m. krituliuose FMTC Fizikos instituto mokslininkai tyrė šių sunkiųjų metalų koncentracijas: Pb, Cd, Cr Ni, Zn ir Cu. Jų srautai su krituliais panaudoti sunkiųjų metalų transformacijoms ir kaupimuisi ekosistemos įvairiose komponentėse tirti.



8.3 pav. Pb, Cd ir Cr mėnesinės koncentracijos krituliuose ir srautai su krituliais Žemaitijos KMS



8.4 pav. Zn, Ni ir Cu mėnesinės koncentracijos krituliuose ir srautai su krituliais Žemaitijos KMS

Per 19 m. laikotarpį FMTC Fizikos instituto mokslininkų atliktų tyrimų Žemaitijos KMS rezultatai rodo, kad Pb koncentracija krituliuose ir šio elemento srautas su krituliais pasiekiantis miško paklotę, kaip ir Aukštaitijos KMS turi aiškią tendenciją mažėti, o mažėjimo intensyvumas siekia atitinkamai -0,051 µg/l per mėn., t.y. daugiau nei 2 kartus intensyviau negu Aukštaitijos KMS ir -5,5 µg/m^2 per mėn., t.y. apie 8 kartus intensyviau negu Aukštaitijos KMS. Reikšmingiau mažėja šio elemento srautas su krituliais, nors kaip minėta kritulių kiekis per tiriamąjį laikotarpį turi tendenciją didėti (I skyrius).

Skirtingai negu Aukštaitijos KMS Cd koncentracija krituliuose ir šio elemento srautas su krituliais pasiekiantis miško paklotę neturi aiškesnės tendencijos kįsti ir svyruoja atitinkamai apie 0,1 µg/l ir apie mažiau negu 10 µg/m^2 per mėn. µg/l , o srautas siekė (2016 m.) 250 µg/m^2 per mėn. Paskutiniaisiais metais Cr koncentracijos ir srautai išlieka stabilūs, apie 0,3-0,5 µg/l ir apie 20 µg/m^2 per mėn. ***Galima Cr grėsmė nustatyta Aukštaitijos KMS, vakariniame Lietuvos regione nepasitvirtino.***

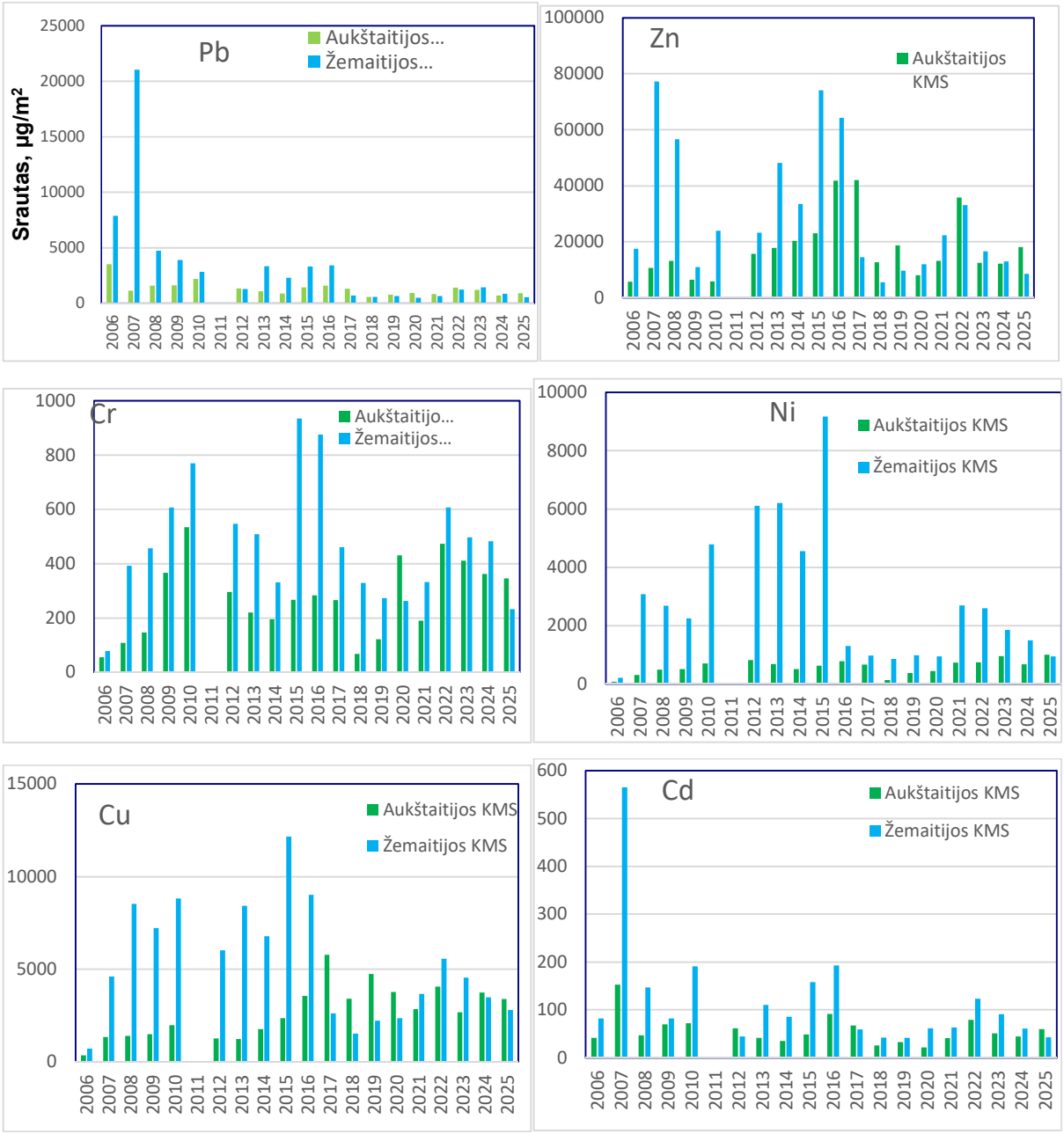
Zn, Cu ir Ni kaitoje Žemaitijos KMS stebima ta pati kaitos tendencija. Tirtų elementų koncentracijos ir srautai iki 2016 m. reikšmingai didėja, o nuo šių metų iki 2020 šuoliškai sumažėjo ir paskutiniaisiais metais išlieka stabiliame lygmenyje. Pražastys tokios kaitos tirėtų aiškinti šios srities profesionalai, t.y. Fizikos instituto mokslininkai.

Apibendrinus gautus rezultatus galima teigti, kad ***Aukštaitijos KMS grėsmę miško ekosistemoms galėtų kelti paskutiniaisiais metai reikšmingai padidėjusios Cr koncentracijos ir šio elemento srautai su krituliais, o taip pat reikšmingai didėjanti Cu koncentracija krituliuose ir šio elemento srautas į miško paklotę. Teigiami pokyčiai, kurie galėtų skatinti atitinkamų biotos komponentų rūšių įvairovę ir gausą turėtų būti reguliariai mažėjanti vienų toksiškiausių sunkiųjų metalų Pb ir Cd koncentracijos krituliuose ir jų srautai.***

Žemaitijos KMS sunkiųjų metalų koncentracijų ir jų srautų kaita neturėtų sukelti naujų grėsmių miško ekosistemos biotos komponentams. Teigiami pokyčiai ekosistoje galėtų būti siejami su reguliariu Pb koncentracijų ir jo srautų mažėjimu, o taip pat su sumažėjusiomis Zn, Ni ir Cu koncentracijomis krituliuose ir jų srautais į miško paklotę.

8.1.3. Sunkiųjų metalų metinių srautų palyginimas KM teritorijose.

Sunkiųjų metalų metinių srautų su krituliais į miško paklotę analizė parodė, kad Žemaitijos KMS krituliai labiau užteršti sunkiaisiais metalais negu Aukštaitijos KMS. Tai tolimųjų pernašų iš Vidurio ir Vakarų Europos rezultatas.



8.5 pav. Tirtų metalų srautai su krituliais kompleksiško monitoringo teritorijose

Kritulių kiekis taip pat šiame regione didesnis, nors jų kiekis tiriamuoju laikotarpiu (2006-2020 m.) mažėja po 32 mm per m. Nepaisant to sunkiųjų metalų srautai Žemaitijos KMS į miško paklotę yra apie 2 kartus didesni negu Aukštaitijos KMS. Tirtų elementų sąraše išsiskiria Ni, kurio srautas į miško paklote net 6 kartus viršija srautą į paklotę Aukštaitijos KMS.

8.1 lentelė. Tirtų sunkiųjų metalų vidutinių metinių koncentracijų ir jų srautų kaita bei reikšmingumas

KMS	Vidut.	Std.Dv.	r(X,Y)	r^2	t	p	Kaita per m.
AKMS	Koncentracijos krituliuose, µg/l						
Pb	2.39	1.377	-0.677	0.459	-3.188	0.008	-0.202
Zn	29.83	19.560	0.344	0.118	1.267	0.229	1.459
Cr	0.43	0.350	-0.013	0.000	-0.044	0.966	-0.001
Ni	1.88	4.277	-0.063	0.004	-0.218	0.831	-0.058
Cu	4.79	3.960	0.391	0.153	1.472	0.167	0.336
Cd	0.09	0.054	-0.534	0.285	-2.187	0.049	-0.006
	Koncentracijos krituliuose, µg/l						
ŽKMS	Mean	Std.Dv.	r(X,Y)	r^2	t	p	Slope
Pb	3.79	3.706	-0.766	0.588	-4.134	0.001	-0.617
Zn	33.76	22.498	-0.155	0.024	-0.545	0.596	-0.759
Cr	0.51	0.236	0.258	0.066	0.923	0.374	0.013
Ni	3.34	2.923	-0.022	0.000	-0.077	0.940	-0.014
Cu	6.05	3.618	-0.041	0.002	-0.143	0.889	-0.032
Cd	0.12	0.074	-0.469	0.220	-1.841	0.091	-0.008
	Srautas su krituliais, µg/m^2						
AKMS	Mean	Std.Dv.	r(X,Y)	r^2	t	p	Slope
h. mm	644.4	120.0	-0.068	0.005	-0.236	0.817	-1.8
Pb	1423.8	715.3	-0.661	0.437	-3.049	0.010	-102.6
Zn	17298.1	11798.2	0.465	0.216	1.819	0.094	1191.3
Cr	239.9	139.3	0.134	0.018	0.468	0.648	4.1
Ni	508.8	225.9	0.146	0.021	0.513	0.618	7.2
Cu	2463.8	1552.7	0.822	0.676	5.000	0.000	277.2
Cd	57.7	34.0	-0.476	0.226	-1.874	0.085	-3.5
	Srautas su krituliais, µg/m^2						
ŽKMS	Mean	Std.Dv.	r(X,Y)	r^2	t	p	Slope
mm	983.5	321.8	-0.457	0.209	-1.778	0.101	-31.9
Pb	4031.6	5294.6	-0.650	0.423	-2.965	0.012	-747.6
Zn	33671.2	25427.4	-0.311	0.097	-1.133	0.279	-1716.6
Cr	487.5	244.1	0.024	0.001	0.082	0.936	1.3
Ni	3151.1	2657.8	-0.137	0.019	-0.478	0.641	-79.0
Cu	5849.7	3392.2	-0.236	0.056	-0.843	0.416	-174.2
Cd	133.0	135.1	-0.470	0.221	-1.847	0.090	-13.8

Per tiriamąjį laikotarpį reikšmingiausiai mažėja Pb koncentracija krituliuose abiejose stotyse po 2,39 µg/l per metus Aukštaitijos KMS ir 3,79 µg/l per metus Žemaitijos KMS.

Arti reikšmingumo lygmens mažėja Cd koncentracija Žemaitijos KMS – po 0,12 µg/l per metus, o Aukštaitijos KMS šio elemento koncentracijos mažėja jau reikšmingai, po 0,09 µg/l per m.

Palyginus sunkiųjų metalų srautus į miško paklotę nustatyta, kad reikšmingai mažėja abiejose stotyse Pb srautas: Aukštaitijos KMS po -103 µg/m^2 per m., o Žemaitijos KMS net 7 kartus intensyviau, po 748 µg/m^2 per m. Cg srautas Aukštaitijos KMS mažėja po 3,5 µg/m^2 per m., o Žemaitijos KMS – apie 4 kartus intensyviau – 13,8 µg/m^2 per m. Aukštaitijos KMS nustatytas papildomai reikšmingas Cu srauto augimas po 277 µg/m^2 per m.

IŠVADOS

1. Aukštaitijos KMS grėsmę miško ekosistemoms galėtų kelti paskutiniaisiais metai reikšmingai padidėjusios Cr koncentracijos ir šio elemento srautai su krituliais, o taip pat reikšmingai didėjanti Cu koncentracija krituliuose ir šio elemento srautas į miško paklotę. Teigiami pokyčiai, kurie galėtų skatinti atitinkamų biotos komponentų rūšių įvairovę ir gausą turėtų būti reguliariai mažėjanti vienų toksiškiausių sunkiųjų metalų Pb ir Cd koncentracijos krituliuose ir jų srautai.
2. Žemaitijos KMS sunkiųjų metalų koncentracijų ir jų srautų kaita neturėtų sukelti naujų grėsmių miško ekosistemos biotos komponentams. Teigiami pokyčiai ekosistoje galėtų būti siejami su reguliariu Pb koncentracijų ir jo srautų mažėjimu, o taip pat su sumažėjusiomis Zn, Ni ir Cu koncentracijomis krituliuose ir jų srautais į miško paklotę.
3. Sunkiųjų metalų metinių srautų su krituliais į miško paklotę analizė parodė, kad Žemaitijos KMS krituliai labiau užteršti sunkiaisiais metalais negu Aukštaitijos KMS. Tai tolimųjų pernašų iš Vidurio ir Vakarų Europos rezultatas.
4. Palyginus sunkiųjų metalų srautus į miško paklotę nustatyta, kad reikšmingai mažėja abiejose stotyse Pb srautas: Aukštaitijos KMS po -103 $\mu g/m^2$ per m., o Žemaitijos KMS net 7 kartus intensyviau, po 748 $\mu g/m^2$ per m. Cg srautas Aukštaitijos KMS mažėja po 3,5 $\mu g/m^2$ per m., o Žemaitijos KMS – apie 4 kartus intensyviau – 13,8 $\mu g/m^2$ per m. Aukštaitijos KMS nustatytas papildomai reikšmingas Cu srauto augimas po 277 $\mu g/m^2$ per m.
5. ***2021-2025 m. laikotarpis išsiskyrė sunkiųjų metalų srautų su krituliais padidėjimu su mažėjimo tendencija iki 2025 m. Koncentracijų kaitoje pavojingų tendencijų visumoje nenustatyta, išskyrus Cr koncentracijų padidėjimą Aukštaitijos ir Žemaitijos KMS 2023-2024 m. laikotarpiu. Paskutiniaisiais metais šio elemento koncentracijos sumažėjusios.***

Cr, Ni ir Cu koncentracijų padidėjimą, ypač Aukštaitijos KMS baseine galėjo sąlygoti ir karo pasekmės Ukrainoje.

GRĖSMĖS

Didžiausią potencialią grėsmę Aukštaitijos KMS gali kelti pastaraisiais metais reikšmingai padidėjusios Cr koncentracijos ir srautai bei ilgalaikis Cu srauto į miško paklotę augimas.

Šiuo metu naujų sisteminių grėsmių Žemaitijos KMS nenustatyta, tačiau Aukštaitijos KMS būtina toliau kryptingai stebėti Cr, Ni ir ypač Cu kaitą, nes jų trumpalaikį padidėjimą galėjo lemti pasikeitę tolimosios pernašos srautai, įskaitant galimą karo Ukrainoje sąlygotų emisijų poveikį.

8.2. Sunkiųjų metalų koncentracijos medžių lapuose ir spygliuose

Tarp reikšmingiausių teršalų, darančių įtaką miško ekosistemoms, yra sunkieji metalai, kurie ilgą laiką gali kauptis miško augalijoje ir dirvožemyje ir daryti tiesioginį ir netiesioginį poveikį ekosistemų funkcionavimui (Alloway, 2013; Kabata-Pendias, 2011).

Daugybė tyrimų pabrėžė sunkiųjų metalų kaupimosi sausumos ekosistemose ekologinę reikšmę ir su tuo susijusią riziką augalų fiziologijai ir ekosistemų funkcionavimui (Adriano, 2001; Nagajyoti ir kt., 2010). Įprasti sunkieji metalai ir mikroelementai, tirti miško ekosistemose, yra švinas (Pb), kadmis (Cd), gyvsidabris (Hg), nikelis (Ni), chromas (Cr), varis (Cu), cinkas (Zn), manganas (Mn), geležis (Fe) ir arsenas (As). Nors kai kurie elementai, tokie kaip Cu, Zn, Fe ir Mn, yra būtini mikroelementai, reikalingi augalų metabolizmui, per didelės koncentracijos gali sutrikdyti fiziologinius procesus ir sukelti toksiškumą. Kiti metalai, įskaitant Pb, Cr ir Cd, neturi žinomos biologinės funkcijos ir yra laikomi labai toksiškais augalams ir kitiems organizmams.

Miško aplinkoje sunkieji metalai atsiranda tiek iš natūralių, tiek iš antropogeninių šaltinių. Natūralūs šaltiniai apima pirminės uolienų medžiagos atmosferą, vulkanines emisijas, miškų gaisrus ir dulkių nusėdimą. Antropogeniniai šaltiniai yra įvairesni ir dažnai dominuoja pramoniniuose regionuose, įskaitant išmetamuosius teršalus iš metalo lydymo, iškastinio kuro deginimo, transporto priemonių eismo, atliekų deginimo, pramoninės gamybos ir žemės ūkio veiklos. Tolimos užteršto oro pernašos yra vienas iš pagrindinių kelių, per kuriuos sunkieji metalai patenka į miško ekosistemas (Steinnes, 1995; Berg & Steinnes, 1997). Dėl didelio miškų paviršiaus ploto ir sudėtingos lajų struktūros medžiai efektyviai sulaiko ore esančias daleles ir teršalus, todėl teršalai kaupiasi spygliuose, lapuose, žievėje, nuokritose ir dirvožemyje.

Spygliuočių ir lapuočių medžių rūšys plačiai naudojamos kaip aplinkos taršos bioindikatoriai ir biomonitoriai, nes laikui bėgant kaupiasi atmosferos teršalai. Ankstesni tyrimai parodė, kad medžių lapija veiksmingai atspindi atmosferos metalų pėdsakų ir kietųjų dalelių nusėdimo modelius miškingoje ir miesto aplinkoje (Fernández ir kt., 2004; Sæbø ir kt., 2012). Šiaurės ir Vidurio Europos miškuose dažniausiai tiriamos paprastosios eglės (Picea abies), paprastosios pušis (Pinus sylvestris) ir beržo rūšys (Betula spp.). Jų spygliai ir lapai suteikia vertingos informacijos apie erdvinius ir laikinus sunkiųjų metalų nusėdimo bei aplinkos užterštumo procesus. Šios rūšys skiriasi morfologija, fiziologija, lajos struktūra, spyglių ar lapų ilgaamžiškumu ir maistinių medžiagų įsisavinimo strategijomis, kurios turi įtakos jų gebėjimui kaupti sunkiuosius metalus iš atmosferos iškritų ir dirvožemio.

Eglės spygliai laikomi itin tinkamais atmosferos užterštumo rodikliais dėl savo tankios lajos struktūros, vaško paviršiaus ir ilgo spyglių gyvavimo laiko. Ankstesni tyrimai pabrėžė didelį paprastosios eglės spyglių akumuliacinį pajėgumą švino, kadmio, nikelio ir kitų oro teršalų pramoniniuose regionuose (Berg ir Steinnes, 2000; Kalko ir Andreev, 2025). Jos spygliai gali išsilaikyti net iki 10 m., todėl teršalai kaupiasi palaipsniui ir suteikia informacijos už ilgą laikotarpį. Šiurkštus paviršius ir spyglių išsidėstymas padidina ore esančių dalelių sulaikymą, todėl ši rūšis yra ypač tinkama sunkiųjų metalų nusėdimui ir jų koncentracijų tyrimams.

Paprastosios pušies spygliai taip pat plačiai naudojami biomonitoringo tyrimuose dėl plataus geografinio pasiskirstymo, ekologinio prisitaikymo ir jautrumo aplinkos stresui. Paprastoji pušis buvo pripažinta viena patikimiausių biomonitoringo rūšių vertinant ilgalaikį atmosferos iškritų ir dirvožemio užterštumą visoje Europoje (Juranović Cindrić ir kt., 2019; Pająk ir kt., 2017; Kosiorek ir kt., 2016). Pušies spygliai kaupia sunkiuosius metalus tiek dėl tiesioginio atmosferos nusėdimo, tiek dėl šaknų pasisavinimo iš užterštos dirvos. Kadangi pušies spygliai išlieka keletą metų, jie suteikia vertingos informacijos apie teršalų kaupimosi tendencijas. Be to, pušynai yra paplitę maistinių medžiagų neturtinguose ir smėlinguose dirvožemiuose, kur sunkiųjų metalų mobilumas ir maistinių medžiagų disbalansas gali reikšmingai paveikti medžių augimą ir fiziologinį funkcionavimą. Todėl sunkiųjų metalų koncentracijos pušies spygliuose svyravimai gali atspindėti tiek vietinius taršos šaltinius, tiek aplinkos stresą, susijusį su dirvožemio rūgštingumu, sausra ar maistinių medžiagų apribojimais.

Beržo lapai nuo spygliuočių spygliuočių skiriasi morfologija, gyvenimo trukme ir kaupimosi dinamika. Tyrimai parodė, kad lapuočių medžių lapai efektyviai kaupia ore esančias kietąsias daleles ir mikroelementus, todėl beržo lapai taip pat yra vertingi pastarojo meto aplinkos užterštumo rodikliai (Aničić ir kt., 2011; Sæbø et al., 2012). Dėl plataus lapų paviršiaus ir gana greito augimo beržo lapai gali efektyviai sugauti ir sugerti dujinius teršalus. Nors lapuočių lapai paprastai kaupia teršalus per trumpesnį laikotarpį, palyginti su visžaliais spygliais, beržo lapai labai reaguoja į besikeičiančias aplinkos sąlygas ir gali atspindėti naujausius taršos įvykius.

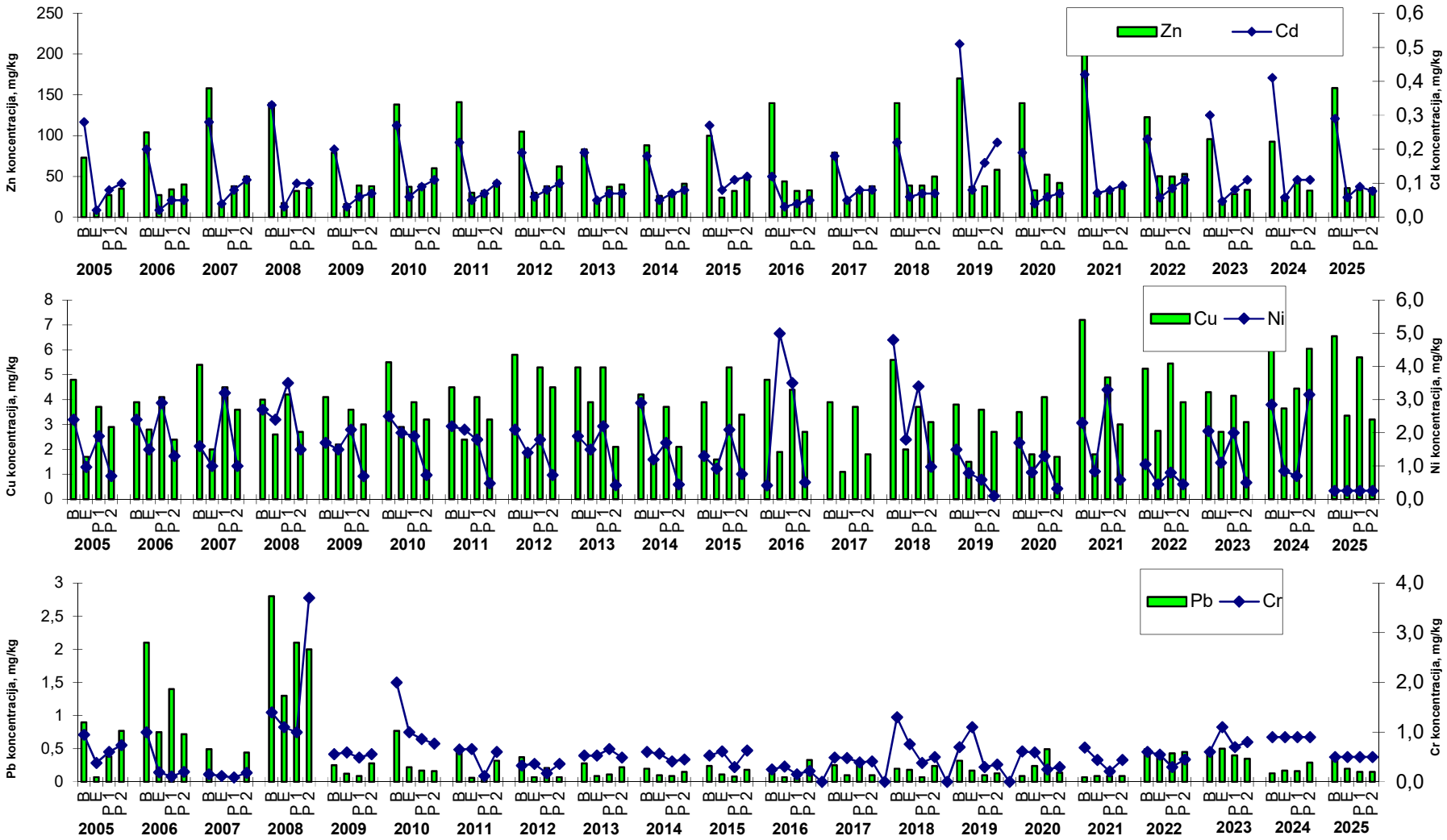
Sunkiųjų metalų kaupimasis medžių spygliuose ir lapuose turi svarbių pasekmių miško ekosistemos būklei, produktyvumui ir tvarumui. Padidėjusi toksiškų metalų koncentracija gali sumažinti fotosintezės efektyvumą, pabloginti maistinių medžiagų pasisavinimą ir padidinti oksidacinį stresą miško augalijoje (Kabata-Pendias, 2011; Adriano, 2001; Nagajyoti ir kt., 2010). Sunkieji metalai gali trukdyti daugeliui fiziologinių ir biocheminių augalų procesų. Padidėjusi toksiškų metalų koncentracija gali pažeisti chloroplastų struktūrą, slopinti chlorofilo sintezę, sumažinti stomato laidumą ir sukelti oksidacinį stresą. Šis poveikis galiausiai gali sumažinti medžių augimą, gyvybingumą ir atsparumą nepalankiems aplinkos veiksniams.

Lyginamieji spygliuočių ir lapuočių rūšių tyrimai pagerina rūšims būdingų kaupimosi modelių ir ekologinių reakcijų į aplinkos stresą kintančiomis klimato sąlygomis supratimą. Todėl sunkiųjų metalų koncentracijos eglių spygliuose, pušų spygliuose ir beržų lapuose stebėjimas būtini vertinant aplinkos kokybę ir riziką miško tvarumui. Be to, klimato kaita gali sąveikauti su sunkiųjų metalų užterštumu ir padidinti miško ekosistemų pažeidžiamumą. Naujausi tyrimai rodo, kad didėjantis sausrų dažnis, šiltėjanti temperatūra ir pakitęs kritulių kiekis gali turėti įtakos sunkiųjų metalų mobilumui, biologiniam prieinamumui ir augalų įsisavinimo dinamikai borealiniuose ir vidutinio klimato miškuose (Jokanović ir kt., 2025). Kylanti temperatūra, pakitęs kritulių režimas, padažnėjęs sausrų reiškinys ir besikeičianti dirvožemio chemija gali turėti įtakos metalų mobilumui, biologiniam prieinamumui ir augalų įsisavinimui. Tuo pačiu metu aplinkos stresas, susijęs su ekstremaliais klimato pokyčiais, gali sumažinti medžių gebėjimą toleruoti toksiškas metalų koncentracijas. Todėl norint numatyti būsimą miško sveikatą ir plėtoti tvarumą labai svarbu suprasti bendrą sunkiųjų metalų ir klimato stresorių poveikį. Tačiau vien tik lapų ar spyglių cheminės sudėties analizė, neatsižvelgiant į sunkiųjų metalų koncentraciją dirvožemyje ir šių elementų paėmimo iš dirvožemio intensyvumą, negali patikimai informuoti apie aplinkos užterštumą sunkiaisiais metalais. Todėl įgyvendinant ICP KM programos reikalavimus sunkieji metai stebimo visuose aplinkos komponentėse kasmet.

8.2.1. Aukštaitijos kompleksiško monitoringo stotis

Per tiriamąjį laikotarpį atlikta sunkiųjų metalų koncentracijų kaitos lapijos pavyzdžiuose analizė. Nustatyta, kad beržų lapai ir pirmų metų pušies spygliai sunkiųjų metalų kaupia daugiau negu eglės įvairaus amžiaus spygliai ir antrų metų pušies spygliai. Kaip ir makro elementus gausūs krituliai matyt išplauna iš audinių ir sunkiuosius metalus, kurių koncentracijos senesniuose audiniuose mažėja.

Palyginus tirtų metalų sekas, aiškesnių kaitos tendencijų nustatyti nepavyko. 2020 m. atlikus matematinę analizę išaiškinta, kad Pb koncentracija lapijos pavyzdžiuose mažėjo, o beržų lapuose ir pušies II m. spygliuose, net reikšmingai, po -0,1 mg/kg ir -0,05 mg/kg per metus. Eglės ir pušies I metų spygliuose mažėjimas buvo nereikšmingas. Mažėjo taip pat ir Cu koncentracijos lapijos pavyzdžiuose, nors jo srautai su krituliais ir koncentracijos krituliuose pakankamai reikšmingai didėjo. Reikšmingiausiai šis mažėjimas pasireiškė senesniuose pavyzdžiuose, t.y. eglės II metų pušies spygliuose. Mažėjimo tendencijos buvo nustatytos ir Ni duomenų sekose, ypač pušies spygliuose. Beržų lapuose ir eglės spygliuose šio elemento koncentracijos išliko pakankamai stabilios. Cr kaitoje aiškesnės tendencijos nustatyti nepavyko, o didėjimo tendencija išaiškinta Zn koncentracijų sekoje ir ypač eglės spygliuose, kur koncentracijų augimas buvo reikšmingas ir siekė po 1,28 mg/kg. Beržų lapuose šio elemento didėjo nereikšmingai.



8.6 pav. Sunkiųjų metalų koncentracijų lapijoje kaita Aukštaitijos KMS 2005-2025 m.

8.7 pav. Sunkiųjų metalų koncentracijų lapijoje kaita Žemaitijos KMS 2005-2025 m.

8.2 lentelė. Sunkiųjų metalų kaita tirtuose Aukštaitijos KMS spygliuose/lapuose

SM	Medžio rūšis	Mean	Std.Dv.	r(X,Y)	r^2	t	p	Kaita per m.
Zn	B	117.38	31.669	0.259	0.067	1.004	0.333	1.724
Zn	E	26.51	9.883	0.614	0.377	2.912	0.011	1.275
Zn	P 1	35.97	5.647	0.432	0.187	1.793	0.095	0.513
Zn	P 2	44.69	9.090	0.178	0.032	0.677	0.510	0.340
Na	B	40.20	18.606	0.281	0.079	1.056	0.310	1.116
Na	E	34.80	21.099	0.110	0.012	0.400	0.696	0.496
Na	P 1	31.73	11.003	0.604	0.365	2.735	0.017	1.418
Na	P 2	49.00	22.013	0.680	0.462	3.341	0.005	3.191
Cu	B	4.563	0.754	-0.223	0.050	-0.855	0.407	-0.035
Cu	E	2.125	0.675	-0.390	0.152	-1.585	0.135	-0.055
Cu	P 1	4.200	0.611	-0.028	0.001	-0.103	0.919	-0.004
Cu	P 2	2.819	0.718	-0.337	0.113	-1.338	0.202	-0.051
Ni	B	2.141	0.967	-0.040	0.002	-0.144	0.887	-0.008
Ni	E	1.659	1.046	0.050	0.003	0.181	0.859	0.011
Ni	P 1	2.259	0.863	-0.322	0.104	-1.226	0.242	-0.058
Ni	P 2	0.711	0.369	-0.612	0.375	-2.790	0.015	-0.047
Pb	B	0.615	0.759	-0.606	0.368	-2.853	0.013	-0.097
Pb	E	0.228	0.333	-0.307	0.094	-1.207	0.247	-0.021
Pb	P 1	0.353	0.575	-0.388	0.151	-1.575	0.138	-0.047
Pb	P 2	0.390	0.476	-0.535	0.286	-2.368	0.033	-0.053
Cr	B	0.753	0.478	-0.205	0.042	-0.784	0.446	-0.021
Cr	E	0.584	0.294	0.296	0.088	1.161	0.265	0.018
Cr	P 1	0.402	0.268	-0.179	0.032	-0.682	0.507	-0.010
Cr	P 2	0.651	0.834	-0.294	0.086	-1.149	0.270	-0.051
Cd	B	0.239	0.089	-0.001	0.000	-0.003	0.998	0.000
Cd	E	0.046	0.019	0.553	0.306	2.482	0.026	0.002
Cd	P 1	0.078	0.028	0.237	0.056	0.915	0.376	0.001
Cd	P 2	0.094	0.040	0.181	0.033	0.687	0.503	0.002

Didėjo ir Na koncentracijos visuose pavyzdžiuose: reikšmingiausiai pušies spygliuose, o mažiausiai eglės spygliuose. Nerimą galėjo kelti Cd koncentracijų lapijoje augimas, nepriklausomai nuo to, kad šios elemento koncentracija krituliuose mažėjo, kaip ir jo srautas su krituliais į miško paklotę. ***Tik Pb ir Cr koncentracijų ir jų srautų mažėjimas tiesiogiai atsispindi ir šių elementų koncentracijose lapijos pavyzdžiuose.***

2021-2025 m. laikotarpiu esminių pokyčių tirtų sunkiųjų metalų kaitoje nenustatyta. Matomą Pb ir Cr koncentracijų padidėjimą sąlygojo cheminių analizių tikslumas.

8.2.2. Žemaitijos kompleksiško monitoringo stotis

Palyginus tirtų metalų sekas, aiškesnių kaitos tendencijų nustatyti nepavyko. 2020 m. Atlikus matematinę analizę išaiškinta, kad reikšmingiausiai lapijos pavyzdžiuose, kaip ir krituliuose, mažėjo Pb koncentracija visuose lapijos pavyzdžiuose. Intensyviausiai lapuose ir pušies spygliuose, o eglės spygliuose silpniausiai. Pakankamai intensyviu mažėjimu pasižymėjo ir Ni. Mažėjo taip pat panašiu reikšmingumu Cu ir Cr koncentracijos lapijos pavyzdžiuose.

Skirtingai negu Aukštaitijos KMS pakankamai reikšmingai mažėjo Cd koncentracijos Žemaitijos KMS lapijos pavyzdžiuose ir ypač pušies spygliuose. Tačiau visuose tirtuose lapijos pavyzdžiuose didėja tik Zn koncentracijos, nors krituliuose šio elemento koncentracijų kaita priešinga – ji mažėjo.

2021-2025 m. esminių pokyčių nenustatyta, nors kai kurių elementų koncentracijos jau yra sumažėjusios žemiau cheminių analizių nustatymo tikslumo ribos, dėl ko matomą padidėjimą sąlygojo cheminių analizių tikslumas.

Kaitą sąlygojančių veiksnių analizės išvada: sunkiųjų metalų koncentracijos krituliuose nėra pagrindinis veiksnys lemiantis lapijos užterštumą šiais elementais.

8.3 lentelė. Sunkiųjų metalų kaita tirtuose Žemaitijoss KMS spygliuose/lapuose

SM	Medžių rūšis	Mean	Std.Dv.	r(X,Y)	r^2	t	p	Kaita per m.
Cd	B	0.388	0.133	0.244	0.060	0.943	0.362	0.007
Cd	E	0.062	0.037	-0.320	0.103	-1.266	0.226	-0.002
Cd	P 1	0.160	0.038	-0.668	0.447	-3.361	0.005	-0.005
Cd	P 2	0.179	0.046	-0.708	0.501	-3.746	0.002	-0.007
Cr	B	1.201	0.369	-0.597	0.356	-2.785	0.015	-0.046
Cr	E	0.831	0.406	-0.372	0.138	-1.499	0.156	-0.032
Cr	P 1	0.546	0.800	-0.187	0.035	-0.713	0.488	-0.031
Cr	P 2	0.535	0.267	-0.400	0.160	-1.635	0.124	-0.022
Pb	B	0.708	0.812	-0.549	0.301	-2.455	0.028	-0.094
Pb	E	0.428	0.672	-0.362	0.131	-1.454	0.168	-0.051
Pb	P 1	0.255	0.409	-0.517	0.268	-2.261	0.040	-0.044
Pb	P 2	0.437	0.343	-0.583	0.340	-2.683	0.018	-0.042
Ni	B	2.120	0.708	-0.295	0.087	-1.114	0.285	-0.044
Ni	E	1.097	0.639	0.041	0.002	0.147	0.885	0.005
Ni	P 1	1.427	0.474	-0.445	0.198	-1.791	0.097	-0.044
Ni	P 2	0.548	0.235	-0.602	0.363	-2.720	0.018	-0.030
Cu	B	4.925	1.373	-0.112	0.013	-0.422	0.679	-0.032
Cu	E	2.144	0.680	-0.446	0.199	-1.863	0.084	-0.064
Cu	P 1	3.925	0.996	-0.368	0.136	-1.483	0.160	-0.077
Cu	P 2	3.474	3.005	-0.021	0.000	-0.077	0.939	-0.013
Na	B	46.38	19.012	-0.267	0.071	-1.038	0.317	-1.068
Na	E	47.63	25.182	-0.276	0.076	-1.074	0.301	-1.459
Na	P 1	43.44	28.819	0.010	0.000	0.037	0.971	0.060
Na	P 2	92.44	35.410	0.222	0.049	0.852	0.409	1.651
Zn	B	179.00	75.897	0.316	0.100	1.246	0.233	5.035
Zn	E	26.88	8.115	0.141	0.020	0.535	0.601	0.241
Zn	P 1	43.31	12.462	0.322	0.104	1.272	0.224	0.843
Zn	P 2	51.56	12.559	0.442	0.195	1.844	0.086	1.166

IŠVADOS

1. Beržų lapai ir pirmų metų pušies spygliai sunkiųjų metalų kaupia daugiau negu eglės įvairaus amžiaus spygliai ir antrų metų pušies spygliai. Kaip ir makro elementus gausūs krituliai matyt išplauna iš audinių ir sunkiuosius metalus, kurių koncentracijos senesniuose audiniuose mažėja.

2. Aukštaitijos KMS Pb koncentracija lapijos pavyzdžiuose mažėja, o beržų lapuose ir pušies II m. spygliuose, net reikšmingai, po -0,1 mg/kg ir -0,05 mg/kg per metus. Eglės ir pušies I metų spygliuose mažėjimas buvo nereikšmingas.
3. Mažėja taip pat ir Cu koncentracijos lapijos pavyzdžiuose, nors jo srautai su krituliais ir koncentracijos krituliuose pakankamai reikšmingai didėjo. Reikšmingiausiai šis mažėjimas pasireiškia senesniuose pavyzdžiuose, t.y. eglės II metų pušies spygliuose.
4. Aukštaitijos KMS tirtų medžių lapijos pavyzdžiuose per paskutinįjį 2005-2020 m. laikotarpi didėja Zn, Na ir Cd koncentracijos, *mažai keičiasi Cr ir Ni ir mažėja* Cu ir *bei reikšmingiausiai Pb koncentracijos.*
5. Žemaitijos KMS intensyviausiai Pb mažėja beržų lapuose – po 0,09 mg/kg per m. ir pušies spygliuose: po 0,04 mg/kg per metus. Eglės spygliuose Pb mažėjimas silpniausiai išreikštas ir siekia tik -0,05 mg/kg per m.
6. Žemaitijos KMS tirtų medžių lapijos pavyzdžiuose per paskutinįjį 2005-2020 m. laikotarpi didėja Zn koncentracijos, *mažai keičiasi ir mažėja* Na ir mažėja Cd, Cr, *Ni ir Cu, bei reikšmingiausiai Pb koncentracijos.*
7. ***Apibendrinus gautus rezultatus, nustatyta, kad sunkiųjų metalų koncentracijos krituliuose ir jų srautai su krituliais į miško paklote nėra pagrindinis veiksnys lemiantis sunkiųjų metalų koncentracija lapijoje ir jų kaitą laike. Tik Pb ir Cr koncentracijų ir jų srautų mažėjimas tiesiogiai atsispindi ir šių elementų koncentracijose lapijos pavyzdžiuose.***
8. ***2021-2025 m. esminių pokyčių ar galimų grėsmių miško ekosistemoms sunkiųjų metalų koncentracijų lapijoje kaitoje nenustatyta.***

Apibendrinanti išvada. Ilgalaikiai sunkiųjų metalų koncentracijų žaliojoje lapijoje tyrimai parodė, kad lapijos cheminė sudėtis yra ne tiesioginis atmosferinės taršos indikatorius, bet integruotas miško ekosistemų funkcionavimo rodiklis, atspindintis atmosferinės depozicijos, dirvožemio cheminių savybių, elementų biologinio prieinamumo, medžių fiziologinių reguliacijos mechanizmų ir klimato sąlygų sąveiką.

Toks rezultatas patvirtina, kad medžiai pasižymi efektyviais fiziologiniais mechanizmais, reguliuojančiais toksiškų elementų patekimą ir persiskirstymą audiniuose, o lapijos cheminė sudėtis atspindi bendrą ekosistemos homeostazę. Todėl ilgalaikė lapijos cheminių elementų stebėsena yra svarbi kompleksinio monitoringo dalis, leidžianti nustatyti ne tik atmosferinės taršos pokyčius, bet ir dirvožemio cheminės būklės, medžių mineralinės mitybos, klimato kaitos bei kitų stresorių sąlygotus miško ekosistemų funkcionavimo pokyčius ir jų ilgalaikes pasekmes ekosistemų stabilumui.

8.3. Sunkiųjų metalų koncentracijos nuokritose ir jų srautai į dirvožemį

Lapijos cheminės sudėties tyrimas yra viena iš efektyviausių priemonių medžių stresui, sukelto aplinkos užteršimo, įvertinti. Tokio tyrimo metu nustatoma kaip maistinių, taip ir toksiškų elementų kiekis spygliuose ir lapuose. Lyginant gyvų lapų ir spyglių cheminę sudėtį su nuokritų sudėtimi įvertinamas maistinių medžiagų srautas bei medžių būklė maistinių elementų kiekio atžvilgiu (UN-ECE, 1998).

Nuokritos yra vienas iš pagrindinių kelių, kuriais sunkieji metalai pernešami iš miško augalijos į dirvos paviršių. Spygliai, lapai, žievės fragmentai, šakelės ir dauginimosi organai kaupia mikroelementus auginimo sezono metu ir vėliau prisideda prie biogeocheminio metalų ciklo. Todėl sunkiųjų metalų koncentracija paklotėse yra svarbus tiek atmosferos nusėdimo, tiek vidinių maistinių medžiagų ciklo procesų miško ekosistemose rodiklis (Berg ir McClaugherty, 2014).

Spygliuočių miškuose eglių ir pušų spygliai sudaro pagrindinę kasmetinio nuokritų dalį. Kadangi spygliai ant medžių išlieka keletą metų, prieš patekdami į miško paklotę jose gali susikaupti nemažai metalų. Beržo lapai, nepaisant jų trumpesnės gyvenimo trukmės, taip pat labai prisideda prie metinių metalų srautų, nes jų biomasės apyvarta yra gana greita. Sunkiųjų metalų pernešimas per lapiją paveikia organinio horizonto cheminę sudėtį ir įtakoja ilgalaikį teršalų kaupimąsi miško dirvožemyje (Ukonmaanaho ir kt., 2008).

Sunkiųjų metalų srautai su nuokritomis yra ekologiniu požiūriu svarbūs, nes reguliuoja teršalų persiskirstymą tarp augmenijos ir dirvožemio. Maistinių ir toksinių medžiagų apytaka su nuokritomis vaidina lemiamą vaidmenį energetiniuose srautuose tarp augalų ir dirvožemio. Būtent, nuokritos, kurios kaupiasi dirvožemio viršutiniame sluoksnyje, tampa augalams pagrindiniu maistinių medžiagų šaltinių. Po nuokritų irimo metalai gali imobilizuoti organinėse medžiagose arba patekti į dirvožemio tirpalą, kur juos gali pasisavinti šaknys arba pernešti į gilesnius dirvožemio sluoksnius. Didelės toksiškų metalų, tokių kaip Pb ir Cd, koncentracijos gali slopinti skilimo procesus ir neigiamai paveikti mikrobų bendruomenes, atsakingas už maistinių medžiagų mineralizaciją (Giller ir kt., 1998). Todėl sunkiųjų metalų koncentracijos ir metinių srautų į miško paklotę įvertinimas suteikia vertingos informacijos apie ekosistemos stabilumą, maistinių medžiagų ciklą ir miško tvarumą. Nuokritų ir atmosferos iškritų monitoringas plačiai naudojamas vertinant teršalų nusėdimą, teršalų patekimą į dirvožemį ir ilgalaikę ekologinę riziką, susijusią su pramoniniais teršalais ir atmosferos tarša, dėl to yra neatsiejama dalis nuo sunkiųjų metalų tyrimo ne tik ore ir krituliuose, bet taip pat dirvožemyje bei visuose požeminiuose vandenyse. Šie tyrimai pagal ICP KM programa dėl jų svarbos vykdomi kasmet.

8.3.1. Metalų koncentracijų nuokritose sezoninė kaita ir jų srautai Aukštaitijos KMS

Analizuojant Aukštaitijos KMS nuokritų cheminę sudėtį, nustatyta statistiškai reikšminga ($p<0,05$) sezoniškumo įtaka tirtų metalų koncentracijoms (8.8 pav.). Tokių tirtų metalų, kaip švino (Pb), vario (Cu), chromo (Cr) koncentracijos nuokritose yra didžiausios žiemos mėnesiais, t.y. gruodį, sausį, vasarį. Nuokritos per šį laikotarpį surenkamos anksti pavasarį, kai rinktuvuose pilnai nutirpsta sniegas. Manome, kad dėl šios priežasties, metalų koncentracijoms didesnę įtaką gali turėti krituliai, t.y. palaipsniui tirpstantis sniegas.

Tokių elementų, kaip cinko (Zn), natrio (Na) ir mangano (Mn) koncentracijų nuokritose sezoniškumas neturi ryškių tendencijų, tačiau mažesnės koncentracijos atrodo, kad yra būdingesnės žiemos mėnesių nuokritoms. Ypač tai galima įžvelgti, tiriant paskutiniųjų metų sunkiųjų metalų nuokritose sezoniškumą. Kalio (K) koncentracijų nuokritose kaitoje matyti, kad didžiausi šio elemento kiekiai užfiksuoti pavasario ir vasaros mėnesiais (II_III).

Tyrimo rezultatai rodo, kad per 32 m laikotarpį koncentracijų didėjimo tendencija yra būdinga šiems sunkiesiems metalams: Cd, Zn ir K. Pastaruoju laikotarpiu K koncentracijos nuokritose taip pat kaip ir Cr bei Pb reikšmingai nesikeičia. Didžiausiu padidėjimu pasižymi Cu ir Na koncentracijos, ypač 2021-2024 m. laikotarpiu.

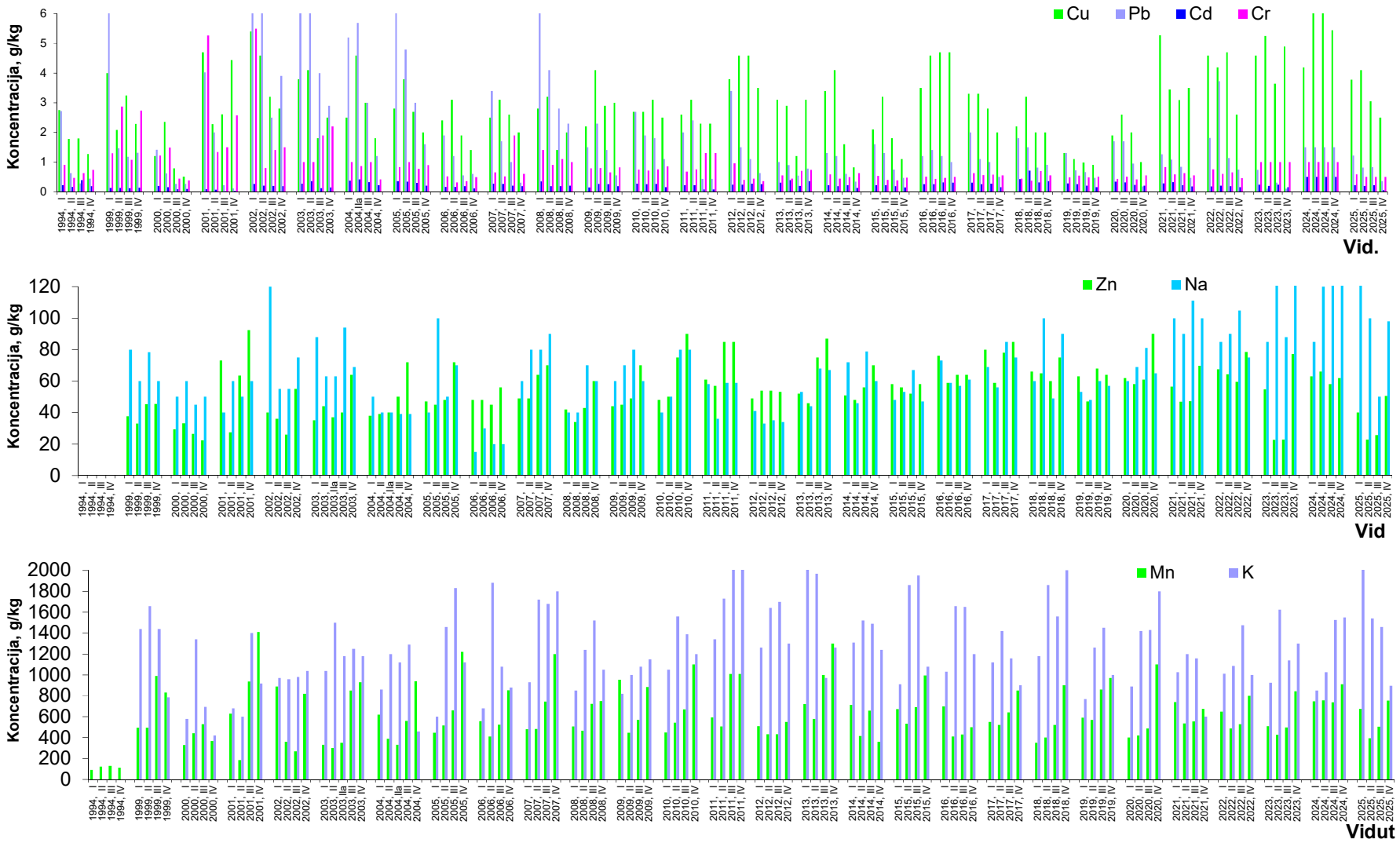
Išskirtinis 2020 m. sunkiųjų metalų tyrimo nuokritose bruožas – jų koncentracijų reikšmingas sumažėjimas lyginant su ankstesniais metais, 2021-2025 m. laikotarpiu nepasitvirtino.

Apibendrinus tirtų metalų koncentracijas nuokritose 1994-2025 m. laikotarpiu, nustatyta, kad reikšmingiausiai didėjo Cd koncentracija nuokritose – po 0,004 mg/kg, Zn – po 0,94 mg/kg per m., Cu – po 0,043 ng/kg per m., Na – po 2,5 mg/kg per m. ir K – po 4,3 mg/kg per m.

Reikšminga ir mažėjimo tendencija nustatyta Pb – po -0,09 mg/kg per m. ir Cr po -0,04 mg/kg per m.

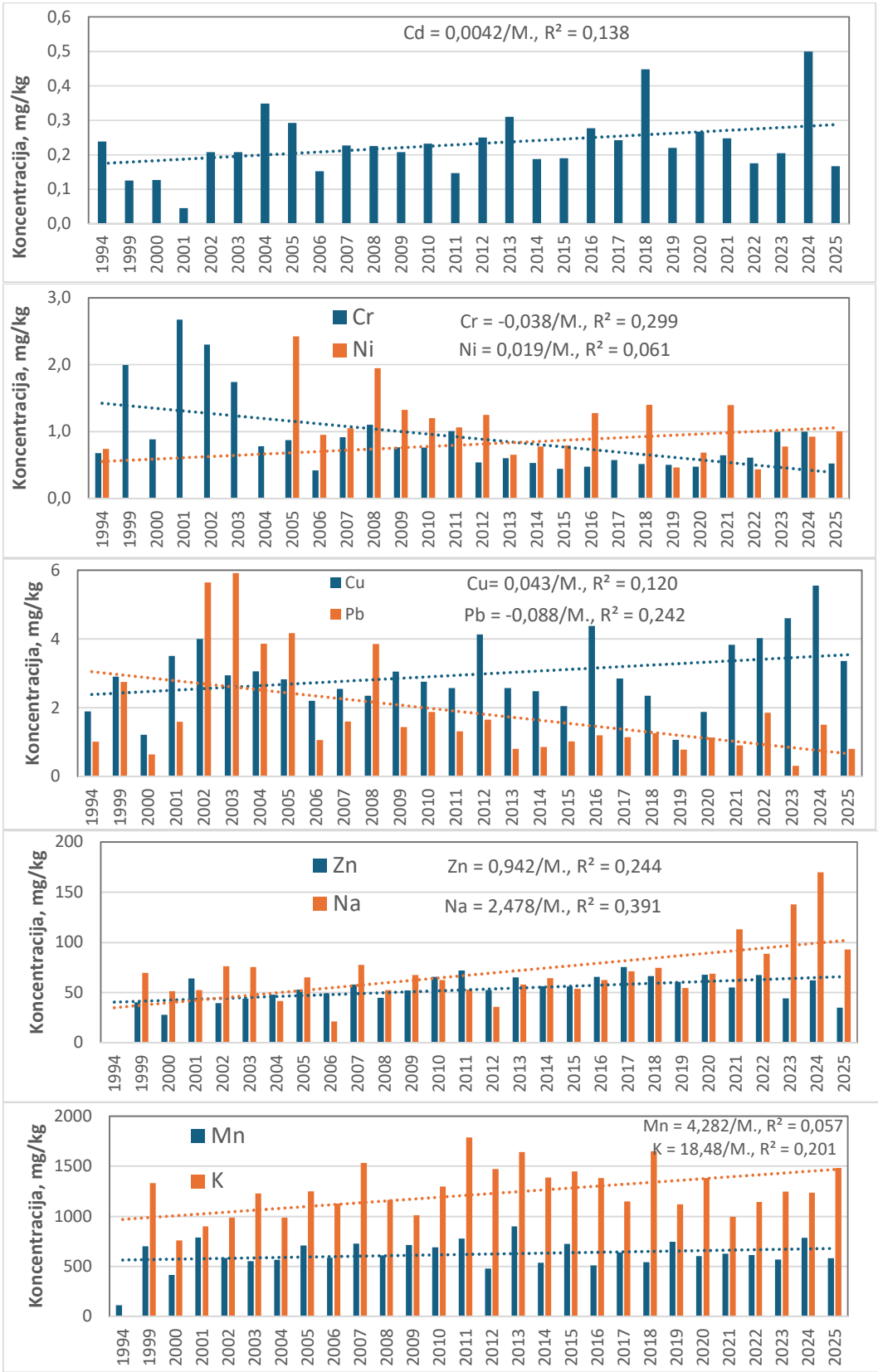
Zn ir Mn koncentracijų sekose reikšmingos kaitos nenustatyta.

Išskirtiniai 2021-2024 m. tyrimo rezultatai. Šiuo laikotarpi reikšmingai padidėjo Na, Cu Cd koncentracijos nuokritose.



8.8 pav. Metalų koncentracijų nuokritose sezoninė dinamika Aukštaitijos KMS 1994-2025 m.

8.9 pav. Metalų koncentracijų srautų su nuokritomis sezoninė dinamika Aukštaitijos KMS 1994-2025m.



8.10 pav. Metalų metinių koncentracijų nuokritose kaita Aukštaitijos KMS 1994-2025 m.

8.4 lentelė. Sunkiųjų metalų koncentracijų nuokritose ir jų srautų į paklotę kaitos intensyvumas (kaita per m.) ir reikšmingumas (p) Aukštaitijos KMS

	AKMS	m.v.	Mean	Std.Dv.	r(X,Y)	r^2	t	p	Kaita per m.
Cu	Koncentr	mg/kg	2.677	0.819	-0.085	0.007	-0.391	0.700	-0.010
Cu	Srautas	g/m^2	1.017	0.388	0.238	0.057	1.121	0.275	0.013
Pb	Koncentr	mg/kg	2.026	1.562	-0.417	0.174	-2.104	0.048	-0.092
Pb	Srautas	g/m^2	0.730	0.592	-0.281	0.079	-1.341	0.194	-0.023
Cd	Koncentr	mg/kg	0.225	0.082	0.423	0.179	2.141	0.044	0.005
Cd	Srautas	g/m^2	0.088	0.041	0.605	0.365	3.478	0.002	0.003
Cr	Koncentr	mg/kg	0.937	0.628	-0.598	0.358	-3.419	0.003	-0.053
Cr	Srautas	g/m^2	0.337	0.192	-0.449	0.202	-2.303	0.032	-0.012
Zn	Koncentr	mg/kg	54.97	12.06	0.744	0.554	5.104	0.000	1.261
Zn	Srautas	g/m^2	22.10	9.233	0.791	0.626	5.927	0.000	1.026
Na	Koncentr	mg/kg	59.95	13.92	0.012	0.000	0.056	0.956	0.024
Na	Srautas	g/m^2	22.79	8.843	0.572	0.327	3.195	0.004	0.710
Ni									
Ni									

Sunkiųjų metalų srautai su nuokritomis Aukštaitijos KMS teritorijoje

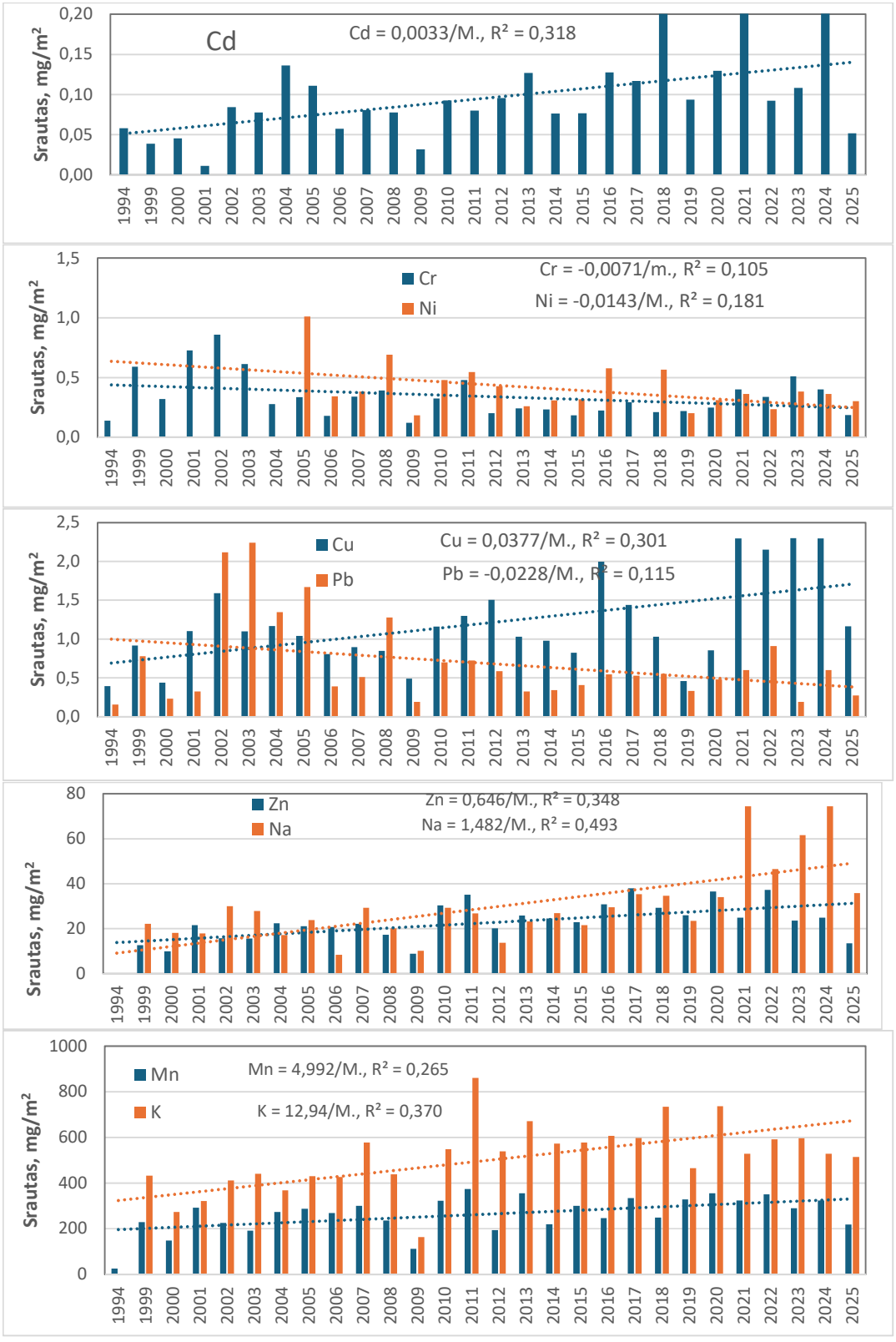
Išanalizavus Aukštaitijos KMS nuokritų cheminę sudėtį, toliau tyrėme tirtų metalų srautus su nuokritomis į dirvožemio paklotę. Gauti rezultatai pateikti 8.10 paveiksle. Iš pateiktų duomenų matyti aiškus tik tokių tirtų metalų, kaip Pb, Mn, Na ir K srautų su nuokritomis sezoniškumas, kurio pobūdis analogiškas šių metalų koncentracijų nuokritose sezoniškumui. Likusių metalų sezoniškumo kaita nėra statistiškai reikšminga ($p>0,05$).

Metinių metalų srautų su nuokritomis analizė parodė, kad metalų srautai kito analogiškai jų koncentracijoms nuokritose, o padidėjęs nuokritų kiekis neturėjo reikšmingesnės įtakos šių metalų srautų tendencijai. Reikšmingai didėjo Cd, Cu, Na ir K srautai su nuokritomis. Didėjimo tendencija nustatyta ir Mn ir Zn srautuose, ypač nuo 2021 m. Cr, Ni ir Pb srautai, kurių kaitoje tyrimų pradžioje buvo aiški didėjimo tendencija, pradėjo demonstruoti tendenciją mažėti, ypač Pb srautas, nors 2022 ir 2024 m. registruotas nedidelis koncentracijos padidėjimas.

1994-2025 m. laikotarpio rezultatus, nustatyta, kad tyrimų pradžioje sunkiųjų metalų srautus su nuokritomis sąlygojo nuokritų kiekis, tai paskutiniaisiais, išskirtiniais 2019 m., srautus į miško ekosistemą sąlygojo sunkiųjų metalų koncentracijos nuokritose.

Per tiriamąjį laikotarpį reikšmingai didėjo Cd srautas su nuokritomis – po 0,003 mg/m² per m., Na – po 1,5 mg/m² per m., Na – po 1,5 mg/m² per m. ir reikšmingiausiai Cu – po 0,04 mg/m² per m. ir K – po 13 mg/m² per m.

Per tiriamąjį laikotarpį reikšmingiausiai mažėjo tik Cr srautas, po -0,007 g/m² per m. Ir Pb po 0,023 mg/m² per m.



8.11 pav. Metiniai metalų srautai su nuokritomis Aukštaitijos KMS 1994-2025 m.

Aukštaitijos KMS ilgalaikė (1994–2025 m.) sunkiųjų metalų koncentracijų ir jų srautų su nuokritomis analizė parodė, kad miško paklotę pasiekiantys metalų srautai pasižymi nevienakryptėmis kaitos tendencijomis. Ryškiausias teigiamas pokytis yra nuoseklus Pb ir Cr koncentracijų bei jų srautų mažėjimas, rodantis ilgalaikį atmosferinės šių elementų taršos silpnėjimą ir mažėjančią jų akumuliaciją miško ekosistemoje. Tuo tarpu reikšmingai didėjantys Cu, Cd, Na ir K koncentracijų bei srautų rodikliai rodo, kad šių elementų biogeocheminis ciklas pastaraisiais dešimtmečiais intensyvėja. Ypač išsiskyrė 2021–2024 m. laikotarpis, kai reikšmingai padidėjo Cu, Cd ir Na koncentracijos nuokritose bei jų srautai į miško paklotę. Kartu nustatyta, kad tyrimų pradžioje metinius metalų srautus daugiausia lėmė nuokritų kiekis, o pastaraisiais metais jų kaitą vis labiau pradėjo reguliuoti pačių metalų koncentracijos nuokritose. Tai rodo, kad atmosferinės depozicijos kokybiniai pokyčiai tampa svarbesniu veiksniu negu nuokritų masė. Nors bendrų sisteminių grėsmių miško ekosistemai nenustatyta, ilgalaikis Cu ir Cd koncentracijų bei jų srautų didėjimas rodo būtinybę toliau stebėti šių elementų kaupimąsi miško paklotėje ir galimą jų poveikį dirvožemio biogeocheminiams procesams bei miško ekosistemų biologinei būklei.

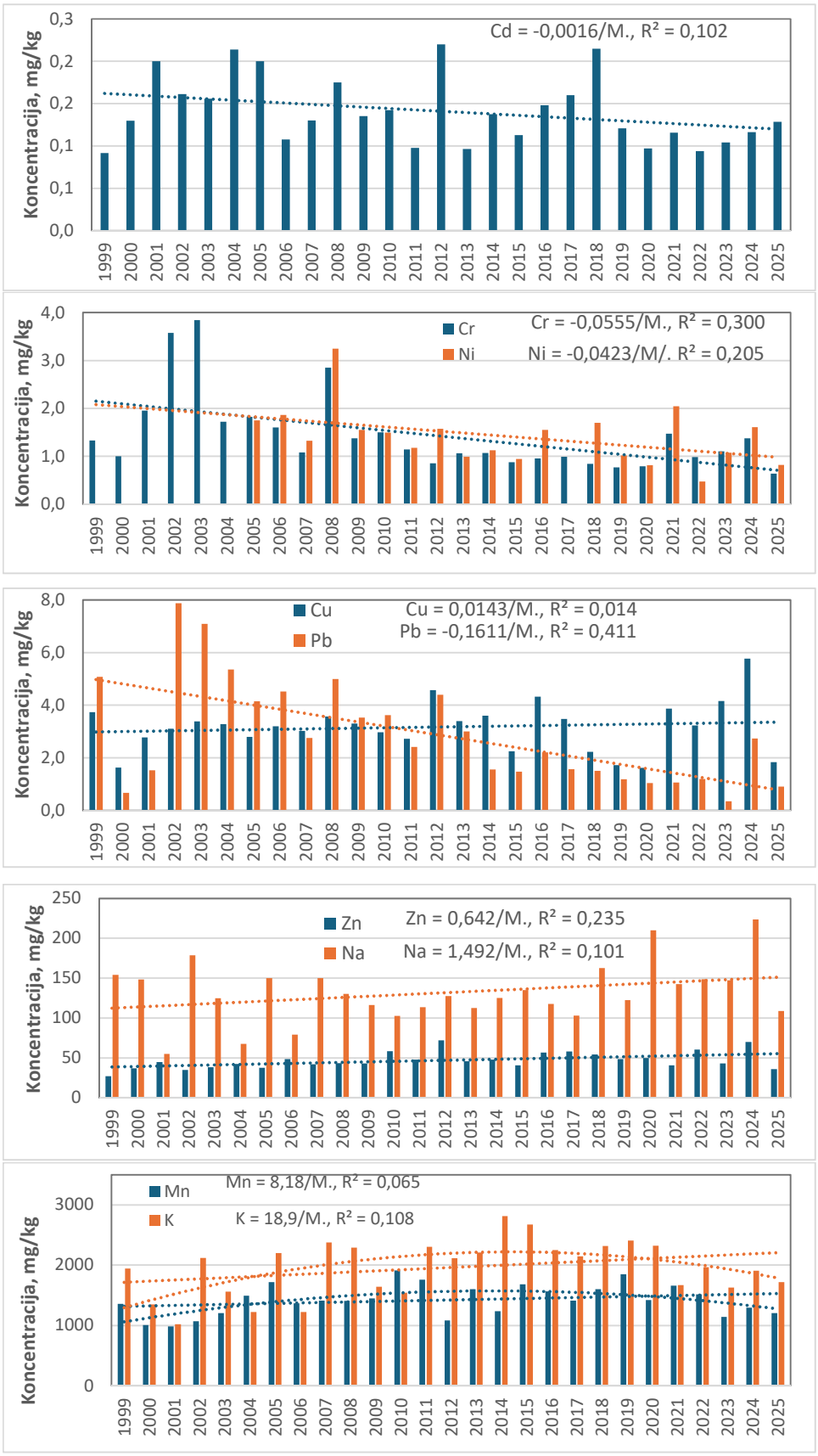
8.3.2. Metalų koncentracijų nuokritose sezoninė kaita ir jų srautai Žemaitijos KMS

Analizuojant Žemaitijos KMS nuokritų cheminę sudėtį, statistiškai reikšmingos ($p<0,05$) sezoniškumo įtakos, tokios kaip Aukštaitijos KMS, tirtų metalų koncentracijoms nustatyti nepavyko. Metinių koncentracijų kitimas 1999-2025m. laikotarpiu analizė rodo, st**abilios jau daugelį metų išlieka Cu, Zn koncentracijos nuokritose.** Mažėjimo tendencija stebima Cd, Cr, Ni ir Pb koncentracijose, o didėja Na. Išskirtinės Mn ir K koncentracijų nuokritose kaitos: iki 2014-2015 m. šių elementų koncentracijos turėjo pakankamai aiškią tendenciją didėti, po šio laikotarpio iki 2025 m. turi tendenciją mažėti.

2020 m. praktiškai visų tirtų sunkiųjų metalų koncentracijos Žemaitijos KMS sumažėjo lyginant su praėjusiais metais, o Cd, Cr, Ni, Cu ir Pb buvo vienos iš mažiausių per visą tiriamąjį laikotarpį. Išskirtinė padėtis susiformavo Na koncentracijų nuokritose sekoje – 2020 m. nustatyta rekordiškai didelė šio elemento koncentracija, kuri siekė net 210 mg/kg. Tai Baltijos jūros ir vyraujančių Vakarų krypties vėjų poveikio rezultatas.

2021-2025 m. išsiskyrė padidėjusiomis koncentracijomis Na ir Cu

.



8.12 pav. Metalų metinių koncentracijų nuokritose kaita Žemaitijos KMS 1999-2025m.

8.13 pav. Metalų koncentracijų nuokritose sezoninė dinamika 1999-2025 m.

8.14 pav. Metalų koncentracijų srautų su nuokritomis sezoninė dinamika 1999-2025 m.

8.5 lentelė. Sunkiųjų metalų koncentracijų nuokritose ir jų srautų į paklotę kaitos intensyvumas (kaita per m.) ir reikšmingumas (p) Žemaitijos KMS

	ZKMS	m.v.	Vidut.	Std.Dv.	r(X,Y)	r^2	t	p	Slope
Cu	Koncentr	mg/kg	3.032	0.785	-0.150	0.022	-0.678	0.506	-0.018
Cu	Srautas	g/m^2	1.512	0.504	-0.047	0.002	-0.208	0.837	-0.004
Pb	Koncentr	mg/kg	3.251	1.999	-0.569	0.323	-3.092	0.006	-0.175
Pb	Srautas	g/m^2	1.742	1.374	-0.473	0.224	-2.403	0.026	-0.100
Cd	Koncentr	mg/kg	0.148	0.041	-0.128	0.016	-0.577	0.571	-0.001
Cd	Srautas	g/m^2	0.078	0.031	0.029	0.001	0.131	0.897	0.000
Cr	Koncentr	mg/kg	1.500	0.867	-0.579	0.336	-3.178	0.005	-0.077
Cr	Srautas	g/m^2	0.772	0.475	-0.462	0.213	-2.329	0.030	-0.034
Zn	Koncentr	mg/kg	46.13	9.701	0.639	0.408	3.710	0.001	0.954
Zn	Srautas	g/m^2	23.66	7.912	0.638	0.407	3.705	0.001	0.777
Na	Koncentr	mg/kg	126.6	35.189	0.193	0.037	0.879	0.390	1.046
Na	Srautas	g/m^2	70.54	33.99	0.245	0.060	1.132	0.271	1.284

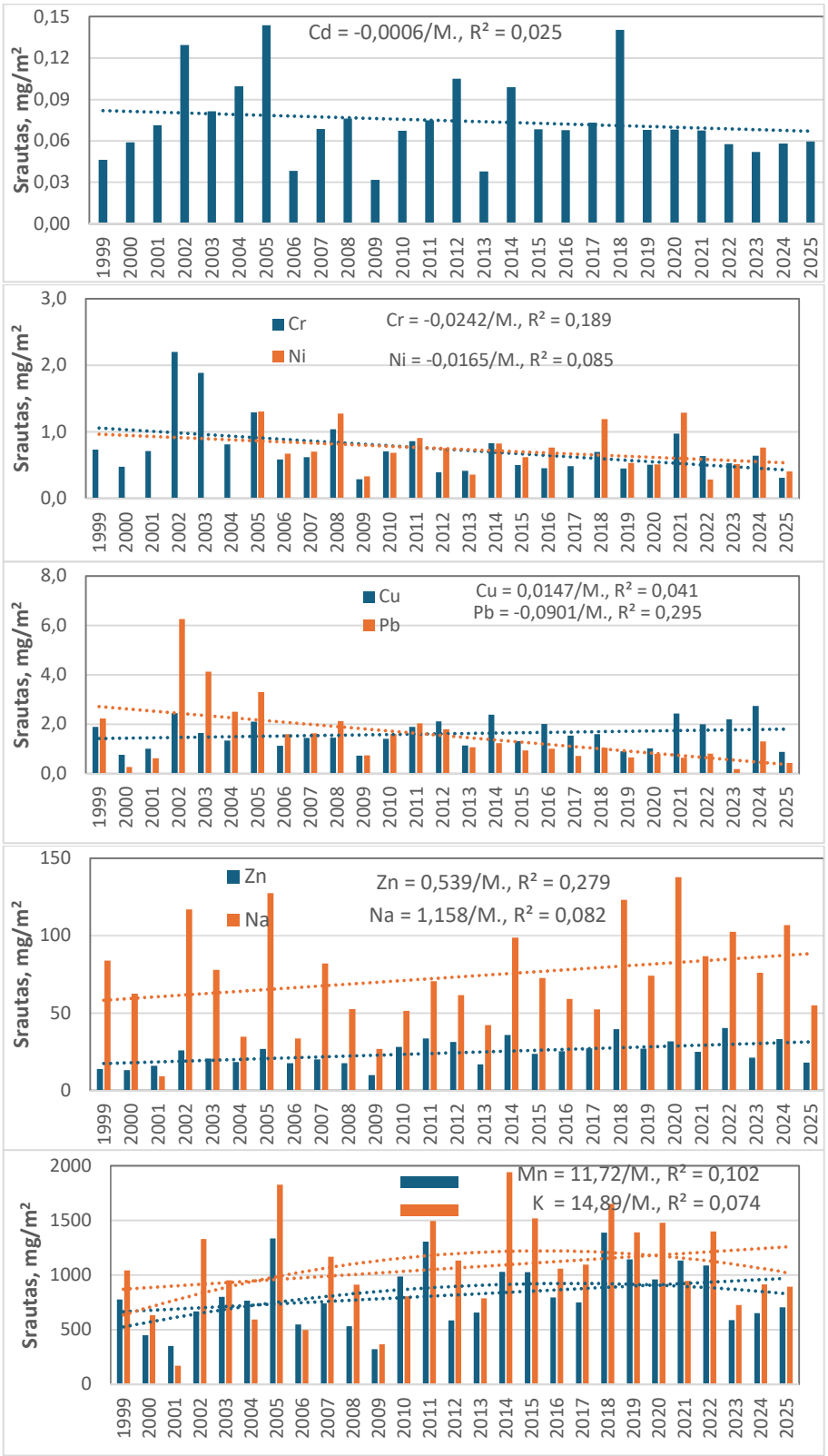
Metalų srautų dirvožemį su nuokritomis kaita Žemaitijos KMS

Metalų srautų su nuokritomis sezoninės dinamikos analizė rodo, kad sezoniškumas turėjo reikšmingos įtakos metalų srautams su nuokritomis. Daugelio tirtų elementų didžiausi srautai užfiksuoti žiemos (I) ir kiek mažesni – pavasario laikotarpiais (II). Išsiskyrė tik mažiausių srautų laikotarpiai: jei švino mažiausias srautas buvo registruojamas rudens laikotarpiu, tai likusių metalų – vasaros (III) laikotarpiu. Pagrindinis veiksnys lėmęs tokį tirtų metalų sezoniškumą buvo nuokritų kiekio sezoniškumas, o ne metalų koncentracijos jose.

Metinių tirtų metalų srautų su nuokritomis analizė parodė, kad dėl didelių nuokritų kiekio 2002 m., 2005, 2018 m., tirtų metalų srautai į ploto vienetą Žemaitijos KMS teritorijoje buvo didžiausi.

Tiriamuoju laikotarpiu sumažėjęs nuokritų kiekis sąlygojo ir sumažėjusį sunkiųjų metalų srautą su nuokritomis į miško paklotę. Daugiametė rezultatų analizė rodo, kad sunkiųjų metalų srautus didžiąja dalimi lemia ir nuokritų kiekis, kuris 1,5 k yra didesnis negu Aukštaitijos KMS, ir sunkiųjų metalų koncentracijos nuokritose.

2020 m. dėl padidėjusio nuokritų kiekio, tirtų metalų srautai su nuokritomis buvo artimi paskutiniųjų kelerių metų vidurkiui.



8.15 pav. Metalų metinių srautų su nuokritomis kaita Žemaitijos KMS 1999-2025m.

Per visą tiriamąjį laikotarpį stebima Cr ir Pb srautų mažėjimo tendencija, kurią reikšmingai sąlygojo šių elementų koncentracijų sumažėjimas: Pb srautas mažėja po 0,09 mg/m^2, o Cr – po -0,024 mg/m^2 per m. Mažėja ir Ni srautas su nuokritomis, po 0,016 mg/m^2 per m. Stabilus išlieka Cu ir Zn srautas, o besikeičiantis srautas nustatytas Mn ir k, tik didėjimo tendencija šių metalų srautų tęsėsi iki 2018 m., o paskutiniaisiais metais pakankamai ženkliai koncentracijos pradėjo mažėti.

Žemaitijos KMS ilgalaikė (1999–2025 m.) sunkiųjų metalų koncentracijų ir jų srautų su nuokritomis analizė parodė, kad Žemaitijos KMS metalo srautų formavimą daugiausia lemia nuokritų kiekis, kuris dėl drėgnesnio regiono klimato yra apie 1,5 karto didesnis negu Aukštaitijos KMS, o tik po to – metalų koncentracijos nuokritose. Ryškiausias teigiamas pokytis nustatytas Pb, Cr ir Ni koncentracijų bei jų srautų mažėjime, rodant ilgalaikį šių elementų atmosferinės taršos silpnėjimą. Tuo tarpu Cu ir Zn koncentracijos bei jų srautai išliko stabilūs, o Mn ir K pasižymėjo cikline kaita – jų koncentracijos ir srautai didėjo iki 2014–2018 m., tačiau vėlesniu laikotarpiu pradėjo mažėti. Išskirtinis 2020 m. bruožas buvo rekordiškai didelė Na koncentracija nuokritose, kurią greičiausiai nulėmė Baltijos jūros aerozolių pernaša vyraujančiais vakarų vėjais, o 2021–2025 m. laikotarpiu išsiskyrė padidėjusios Na ir Cu koncentracijos. Gauti rezultatai rodo, kad Žemaitijos KMS sunkiųjų metalų patekimas į miško paklotę pirmiausia priklauso nuo regiono hidrometeorologinių sąlygų ir nuokritų kiekio, todėl šioje teritorijoje klimato veiksniai turi didesnę reikšmę metalų biogeocheminiams ciklams negu trumpalaikiai atmosferinės taršos svyravimai. Nors bendrų naujų grėsmių miško ekosistemai nenustatyta, būtina tęsti Na ir Cu kaitos stebėseną, nes jų padidėjimas pastaraisiais metais gali rodyti besikeičiančius atmosferinės pernašos procesus ir klimato sąlygų poveikį medžiagų apytakai miško ekosistemoje.

8.3.3. Aukštaitijos ir Žemaitijos KMS sunkiųjų metalų koncentracijų palyginimas lapijoje ir nuokritose bei jų srautai

Lyginamoji žaliosios lapijos ir nuokritų cheminių rodiklių analizė parodė, kad šie du miško ekosistemos komponentai atspindi skirtingus sunkiųjų metalų biogeocheminio ciklo etapus. Lapija pirmiausia atspindi medžių fiziologinius procesus – elementų pasisavinimą iš dirvožemio, jų transportavimą ir transformaciją, tuo tarpu nuokritos integruoja tiek atmosferinės iškritas, tiek medžių metabolizmo procesus ir sudaro pagrindinį sunkiųjų metalų grįžimo į miško paklotę srautą.

Abiejose KM stotyse nustatyta, kad sunkiųjų metalų koncentracijų kaita žaliojoje lapijoje daugeliu atvejų nesutapo su jų koncentracijų bei srautų pokyčiais atmosferinėse iškritose. Net ir didėjant kai kurių elementų, ypač Cu, koncentracijoms krituliuose bei jų srautams į miško ekosistemą,

šių elementų koncentracijos lapijoje dažniausiai nekito arba net mažėjo. Tai rodo, kad medžiai efektyviai reguliuoja potencialiai toksiškų elementų patekimą į asimiliacinius audinius ir palaiko jų koncentracijas fiziologiškai optimaliame lygyje.

Priešingai, nuokritose nustatyti pokyčiai daug geriau atspindėjo ilgalaikius metalų srautus į dirvožemio paklotę. Aukštaitijos KMS pastaraisiais metais metinius metalų srautus vis labiau pradėjo lemti pačių metalų koncentracijos nuokritose, o Žemaitijos KMS svarbiausiu reguliuojančiu veiksniu išliko didesnis nuokritų kiekis, susijęs su drėgnesnėmis regiono klimato sąlygomis. Tai rodo, kad rytinėje Lietuvos dalyje didesnę reikšmę įgauna atmosferinės depozicijos kokybiniai pokyčiai, o vakarinėje – hidrometeorologinės sąlygos.

Abiejose stotyse nustatytas ilgalaikis Pb koncentracijų mažėjimas buvo nuoseklus visuose tirtuose ekosistemos komponentuose – krituliuose, žaliojoje lapijoje ir nuokritose. Tai patvirtina, kad šis elementas yra jautriausias ilgalaikės atmosferinės taršos pokyčių indikatorius. Tuo tarpu kitų metalų, ypač Cu, Zn, Cd ir Na, kaita atskiruose ekosistemos komponentuose buvo nevienoda, rodanti, kad jų biogeocheminius ciklus reguliuoja ne vien atmosferinė depozicija, bet ir dirvožemio cheminės savybės, biologinis prieinamumas, medžių fiziologija bei klimato sąlygos.

Gauti rezultatai leidžia teigti, kad žalioji lapija ir nuokritos papildo viena kitą vertinant miško ekosistemų būklę. Žalioji lapija geriau apibūdina medžių fiziologinį atsaką į ilgalaikius aplinkos pokyčius, o nuokritos tiksliau atspindi bendrą potencialiai toksiškų elementų apytaką tarp atmosferos, augalijos ir dirvožemio. Todėl tik kompleksinis šių dviejų komponentų vertinimas leidžia patikimai įvertinti sunkiųjų metalų biogeocheminius ciklus, nustatyti jų reguliavimo mechanizmus ir prognozuoti galimus ilgalaikius pokyčius hemiborealinių miško ekosistemų funkcionavime.

IŠVADOS

1. Aukštaitijos KMS reikšmingiausiai didėjo Cd koncentracija nuokritose – po 0,004 mg/kg, Zn – po 0,94 mg/kg per m., Cu – po 0,043 ng/kg per m., Na – po 2,5 mg/kg per m. ir K – po 4,3 mg/kg per m. Reikšminga ir mažėjimo tendencija nustatyta Pb – po -0,09 mg/kg per m. ir Cr po -0,04 mg/kg per m. Zn ir Mn koncentracijų sekose reikšmingos kaitos nenustatyta. Išskirtiniai 2021-2024 m. tyrimo rezultatai. Šiuo laikotarpi reikšmingai padidėjo Na, Cu Cd koncentracijos nuokritose
2. 1994-2025 m. laikotarpiu nustatyta, kad tyrimų pradžioje sunkiųjų metalų srautus su nuokritomis sąlygojo nuokritų kiekis, tai paskutiniaisiais metalų koncentracijos nuokritose. Reikšmingai didėjo Cd srautas su nuokritomis – po 0,003 mg/m^2 per m., Na – po 1,5 mg/m^2 per m., Na – po 1,5 mg/m^2 per m. ir reikšmingiausiai Cu – po 0,04 mg/m^2 ir K – po 13 mg/m^2 per m. Per tiriamąjį laikotarpį reikšmingiausiai mažėjo tik Cr srautas, po -0,007 g/m^2 per m. bei Pb po 0,023 mg/m^2 per m.

3. Aukštaitijos KMS reikšmingiausiai mažėjo Pb ir Cr koncentracijos bei jų srautai su nuokritomis, rodydami ilgalaikį šių elementų atmosferinės taršos mažėjimą. Tuo pat metu reikšmingai didėjo Cd, Cu, Na ir K koncentracijos bei jų srautai, o ypač ryškus Cu ir Na padidėjimas nustatytas 2021–2024 m. laikotarpiu.
4. ***Daugiametė rezultatų analizė rodo, kad sunkiųjų metalų srautus didžiąja dalimi lemia ir nuokritų kiekis, kuris 1,5 k yra didesnis negu Aukštaitijos KMS, ir sunkiųjų metalų koncentracijos nuokritose.***
5. Žemaitijos KMS st**abilios jau daugelį metų išlieka Cu, Zn koncentracijos nuokritose.** Mažėjimo tendencija stebima Cd, Cr, Ni ir Pb koncentracijose, o didėja Na. Išskirtinės Mn ir K koncentracijų nuokritose kaitos: iki 2014-2015 m. šių elementų koncentracijos turėjo pakankamai aiškią tendenciją didėti, po šio laikotarpio iki 2025 m. turi tendenciją mažėti. ***2021-2025 m. išsiskyrė padidėjusiomis koncentracijomis Na ir Cu.***
6. Per tiriamąjį laikotarpį Pb srautas mažėja po 0,09 mg/m^2, o Cr – po -0,024 mg/m^2 per m. Mažėja ir Ni srautas su nuokritomis, po 0,016 mg/m^2 per m. Stabilus išlieka Cu ir Zn srautas, o besikeičiantis srautas nustatytas Mn ir k, tik didėjimo tendencija šių metalų srautų tęsėsi iki 2018 m., o paskutiniaisiais metais pakankamai ženkliai koncentracijos pradėjo mažėti.
7. Žemaitijos KMS ilgalaikėje perspektyvoje taip pat nustatytas reikšmingas Pb, Cr ir Ni koncentracijų bei jų srautų mažėjimas, tuo tarpu Cu ir Zn išliko stabilūs, o Mn ir K pasižymėjo cikline kaita – didėjimo tendencija iki 2014–2018 m., kuri vėliau pasikeitė į mažėjimą.
8. Nustatyta, kad Aukštaitijos KMS pastaraisiais metais metinius metalų srautus vis labiau lėmė pačių metalų koncentracijos nuokritose, tuo tarpu Žemaitijos KMS pagrindiniu reguliuojančiu veiksniu išliko didesnis nuokritų kiekis, susijęs su drėgnesnėmis regiono klimato sąlygomis.
9. Abiejose KM stotyse Pb ir Cr koncentracijų bei jų srautų mažėjimas patvirtina nuoseklų šių elementų atmosferinės taršos silpnėjimą, o padidėjusios Cu ir Na koncentracijos rodo galimus atmosferinės depozicijos sudėties pokyčius, kurių kilmė turėtų būti toliau tiriama.
10. 2021–2025 m. laikotarpiu nenustatyta tokių sunkiųjų metalų koncentracijų ar jų srautų su nuokritomis pokyčių, kurie rodytų naujų sisteminių grėsmių miško ekosistemoms atsiradimą. Vis dėlto ilgalaikė Cu, Cd ir Na kaitos stebėsena išlieka svarbi vertinant galimus klimato kaitos ir atmosferinės pernašos pokyčių padarinius miško ekosistemų biogeocheminiams procesams.
11. Gauti rezultatai rodo, kad nuokritos yra vienas jautriausių ilgalaikio kompleksinio monitoringo komponentų, leidžiančių vertinti ne tik atmosferinės taršos pokyčius, bet ir medžiagų apytakos intensyvumą tarp medžių lajų, miško paklotės ir dirvožemio, todėl jų cheminės sudėties ir metalų srautų stebėsena yra būtina vertinant ilgalaikį miško ekosistemų stabilumą.

Bendrosios lapijos ir nuokritų tyrimų išvados

1. Ilgalaikiai (1994–2025 m.) žaliosios lapijos ir nuokritų tyrimai parodė, kad šie miško ekosistemos komponentai atspindi skirtingus sunkiųjų metalų biogeocheminio ciklo etapus. Žalioji lapija pirmiausia atspindi medžių fiziologinius procesus – elementų pasisavinimą, selektyvų transportą, retranslokaciją ir jų vidinę reguliaciją, tuo tarpu nuokritos integruoja atmosferinės depozicijos, medžių metabolizmo ir medžiagų grįžimo į dirvožemį procesus.
2. Nustatyta, kad sunkiųjų metalų koncentracijų kaita žaliojoje lapijoje daugeliu atvejų nesutampa su jų koncentracijų ir srautų pokyčiais atmosferinėse iškritose bei nuokritose. Net didėjant kai kurių elementų, ypač Cu, koncentracijoms ir srautams į miško ekosistemą, jų koncentracijos lapijoje dažniausiai nekito arba mažėjo. Tai rodo, kad atmosferinė depozicija nėra pagrindinis veiksnys, lemiantis sunkiųjų metalų kaupimąsi asimiliaciniuose audiniuose.
3. Abiejose KM stotyse nustatytas nuoseklus Pb koncentracijų mažėjimas krituliuose, žaliojoje lapijoje ir nuokritose patvirtina, kad šis elementas yra jautriausias ilgalaikių atmosferinės taršos pokyčių indikatorius. Tuo tarpu Cu, Zn, Cd, Na ir kitų elementų kaita atskiruose ekosistemos komponentuose buvo nevienoda, rodanti sudėtingą jų biogeocheminę reguliaciją.
4. Aukštaitijos ir Žemaitijos KMS palyginimas parodė, kad medžių biogeocheminiai procesai abiejose stotyse yra panašūs, tačiau metalų grįžimo į dirvožemį intensyvumą reguliuoja skirtingi veiksniai. Aukštaitijos KMS didesnę reikšmę turi metalų koncentracijų pokyčiai nuokritose, o Žemaitijos KMS – didesnis nuokritų kiekis, susijęs su drėgnesniu regiono klimatu.
5. Gauti rezultatai rodo, kad medžiai nėra pasyvūs atmosferinės taršos akumuliatoriai. Jie aktyviai reguliuoja potencialiai toksiškų elementų patekimą į asimiliacinius audinius, jų vidinį persiskirstymą ir grąžinimą į miško paklotę su nuokritomis. Todėl ilgalaikiai žaliosios lapijos ir nuokritų tyrimai leidžia vertinti ne tik atmosferinės taršos pokyčius, bet ir medžių fiziologinį prisitaikymą prie kintančių aplinkos sąlygų.
6. Kompleksinis žaliosios lapijos ir nuokritų vertinimas parodė, kad sunkiųjų metalų biogeocheminius ciklus hemiborealiniuose miškuose reguliuoja ne vien atmosferinė depozicija, bet ir dirvožemio cheminės savybės, elementų biologinis prieinamumas, medžių fiziologiniai procesai bei klimato sąlygos. Todėl tik integruota atmosferinių iškritų, žaliosios lapijos, nuokritų, dirvožemio ir vandens cheminės sudėties analizė leidžia patikimai įvertinti ilgalaikius medžiagų apytakos pokyčius bei jų reikšmę miško ekosistemų stabilumui.

Galimos grėsmės miško ekosistemoms

Ilgalaikiai žaliosios lapijos ir nuokritų tyrimai parodė, kad šiuo metu Lietuvos hemiborealiniuose miškuose nėra požymių, rodančių sistemingą sunkiųjų metalų kaupimąsi medžių asimiliaciniuose audiniuose ar staigų jų patekimo į miško paklotę didėjimą, kuris galėtų kelti tiesioginę grėsmę miško ekosistemų stabilumui. Priešingai, nuoseklus Pb ir Cr koncentracijų bei jų srautų mažėjimas patvirtina ilgalaikį atmosferinės šių elementų taršos mažėjimą.

Tačiau pastaraisiais metais nustatytas Cu, Cd ir Na koncentracijų bei jų srautų didėjimas, ypač Aukštaitijos kompleksinio monitoringo stotyje, rodo, kad keičiasi kai kurių elementų biogeocheminiai ciklai. Nors šie pokyčiai kol kas neatsispindi padidėjusiose metalų koncentracijose žaliojoje lapijoje, ilgalaikis jų kaupimasis miško paklotėje gali didinti šių elementų atsargas dirvožemyje ir sudaryti prielaidas jų didesniam biologiniam prieinamumui ateityje.

Papildomą riziką gali kelti klimato kaitos sąlygomis dažnėjantys ekstremalūs meteorologiniai reiškiniai – ilgalaikės sausros, intensyvūs krituliai ir užmirkimo periodai. Tokios sąlygos gali keisti dirvožemio rūgštingumą, oksidacijos–redukcijos procesus, organinės anglies dinamiką ir potencialiai toksiškų elementų judrumą, todėl net ir istoriškai sukaupti metalai gali tapti lengviau prieinami augalams ir dirvožemio organizmams.

Todėl didžiausia galima grėsmė ateityje yra ne dabartinis atmosferinės taršos lygis, bet klimato kaitos sąlygomis galintis keistis jau sukauptų potencialiai toksiškų elementų judrumas bei jų įsijungimas į aktyvius miško ekosistemų biogeocheminius ciklus. Dėl šios priežasties sunkiųjų metalų stebėsena turėtų būti tęsiama kartu su dirvožemio cheminės būklės, organinės anglies, medžių mitybos ir biologinių komponentų monitoringu.

Prognozės

Jeigu išliks dabartinės atmosferos taršos mažėjimo tendencijos, artimiausiais dešimtmečiais tikėtinas tolesnis Pb ir Cr koncentracijų bei jų srautų mažėjimas miško ekosistemose. Tuo pačiu tikėtina, kad Cu, Na ir kai kurių kitų elementų biogeocheminius ciklus vis labiau reguliuos ne tiesioginė atmosferinė tarša, o klimato kaitos sąlygoti hidrologinio režimo, dirvožemio cheminių savybių ir medžiagų apytakos pokyčiai. Todėl ateityje didžiausią reikšmę įgis kompleksinis atmosferinių iškritų, žaliosios lapijos, nuokritų, dirvožemio ir dirvožemio vandens monitoringas, leidžiantis anksti nustatyti potencialiai toksiškų elementų biologinio prieinamumo bei jų biogeocheminių ciklų pokyčius ir laiku įvertinti galimą poveikį miško ekosistemų stabilumui.

8.4. Sunkiųjų metalų koncentracijos dirvožemio, gruntiniame ir upelio-paviršiniame vandenyje bei jų srautai. .

Miško ekosistemose esantys sunkieji metalai gali būti pernešami ne tik per augmeniją ir nuokritas, bet ir per dirvožemio vandenį, gruntinius vandenis bei paviršinius nuotėkius. Šie hidrologiniai keliai atlieka svarbų vaidmenį perskirstant teršalus ir daro didelę įtaką maistinių medžiagų ciklui, dirvožemio chemijai ir vandens kokybei miško ekosistemose. Metalų mobilumas miško dirvožemyje priklauso nuo daugelio aplinkos veiksnių, įskaitant dirvožemio pH, organinių medžiagų kiekį, redokso sąlygas, dirvožemio tekstūrą ir klimato sąlygas (Kabata-Pendias, 2011).

Dirvožemio vanduo yra dinamiškas miško ekosistemų komponentas ir veikia kaip pagrindinė terpė, pernešanti ištirpusius metalus per dirvožemio profilius. Sunkieji metalai, išsiskiriantys dėl atmosferinių nuosėdų, irstančio nuokritų ar mineralinių sąlygų, gali patekti į dirvožemio tirpalą ir tapti prieinami augalams pasisavinti arba išplauti į gilesnius horizontus. Padidėjusi toksiškų metalų koncentracija dirvožemio vandenyje gali neigiamai paveikti šaknų sistemas, pedobiontų bendrijasdirvožemyje, makrobentoso gausa upelyje bei mikorizinius grybus miške, galiausiai sumažindama maistinių medžiagų įsisavinimo efektyvumą ir miško produktyvumą (Giller ir kt., 1998).

Požeminio vandens užterštumas sunkiaisiais metalais kelia ypatingą susirūpinimą aplinkai, nes požeminis vanduo yra svarbus gėlo vandens išteklius ir gali atspindėti ilgalaikius kaupimosi procesus miško baseinuose. Metalai, tokie kaip kadmis, švinas, nikelis ir chromas, gali migruoti iš viršutinių dirvožemio horizontų į požeminį vandenį esant rūgščioms sąlygoms arba kai metalų sulaikymo gebėjimas dirvožemyje yra ribotas. Todėl miško ekosistemos, ilgainiui gali sąlygoti ir požeminio vandens užteršimo laipsnį ir bendrą jo kokybę (Alloway, 2013).

Paviršinis nuotėkis yra dar vienas svarbus sunkiųjų metalų transportavimo kelias, ypač intensyvaus lietaus ar sniego tirpimo laikotarpiais. Miško paklotėje ir viršutiniuose dirvožemio sluoksniuose susikaupę metalai gali būti mobilizuojami ir perkeliami į upelius, upes ir vandens ekosistemas. Su nuotėkiu susijęs transportas gali padidėti pažeistuose miškuose, paveiktuose intensyvaus pažeidimo, tokio kaip kenkėjų, dirvožemio erozijos, miškų gaisrų ar ekstremalių klimato reiškinių. Tokie procesai gali sukelti antrinę gėlo vandens ekosistemų taršą ir neigiamai paveikti vandens organizmus bei biologinę įvairovę.

Sunkiųjų metalų kiekio dirvožemio vandenyje, požeminiame vandenyje ir paviršinio nuotėkio stebėjimas yra būtinas norint suprasti teršalų srautus ir ekologinę riziką miško ekosistemose. Ilgalaikiai tyrimai Europos miškų baseinuose parodė didelius gyvsidabrio, švino, kadmio, vario ir

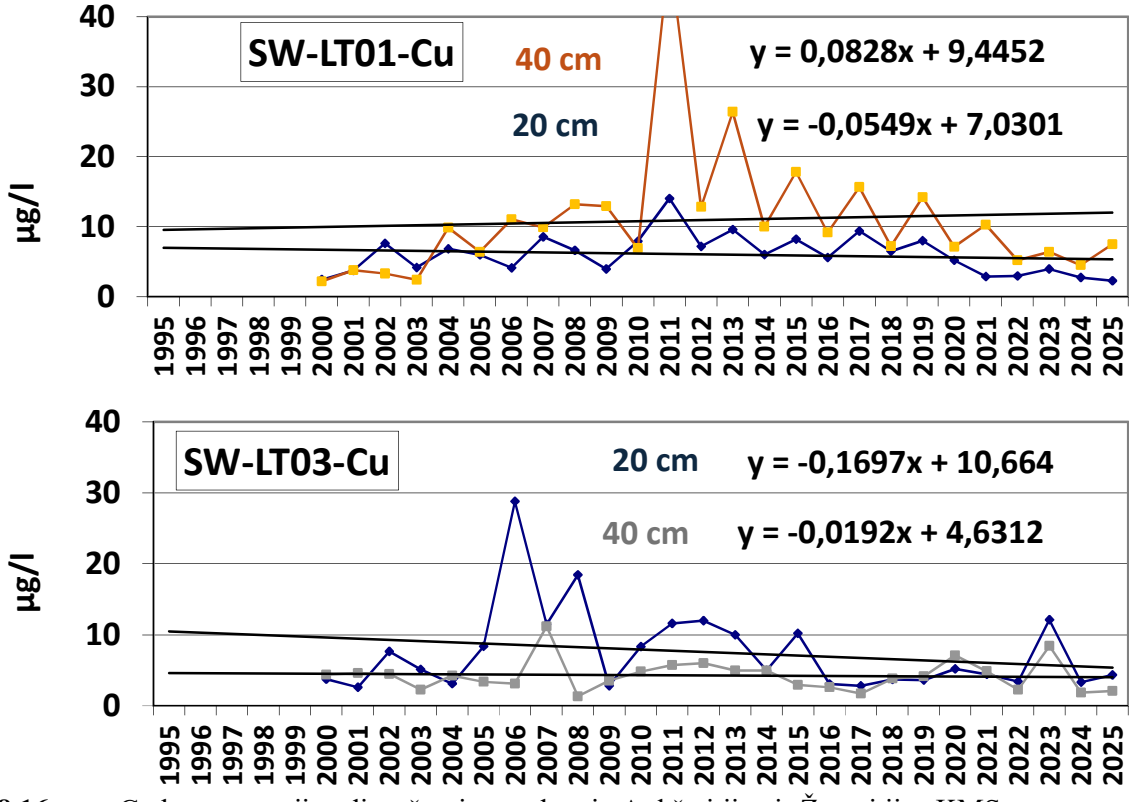
cinko pernešimo vandens keliuose erdvinius ir laiko skirtumus, pabrėždami integruoto miško vandenų ir atmosferos nusėdimo stebėjimo svarbą (Bringmark ir kt., 2013; Eklöf ir kt., 2024). Hidrologiniai transportavimo procesai sujungia sausumos ir vandens dalis, taip darydami įtaką ilgalaikiam ekosistemos stabilumui ir tvarumui. Padidėjusi metalų koncentracija miško vandenyse gali pakeisti biogeocheminius ciklus, pabloginti vandens kokybę ir pabloginti ekologinį funkcionavimą tiek vietos, tiek regioniniu mastu.

Klimato kaita gali dar labiau sustiprinti sunkiųjų metalų mobilumą miško ekosistemose, nes pasikeičia kritulių režimai, padažnėja sausros ir padidės dirvožemio rūgštėjimas. Hidrologinių sąlygų pokyčiai gali turėti įtakos metalų tirpumui, išplovimo intensyvumui ir transportavimo keliams, padidindami miško ekosistemų pažeidžiamumą taršos stresui. Todėl norint visapusiškai įvertinti ekosistemų sveikatą ir tvarų miškų valdymą, būtinas integruotas sunkiųjų metalų augmenijoje, paklotėse, dirvožemyje ir miško vandenyse vertinimas, kuris ir atliekamas įgyvendinant ssąlygiškai natūralių miško ekosistemų kompleksiško monitoringo programą.

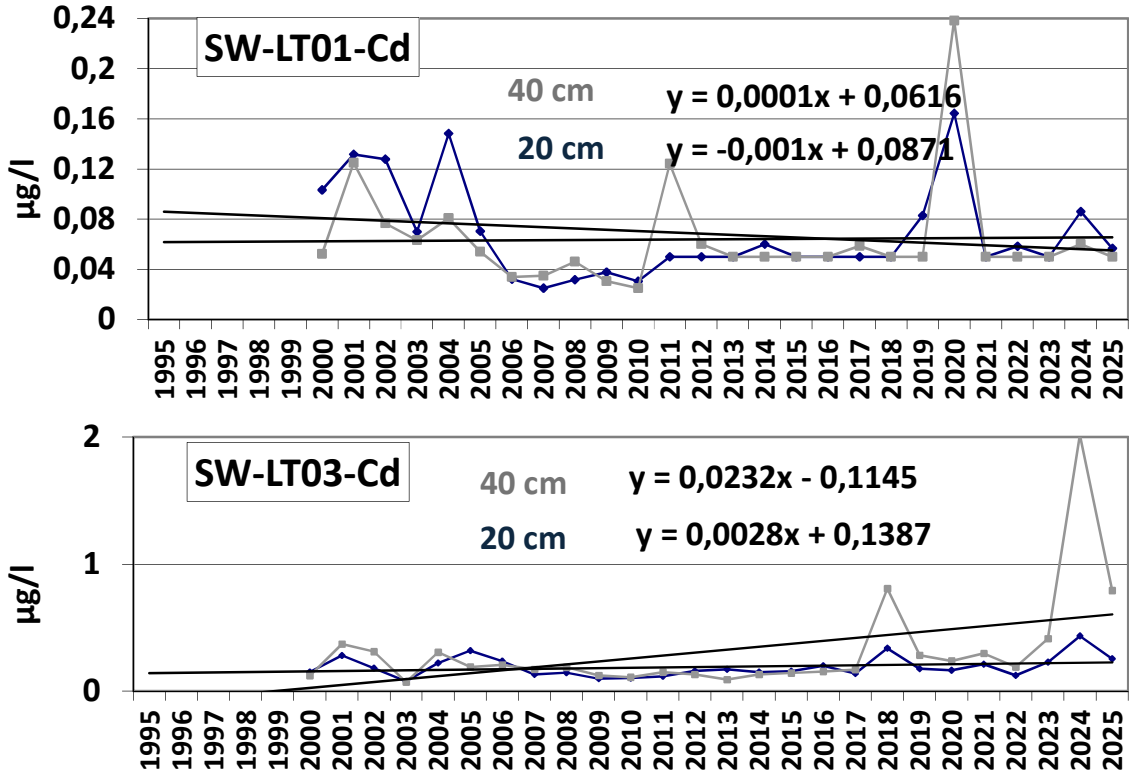
8.4.1. Sunkiųjų metalų koncentracijos KMS baseinų dirvožemio vandenyje

Nustatytos šios sunkiųjų metalų kaitos tendencijos KM stočių dirvožemio vandenyje:

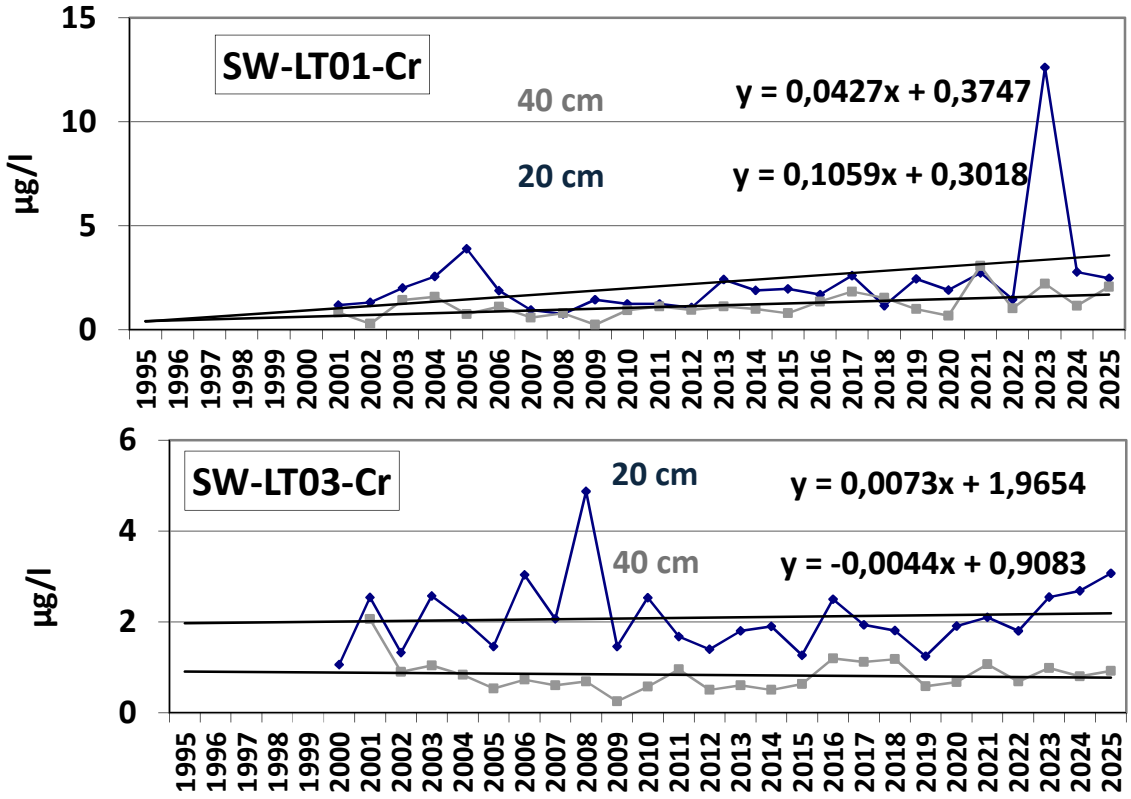
- Cu koncentracija abiejų gylių dirvožemio vandenyje Aukštaitijos KMS išliek stabiliame lygmenyje per visa tiriamąjį laikotarpį. Išskirtinė, tik vieną kartą nustatyta didelė šio element koncentracija 2011 m. Aukštaitijos KMS dirvožemio vandenyje 40 cm gylyje. 2021-2025 m. laikotarpyje Cu koncentracijos minimaliame lygmenyje papildomai dar palaipsniui mažėja.
- Žemaitijos KMS dirvožemio vandenyje Cu koncentracijos yra kiek tai mažesnės negu Aukštaitijos KMS, tačiau taip pat ryškesnės šio element kaitos tendencijos nenustatyta.
- Cd koncentracijos nuo 2013 m. Aukštaitijos KMS dirvožemio vandenyje neturi tendencijos kisti, išskyrus tik vienkartinę didelę nustayta koncentraciją 2020 m., Tai Žemaitijos KMS dirvožemio vandenyje dėl nustaytų didesnių koncentracijų 2018 ir 2024 m. turi tendenciją didėti. Padidėjusios koncentracijos čia nustatytos ir 2021-2025 m. laikotarpiu.
- Cr koncentracijos reikšmingai didėja Aukštaitijos KMS baseline su nustatyta maksimalia koncentracija 2023 m. 20 cm gylyje. Žemaitijos KMS šio element koncentracijos išlika stabiliame lygyje.
- Zn koncentracijų kaita Aukštaitijos KMS priešinga: 20 cm gylyje Zn reikšmingai mažėja, kai 40 cm gylyje turi tendenciją didėti. Žemaitijos KMS Zn koncentracijos dirvožemio bandenyje nuo 2009-2010 m. reikšmingai nekinta.



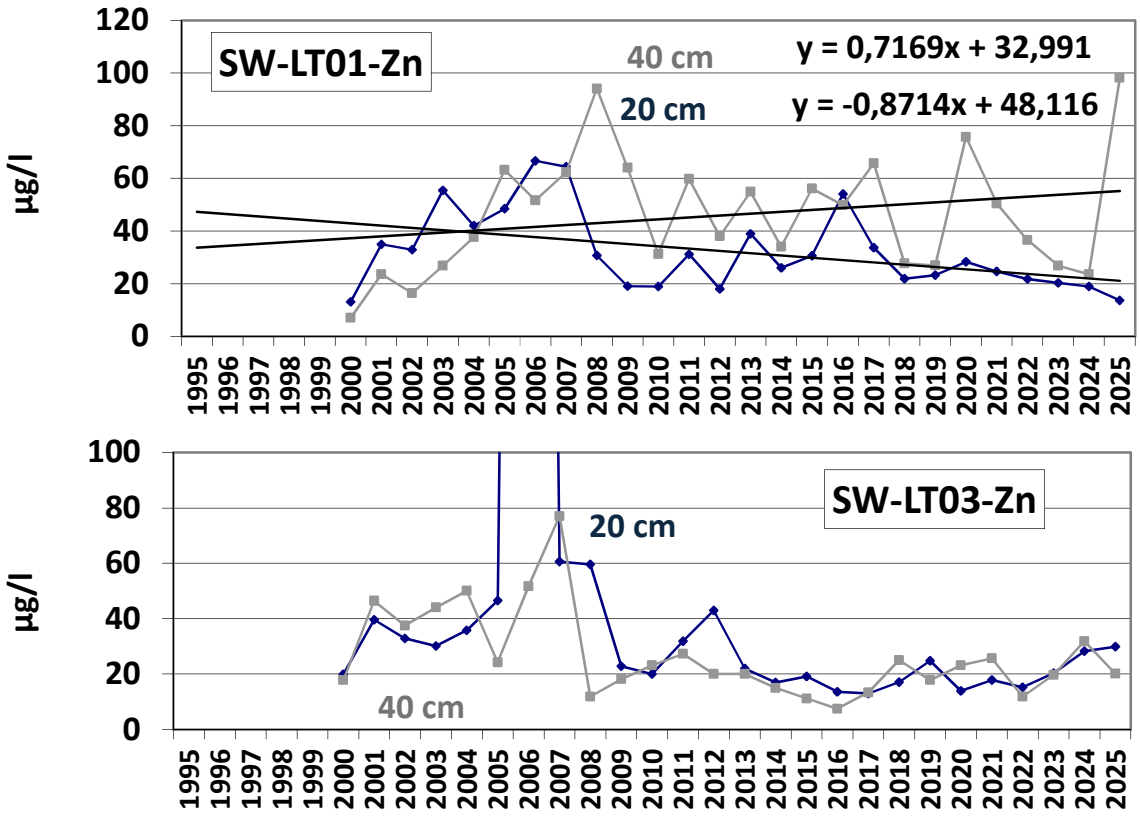
8.16 pav. Cu koncentracijos dirvožemio vandenyje Aukštaitijos ir Žemaitijos KMS



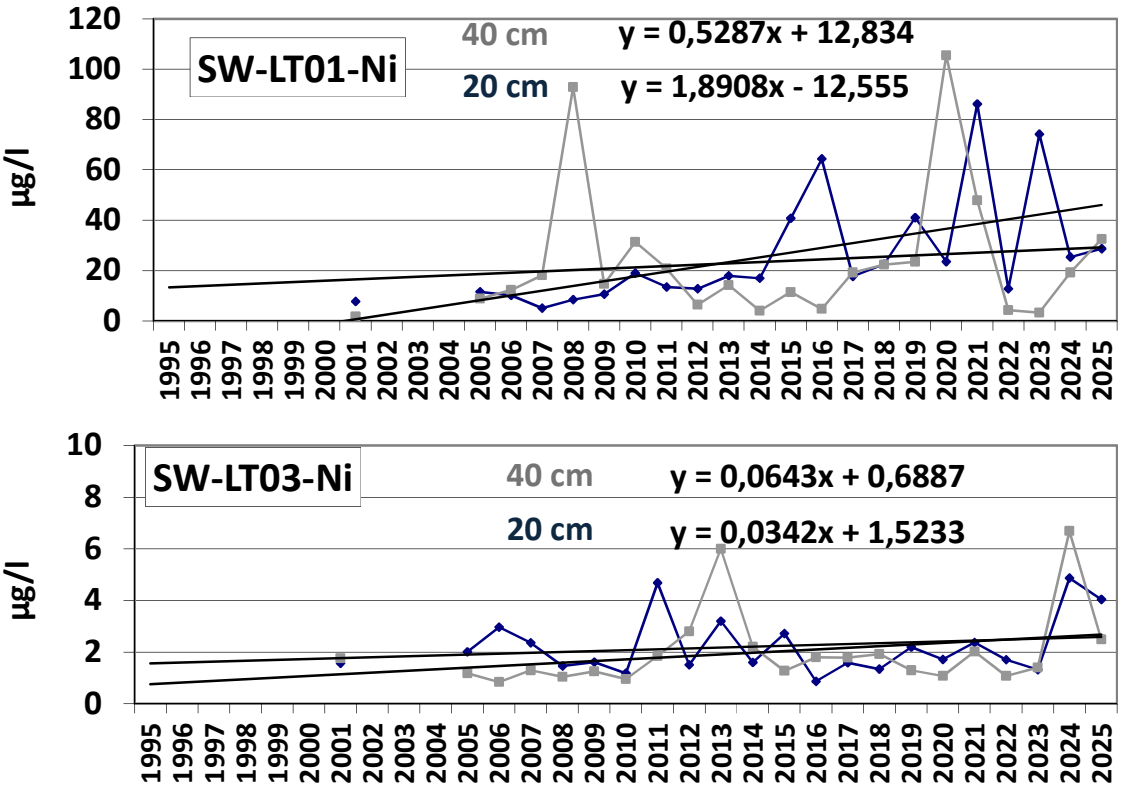
8.17 pav. Cd koncentracijos dirvožemio vandenyje Aukštaitijos ir Žemaitijos KMS



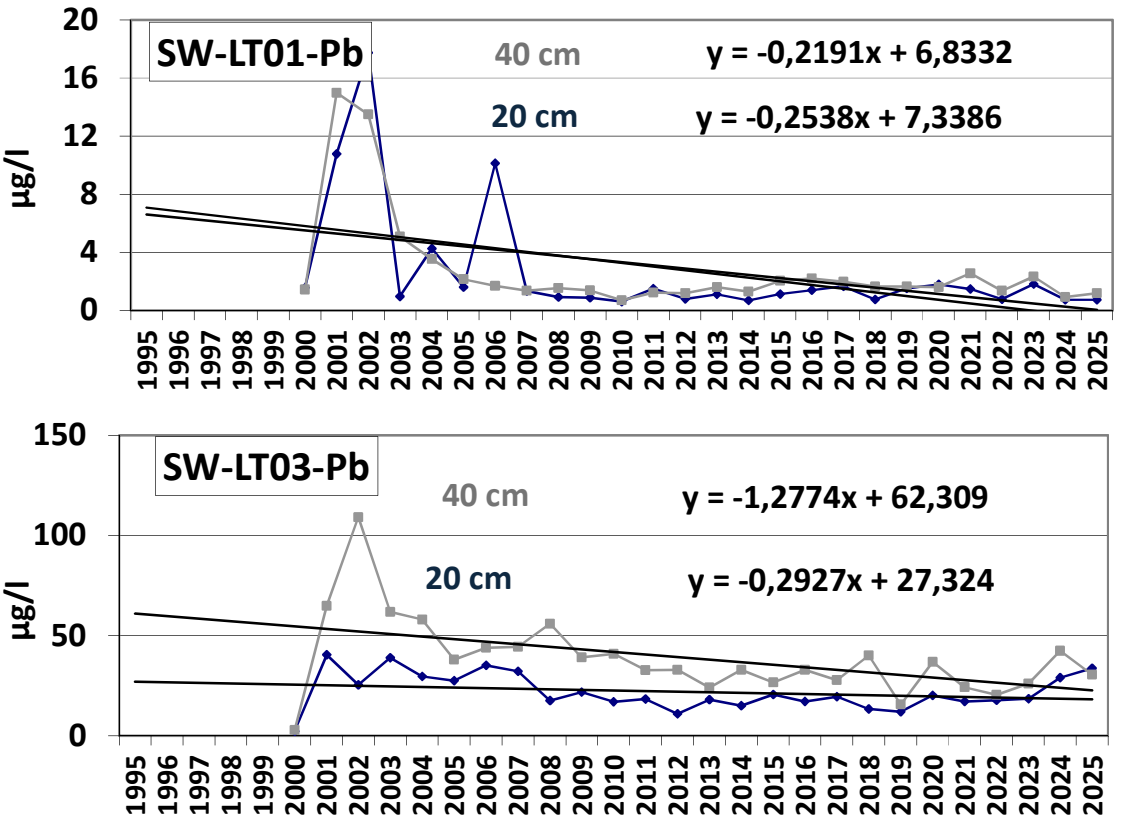
8.18 pav. Cr koncentracijos dirvožemio vandenyje Aukštaitijos ir Žemaitijos KMS



8.19 pav. Cr koncentracijos dirvožemio vandenyje Aukštaitijos ir Žemaitijos KMS



8.20 pav. Ni koncentracijos dirvožemio vandenyje Aukštaitijos ir Žemaitijos KMS



8.21 pav. Pb koncentracijos dirvožemio vandenyje Aukštaitijos ir Žemaitijos KMS.

- Ni apie 10 kartus daugiau yra užterštas Aukštaitijos KMS dirvožemio vanduo, kur šio elemento koncentracijos svyruoja apie 20 µg/l ir turi aiškią tendenciją didėti. Žemaitijos KMS Ni koncentracijos svyruoja apie ir tik 2024-2025 m. nustatos jo didesnės koncentracijos dirvožemio vandenyje.
- Pb kaitoje nustatytos panašios kaitos tendencijos abiejų stočių abiejų gylių dirvožemio vandenyse: nuo 2007-2008 m. šio element koncentracijo išlieka praktiškai stabiliame lygmenyje tik Aukštaitijoje su neženkliu didėjimu, o Žemaitijoje mažėjimu.
- Nepaisant šių tendencijų paskutiniaisiais metais Pb koncentracija Aukštaitijos KMS dirvožemio vandenyje siekia 2 µg/l, kai tuo tarpu Žemaitijos KMS arti 10 kartų daugiau - apie 15 µg/l.

Sunkiųjų metalų koncentracijų dirvožemio vandenyje apibendrinimas

Ilgalaikė sunkiųjų metalų koncentracijų dirvožemio vandenyje analizė parodė, kad daugumos tirtų elementų koncentracijos išliko mažos ir gana stabilios, o ryškių sisteminio jų kaupimosi požymių nenustatyta. Stabiliausiomis koncentracijomis pasižymėjo Cu, kurio kiekiai abiejų gylių dirvožemio vandenyje tiek Aukštaitijos, tiek Žemaitijos KMS beveik nekito. Aukštaitijos KMS po 2021 m. šio elemento koncentracijos netgi toliau mažėjo ir pasiekė minimalų lygį.

Didžiausi pokyčiai nustatyti Cr, Cd ir Ni koncentracijų kaitoje. Aukštaitijos KMS reikšmingai didėjo Cr koncentracijos, o didžiausios jų reikšmės nustatytos 2023 m. 20 cm gylyje. Tuo tarpu Žemaitijos KMS Cr koncentracijos visą tyrimų laikotarpį išliko stabilios. Priešingai, Cd koncentracijos Aukštaitijos KMS po 2013 m. beveik nekito, o Žemaitijos KMS dėl padidėjusių koncentracijų 2018 ir 2024 m. nustatyta jų didėjimo tendencija, kuri išliko ir 2021–2025 m. laikotarpiu.

Ryškiausi skirtumai tarp stočių nustatyti Ni ir Pb koncentracijose. Aukštaitijos KMS dirvožemio vandenyje Ni koncentracijos buvo maždaug dešimt kartų didesnės negu Žemaitijos KMS ir visą tyrimų laikotarpį demonstravo didėjimo tendenciją – vidutinės koncentracijos siekė apie 20 µg l^{-1}. Žemaitijos KMS Ni koncentracijos išliko mažos, o jų padidėjimas nustatytas tik 2024–2025 m. Kitaip pasireiškė Pb kaita – abiejose stotyse nuo 2007–2008 m. koncentracijos išliko gana stabilios, tačiau Aukštaitijos KMS jos buvo mažos (apie 2 µg l^{-1}) ir turėjo nežymaus didėjimo tendenciją, o Žemaitijos KMS, nepaisant mažėjimo tendencijos, išliko beveik dešimt kartų didesnės ir paskutiniaisiais metais siekė apie 15 µg l^{-1}.

Skirtingą metalų migraciją rodo ir Zn koncentracijų kaita. Aukštaitijos KMS 20 cm gylyje Zn koncentracijos reikšmingai mažėjo, tuo tarpu 40 cm gylyje nustatyta jų didėjimo tendencija, rodanti galimą šio elemento migraciją į gilesnius dirvožemio sluoksnius. Žemaitijos KMS Zn koncentracijos visą stebėjimo laikotarpį išliko stabilios, todėl reikšmingesnių šio elemento migracijos pokyčių nenustatyta.

Gauti rezultatai rodo, kad sunkiųjų metalų koncentracijas dirvožemio vandenyje pirmiausia lemia dirvožemio geocheminės savybės, sorbcijos procesai, elementų biologinis prieinamumas ir hidrologinis režimas, o ne vien jų patekimas su atmosferinėmis iškritomis. Aukštaitijos KMS būdingos didesnės Ni ir didėjančios Cr koncentracijos rodo aktyvesnę šių elementų migraciją dirvožemio profilyje, tuo tarpu Žemaitijos KMS didesnės Pb ir didėjančios Cd koncentracijos leidžia manyti, kad šioje teritorijoje svarbesni yra istoriškai sukauptų elementų išsilaikymo ir jų lėtesnio išplovimo procesai. Nors sisteminių sunkiųjų metalų taršos požymių dirvožemio vandenyje nenustatyta, išryškėję stočių skirtumai rodo, kad klimato kaita, dirvožemio cheminės savybės ir hidrologinis režimas gali skirtingai veikti potencialiai toksiškų elementų judrumą skirtinguose Lietuvos regionuose.

Šiuose rezultatuose jau ryškėja labai įdomus dėsningumas:

- **Aukštaitija** → didesnis **Ni**, didėjantis **Cr**, Zn migracija į gylį.
- **Žemaitija** → didesnis **Pb**, didėjantis **Cd**, stabilus Zn.

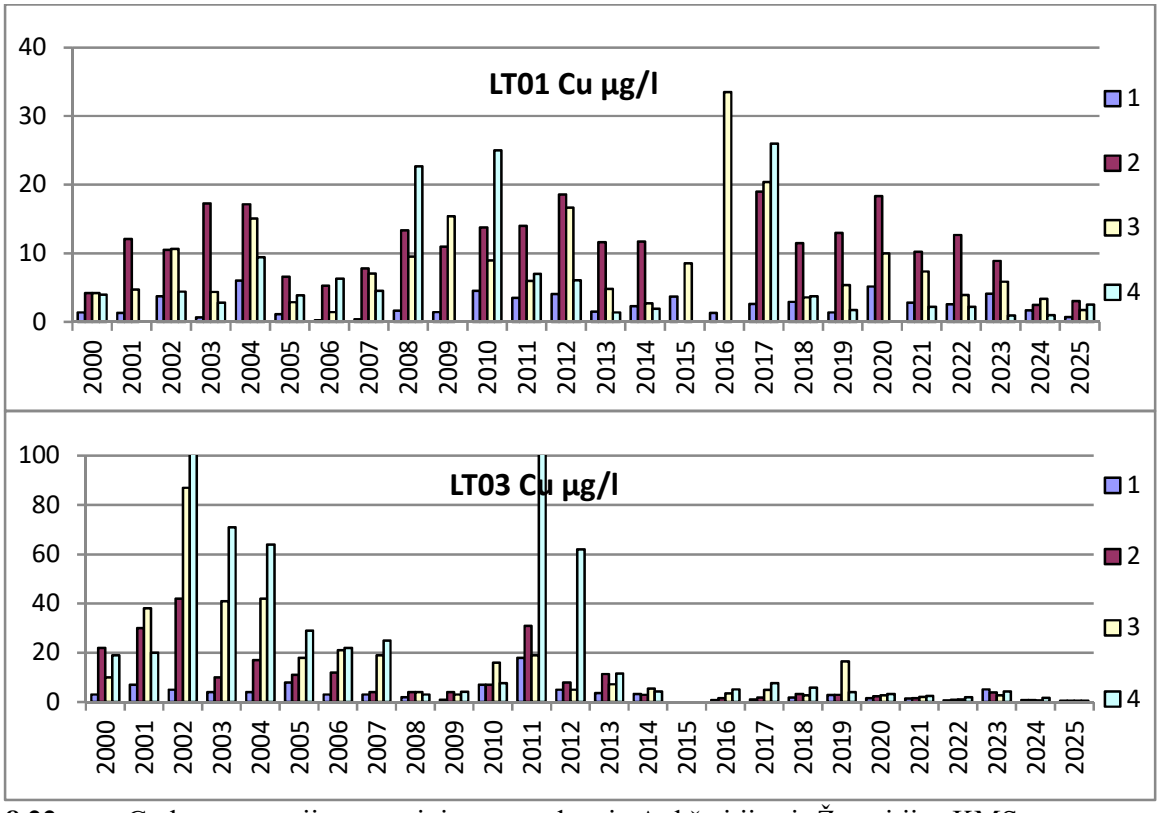
Tai leidžia manyti, kad skirtumai tarp stočių susiję ne tik su atmosferine tarša, bet ir su **skirtingomis dirvožemio geocheminėmis bei hidrologinėmis sąlygomis**.

8.4.2. Sunkiųjų metalų koncentracijos gruntiniame vandenyje

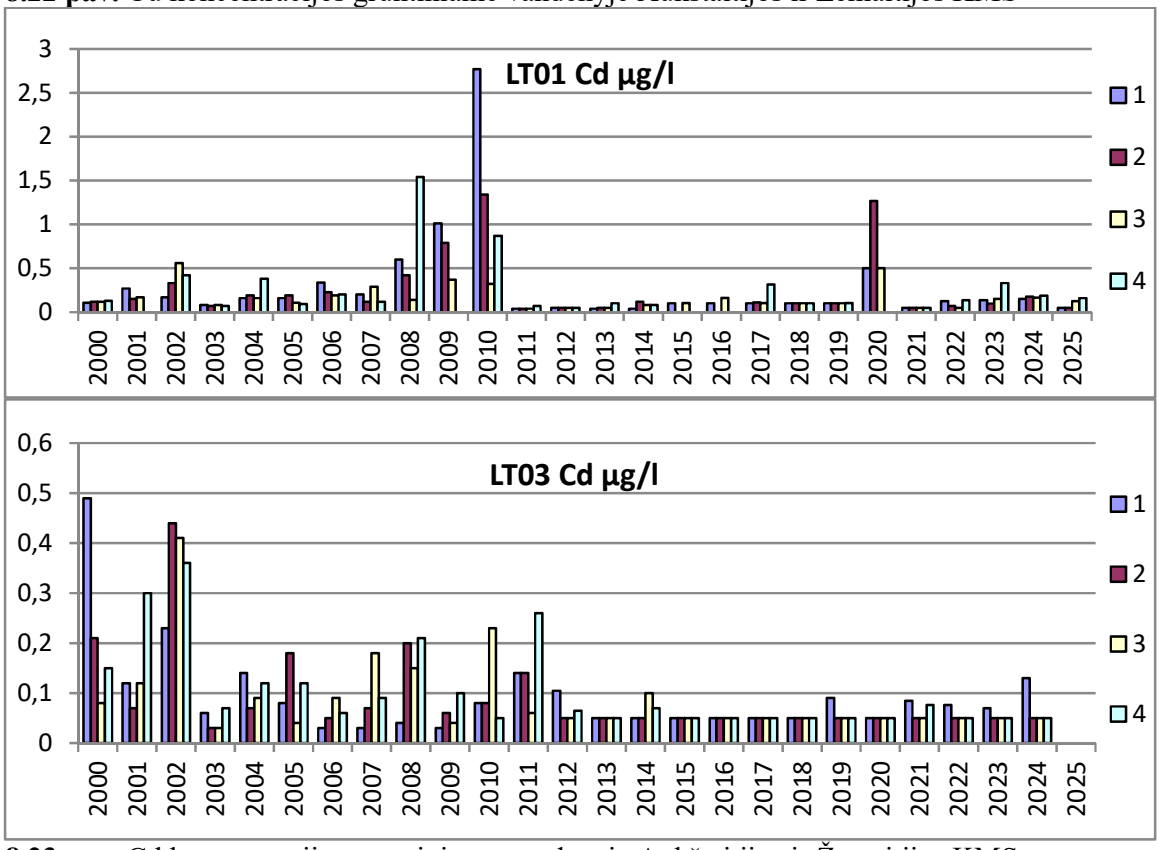
Mn koncentracijų kaitą apsukina metodologiniai aspektai. Paskutiniaisiais metais šio elemento koncentracija nustatoma tik iki 2 µg/l ribos, kuri yra didesnė nei koncentracijos nustatytos ankstesniais metais. 2018-2019 m. sausra neturėjo reikšmingos įtakos Mn koncentracijų kaitai gruntiniuose vandenyse.

Didžiausios Fe koncentracijos gruntiniuose vandenyse nustatytos 2008-2011 m. abiejų stočių baseinų gruntiniuose vandenyse. Nuo šio laikotarpio iki 2019 m. Fe koncentracijos turi tendencija mažėti. Reikšmingesnė Fe koncentracijos priklausomybė nuo kritulių kiekio nenustatyta.

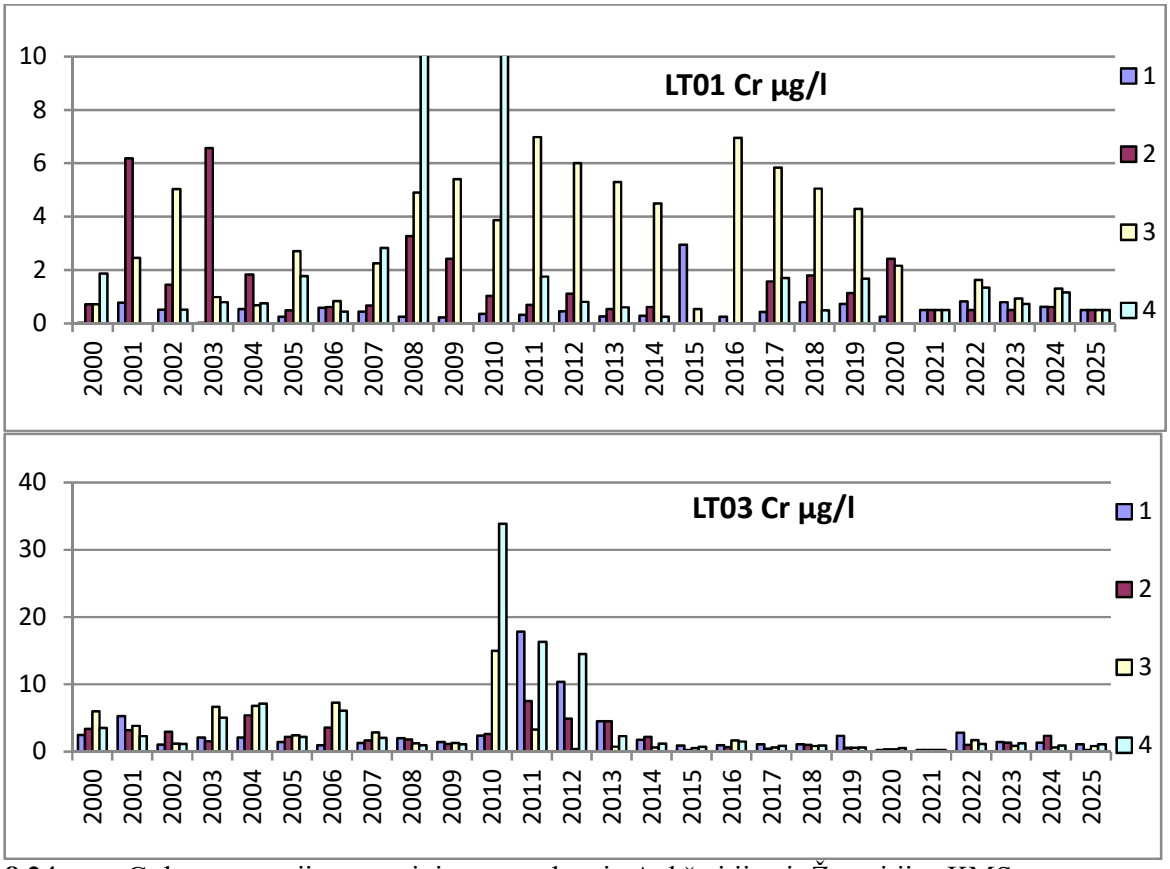
Gruntiniame vandenyje 2010-2011 metais sunkiųjų metalų koncentracijos buvo padidėjusios iki didžiausių reikšmių per stebėsenos laikotarpį.



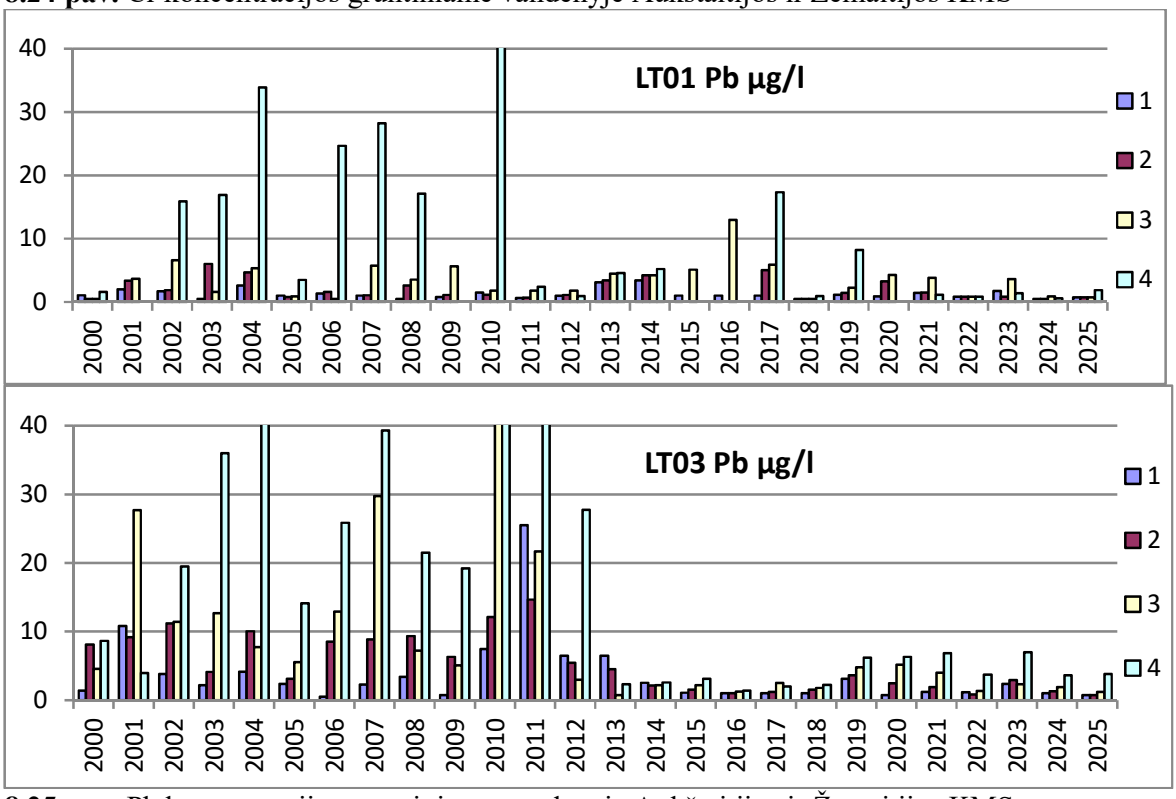
8.22 pav. Cu koncentracijos gruntiniame vandenyje Aukštaitijos ir Žemaitijos KMS



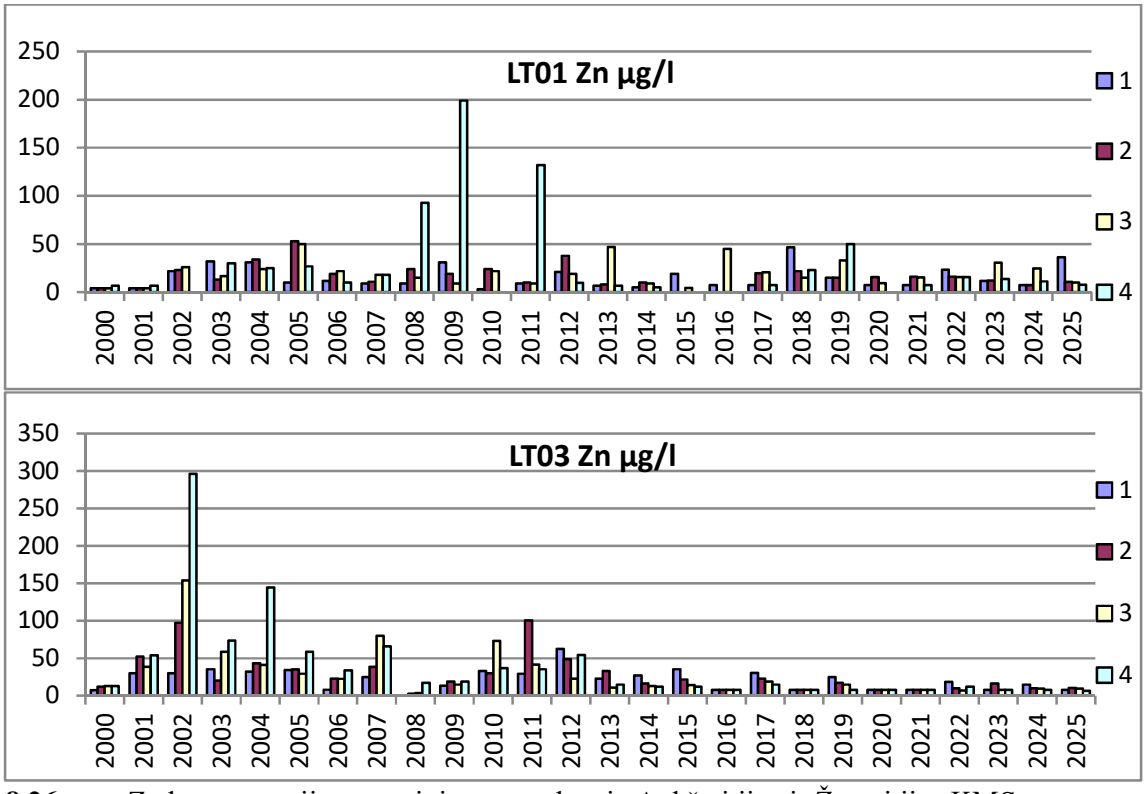
8.23 pav. Cd koncentracijos gruntiniame vandenyje Aukštaitijos ir Žemaitijos KMS



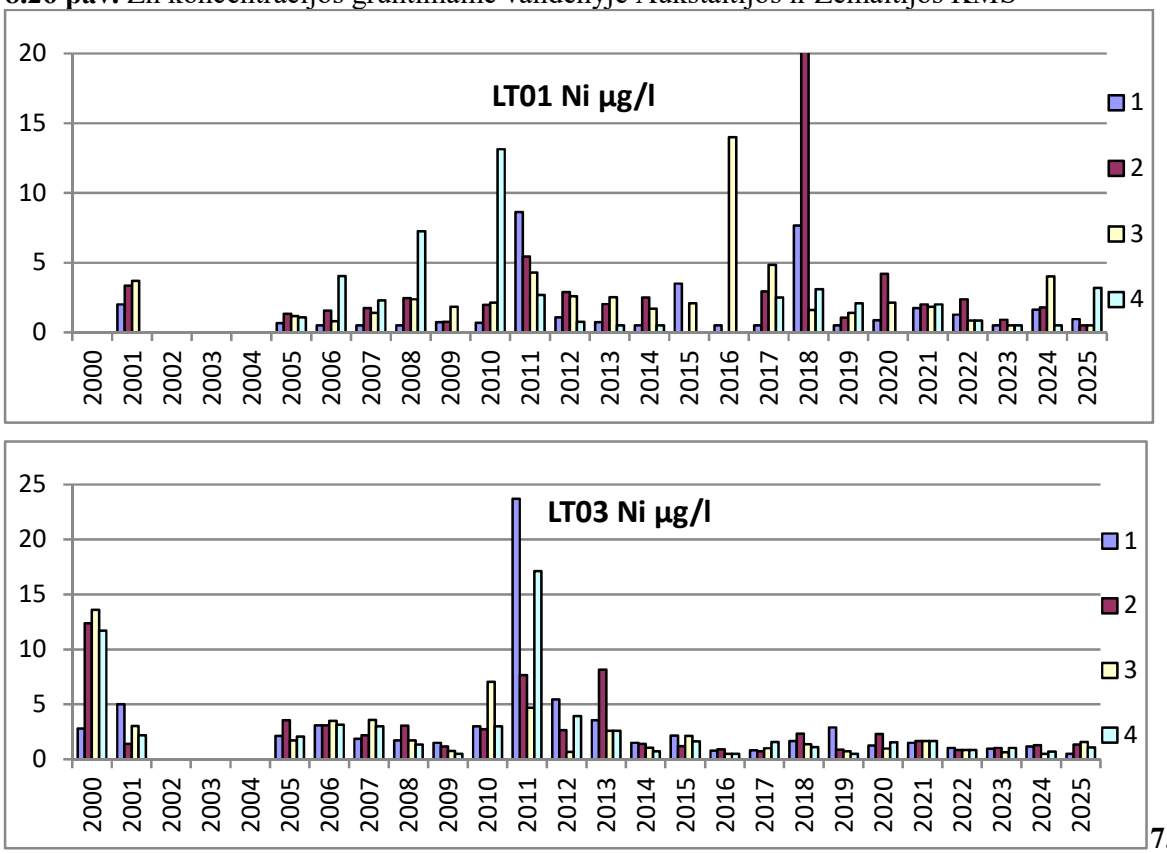
8.24 pav. Cr koncentracijos gruntiniame vandenyje Aukštaitijos ir Žemaitijos KMS



8.25 pav. Pb koncentracijos gruntiniame vandenyje Aukštaitijos ir Žemaitijos KMS



8.26 pav. Zn koncentracijos gruntiniame vandenyje Aukštaitijos ir Žemaitijos KMS



7.3

8.27 pav. Ni koncentracijos gruntiniame vandenyje Aukštaitijos ir Žemaitijos KMS

2017-2020 m. pažymėtinas dėsningumas - gruntinio vandens užterštumo Cu mažėjimas. Išsiskiria 2017 m. reikšmingai padidėjusios Cu koncentracijos gruntiniuose vandenyse Aukštaitijos KMS. Paskutiniaisiais metais Cu koncentracijos abiejų stočių gruntiniuose vandenyse išlieka stabilio panašiame lygmenyje, t.y. apie mažiau negu 5 µg/l.

Cd koncentracijos Aukštaitijos KMS nuo 2011 m. išlieka minimaliame lygmenyjeapie 0,1-0,2 ug/l. Padidėjusi koncentracija buvo nustayta tik 2020. Žemaitijos KMS, dėl tyrimų tikslumo ribotumo Cd koncentracijos tikslai nustayti nepavyksta. Ji yra mažesnė negu 0,1 ug/l.

Didžiausios Cr koncentracijos buvo nusttaytos 2010 m. Paskutiniuoju laikotarpiu koncentracijo reikšmingai sumažėjo ir svyruoja minimaliame lygmenyje apie 1 ug/l

Pb koncentracijos gruntiniuose vandenyse, taip pat nuo 20012 m. išlieka stabilios minimaliame lygmenyje apie 1-2 ug/l Aukštaitijos KMS ir apie 2-4 ug/l lygmenyje Žemaitijos KMS gruntiniuose vandenyse.

Analogiškai kito ir Zn bei Ni koncentracijų kaitoje. Nuo 2013 m. esminių pokyčių šių elementų koncentracijų kaitoje nenustayta. Ženklus Ni koncentracijų padidėjimas Aukštaitijos KMS buvo registruotas 2018m. Paskutiniuoju laikotarpiu Ni koncentracijos šioje stotyje pasiekė savo įprastinį daugiametį vidurkį. Žemaitijos KMS Ni koncentracijos jau daugiau kaip 6 m išlieka stabilios 2 µg/l lygmenyje.

Ilgalaikė gruntinio vandens cheminių tyrimų analizė parodė, kad sunkiųjų metalų koncentracijos pasižymi gerokai didesniu stabilumu negu dirvožemio vandenyje. Mn koncentracijų kaitos vertinimą apsunkino pasikeitęs cheminių analizių jautrumas, todėl patikimų ilgalaikių šio elemento kaitos tendencijų nustatyti nepavyko. Fe koncentracijos abiejų kompleksinio monitoringo stočių gruntiniuose vandenyse didžiausios buvo 2008–2011 m., o vėliau iki 2019 m. stebėta jų mažėjimo tendencija. Reikšmingos Fe koncentracijų priklausomybės nuo kritulių kiekio ar 2018–2019 m. sausros poveikio nenustatyta. 2021–2025 m. laikotarpiu naujų reikšmingų sunkiųjų metalų koncentracijų pokyčių gruntiniame vandenyje neužfiksuota. Gauti rezultatai rodo, kad gruntinis vanduo pasižymi didele geochemine inercija ir trumpalaikiams meteorologiniams svyravimams yra gerokai atsparesnis negu dirvožemio vanduo, todėl jame stebimi pokyčiai daugiausia atspindi ilgalaikius hidrogeocheminius procesus, o ne momentinius klimato ar atmosferinės taršos poveikius.

2017-2020 m. pažymėtinas dėsningumas - gruntinio vandens užterštumo sunkiaisiais metalais mažėjimas, sinchroniškas geležies koncentracijų mažėjimui.

2021-2025 m. Laikotarpis naujų reikšmingų pokyčių neišryškino.

8.4.3. Sunkiųjų metalų koncentracijos paviršiniame vandenyje

Sunkiųjų metalų, vario (Cu), chromo (Cr), nikelio (Ni), švino (Pb), cinko (Zn) ir kadmio (Cd) koncentracijai KMS upelių vandenyje upelio debitas neturi lemiamos įtakos. Sausros įtaka per stebėjimų laikotarpį galėjo padidinti vario, cinko ir chromo koncentraciją, bet ne kiekvieni per stebėjimų laikotarpį buvę sausringi metai darė poveikį.

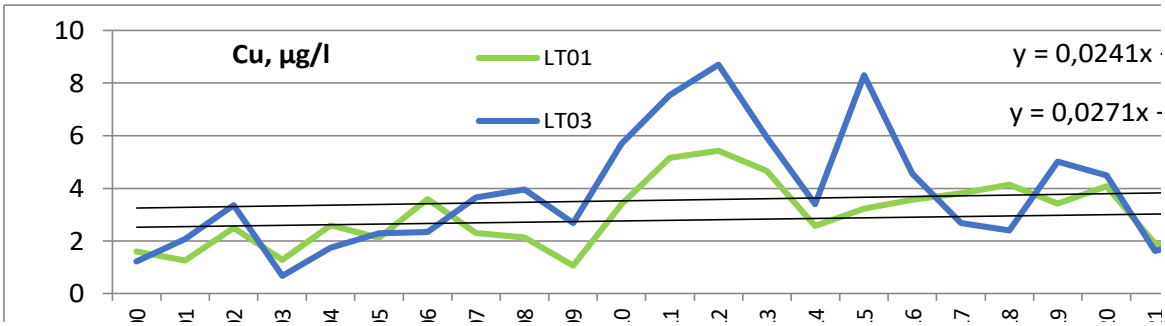
Sunkiųjų metalų tirtuose upelių vandenyse tyrimų analizė parodė, Cu ir Cr koncentracijų augimo tendenciją. Cu kaitoje 2010-2012 m. ir 2015 m. registruojami šio elemento didžiausi kiekiai. Po šių metų iki 2025 m. registruojamas laipsniškas Cu koncentracijų mažėjimas, 2025 m. pasiekiant minimaliausią reikšmę per visą tirismąjį laikotarpį.

Cd koncentracijų kaitoje stebima šio elementu didėjimo tendencija abiejose stotyse, tačiau priežastis gali būti ir dėl cheminių analizių atlikimo tikslumo. Paskutiniuoju laikotarpi Cd koncentracijos, kurių reikšmė yra žemesnė negu 0,1 µg/l yra nenustatomos. Cr analizę riboja cheminių tyrimų tislumo ribos, kurios yra didesnės negu Cr koncentracijos vandenyje.

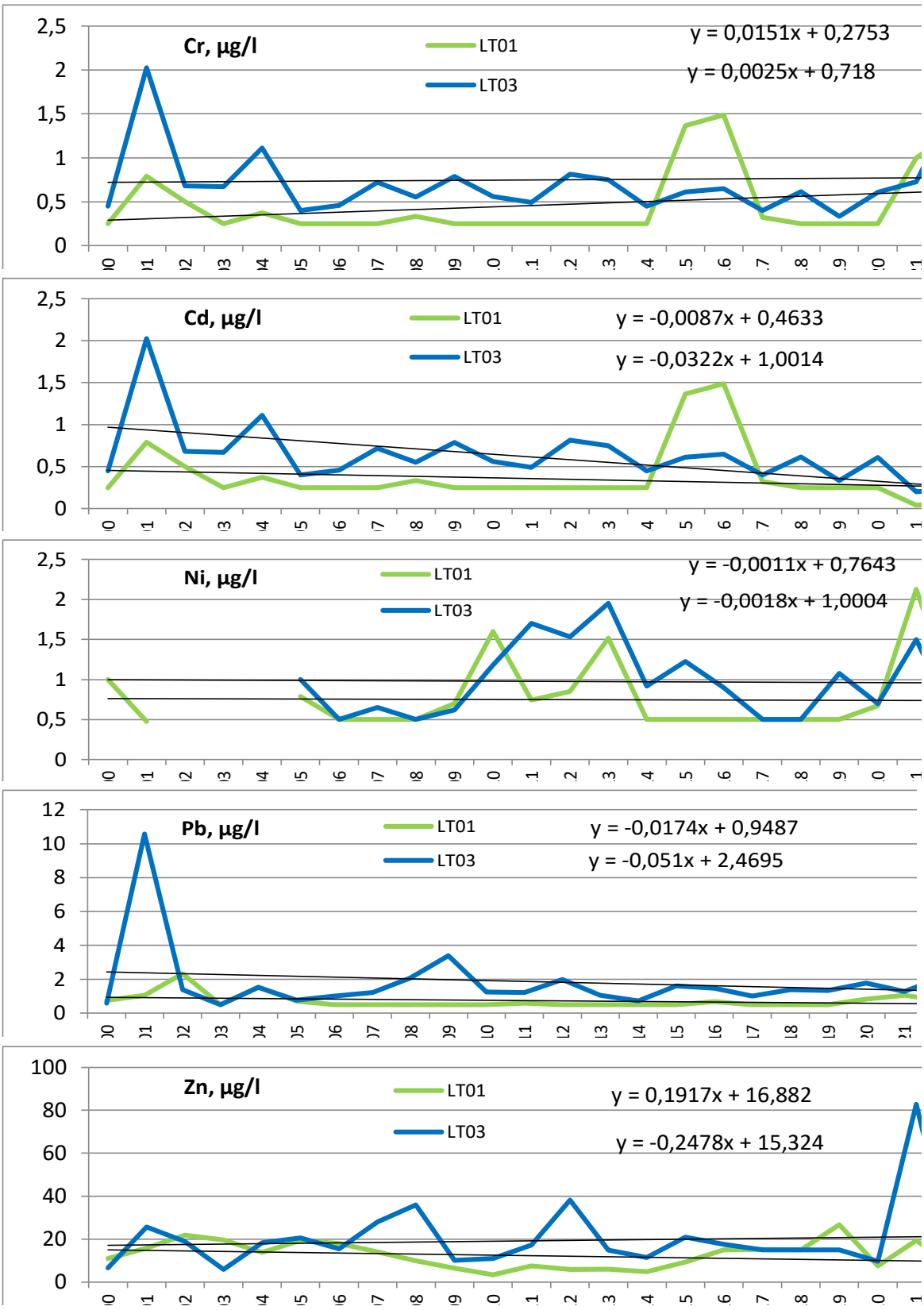
Cd koncentracijos reikšmingai upelio vandenyse mažėja ir paskutiniuoju laikotarpiu jo minimalios koncentracijos yra mažesnės negu cheminių tyrimų galimybės. Paskutiniuoju laikotarpiu Cd koncentracija upelio vandenyje, retai viršija mažiausią nustatymo ribą. 0,1 µg/l.

Ni ir Cr koncentracijos per tiriamąjį laikotarpį išlieka stabilios. Paminėtina tik kad 2015 m. sausra turėjo reikšmingos įtakos Cr koncentracijų padidėjimui Aukštaitijos KMS upelio vandenyje. Paskutiniaisiais metais Cr koncentracijos šios stoties vandenyse vėl sumažėjo iki daugiamečio vidurkio, o Žemaitijos KMS upelio vandenyje padidėjo, viršydama 1ug/l ribą.

Zn koncentracijos upelių vandenyse reikšmingai nesiskiria tarp stočių ir išlieka minimaliame lygmenyje praktiškai per visą tiriamąjį laikotarpį.



8.28 pav. Sunkiųjų metalų koncentracijos upelių vabndenyse



8.28 pav. Sunkiųjų metalų koncentracijos upelių vabndenyse

Paminėtina Pb koncentracijų kaita upelių vandenyse, kuri abiejose stotyse mažėja po maždaug 0,02-0,05 ug/l per m.. Paskutiniaisiais metais Aukštaitijos KMS upelio vandenyje šio elemento koncentracija išlieka stabili, o jo kaitą lemia cheminių analizių tikslumas, tai ***Žemaitijos KMS 2019 m. užregistruotas padidėjęs upelio vandens užterštumas šiuo sunkiuoju metalų, ypač 2023 m.***

Palyginus metalų koncentracijų kaitą tarp KMS teritorijose nustatyta, kad sunkiaisiais metalai tirtų upelių vandenys yra užteršti tam pačiame lygmenyje, ir jų kaitos tendencijos yra panašios.

Ilgalaikė sunkiųjų metalų koncentracijų paviršiniame vandenyje analizė parodė, kad tirtų upelių vandens cheminė sudėtis išlieka stabili, o daugumos potencialiai toksiškų elementų koncentracijos visą tyrimų laikotarpį buvo mažos ir tik epizodiškai nukrypdavo nuo daugiamečio vidurkio. Upelio debitas nebuvo pagrindinis veiksnys, reguliuojantis Cu, Cr, Ni, Pb, Zn ir Cd koncentracijas, o sausrų poveikis pasireiškė tik pavieniais atvejais ir nebuvo nuoseklus.

Per visą tyrimų laikotarpį ryškiausia ilgalaikė mažėjimo tendencija nustatyta Pb koncentracijoms. Cd koncentracijos taip pat mažėjo ir paskutiniaisiais metais dažniausiai neviršijo cheminių analizių nustatymo ribos. Tuo tarpu Ni ir Zn koncentracijos išliko stabilios.

Cu ir Cr koncentracijų kaita pasižymėjo trumpalaikiais svyravimais. Didžiausios Cu koncentracijos nustatytos 2010–2012 m. ir 2015 m., po kurių iki 2025 m. stebėtas nuoseklus mažėjimas, pasiekiant mažiausias koncentracijas per visą stebėjimų laikotarpį. Cr koncentracijų padidėjimas Aukštaitijos KMS buvo susijęs su 2015 m. sausra, tačiau vėliau koncentracijos grįžo į daugiametį lygį. Žemaitijos KMS paskutiniaisiais metais registruotas didesnis Cr ir epizodinis Pb koncentracijų padidėjimas, tačiau ilgalaikės šių elementų didėjimo tendencijos nenustatyta.

Palyginus Aukštaitijos ir Žemaitijos kompleksinio monitoringo stočių rezultatus nustatyta, kad tirtų upelių užterštumas sunkiaisiais metalais yra panašaus lygio, o pagrindinės jų kaitos tendencijos iš esmės sutampa. Tai rodo, kad baseino geocheminiai ir hidrologiniai procesai efektyviai amortizuoja lokalius metalų migracijos svyravimus dirvožemio bei gruntinio vandens sistemose ir palaiko santykinai stabilią paviršinių vandenų cheminę sudėtį. Todėl paviršiniai vandenys labiau atspindi ilgalaikę viso hidrografinio baseino geocheminę būklę negu trumpalaikius atmosferinės taršos ar meteorologinių sąlygų pokyčius.

8.4.4. Sunkiųjų metalų migracijos vandenyse palyginamoji analizė KM stočių baseinuose

Kompleksinė atmosferinių iškritų, dirvožemio, gruntinio ir paviršinio vandens tyrimų analizė parodė, kad sunkiųjų metalų migracija hemiborealinių miškų ekosistemose yra daugiapakopis procesas, kurį reguliuoja ne vien atmosferinės iškritų intensyvumas, bet ir dirvožemio geocheminės savybės, hidrologinis režimas bei klimato kaita.

Dirvožemio vandenyje nustatyti didžiausi metalų migracijos skirtumai tarp stočių. Aukštaitijos KMS išryškėjo didėjančios Cr ir Ni koncentracijos bei Zn migracija į gilesnius dirvožemio sluoksnius, tuo tarpu Žemaitijos KMS didesnės buvo Pb ir didėjančios Cd koncentracijos. Šie skirtumai rodo, kad metalų judrumą dirvožemyje daugiausia reguliuoja dirvožemio geocheminės savybės, sorbcijos procesai, organinė medžiaga ir hidrologinis režimas, o ne vien jų patekimas su atmosferinėmis iškritomis.

Gruntinio vandens tyrimai parodė, kad ši vandens sistemos grandis pasižymi gerokai didesniu geocheminiu stabilumu negu dirvožemio vanduo. Daugumos metalų koncentracijos per visą stebėjimo laikotarpį beveik nekito, o trumpalaikiai klimato ekstremumai, įskaitant 2018–2019 m. sausrą, reikšmingesnės įtakos jų koncentracijoms neturėjo. Tai rodo, kad gruntinis vanduo veikia kaip natūralus geocheminis buferis, slopinantis trumpalaikius metalų migracijos svyravimus.

Paviršinių vandenų tyrimai patvirtino, kad upelių vanduo yra stabiliausia visos vandens sistemos grandis. Daugumos tirtų metalų koncentracijos išliko mažos ir reikšmingų ilgalaikių pokyčių neparodė. Vienintelė nuosekli ilgalaikė tendencija buvo Pb koncentracijų mažėjimas, o trumpalaikiai Cu, Cr ar kitų elementų koncentracijų padidėjimai buvo epizodiniai ir nesusiformavo į ilgalaikes kaitos tendencijas.

Apibendrinant galima teigti, kad atmosferinė depozicija lemia pirminį sunkiųjų metalų patekimą į miško ekosistemą, tačiau jų tolesnį likimą reguliuoja natūralūs ekosistemos savireguliacijos mechanizmai. Medžiai riboja metalų kaupimąsi gyvuose audiniuose, dirvožemis veikia kaip pagrindinis geocheminis filtras, o gruntinis ir paviršinis vanduo amortizuoja trumpalaikius migracijos svyravimus. Todėl miškų ekosistemose potencialiai toksiškų elementų migracija pasižymi didele geochemine inercija ir savireguliacija, o ilgalaikiai atmosferinės taršos pokyčiai tik iš dalies atsispindi vandens sistemose. Tai paaiškina, kodėl net ir padidėjus kai kurių elementų koncentracijoms atmosferinėse iškritose ar nuokritose, jų koncentracijos paviršiniuose ir gruntiniuose vandenyse išlieka mažos bei stabilios.

Bendrosios sunkiųjų metalų kaitos vandenyse išvados

1. Lyginamoji atmosferinių iškritų, dirvožemio, gruntinio ir paviršinio vandens analizė parodė, kad atmosferinė iškritos yra pagrindinis sunkiųjų metalų patekimo į miško ekosistemas šaltinis, tačiau jų koncentracijų ir srautų pokyčiai tik iš dalies atsispindi vandens sistemose.
2. Dirvožemio vanduo pasirodė esantis jautriausia sunkiųjų metalų migracijos grandis. Aukštaitijos KMS nustatytas didėjančios Cr ir Ni koncentracijos bei Zn migracijos į gilesnius dirvožemio sluoksnius požymiai, o Žemaitijos KMS – didesnės Pb ir didėjančios Cd koncentracijos. Tai rodo, kad metalų judrumą daugiausia reguliuoja dirvožemio geocheminės savybės ir hidrologinis režimas.
3. Gruntinis vanduo pasižymėjo didele geochemine inercija. Daugumos sunkiųjų metalų koncentracijos išliko stabilios, o trumpalaikiai meteorologiniai ekstremumai, įskaitant sausras, reikšmingos įtakos jų kaitai neturėjo.
4. Paviršinių vandenų tyrimai parodė, kad upelių užterštumas sunkiaisiais metalais abiejose kompleksinio monitoringo stotyse yra panašus ir mažas. Daugumos metalų koncentracijos išliko stabilios, o ryškiausia ilgalaikė tendencija buvo Pb koncentracijų mažėjimas, atspindintis atmosferinės šio elemento taršos mažėjimą.
5. Palyginus visas vandens sistemos grandis nustatyta, kad trumpalaikiai atmosferinės depozicijos pokyčiai silpnėja pereinant iš dirvožemio vandens į gruntinį ir paviršinį vandenį. Tai rodo, kad miško dirvožemis ir požeminio vandens sistema efektyviai amortizuoja potencialiai toksiškų elementų migraciją ir mažina jų patekimą į paviršinius vandenis.
6. Gauti rezultatai rodo, kad miško ekosistemų vandens sistema pasižymi dideliu geocheminiu stabilumu ir savireguliacija. Todėl ilgalaikis atmosferinės taršos mažėjimas, ypač Pb ir Cd atveju, jau atsispindi vandens cheminėje sudėtyje, o pastaraisiais metais nustatyti pavieniai Cr, Cu, Ni ar Cd koncentracijų padidėjimai kol kas nesudaro sisteminės grėsmės miško ekosistemų ar paviršinių vandenų kokybei.

Galimos grėsmės vandens ekosistemoms

Ilgalaikiai tyrimai parodė, kad šiuo metu sisteminių sunkiųjų metalų kaupimosi požymių dirvožemio, gruntiniame ir paviršiniame vandenyje nenustatyta, todėl tiesioginė grėsmė miško vandens ekosistemoms išlieka nedidelė. Tačiau Aukštaitijos KMS nustatytas didėjančios Cr ir Ni koncentracijos dirvožemio vandenyje, o Žemaitijos KMS – didėjančios Cd koncentracijos signalas rodo, kad šių elementų migracija dirvožemio profilyje gali intensyvėti. Nors gruntinis ir paviršinis vanduo kol kas pasižymi dideliu geocheminiu stabilumu, klimato kaitos sąlygomis dažnėjant sausroms, intensyviems krituliams ir dirvožemio drėgmės režimo svyravimams gali didėti potencialiai toksiškų elementų judrumas bei jų biologinis prieinamumas. Todėl didžiausia galima grėsmė ateityje yra ne dabartinis vandens užterštumas, o galimi dirvožemio geocheminių procesų pokyčiai, galintys padidinti sunkiųjų metalų migraciją į vandens sistemas.

Prognozė

Jeigu išliks dabartinės atmosferinės taršos mažėjimo tendencijos, sunkiųjų metalų koncentracijos gruntiniame ir paviršiniame vandenyje artimiausiais dešimtmečiais turėtų išlikti mažos ir reikšmingai nekisti. Tačiau klimato kaitos sąlygomis didėjant oro temperatūrai, dažnėjant sausroms ir intensyvių kritulių epizodams, dirvožemio vanduo gali tapti jautriausia sunkiųjų metalų migracijos grandimi. Todėl ateityje didžiausią reikšmę įgis ilgalaikė kompleksinė atmosferinių iškritų, dirvožemio, dirvožemio vandens, gruntinio ir paviršinio vandens stebėsena, leidžianti laiku nustatyti potencialiai toksiškų elementų migracijos pokyčius ir įvertinti jų galimą poveikį hemiborealinių miško ekosistemų bei vandens telkinių būklei.

8.5. Sunkiųjų metalų koncentracijos dirvožemyje ir jų kaita 1994-2025 m.

Dirvožemis yra pagrindinis atmosferinės kilmės sunkiųjų metalų kaupimosi rezervuaras miško ekosistemose ir svarbiausia grandis, reguliuojanti jų migraciją į dirvožemio vandenį, gruntinius bei paviršinius vandenis, augalus ir dirvožemio biotą (ICP Forests, 2025; Queiroz et al., 2026). Į miško dirvožemį potencialiai toksiški elementai patenka su šlapiosiomis ir sausosiomis atmosferinėmis iškritomis, per medžių lajas, su nuokritomis bei organinės medžiagos skaidymosi produktais. Jų kaupimąsi, chemines formas ir biologinį prieinamumą lemia ne tik atmosferinės iškritų intensyvumas, bet ir dirvožemio pH, organinės anglies kiekis, molio mineralų sudėtis, Fe ir Mn oksidų kiekis, oksidacijos–redukcijos sąlygos, dirvožemio drėgmė bei mikrobiologinis aktyvumas (Yu et al., 2023; Xu et al., 2024; Queiroz et al., 2026).

Pastarųjų metų tyrimai rodo, kad klimato kaita tampa vienu svarbiausių veiksnių, keičiančių sunkiųjų metalų judrumą dirvožemyje. Dažnėjant sausroms, intensyviems krituliams ir dirvožemio užmirkimo epizodams, keičiasi dirvožemio redokso potencialas, organinės medžiagos mineralizacijos intensyvumas bei sorbcijos procesai, todėl anksčiau stabiliose dirvožemio frakcijose sukaupti metalai gali tapti labiau judrūs ir biologiškai prieinami (Journal of Hazardous Materials, 2024; Ingle et al., 2024; Queiroz et al., 2026). Todėl net ir mažėjant atmosferinei taršai, dirvožemis gali išlikti ilgalaikiu potencialiai toksiškų elementų šaltiniu vandens sistemoms ir augalams.

Ilgalaikiai dirvožemio cheminių savybių tyrimai yra viena svarbiausių kompleksinio monitoringo dalių, nes jie leidžia įvertinti ne tik atmosferinės taršos pokyčius, bet ir medžiagų biogeocheminių ciklų transformaciją miško ekosistemose. Kartu su atmosferinių iškritų, žaliosios lapijos, nuokritų bei vandens cheminių tyrimų rezultatais dirvožemio analizė leidžia įvertinti visą sunkiųjų metalų migracijos grandinę – nuo jų patekimo iš atmosferos iki kaupimosi dirvožemyje, migracijos į vandens sistemas ir galimo poveikio miško ekosistemų funkcionavimui bei stabilumui (ICP Forests, 2025; Lovynska et al., 2024).

Metodika

Metalų kiekiai dirvožemyje buvo matuoti 1993/1994, 2000, 2005, 2020 it 2025 metais. Skirtumai, atsirandantys dėl ėminio vietos yra neišvengiami, todėl vadinami sisteminėmis paklaidomis. Vengiant sisteminių paklaidų, palyginami ne absoliutūs kiekiai, bet santykiniai dydžiai, įvairūs geocheminiai koeficientai (Kadūnas et el, 1999). Išsamią mokslinę metalų kiekio analizę, paremtą išvestiniais koeficientais, planuojama atlikti ruošiant mokslines publikacijas. Dabartiniame etape, šioje ataskaitoje aprašomas metalų pasiskirstymas dirvožemio profiliuose ir koncentracijų kaitos tendencijos, detaliai ir tiksliai neanalizuojant priežasčių.

Gautų rezultatų analizė parodė, kad kadmiui (Cd) ir švinui (Pb) būdinga sąsaja su dirvožemio organine medžiaga, nes didžiausi kiekiai kaupiasi paviršiniame dirvožemio horizonte (0...5 cm gylyje). Nuo kadmio koncentracija paviršiniame dirvožemio horizonte mažėjo.

Geocheminis karbonatinis barjeras bei geležies hidroksidas dirvožemio B horizontuose kaupia chromą (Cr), varį (Cu), nikelį (Ni), manganą (Mn) ir geležį (Fe).

Aukštaitijos KMS dirvožemiui būdingas karbonatais pasotintas horizontas, kuriame 2020 metai nustatyti didesni šių metalų kiekiai (8.20 pav.). Tolygus koncentracijų mažėjimas būdingas visiems metalams Žemaitijos KMS dirvožemio 20-80 cm gylyje, nes dirvožemis turi geocheminį barjerą giliau 80 cm, kuriama padidėja chromo, vario, nikelio ir geležies.

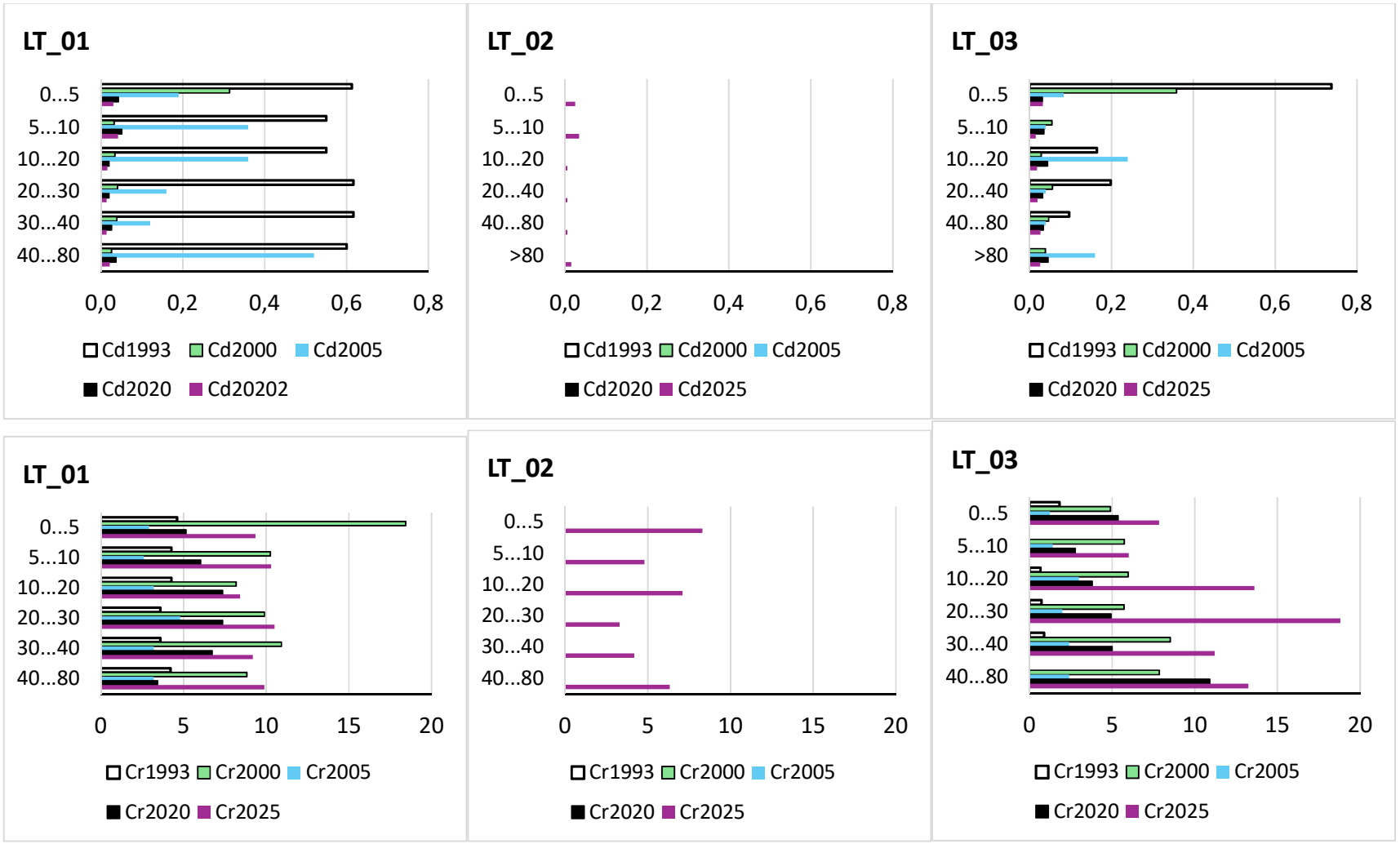
Stebėsenos laikotarpiu dirvožemis darėsi mažiau rūgštus ir mažėjo sorbcinio komplekso pajėgumas. Dirvožemio elementų susijusių su organinėmis medžagomis visuminiai kiekiai mažėjo, išskyrus sieros junginius, kurių kiekis Aukštaitijos KMS paviršiniame horizonte 2020 metais, palyginus su 2005 padidėjo, o gilesniuosiuose horizontuose, sumažėjo.

Metalų koncentracija dirvožemio paviršiniuose horizontuose (0...5 cm gylyje) mažėjo, bet padidėjo chromo, vario ir nikelio koncentracija gilesniuosiuose dirvožemio horizontuoje, geocheminiuose dirvožemio barjeruose.

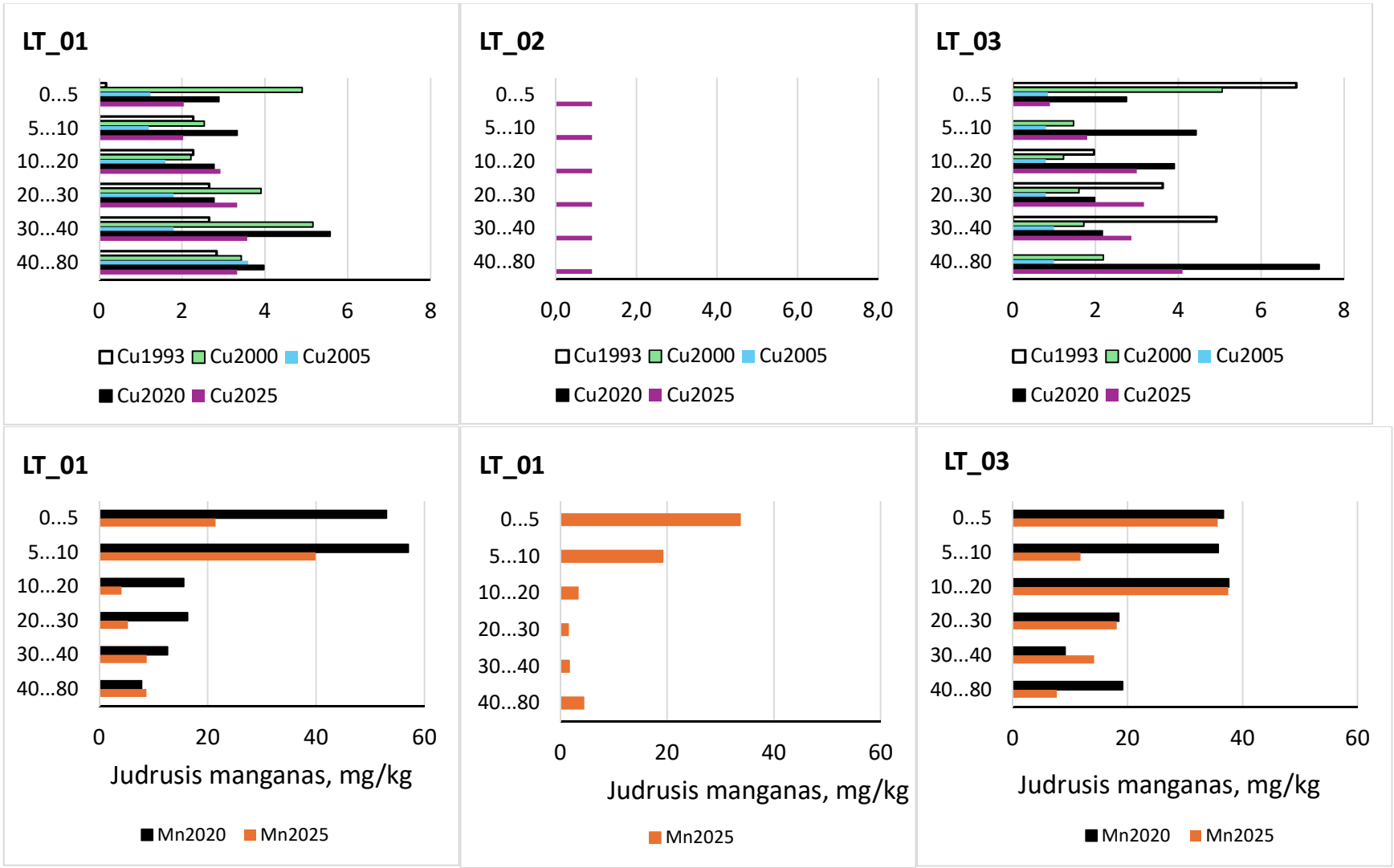
Ilgalaikė sunkiųjų metalų koncentracijų dirvožemyje analizė parodė, kad skirtingų elementų pasiskirstymą dirvožemio profilyje lemia jų geocheminės savybės ir sąveika su dirvožemio komponentais. Cd ir Pb daugiausia kaupėsi organine medžiaga turtingame paviršiniame (0–5 cm) dirvožemio horizonte, o jų koncentracijos per 1993–2020 m. laikotarpį mažėjo, atspindėdamos ilgalaikį atmosferinės šių elementų taršos mažėjimą.

Cr, Cu, Ni, Mn ir Fe daugiausia kaupiasi geocheminiuose dirvožemio barjeruose. Aukštaitijos KMS šių elementų didžiausios koncentracijos nustatytos karbonatais prisotintame horizonte, o Žemaitijos KMS – gilesniuose kaip 80 cm dirvožemio sluoksniuose, kuriuose formuojasi geocheminis kaupimosi barjeras. Tai rodo, kad metalų migraciją dirvožemyje pirmiausia reguliuoja geocheminės dirvožemio savybės, o ne vien jų patekimas iš atmosferos.

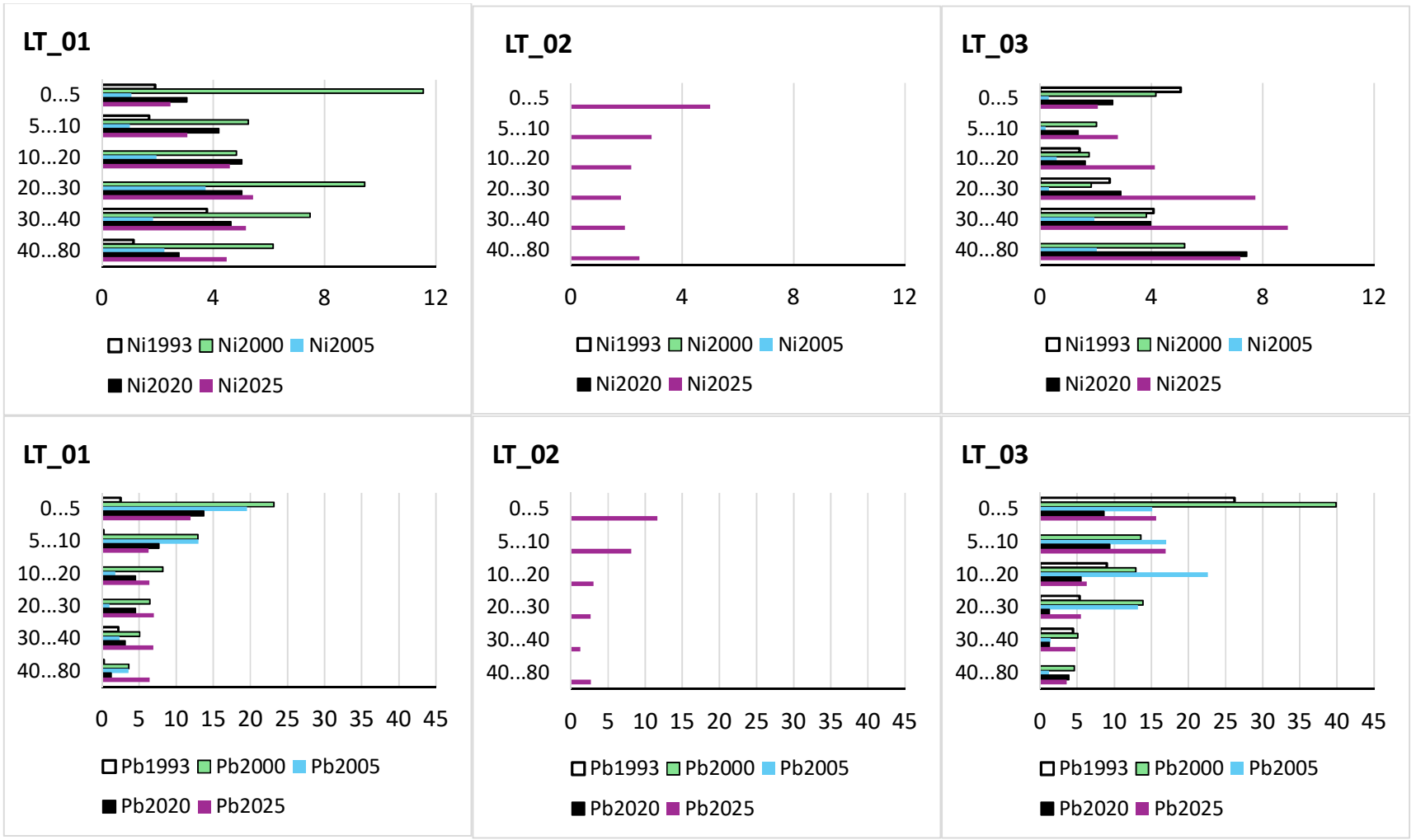
Apibendrinus gautus rezultatus nustatyta, kad per beveik tris stebėsenos dešimtmečius sunkiųjų metalų koncentracijos paviršiniuose dirvožemio sluoksniuose mažėjo, tačiau Cr, Cu ir Ni koncentracijos geocheminiuose barjeruose didėjo. Tai rodo, kad miškų dirvožemiuose vyksta ne bendras sunkiųjų metalų kaupimasis, o jų persiskirstymas dirvožemio profilyje. Dirvožemio barjerai efektyviai riboja potencialiai toksiškų elementų migraciją į gilesnius sluoksnius ir vandens sistemas, todėl dirvožemis išlieka viena svarbiausių miško ekosistemų geocheminio stabilumo grandžių.



8.29 pav. Kadmio ir chromo koncentracijų kitimas dirvožemių profiliuose.



8.30 pav. Vario ir mangano koncentracijų kitimas dirvožemių profiliuose.



8.31 pav. Nikelio ir švino koncentracijų kitimas dirvožemių profiliuose.

IŠVADA

Metalų koncentracija dirvožemio paviršiniuose horizontuose (0...5 cm gylyje) mažėjo, bet padidėjo chromo, vario ir nikelio koncentracija gilesniuosiuose dirvožemio horizontuoje, geocheminiuose dirvožemio barjeruose.

Galimos grėsmės dirvožemio būklei

Ilgalaikiai tyrimai parodė, kad miško ekosistemų dirvožemiuose sisteminio sunkiųjų metalų kaupimosi požymių nenustatyta. Tačiau nustatytas Cr, Cu ir Ni koncentracijų didėjimas geocheminiuose dirvožemio barjeruose rodo, kad šie elementai kaupiasi gilesniuose dirvožemio sluoksniuose ir gali tapti potencialiu ilgalaikiu jų rezervuaru.

Didžiausią galimą riziką ateityje gali lemti klimato kaitos sąlygomis vykstantys dirvožemio geocheminių savybių pokyčiai. Didėjanti oro temperatūra, dažnėjančios sausros, intensyvūs krituliai, dirvožemio užmirkimas bei organinės medžiagos mineralizacijos intensyvėjimas gali keisti dirvožemio pH, oksidacijos–redukcijos sąlygas ir sorbcinio komplekso savybes. Dėl to geocheminiuose barjeruose sukaupti potencialiai toksiški elementai gali tapti judresni, padidėti jų biologinis prieinamumas augalams bei dirvožemio organizmams ir sustiprėti jų migracija į dirvožemio bei gruntinius vandenis.

Papildomą dėmesį reikėtų skirti Cr, Cu ir Ni kaitai Aukštaitijos KMS bei Cd kaitai Žemaitijos KMS, nes šių elementų elgsena rodo, kad jų biogeocheminiai ciklai tampa jautresni aplinkos pokyčiams. Nors šiuo metu šie procesai nekelia tiesioginės grėsmės miško ekosistemų stabilumui, jų ilgalaikė stebėsena yra būtina siekiant anksti nustatyti galimus dirvožemio geocheminės pusiausvyros pokyčius.

Prognozė

Jeigu išliks dabartinės taršos mažėjimo tendencijos, Cd ir Pb koncentracijos paviršiniuose dirvožemio horizontuose turėtų toliau mažėti arba išlikti stabilios. Tuo pačiu Cr, Cu ir Ni koncentracijos geocheminiuose dirvožemio barjeruose greičiausiai išliks stabilios, tačiau jų biologinis prieinamumas ir judrumas gali didėti keičiantis dirvožemio geocheminėms sąlygoms. Didėjant dirvožemio temperatūrai, dažnėjant sausroms ir intensyvių kritulių epizodams, gali keistis dirvožemio geocheminių barjerų efektyvumas, didėti kai kurių potencialiai toksiškų elementų judrumas ir jų migracija į dirvožemio vandenį. Todėl atmosferinių iškritų, dirvožemio, dirvožemio vandens ir biologinių komponentų stebėsena išliks pagrindine priemone vertinant sunkiųjų metalų biogeocheminių ciklų pokyčius ir jų galimą poveikį miško ekosistemų stabilumui.

8.6. Sunkieji metalai samanose

Atmosferos užterštumas labai priklauso nuo kritulių režimo. Metalų koncentracija ore sumažėja lyjant lietui. Tai rodo, kad priklausomai nuo kritulių režimo, žymi dalis teršalų gali būti išplauti Lietuvos teritorijoje. Kadangi kritulių kiekis pagrindiniuose Lietuvos regionuose skiriasi iš esmės, todėl šių teritorijų užterštumui sunkiaisiais metais tirti buvo panaudotos augalų kaupiamosios savybės. Aukštesnieji augalai sulaiko ore esančius sunkiuosius metalus. Tačiau į aukštesniųjų augalų audinius šie elementai patenka ir per šaknų sistemą iš dirvožemio. Todėl vien tik lapų ar spyglių cheminės sudėties analizė, neatsižvelgiant į sunkiųjų metalų koncentraciją dirvožemyje ir šių elementų paėmimo iš dirvožemio intensyvumą, negali patikimai informuoti apie aplinkos užterštumą sunkiaisiais metalais.

Sunkiųjų metalų biomonitoringui plačiai naudojamos samanos. Jų biomasė miškų ekosistemose nėra didelė, tačiau jos funkcionuoja kaip aktyvus sluoksnis, laidus dideliam kiekiui dujų ir skysčių. Kai kuriuose miško tipuose aktyvus samanų paviršiaus plotas priartėja prie medyno lapijos paviršiaus ploto (Berg & Steinnes, 1997). Skirtingai negu aukštesnieji augalai, jos neturi išvystytos šaknų sistemos ir yra nuolat žaliuojantys daugiamečiai augalai. Visus cheminius elementus šie žemesnieji augalai paima tiesiai iš oro su atmosferos krituliais. Dėl visų šių savybių samanos yra nepakeičiami oro taršos bioindikatoriai, kurie įgalina nustatyti priklausomybę tarp sunkiųjų metalų kiekio samanose ir šių metalų koncentracijos ore bei jų nusėdimo intensyvumo (Rühling and Tyler, 1969).

Ekologinė samanose esančių sunkiųjų metalų reikšmė yra glaudžiai susijusi su jų vaidmeniu aplinkos monitoringe ir ekosistemų vertinime. Kadangi samanos greitai reaguoja į atmosferos nuosėdų pokyčius, jos suteikia vertingos informacijos apie taršos tendencijas ir galimą ekologinę riziką. Padidėjusi sunkiųjų metalų koncentracija samanose dažnai rodo padidėjusį teršalų kiekį, patenkantį į miško ekosistemas per atmosferos kelius.

Sunkiųjų metalų kaupimasis samanų sluoksniuose taip pat gali turėti įtakos maistinių medžiagų apykaitai ir dirvožemio procesams. Samanų kilimai prisideda prie vandens sulaikymo, dirvožemio izoliacijos ir organinių medžiagų kaupimosi miško ekosistemose. Pernelyg didelė metalų koncentracija gali pakeisti mikrobų aktyvumą ir skilimo procesus miško paklotuose, kuriuose dominuoja briofitai, o tai gali turėti įtakos ekosistemos produktyvumui ir atsparumui. Ilgalaikiai tarptautiniai samanų tyrimai parodė, kad visoje Europoje dėl išmetamų teršalų mažinimo politikos smarkiai sumažėjo švino ir kadmio nusėdimas atmosferoje, nors pramoniniuose regionuose ir miestų centruose vis dar gali būti padidėjusi koncentracija (Harmens ir kt., 2021).

Sunkieji metalai, tokie kaip švinas (Pb), kadmis (Cd), gyvsidabris (Hg), nikelis (Ni), chromas (Cr), cinkas (Zn) ir varis (Cu), laikui bėgant gali kauptis samanų audiniuose ir atspindėti tiek vietinius, tiek tolimojo atmosferos taršos šaltinius. Samanų biomonitoringas buvo plačiai taikomas visoje Europoje, siekiant įvertinti erdvinius ir laikinus teršalų nusėdimo modelius miškinguose regionuose, pramoninėse zonose ir atokiose ekosistemose (Harmens ir kt., 2010).

Lietuvos regionų užterštumo sunkiaisiais metalais tendencijoms išaiškinti, patikimiau remtis sunkiųjų metalų matavimo samanose duomenimis. Tokie tyrimai visoje Lietuvos teritorijoje LŽŪU ir Fizikos instituto mokslininkų pirmą kartą buvo atlikti 1990 m. 1992 m. LŽŪU mokslininkai šiuos tyrimus pakartojo Nacionalinių parkų pušynuose, o nuo 1995 Fizikos instituto mokslininkų sunkiųjų metalų tyrimai vykdomi reguliariai, kas 5 m. laikotarpį.

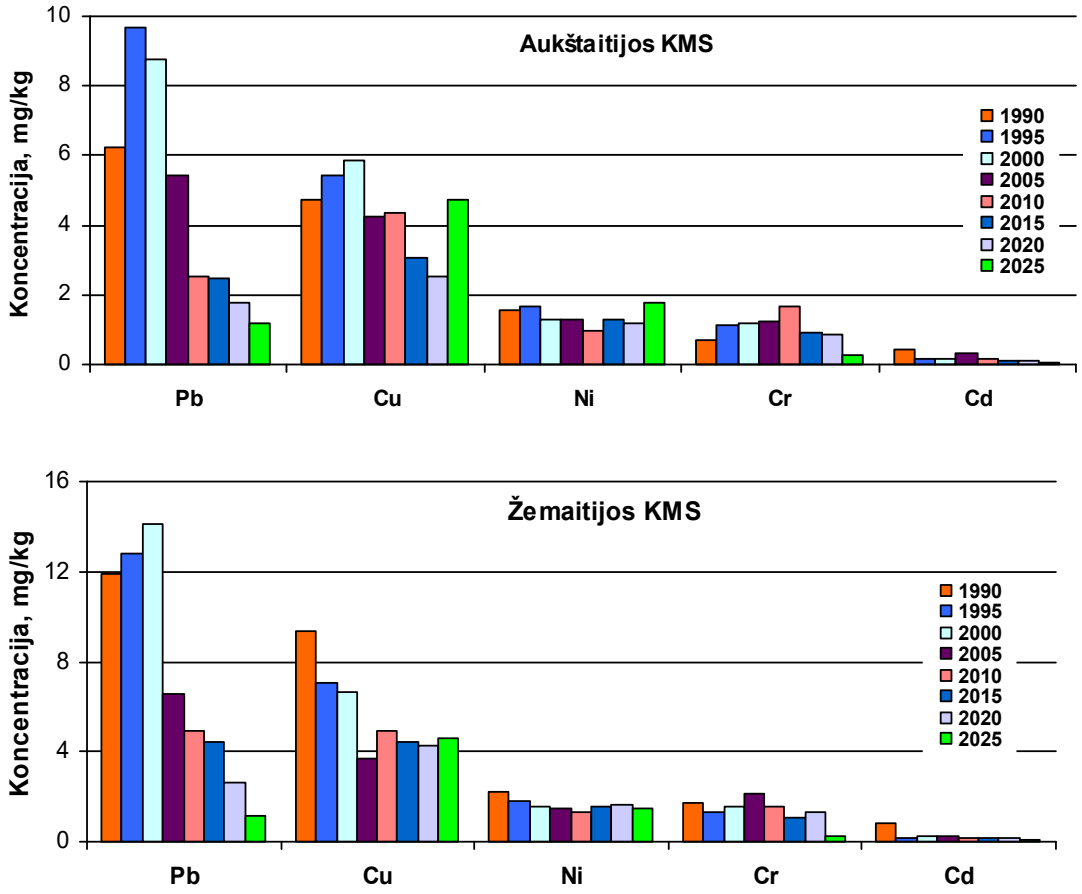
25 metų tyrimų rezultatai rodo, kad Lietuvos teritorijoje iš esmės sumažėjo sunkiųjų metalų koncentracijos samanose. 1990 m. nustatytos koncentracijos visų tirtų sunkiųjų metalų viršijo daugelio tirtų metalų vidutines koncentracijas ir 1995, 2000 ir 2010 m. Paskutiniuoju laikotarpiu (2000 – 2010) toliau iš esmės mažėja (virš 20%) Pb, Ni, Cu ir Fe koncentracijos samanose. Palaipsniškai didėjo tik Cr koncentracijos, o Zn ir Cromo svyravo savo kaitos intervale.

8.6 lentelė. Sunkiųjų metalų kaita samanose Lietuvos teritorijoje 1990-2020 m.

Metalas	**Laikotarpis**						**Pokytis, %**					
	1990	**1995**	**2000**	**2010**	**2015***	**2020***	**1990 2015**	**1995 2015**	**1995 2020**	**2000 2015**	**2010 2015**	**2000 2020**
Pb	9,90	11,40	8,54	3,73	3,47	1,80	-64.9	-69.6	-9.6	-59.4	-7	-6.74
Ni	2,03	1,75	1,39	1,14	1,40	1,41	-31	-20	-0.34	0.7	22.8	0.02
Cu	7,10	5,99	6,54	4,63	3,77	3,40	-46.9	-37.1	-2.59	-42.4	-18.6	-3.14
Cr	1,41	1,34	1,29	1,60	0,99	1,09	-29.8	-26.1	-0.25	-23.3	-41.4	-0.2
Cd	1,24	0,19	0,15	0,17	0,16	0,14	-87.1	-15.8	-0.05	6.7	-5.9	-0.01
Zn	100,8	40,20	34,50	49,00	41,3	36,25	-59	2.7	-3.95	19.7	-15.7	1.75
Fe	1720,0	596,0	636,0	176,7	141,8	228,88	-91.8	-76.2	-367.1	-77.7	-19.8	-407.1

- *- tik KMS duomenys*

Palyginus sunkiųjų metalų koncentracijas KMS baseinuose su Lietuvos vidutinėmis reikšmėmis, matyti, kad sunkiųjų metalų koncentracijos samanose turi reikšmingą tendenciją mažėti.



8.32 pav. Pagrindinių sunkiųjų metalų koncentracijos samanose 1990-2020 m. laikotarpiu.

2020 m. Aukštaitijos KMS sunkiųjų metalų koncentracijos buvo mažesnės negu nustatytos 2015 m. Žemaitijos KMS tirtų metalų koncentracijos, aip pat kaip ir Aukštaitijos KMS, buvo mažesnės negu 2015 m. išskirus Ni ir Cr, o ypač reikšmingai sumažėjo samanose Pb koncentracijos.

Apibendrinus 35 m. tyrimo rezultatus nustatyta kad Aukštaitijos KMS reikšmingai mažėja tik švino, cromo ir kadmio koncentracijos samanose. Cu koncentracijos iki 2025 m. taip pat mažėjo reikšmingai, tačiau 2025 m. nustayta viena dižiausių šio element kioncentracijų pakeitė jo kaitos trendą ir reikšmingumą. Ni kaitoje taip pat nustatyta didžiausia per visą tiriamąjį laikotarpį šio elemento koncentracija samanose.

Žemaitijos KMS per šį laikotarpį įvyko tie patys pokyčiai nustayti Aukštaitijos KMS reikšmingai mažėjo Pb, Cr ir Cd koncentracijos ir tik Cu koncentracijos 2025 m., skirtingai negu Aukštaitijos KMS, nepakeitė šio element kaitos pobūdžio, nors koncentracijos išliko tame pačiame lygmenyje kaip ir 2010-2020 m. Panašiai kito ir Ni.

8.7 lentelė. Aukštaitijos KMS sunkiųjų metalų koncentracijos samanose ir jų kaitos intensyvumas 1990-2025 m.

SM	B	Std.Err.	t(6)	F(1, 6)	r^2	Std.Err of estim	p
Pb	-3,226	0,775	-4,160	17,302	0,861	6,713	0.006
Cu	-6,514	3,622	-1,798	3,234	0,350	10,66	0,122
Ni	-6,627	17,806	-0,372	0,138	0,023	13,08	0,723
Cr	-9,861	11,243	-0,877	0,769	0,114	12,45	0,414
Cd	-72,565	30,078	-2,413	5,821	0,492	9,42	0,052

8.8 lentelė. Žemaitijos KMS sunkiųjų metalų koncentracijos samanose ir jų kaitos intensyvumas 1990-2025 m.

SM	B	Std.Err.	t(6)	F(1, 6)	r^2	Std.Err of estim	p
Pb	-2,281	0,388	-5,877	34,543	0,852	5,089	0,001
Cu	-5,134	1,562	-3,287	10,807	0,643	7,904	0,017
Ni	-29,625	13,895	-2,132	4,0546	0,431	9,978	0,077
Cr	-14,963	6,777	-2,208	4,873	0,448	9,827	0,069
Cd	-35,374	14,955	-2,365	5,595	0,483	9,516	0,056

Todėl galima teigti, kad Žemaitijos KMS miško ekosistemų samanose kaupiasi daugiau sunkiųjų metalų negu Aukštaitijos KMS, tačiau čia išsivalymo procesai vyksta intensyviau negu Aukštaitijos KMS.

Tokią sunkiųjų metalų koncentracijų kaitą KM miško ekosistemų samanose pagrinde lėmė sunkiųjų metalų srautai su krituliais. Aukštaitijos KMS Pb, Cr ir Cd koncentracijų mažėjimą samanose lemia šių metalų koncentracijų kaita krituliuose, o Cu, kad ir nereikšmingą augimą, šio elemento srautas su krituliais.

Žemaitijos KMS visų tirtų sunkiųjų metalų koncentracijų mažėjimą lemia mažėjančios jų koncentracijos krituliuose išskyrus tik Cr koncentracijas, kurios, kaip ir šio elemento srautai su krituliais neturi aiškesnės tendencijos kisti.

Sunkiųjų metalų koncentracijų reikšmingą mažėjimą lemia jų koncentracijų krituliuose ir bendro srauto su krituliais mažėjimas, tačiau ši kaitą neturi reikšmingos įtakos sunkiųjų metalų koncentracijų reikšmingam padidėjimui samanose pradiniame tyrimų etape. Tokio proceso priežasčių reiktų ieškoti kituose procesuose vykstančiuose miško ekosistemose.

Sunkiųjų metalų koncentracijų samanose išvados

1. Ilgalaikiai (1990–2025 m.) samanų tyrimai parodė, kad Lietuvos miško ekosistemose atmosferinės kilmės sunkiųjų metalų tarša per pastaruosius 35 metus reikšmingai sumažėjo. Ryškiausiai mažėjo Pb, Cd ir Cr koncentracijos samanose, o daugumos kitų metalų koncentracijos išliko stabilios arba turėjo mažėjimo tendenciją.
2. Aukštaitijos ir Žemaitijos kompleksinio monitoringo stočių rezultatai patvirtino bendras Lietuvos tendencijas. Abiejose stotyse reikšmingai mažėjo Pb, Cd ir Cr koncentracijos samanose, o Cu ir Ni koncentracijų kaita pasižymėjo trumpalaikiais svyravimais. 2025 m. Aukštaitijos KMS nustatytos padidėjusios Cu ir Ni koncentracijos nepakeitė bendros ilgalaikės atmosferinės taršos mažėjimo krypties, tačiau rodo būtinybę tęsti šių elementų stebėseną.
3. Žemaitijos KMS samanose sunkiųjų metalų koncentracijos išliko didesnės negu Aukštaitijos KMS, tačiau jų mažėjimo tempas buvo spartesnis. Tai rodo, kad vakarų Lietuvos miško ekosistemos istoriškai patyrė didesnį atmosferinės taršos poveikį dėl intensyvesnės tolimosios oro teršalų pernašos, tačiau pastaraisiais dešimtmečiais atmosferos išsivalymo procesai šiame regione vyksta intensyviau.
4. Nustatyta, kad samanų cheminė sudėtis glaudžiausiai siejasi su sunkiųjų metalų koncentracijomis ir jų srautais atmosferinėse iškritose. Aukštaitijos KMS Pb, Cd ir Ni koncentracijų mažėjimas samanose atitiko šių elementų mažėjimą krituliuose, o Žemaitijos KMS beveik visų tirtų metalų koncentracijų mažėjimą taip pat lėmė mažėjanti atmosferinė depozicija. Tai patvirtina, kad samanos yra vienas jautriausių ilgalaikių atmosferinės taršos bioindikatorių.
5. Gauti rezultatai rodo, kad samanos daug tiksliau negu žalioji lapija atspindi atmosferinės kilmės sunkiųjų metalų kaitą. Kadangi jų cheminę sudėtį beveik neveikia dirvožemio savybės ar augalų fiziologiniai procesai, samanų stebėsena leidžia patikimai vertinti ilgalaikius atmosferinės taršos pokyčius ir jų erdvinį pasiskirstymą hemiborealinių miško ekosistemų mastu.

8.7. Sunkiųjų metalų koncentracijų miško ekosistemose kaita KMS teritorijose apibendrinimas.

Aukštaitijos KMS grėsmę miško ekosistemoms galėtų kelti paskutiniaisiais metai reikšmingai padidėjusios Cr koncentracijos ir šio elemento srautai su krituliais, o taip pat reikšmingai didėjanti Cu koncentracija krituliuose ir šio elemento srautas į miško paklotę.

Teigiami pokyčiai, kurie galėtų skatinti atitinkamų biotos komponentų rūšių įvairovę ir gausą turėtų būti reguliariai mažėjanti vienų toksiškiausių sunkiųjų metalų Pb ir Cd koncentracijos krituliuose ir jų srautai.

Žemaitijos KMS sunkiųjų metalų koncentracijų ir jų srautų kaita neturėtų sukelti naujų grėsmių miško ekosistemos biotos komponentams. Teigiami pokyčiai ekosistemoje galėtų būti siejami su reguliariu Pb koncentracijų ir jo srautų mažėjimu, o taip pat su sumažėjusiomis Zn, Ni ir Cu koncentracijomis krituliuose ir jų srautais į miško paklotę.

Sunkiųjų metalų metinių srautų su krituliais į miško paklotę analizė parodė, kad Žemaitijos KMS krituliai labiau užteršti sunkiaisiais metalais negu Aukštaitijos KMS. Tai tolimųjų pernašų iš Vidurio ir Vakarų Europos rezultatas.

Palyginus sunkiųjų metalų srautus į miško paklotę nustatyta, kad reikšmingai mažėja abiejose stotyse Pb srautas: Aukštaitijos KMS po -103 µg/m^2 per m., o Žemaitijos KMS net 7 kartus intensyviau, po 748 µg/m^2 per m. ***Cd srautas*** Aukštaitijos KMS mažėja po 3,5 µg/m^2 per m., o Žemaitijos KMS – apie 4 kartus intensyviau – 13,8 µg/m^2 per m. Aukštaitijos KMS nustatytas papildomai reikšmingas Cu srauto augimas po 277 µg/m^2 per m.

2021-2025 m. laikotarpis išsiskyrė sunkiųjų metalų srautų su krituliais padidėjimu su mažėjimo tendencija iki 2025 m. Koncentracijų kaitoje pavojingų tendencijų visumoje nenustatyta, išskyrus Cr koncentracijų padidėjimą Aukštaitijos ir Žemaitijos KMS 2023-2024 m. laikotarpiu. Paskutiniaisiais metais šio elemento koncentracijos sumažėjusios. Ar tai karo Ukrainoje pasekmė parodys ateities tyrimai.

Beržų lapai ir pirmų metų pušies spygliai sunkiųjų metalų kaupia daugiau negu eglės įvairaus amžiaus spygliai ir antrų metų pušies spygliai. Kaip ir makro elementus, krituliai matyt išplauna iš audinių ir sunkiuosius metalus, kurių koncentracijos senesniuose audiniuose mažėja.

Aukštaitijos KMS Pb koncentracija lapijos pavyzdžiuose mažėja, o beržų lapuose ir pušies II m. spygliuose, net reikšmingai, po -0,1 mg/kg ir -0,05 mg/kg per metus. Eglės ir pušies I metų spygliuose mažėjimas buvo nereikšmingas.

Mažėja taip pat ir Cu koncentracijos lapijos pavyzdžiuose, nors jo srautai su krituliais ir koncentracijos krituliuose pakankamai reikšmingai didėjo. Reikšmingiausiai šis mažėjimas pasireiškia senesniuose pavyzdžiuose, t.y. eglės II metų pušies spygliuose.

Aukštaitijos KMS tirtų medžių lapijos pavyzdžiuose per paskutinįjį 2005-2020 m. laikotarpi didėja Zn, Na ir Cd koncentracijos, mažai keičiasi Cr ir Ni ir mažėja Cu ir bei reikšmingiausiai Pb koncentracijos.

Žemaitijos KMS intensyviausiai Pb mažėja beržų lapuose – po 0,09 mg/kg per m. ir pušies spygliuose: po 0,04 mg/kg per metus. Eglės spygliuose Pb mažėjimas silpniausiai išreikštas ir siekia tik -0,05 mg/kg per m.

Žemaitijos KMS tirtų medžių lapijos pavyzdžiuose per paskutinįjį 2005-2020 m. laikotarpi didėja Zn koncentracijos, *mažai keičiasi ir mažėja* Na ir mažėja Cd, Cr, *Ni ir Cu, bei reikšmingiausiai Pb koncentracijos.*

Apibendrinus gautus rezultatus, nustatyta, kad sunkiųjų metalų koncentracijos krituliuose ir jų srautai su krituliais į miško paklote nėra pagrindinis veiksnys lemiantis sunkiųjų metalų koncentracija lapijoje ir jų kaitą laike. Tik Pb ir Cr koncentracijų ir jų srautų mažėjimas tiesiogiai atsispindi ir šių elementų koncentracijose lapijos pavyzdžiuose.

Sunkiųjų metalų koncentracijos krituliuose nėra pagrindinis veiksnys lemiantis lapijos užterštumą šiais elementais.

2021-2025 m. esminių pokyčių ar galimų grėsmių miško ekosistemoms sunkiųjų metalų koncentracijų lapijoje kaitoje nenustatyta, tačiau dar nežymūs padidėjimai gali būti siejami su karo veiksmais Ukrainoje.

1994-2025 m. laikotarpiu, nustatyta, kad Aukštaitijos KMS reikšmingiausiai didėjo Cd koncentracija nuokritose – po 0,004 mg/kg, Zn – po 0,94 mg/kg per m., Cu – po 0,043 ng/kg per m., Na – po 2,5 mg/kg per m. ir K – po 4,3 mg/kg per m. Reikšminga ir mažėjimo tendencija nustatyta Pb – po -0,09 mg/kg per m. ir Cr po -0,04 mg/kg per m. Zn ir Mn koncentracijų sekose reikšmingos kaitos nenustatyta. ***Išskirtiniai 2021-2024 m. tyrimo rezultatai. Šiuo laikotarpi reikšmingai padidėjo Na, Cu Cd koncentracijos nuokritose.***

1994-2025 m. laikotarpiu ***nustatyta, kad tyrimų pradžioje sunkiųjų metalų srautus su nuokritomis sąlygojo nuokritų kiekis, tai paskutiniaisiais, išskirtiniais 2019 m., srautus į miško ekosistemą sąlygojo sunkiųjų metalų koncentracijos nuokritose. Reikšmingai didėjo Cd srautas su nuokritomis – po 0,003 mg/m^2 per m., Na – po 1,5 mg/m^2 per m., Na – po 1,5 mg/m^2 per m. ir reikšmingiausiai Cu – po 0,04 mg/m^2 per m. ir K – po 13 mg/m^2 per m. Per tiriamąjį laikotarpį reikšmingiausiai mažėjo tik Cr srautas, po -0,007 g/m^2 per m. ir Pb po 0,023 mg/m^2 per m.***

Daugiametė rezultatų analizė rodo, kad sunkiųjų metalų srautus didžiąja dalimi lemia ir nuokritų kiekis, kuris 1,5 k yra didesnis negu Aukštaitijos KMS, ir sunkiųjų metalų koncentracijos nuokritose.

Žemaitijos KMS stabilios jau daugelį metų išlieka Cu, Zn koncentracijos nuokritose. Mažėjimo tendencija stebima Cd, Cr, Ni ir Pb koncentracijose, o didėja Na. Išskirtinės Mn ir K koncentracijų nuokritose kaitos: iki 2014-2015 m. šių elementų koncentracijos turėjo pakankamai aiškią tendenciją didėti, po šio laikotarpio iki 2025 m. turi tendenciją mažėti. ***2021-2025 m. išsiskyrė padidėjusiomis koncentracijomis Na ir Cu.***

Per tiriamąjį laikotarpį Pb srautas mažėja po 0,09 mg/m^2, o Cr – po -0,024 mg/m^2 per m. Mažėja ir Ni srautas su nuokritomis, po 0,016 mg/m^2 per m. Stabilus išlieka Cu ir Zn srautas, o besikeičiantis nustatytas Mn ir k, tik didėjimo tendencija šių metalų srautų tęsėsi iki 2018 m., o paskutiniaisiais metais pakankamai ženkliai koncentracijos pradėjo mažėti.

Sunkiųjų metalų kaitos tendencijos KM stočių dirvožemio vandenyje parodė, kad Cu koncentracija abiejų gylių dirvožemio vandenyje Aukštaitijos KMS išliek stabiliame lygmenyje per visa tiriamąjį laikotarpį. Išskirtinė, tik vieną kartą nustatyta didelė šio elemento koncentracija 2011 m. Aukštaitijos KMS dirvožemio vandenyje 40 cm gylyje. 2021-2025 m. laikotarpyje Cu koncentracijos minimaliame lygmenyje papildomai dar palaipsniui mažėja.

Žemaitijos KMS dirvožemio vandenyje Cu koncentracijos yra kiek tai mažesnės negu Aukštaitijos KMS, tačiau taip pat ryškesnės šio elemento kaitos tendencijos nenustatyta.

Cd koncentracijos nuo 2013 m. Aukštaitijos KMS dirvožemio vandenyje neturi tendencijos kisti, išskyrus tik vienkartinę didelę nustayta koncentraciją 2020 m., Tai Žemaitijos KMS dirvožemio vandenyje dėl nustaytų didesnių koncentracijų 2018 ir 2024 m. turi tendenciją didėti. Padidėjusios koncentracijos čia nustatytos ir 2021-2025 m. laikotarpiu.

Cr koncentracijos reikšmingai didėja Aukštaitijos KMS su nustatyta maksimalia koncentracija 2023 m. 20 cm gylyje. Žemaitijos KMS šio elemento koncentracijos išlika stabili.

Zn koncentracijų kaita Aukštaitijos KMS priešinga: 20 cm gylyje Zn reikšmingai mažėja, kai 40 cm gylyje turi tendenciją didėti. Žemaitijos KMS Zn koncentracijos dirvožemio vandenyje nuo 2009-2010 m. reikšmingai nekinta.

Ni apie 10 kartus daugiau yra užterštas Aukštaitijos KMS dirvožemio vanduo, kur šio elemento koncentracijos svyruoja apie 20 µg/l ir turi aiškią tendenciją didėti. Žemaitijos KMS Ni koncentracijos svyruoja apie 1,5-2 µg/l ir tik 2024-2025 m. nustatytos jo didesnės koncentracijos dirvožemio vandenyje.

Pb kaitoje nustatytos panašios kaitos tendencijos abiejų stočių abiejų gylių dirvožemio vandenyse: nuo 2007-2008 m. šio elemento koncentracijos išlieka praktiškai stabiliame lygmenyje tik Aukštaitijoje su neženkliu didėjimu, o Žemaitijoje mažėjimu.

Nepaisant šių tendencijų paskutiniaisiais metais Pb koncentracija Aukštaitijos KMS dirvožemio vandenyje siekia 2 µg/l, kai tuo tarpu Žemaitijos KMS 7 kartus daugiau - apie 15 µg/l.

Gruntinio vandens tyrimai parodė, kad Mn koncentracija nustatoma tik iki 2 µg/l ribos, kuri yra didesnė nei koncentracijos nustatytos ankstesniais metais. 2018-2019 m. sausra neturėjo reikšmingos įtakos Mn koncentracijų kaitai gruntiniuose vandenyse.

Didžiausios Fe koncentracijos gruntiniuose vandenyse nustatytos 2008-2011 m. abiejų stočių gruntiniuose vandenyse. Nuo šio laikotarpio iki 2019 m. Fe koncentracijos turi tendencija mažėti. Reikšmingesnė Fe koncentracijos priklausomybė nuo kritulių kiekio nenustatyta.

Gruntiniame vandenyje 2010-2011 metais sunkiųjų metalų koncentracijos buvo padidėjusios iki didžiausių reikšmių per stebėsenos laikotarpį,

2017-2020 m. pažymėtinas dėsningumas - gruntinio vandens užterštumo Cu mažėjimas. Išsiskiria 2017 m. reikšmingai padidėjusios Cu koncentracijos gruntiniuose vandenyse Aukštaitijos KMS. Paskutiniaisiais metais Cu koncentracijos abiejų stočių gruntiniuose vandenyse išlieka stabilios panašiame lygmenyje, t.y. apie mažiau negu 5 µg/l.

Cd koncentracijos Aukštaitijos KMS nuo 2011 m. išlieka minimaliame lygmenyje apie 0,1-0,2 µg/l. Padidėjusi koncentracija buvo nustatyta tik 2020. Žemaitijos KMS, dėl tyrimų tikslumo ribotumo Cd koncentracijos tiksliai nustatyti nepavyksta. Ji yra mažesnė negu 0,1 µg/l.

Didžiausios Cr koncentracijos buvo nustatytos 2010 m. Paskutiniuoju laikotarpiu koncentracija reikšmingai sumažėjo ir svyruoja minimaliame lygmenyje apie 1 µg/l.

Pb koncentracijos gruntiniuose vandenyse, taip pat nuo 20012 m. išlieka stabilios minimaliame lygmenyje apie 1-2 µg/l Aukštaitijos KMS ir apie 2-4 µg/l lygmenyje Žemaitijos KMS gruntiniuose vandenyse.

Analogiškai kito ir Zn bei Ni koncentracijų kaitoje. Nuo 2013 m. esminių pokyčių šių elementų koncentracijų kaitoje nenustatyta. Ženklus Ni koncentracijų padidėjimas Aukštaitijos KMS buvo registruotas 2018m. Paskutiniuoju laikotarpiu Ni koncentracijos šioje stotyje pasiekė savo įprastinį daugiametį vidurkį. Žemaitijos KMS Ni koncentracijos jau daugiau kaip 6 m išlieka stabilios 2 µg/l lygmenyje.

2017-2020 m. pažymėtinas dėsningumas - gruntinio vandens užterštumo sunkiaisiais metalais mažėjimas, sinchroniškas geležies koncentracijų mažėjimui.

Sunkiųjų metalų tirtuose upelių vandenyse tyrimų analizė parodė, Cu ir Cr koncentracijų augimo tendenciją. Cu kaitoje 2010-2012 m. ir 2015 m. registruojami šio elemento didžiausi kiekiai. Po šių metų iki 2025 m. registruojamas laipsniškas Cu koncentracijų mažėjimas, 2025 m. pasiekiant minimaliausią reikšmę per visą tiriamąjį laikotarpį.

Cd koncentracijų kaitoje stebima šio elementu didėjimo tendencija abiejose stotyse, tačiau priežastis gali būti ir dėl cheminių analizių atlikimo tikslumo. Paskutiniuoju laikotarpi Cd koncentracijos, kurių reikšmė yra žemesnė negu 0,1 µg/l yra nenustatomos. Cr analizę riboja cheminių tyrimų tikslumo ribos, kurios yra didesnės negu Cr koncentracijos vandenyje.

Cd koncentracijos reikšmingai upelio vandenyse mažėja ir paskutiniuoju laikotarpiu jo minimalios koncentracijos yra mažesnės negu cheminių tyrimų galimybės. Paskutiniuoju laikotarpiu Cd koncentracija upelio vandenyje, retai viršija mažiausią nustatymo ribą. 0,1 µg/l.

Ni ir Cr koncentracijos per tiriamąjį laikotarpį išlieka stabilios. Paminėtina tik kad 2015 m. sausra turėjo reikšmingos įtakos Cr koncentracijų padidėjimui Aukštaitijos KMS upelio vandenyje. Paskutiniaisiais metais Cr koncentracijos šios stoties vandenyse vėl sumažėjo iki daugiamečio vidurkio, o Žemaitijos KMS upelio vandenyje padidėjo, viršydama 1ug/l ribą.

Zn koncentracijos upelių vandenyse reikšmingai nesiskiria tarp stočių ir išlieka minimaliame lygmenyje praktiškai per visą tiriamąjį laikotarpį.

Pb koncentracijos abiejose stotyse mažėja po maždaug 0,02-0,05 ug/l per m.. Paskutiniaisiais metais Aukštaitijos KMS upelio vandenyje Pb koncentracija išlieka stabili, o jo kaitą lemia cheminių analizių tikslumas. ***Žemaitijos KMS 2019 m. užregistruotas padidėjęs upelio vandens užterštumas šiuo sunkiuoju metalu, ypač 2023 m.***

Palyginus metalų koncentracijų kaitą tarp KMS, nustatyta, kad sunkiaisiais metalai tirtų upelių vandenys užteršti tam pačiame lygmenyje, ir jų kaitos tendencijos yra panašios.

Apibendrinus 35 m. tyrimo rezultatus nustatyta kad Aukštaitijos KMS reikšmingai mažėja tik švino, chromo ir kadmio koncentracijos samanose. Cu koncentracijos iki 2025 m. taip pat mažėjo reikšmingai, tačiau 2025 m. nustatyta viena didžiausia šio elemento koncentracija pakeitė jo kaitos trendą ir reikšmingumą. Ni kaitoje taip pat nustatyta didžiausia per visą tiriamąjį laikotarpį šio elemento koncentracija samanose. Tai galimai karo Ukrainoje rezultatas.

Žemaitijos KMS per šį laikotarpį įvyko tie patys pokyčiai nustatyti Aukštaitijos KMS: reikšmingai mažėjo Pb, Cr ir Cd koncentracijos ir tik Cu koncentracijos 2025 m., skirtingai negu Aukštaitijos KMS, nepakeitė šio elemento kaitos pobūdžio, nors koncentracijos išliko tame pačiame lygmenyje kaip ir 2010-2020 m. Panašiai kito ir Ni koncentracijos.

Apibendrinus rezultatus galima teigti, kad Žemaitijos KMS miško ekosistemų samanose kaupiasi daugiau sunkiųjų metalų negu Aukštaitijos KMS, tačiau čia išsivalymo procesai vyksta intensyviau negu Aukštaitijos KMS.

Miško ekosistemose sunkiųjų metalų migracija nėra linijinis procesas „atmosfera–dirvožemis–vanduo“. Atmosferinės iškritos inicijuoja metalų patekimą į ekosistemą, tačiau tolesnį jų pasiskirstymą reguliuoja tarpusavyje susiję biologiniai (lapija, samanos, nuokritos) ir geocheminiai (dirvožemis, dirvožemio vanduo, gruntinis vanduo) procesai. Dėl šios daugiapakopės savireguliacijos sistemos didžioji dalis potencialiai toksiškų metalų yra imobilizuojama dirvožemyje, o jų migracija į vandens sistemas išlieka ribota net ir ilgalaikės klimato kaitos sąlygomis.

Bendrosios sunkiųjų metalų migracijų ir transformacijų išvados KMS baseinų miško dirvožemio ir vandens sistemoje

1. **Dirvožemis yra pagrindinis sunkiųjų metalų geocheminis filtras:** Ilgalaikiai tyrimai parodė, kad didžioji dalis su atmosferinėmis iškritomis į miško ekosistemą patenkančių sunkiųjų metalų nėra tiesiogiai išplaunami į vandens sistemas. Jie efektyviai sulaikomi dirvožemio organiniuose horizontuose ir geocheminiuose barjeruose, todėl dirvožemis tampa pagrindiniu sunkiųjų metalų kaupimo ir migracijos reguliavimo komponentu. Toks procesas užtikrina ilgalaikį hemiborealinių miškų geocheminį stabilumą.
2. **Sunkiųjų metalų migracija vandens sistemoje yra ribota:** Nepaisant skirtingo atmosferinės depozicijos intensyvumo Aukštaitijos ir Žemaitijos KMS, gruntinio ir paviršinio vandens užterštumas daugeliu tirtų metalų išliko mažas ir gana stabilus. Tai rodo, kad natūralūs dirvožemio sorbcijos, kompleksų susidarymo ir geocheminių barjerų procesai efektyviai riboja sunkiųjų metalų pernašą į hidrologinę sistemą.
3. **Klimato ekstremumai daro didesnę įtaką negu ilgalaikė atmosferinė tarša:** trumpalaikiai Cu, Cr, Cd ir Ni koncentracijų padidėjimai dirvožemio bei paviršiniuose vandenyse dažniausiai buvo susiję su sausromis arba kitais hidrometeorologiniais ekstremumais. Tačiau šie padidėjimai nevirto ilgalaikėmis didėjimo tendencijomis. Tai rodo, kad klimato kaita tampa svarbiu veiksniu, reguliuojančiu sunkiųjų metalų judrumą, tačiau kol kas nepakeitė bendros ilgalaikės ekosistemų geocheminės pusiausvyros.
4. **Žemaitijos ir Aukštaitijos ekosistemos pasižymi skirtingu geocheminiu jautrumu:** Žemaitijos KMS atmosferinė depozicija ir samanų užterštumas išliko didesni dėl intensyvesnių tolimųjų oro teršalų pernašų, tačiau daugumos metalų koncentracijos mažėjo sparčiau negu Aukštaitijos KMS. Tuo tarpu Aukštaitijos KMS jautriau reagavo į Cr, Cu ir Ni koncentracijų padidėjimą dirvožemio vandenyje bei geocheminiuose dirvožemio horizontuose. Tai rodo, kad skirtingų regionų miško ekosistemų atsaką lemia ne tik atmosferinė tarša, bet ir vietinės dirvožemio geocheminės savybės bei hidrologinis režimas.
5. **Naujausi pokyčiai kol kas yra epizodiniai:** 2022–2025 m. laikotarpiu užregistruoti trumpalaikiai Cr, Cu ir Ni koncentracijų padidėjimai atmosferinėse iškritose, samanose ir kai kuriuose dirvožemio bei vandens komponentuose. Tačiau šie pokyčiai kol kas neformuoja naujos ilgalaikės tendencijos. Viena iš galimų priežasčių gali būti pakitusios atmosferos pernašos ir karo Ukrainoje metu padidėjusios emisijos, tačiau šiai hipotezei patvirtinti būtini tolesni ilgalaikiai stebėjimai.

Bendrosios galimos grėsmės

Ilgalaikiai kompleksinio monitoringo tyrimai parodė, kad šiuo metu hemiborealinių miško ekosistemų geocheminis stabilumas išlieka aukštas, o sisteminio sunkiųjų metalų kaupimosi daugumoje ekosistemos komponentų nenustatyta. Tačiau pastaraisiais metais užregistruoti epizodiniai Cr, Cu ir Ni koncentracijų padidėjimai atmosferinėse iškritose, samanose, dirvožemio vandenyje ir kai kuriuose kituose ekosistemos komponentuose rodo, kad formuojasi nauji aplinkos pokyčių signalai, kurių ilgalaikė reikšmė dar nėra aiški.

Didžiausia galima grėsmė ateityje gali būti susijusi ne su didėjančia atmosferine sunkiųjų metalų tarša, bet su klimato kaitos sąlygomis vykstančiais dirvožemio geocheminių savybių pokyčiais. Didėjanti oro temperatūra, dažnėjančios sausros, intensyvūs krituliai bei dirvožemio drėgmės režimo svyravimai gali didinti geocheminiuose dirvožemio barjeruose sukauptų Cr, Cu ir Ni judrumą, jų biologinį prieinamumą bei migraciją į dirvožemio ir gruntinius vandenis.

Papildomą neapibrėžtumą kelia pastaraisiais metais registruoti trumpalaikiai kai kurių sunkiųjų metalų koncentracijų padidėjimai, kurių viena iš galimų priežasčių gali būti pakitę atmosferos teršalų pernašos procesai ar nauji antropogeniniai emisijų šaltiniai.

Didžiausia ilgalaikė rizika miško ekosistemų geocheminei pusiausvyrai yra galima sunkiųjų metalų biogeocheminių ciklų transformacija, kai dėl klimato kaitos keistųsi ne bendras jų kiekis ekosistemoje, bet jų judrumas, biologinis prieinamumas ir persiskirstymas tarp atmosferos, augalijos, dirvožemio ir vandens sistemų.

Bendrosios prognozės

Artimiausiu laikotarpiu miško ekosistemų užterštumas sunkiaisiais metalais turėtų išlikti stabilus arba toliau mažėti. Toliau turėtų mažėti Pb ir Cd koncentracijos bei jų srautai atmosferinėse iškritose, samanose, nuokritose ir paviršiniuose dirvožemio horizontuose.

Didėjanti oro temperatūra, dažnėjančios sausros, intensyvūs krituliai ir dirvožemio drėgmės pokyčiai gali tapti pagrindiniais toksiško elementų judrumo veiksniais. Todėl ateityje tikėtina ne tiek didesnė sunkiųjų metalų akumuliacija miško ekosistemose, kiek jų persiskirstymo tarp dirvožemio, dirvožemio vandens ir biologinių komponentų intensyvėjimas.

Miško ekosistemų geocheminiai barjerai ir biologiniai savireguliacijos mechanizmai išliks pagrindiniais veiksniais, ribojančiais sunkiųjų metalų patekimą į gruntinius ir paviršinius vandenis. Tačiau trumpalaikiai Cr, Cu ir Ni koncentracijų padidėjimai pastaraisiais metais rodo, kad klimato kaitos ir galimų naujų atmosferinės taršos šaltinių poveikis turėtų būti nuolat vertinamas ilgalaikio kompleksinio monitoringo sistemoje.

Todėl didžiausia ilgalaikio monitoringo reikšmė ateityje bus ne tik fiksuoti atmosferinės taršos pokyčius, bet ir anksti nustatyti sunkiųjų metalų biogeocheminių ciklų transformaciją, kuri gali tapti vienu jautriausių hemiborealinių miško ekosistemų geocheminio stabilumo ir atsparumo klimato kaitai indikatorių.

Literatūra

1. M.L.Lee, M.V. Novotny, K.D.Bartle (1981) Analytical chemistry of polycyclic aromatic compounds. Academic Press, New York.
2. А.А. Милукаите (1989). расспределение бенз(а)пирена по размерам атмосферных аэрозолей и время его пребывания в атмосфере. В сб.: Физика атмосферы. Вып. 13, Вильнюс, "Мокслас", с. 170-174.
3. Pacyna J.M. et al., 1999. Technical Report. Appendix 1 to executive final summary report. Environmental cycling of selected persistent organic pollutants (POPs) in the Baltic region (Popcycling-Baltic project). Contract No ENV4-CT96-0214. CD-Rom.
4. Shatalov V., Malanichev A., Vulykh N., Berg T., Mano S., 2001. Assessment of POPs transport and accumulation in the environment. EMEP Report 2001/4. Meteorological synthesizing centre-East, Moscow.
5. A.Milukaite (2006). Long-term trends of benzo(a)pyrene concentration on the eastern coast of the Baltic Sea.. Atmospheric Environment, 40, 2046-2057.
6. Milukaite, A. Mikelinskiene, I. Lyulko, M. Frolova. Differences in benzo(a)pyrene concentration in atmospheric air on a regional scale. *J.Environmental and Chemical Physics*, 2004, **26**, 1, p. 14-21.
7. Milukaitė, A. Mikelinskienė B. Giedraitis (2001). Characteristics of NO_2, SO_2, benzo(a)pyrene and soot concentration variation at the eastern coast of the Baltic sea. *J. Water Air and Soil Pollution*, **130**, 1553-1558.
8. D. Čeburnis. (1997) Qualitative and quantitative estimation of atmospheric trace metal deposition. PhD thesis, Institute of Physics, Vilnius, Lithuania.
9. D.Čeburnis. (1999) Atmospheric trace metal deposition in Lithuania: metods and estimation // Ed. D. A. Lovejoy. Heavy Metals in the Environment: an Integrated Approach, Vilnius, Lithuania, 5-15.
10. D.Čeburnis, D.Valiulis, J.Šakalys. (1999) The influence of local processes on trace metal concentrations in long-range transported air masses. Environmental and Chemical Physics, (Vilnius), **21** (1), 31-36.
11. Čeburnis D., Ruhling A. and Kvietkus K. (1997) Extended study of atmospheric heavy metal deposition in Lithuania based on moss analysis. Environmental Monitoring & Assessment, **47,** 135-152.
12. J. Šakalys, K.Kvietkus, D.Čeburnis and D.Valiulis. (2004) The method of determination of heavy metals background concentration in the moss. Environmental and Chemical Physics (Vilnius), 26 (3), 109-117.
13. W. Salomons, U. Förster. (1984) Metals in the hydrocycle. Springer-Verlag. 352 p.
14. А.А. Милукаите. Тонкоструктурная спектрофлуориметрия. Метод добавок. В кн.: Унифицированные методы мониторинга фонового загрязнения природной среды. Совет экономической взаимопомощи. Москва, "Гидрометеоиздат", 1986, с. 103-112.
15. J.Šakalys, J.Švedkauskaitė and D.Valiulis. (2003) Estimation of heavy metal wach-out from the atmosphere. Environmental and Chemical Physics (Vilnius), **25** (1), 16-22.
16. J.Šakalys, K.Kvietkus, D.Valiulis. (2004) Variation tendencies of heavy metal concentrations in the air and precipitation. Environmental and Chemical Physics, (Vilnius), **26** (2), 61-67.
17. A. Bukantis (1994). Lietuvos klimatas.Vilnius, VU, 187 p.

IX ORO, KRITULIŲ, VANDENS IR KITŲ ELEMENTŲ RĖŽIMINIAI TYRIMAI AUKŠTAITIJOS IR DZŪKJOS INTEGRUOTO MONITORINGO STOTYSE PAGAL ICP KM PROGRAMĄ (Ainis Pivoras; Jonė Pivoraitė)

Darbai atlikti 2021-2025 m. laikotarpiu atitinkamų sutarčių (34-A4E-8246; 28T-2022-115; VDU-S-1297; M-10-19/24; VDU-S-248) techninių specifikacijų pagrindu, pagal ICP KM ir EMEP programų reikalavimus.

Sąlygiškai natūralių ekosistemų kompleksiniai stebėjimai pagal ICP KM ir EMEP programų reikalavimus vykdyti Rytų Lietuvoje, Aukštaitijos integruoto monitoringo stotyje (AKMS), Ažvinčių sengirės gamtiniame rezervate esančiame Versminio upelio baseino tyrimų poligone ir Pietų Lietuvoje, Dzūkijos integruoto monitoringo stotyje (DKMS), Skroblaus gamtiniame rezervate, Duburių upelio baseine. AKMS integruoto monitoringo stebėjimai skirtingomis apimtimis nepertraukiamai vykdomi nuo 1993 metų. DKMS intensyvūs aplinkos stebėjimai pagal ICP KM programas vykdyti 1993-1997 metais ir po pertraukos didesne apimtimi vėl atnaujinti tik 2025 m. Papildomai vykdyti kiti Aplinkos Apsaugos Agentūros ar Vytauto Didžiojo universiteto inicijuoti gamtinės aplinkos tyrimų darbai.

Siekiant įgyvendinti sutarčių reikalavimus 2021-2025 metų laikotarpiu užtikrinta ICP KM programos reikalavimus atitinkanti Aukštaitijos integruoto monitoringo stoties veikla. Sudarytos sąlygos efektyviems tolimųjų oro pernašų tyrimams, atlikti reikalingi Stoties priežiūros, eksploatacijos darbai ir su tuo susiję apmokėjimai. Darbus atliko Vytauto Didžiojo universiteto, Miškų mokslų katedros, Miškų monitoringo laboratorijos mokslo darbuotojai.

AKMS teritorijoje ir Ažvinčių sengirės rezervate įrengtame tyrimų poligone 2021 - 2025 metais vykdyti nenutrūkstami atitinkamų aplinkos parametrų stebėjimai:

- Nepertraukiamas aplinkos meteorologinių faktorių fiksavimas: oro ir dirvos temperatūrų, santykinės drėgmės, vėjo krypties ir greičio, saulės aktyvumo, kritulių kiekio, atmosferos slėgio;
- Bandinių paėmimas, dujinių ir aerozolinių atmosferos cheminių priemaišų: - SO2-S; SO4-S; NO2; -HNO3+NO3 ir NH3+NH4 nustatymui;
- Nepertraukiamas pažemio ozono koncentracijos ore matavimas;
- Nepertraukiamas gyvsidabrio koncentracijos ore matavimas;
- Mėnesinių „bendrų" ir savaitinių „šlapių" kritulių surinkimas;
-Savaitinių mėginių, sunkiųjų metalų koncentracijai krituliuose nustatyti, surinkimas;
- Savaitinių oro mėginių KD 2,5 (2,5 mikrono dydžio kietųjų dalelių) analizei paėmimas;

- 72 val. oro mėginių KD 10 (10 mikrono dydžio kietųjų dalelių) sunkiųjų metalų ir policiklinių aromatinių angliavandenilių analizei paėmimas;

- Versminio upelio vandens lygio ir fizikinių parametrų (temperatūra, rūgštingumas, laidumas, ištirpęs deguonies kiekis) matavimai, debito skaičiavimai.

- Gruntinio vandens lygio matavimai;

- Gruntinio vandens bandinių paėmimas;

- Dirvožemio vandens bandinių paėmimas;

- Mėnesinių polajinių kritulių mėginių ėmimas;

- Mėnesinių medžių lajų nuokritų mėginių surinkimas;

- Versminio upelio vandens mėginių ėmimas;

- Dirvožemio drėgnumo ir įšalo gylio matavimai.

DKMS teritorijoje, Duburių upelio baseino tyrimų poligone 2025 metais vykdyti nenutrūkstami atitinkamų aplinkos parametrų stebėjimai:

- Duburių upelio vandens lygio ir fizikinių parametrų (temperatūra, rūgštingumas, laidumas, ištirpęs deguonies kiekis) matavimai, debito skaičiavimai.

- Gruntinio vandens lygio matavimai;

- Gruntinio vandens bandinių paėmimas;

- Mėnesinių polajinių kritulių mėginių ėmimas;

- Mėnesinių medžių lajų nuokritų mėginių surinkimas;

- Duburių upelio paviršinio vandens mėginių ėmimas;

Įvykdytas sutartyse numatytas duomenų ir bandinių pristatymas tyrimams į atitinkamas laboratorijas numatytu laiku. Kiekvieno mėnesio pradžioje paimti paviršiniai upelių, gruntinio ir dirvožemio vandens bandiniai, per 72 val. nuo paėmimo momento, buvo pristatomi tyrimams į Aplinkos tyrimų departamento laboratoriją. Savaitiniai ir mėnesiniai kritulių bandiniai, oro chemijos bandinių filtrai periodiškai keičiami, saugomi šaldytuve ir kas mėnesį pristatomi į Aplinkos tyrimų departamento laboratorijas. Bandiniai, skirti sunkiųjų metalų, gyvsidabrio bei benzo(a)pirenų koncentracijai krituliuose stebėti, kas savaitę fiksuojamai, saugomi šaldytuve ir kartą per mėnesį pristatomi į atitinkamas Fizikinių tyrimų mokslo centro laboratorijas. Medžių nuokritų bandiniai - pristatyti į VDU Miško monitoringo laboratoriją. Meteorologiniai ir kiti duomenys pagal pareikalavimą būdavo perduodami laboratorijoms, dalyvaujančioms kompleksiško monitoringo programoje.

Užtikrinta stotyje naudojamos mokslinės įrangos instaliavimo darbai, kvalifikuotas naudojimas, techninė priežiūra ir savalaikis gedimų šalinimas, apsauga. Inicijuojami trūkstamos

įrangos pirkimai, techninio aptarnavimo darbai, esant reikalui vietoje keičiami ir koreguojami aparatūros darbo režimai, šalinami gedimai.

Vykdyti monitoringo stoties eksploataciniai, administraciniai darbai. Tai apima elektros sąnaudų, reikalingų tyrimų aparatūros darbui užtikrinti bei patalpų ir vandens šildymui, nesudarant vietinės taršos, apmokėjimą; automobilio eksploataciją; pastatų ir tyrimų įrangos eksploatavimo einamuosius darbus; privalomų mokesčių valstybei, bei administravimo mokesčio Universitetui įvykdymą. Aukščiau išvardintų Stoties priežiūros – eksploatavimo sąlygų užtikrinimas sudarė prielaidas Stotyje ir tyrimų poligone vykdyti kompleksišką ekosistemos tyrimą. Darbų vykdymo laikotarpiu Stotyje buvo sudarytos darbo sąlygos visiems kompleksinio monitoringo programos dalyviams, turintiems atlikti darbus pačioje stotyje arba šiame regione esančiuose tyrimų poligonuose. Tai Aplinkos apsaugos agentūros, Fizikinių tyrimų mokslo centro, VDU ir kiti pagal atskiras sutartis dirbantys ar paskiriems darbams laikinai samdomi darbuotojai.

Detalesnis atliktų darbų aprašymas pagal atskiras kompleksinio ekosistemos monitoringo darbų paprogrames:

a. Meteorologija, fizikiniai ir meteorologiniai matavimai

Pagrindinė meteorologinė informacija buvo gaunama ir apdorojama “Campbell CR 5000” matavimo ir kontrolės modulio ir prie jo prijungtų daviklių pagalba, naudojant duomenų nuskaitymo ir pirminio jų apdorojimo kompiuterinę programą “PC 200 W”. Minėtos įrangos dėka, kas 10 sekundžių buvo matuojama: dirvožemio temperatūra 0,2 m., 0,1m. ir 0,05 m. gyliuose; oro temperatūra 2,0 m. aukštyje; vėjo kryptis (laipsniais); vėjo greitis (m/s); kritulių kiekis (mm); santykinė oro drėgmė (%); saulės spinduliuotė (bendroji, FAR, UVA, UVB); atmosferos slėgis; oro temperatūros gradientas; sniego dangos storis.

Dirvožemio temperatūra buvo matuojama naudojant *Campbell Scientific* 107 temperatūros matavimo zondus su *BetaTherm* 100K6A termistoriais.

Oro temperatūra ir drėgmė 2,0 m. aukštyje buvo matuojama *Vaisala HUMICAP*® drėgmės ir temperatūros matavimo zondu HMP155 su aktyviai ventiliuojamu saulės radiacijos apsaugos skydeliu. HMP155 zondas instaliuotas šalia Stoties esančioje meteorologinėje aikštelėje, o trys dirvožemio temperatūrą matuojantys zondai - šalia Stoties esančiame miške.

Taip pat buvo matuojamas oro temperatūros gradientas. Tam reikalingi oro temperatūros matavimai buvo atliekami 2; 8; ir 22 m. aukščiuose. Jo matavimui buvo panaudoti trys, prie meteorologinio bokšto pritvirtinti, *Campbell Scientific* 43347 RTD temperatūros matavimo zondai su aktyviai ventiliuojamais saulės radiacijos apsaugos skydeliais.

Vėjo krypties ir greičio matavimui buvo naudotas *WindSonic* ultragarsinis anemometras. Šis daviklis iškeltas į 27 m. aukštį ir yra apytikriai viename aukštyje su stoties pastatą supančio miško medžių viršūnėmis

Metų eigoje buvo matuojami keturi skirtingi saulės spinduliuotės parametrai. Tai bendroji saulės spinduliuotė, PAR, UVA ir UVB. Matavimai atlikti atitinkamais matuokliais:

- Kipp & Zonen pyranometras – bendrajai saulės spinduliuotei matuoti su matuojamo 310-2800 nm spektro intervalu;
- SKU 420 sensorius - matuoja 315-380 nm (FWHM arba maksimalios reakcijos pilno pločio pusės maksimumo) UV-A spindulius pagal DIN 5031 7 dalį;
- SKU 430 sensorius - matuoja 280-315 nm (FWHM arba maksimalios reakcijos pilno pločio pusės maksimumo) UV-B spindulius pagal DIN 5031 7 dalį;
- SKP 215 šviesos kvantų sensorius - matuoja atsitiktinius kvantus nuo 400 iki 700 nm., Šviesa šiame bangos diapazone yra naudojama fotosintezei, FAR - fotosintezei aktyvi radiacija.

Visi saulės davikliai sumontuoti meteorologinio bokšto viršuje, 26 metrų aukštyje nuo žemės paviršiaus.

Kritulių pasiskirstymas laike buvo matuotas automatiniu, sniegą tirpinančiu kritulmačiu “LAMBRECHT 15189H”.

Kaip parodė eilės metų patirtis, automatinio kritulmačio parodymais negalima aklai pasitikėti, ypač šaltuoju metu laiku; jo teikiamuose parodymuose bet kada gali atsirasti neprognozuojamų klaidų. Kad pastebėti ir pašalinti tokias klaidas, meteorologinėje aikštelėje, šalia minėto kritulmačio, sumontuotas NovaLynx firmos mechaninis lietaus ir sniego kritulmatis (modelis 260-2510). Šio kritulmačio pagalba buvo pastoviai tikrinami automatinio kritulmačio teikiami duomenys; įvedamos reikalingos pataisos kritulių duomenų galutinėje suvestinėje.

Atmosferos slėgis buvo matuojamas barometriniu slėgio davikliu *Setra 278*.

Sniego dangos storis buvo matuojamas ultragarsiniu SR50A davikliu, instaliuotu šalia stoties esančiame miške. Dėl nežinomų priežasčių automatinio daviklio matavimai labai nepastovūs, vertės nepatikimos, todėl šalimais papildomai vykdomi kas savaitiniais rankiniai sniego dangos storio matavimai.

Kiekvienos valandos matavimų vidutinės reikšmės buvo kaupiamos kompiuteryje “pirminiame” tekstinių failų formate. Pirminiai meteorologiniai duomenys periodiškai sutvarkomi, performatuojami į Excel failus, pašalinami nekokybiški duomenys, atliekamos reikalingos pirminių duomenų transformacijos (sutvarkytų duomenų failo iškarpa pateikiama 1 lentelėje).

Pagal pareikalavimą sukaupti nauji duomenys būdavo persiunčiami kitiems jų naudotojams.

Duomenų kaupiklio CR5000 laikrodis visus kalendorinius metus buvo nustatytos žiemos laiku.

b. Oro cheminė analizė

Kad būtų galima atlikti dujinių medžiagų ir aerozolių tyrimus, leidžiančius įvertinti ore esančių junginių koncentracijas ir srautus, stoties teritorijoje buvo pastoviai renkami atmosferos oro bandiniai. Tam pro keturis skirtingai impregnuotus "Whatman 40" tipo filtrus ir porėto stiklo filtrą buvo nenutrūkstamai siurbiamas oras. Filtrai buvo eksponuojami meteo. bokšte, 26 m. aukštyje: Jie buvo keičiami kiekvienos savaitės pirmąją dieną. Tiriami parametrai: dujinės ir aerozolinės atmosferos cheminės priemaišos - SO2-S, SO4-S, NO2, -HNO3+NO3 ir NH3+NH4.

Oro bandinių paėmimui naudoti ENVItech Bohemia s.r.o. firmos dviejų kanalų ėmikliais su integruotais vidiniais siurbliais: ENVISAM – EMEP 221501 ir SAM NO2-SO2 214802; arba gedimų metu pakeisti HORIBA firmos oro mėginių paėmikliais GPS5 Vienas iš jų skirtas NO2 bandinių surinkimui 0,5 litrų/min oro srautu, kitas - SO2-S, SO4-S, -HNO3+NO3 ir NH3+NH4 bandiniams paimti 10 litrų/min oro srautu.
Bandinių filtrai keičiami savaitės intervalu ir pagal iš anksto suderintą grafiką pristatomi analizavimui į Aplinkos tyrimų departamentą.

Ozono koncentracija ore matuojama 2 m aukštyje virš žemės paviršiaus elektroninio analizatoriaus pagalba. Buvo naudojamas elektroninis Horiba APOA-370 analizatorius. Matavimų duomenys buvo nuskaitomi ir apdorojami atskiro kompiuterio pagalba. Duomenys pastovaus ryšio rėžimu buvo perduodami į AA Agentūrą. Reguliarius ozono analizatoriaus patikros darbus atliko AAA specialistai.

c. Kritulių cheminė analizė, polajinių kritulių cheminė analizė

Šalia stoties esančioje meteorologinėje aikštelėje 1,6 m. aukštyje instaliuoti du kritulių rinktuvai. Vienas iš jų - mėnesinis, vadinamas "BULK" tipo; jis būna atviras tiek lyjant, tiek sausuoju laikotarpiu. Kitas - savaitinių kritulių automatinis rinktuvas, skirtas "WET" tipo, tik šlapioms iškritoms rinkti. Mėnesinių kritulių surinkimui buvo naudojami NILU plastikiniai žiemos ir vasaros kritulių rinktuvai su 200 mm. skersmens surinkimo anga. Esant aukštesnei oro temperatūrai (>10 °C), inde susikaupę krituliai kas savaitę būdavo paimami iš rinktuvų ir toliai laikomi šaldytuve. Automatinis "šlapių" kritulių rinktuvas NSA 181/KE veikia esant ir minusinėms temperatūroms, bei palaiko pastovią temperatūrą (+5 °C) surinktų kritulių kameroje.

Kritulių surinkimo efektyvumas įvertinamas automatiniu kritulių kiekio matuokliu "LAMBRECHT 15189H" bei kalibraciniu mechaniniu lietaus ir sniego kritulmačiu „NovaLynx 260-2510".

Polajiniai krituliai rinkti Ažvinčių ir Skroblus rezervatuose šalia intensyvių stebėjimų stacionarų (A100 ir D100)), naudojant penkis pasyvius kritulių rinktuvus. Šiltuoju metų laikotarpiu naudojami 5 l. PET indai su 160 mm. skersmens kritulių surinkimo piltuvais. Žiemos mėnesiais 270 mm. skersmens PET kibirėliai, be piltuvo. Krituliai surenkami kiekvieno mėnesio pabaigoje, žiemos metu atitirpinami kambario temperatūroje ir pagal iš anksto suderintą grafiką pristatomi į jų analizę atliekančią Aplinkos tyrimų departamento laboratoriją.

d. Dirvožeminio vandens cheminė analizė

Versminio upelio baseine instaliuoti 6 nerūdijančio plieno lizimetrai. Trys iš jų įrengti viršutiniame dirvos sluoksnyje (eliuvinis horizontas - 20 cm.) ir trys žemiau šaknų zonos (B horizontas - 40 cm.). Bandiniai iš visų lizimetrų surenkami kiekvieno mėnesio pradžioje. Kai kuriais atvejais, dėl mažo kritulių kiekio, vandens juose neprisirinko ir bandiniai nebuvo imami (5 lentelė). Paimti vandens bandiniai per 48 val. buvo pristatomi į Aplinkos tyrimų departamento laboratoriją (2 lentelė).

Ažvinčių sengirės tyrimų poligone, šalimais lizimetrų, dviejų savaičių intervalu matuojama santykinė dirvožemio drėgmė (4 lentelė). Dirvožemio drėgmės nustatymui buvo naudotas: elektroninis Delta-T firmos HH2 dirvožemio drėgmės matuoklis ir stacionariai įrengti šeši Theta Probe ML2x dirvos drėgmės davikliai (3vnt. 20 cm. gylyje ir 3vnt. 40 cm gylyje). Dirvožemio drėgnumas buvo tiesiogiai matuojamas procentine išraiška.

Žiemos metu, šalia lizimetrinių įrenginių kas dvi savaites matuojamas dirvožemio įšalo gylis (6 lentelė).

Pastabos: Lizimetre nr. 41 ilgą laiką kritulių nesusirenka. Visus lizimetrus reikėtų perinstaliuoti, nes dėl ilgalaikio naudojimo augalijos šaknų sistema, tikėtina, iškreipia į rinktuvus prasifiltruojančio dirvožeminio vandens kiekius. 2024-2025 metais aiškiai brokuotos vertės lizimetre A41. Rekomenduotina naudoti didesnės talpos dirvožeminio vandens rinktuvus arba tankinti mėginių paėmimo intervalus. Dėl augančio liūčių dažnio, intensyvumo ir sąlyginai ilgos mėginių ekspozicijos, dabar naudojamais 5 l talpos rinktuvais dalies dirvožemio vandens, jo filtravimosi apimčių, apskaityti nepavyksta.

e. Gruntinio vandens cheminė analizė

Gruntinio vandens stebėjimui Ažvinčių sengirės rezervate, Versminio upelio baseino teritorijoje ir Skroblaus gamtiniame rezervate, Duburių upelio baseino teritorijoje, įrengti 4 gręžiniai. 1-2 kartus per mėnesį buvo atliekamas gruntinio vandens lygio gręžiniuose matavimas (7 lentelė). Gruntinio vandens bandiniai cheminei analizei renkami kas antrą mėnesį. Vandens bandiniai iš gręžinių buvo imami su mechaniniu tefloniniu vandens paėmikliu. Paimti vandens bandiniai, ne vėliau kaip per 72 valandas nuo jų paėmimo, buvo pristatomi į Aplinkos tyrimų departamento laboratoriją cheminei analizei atlikti (2 lentelė). AKMS gręžinys Nr. 4 2024.11.17 – 2025.02.13 laikotarpiu neprieinamas, dėl įkritusio dangtelio, laikinai naudojamas greta esanti senas gręžinys nr. 4. DKMS gręžiniai 2025 m. pradėti naudoti po ilgos pertraukos. Gręžiny nr.1 atnaujintas, likę pravalyti. Esant galimybei 2-4 gręžinius būtina pergręžti iš naujo.

f. Paviršinio vandens kiekis ir cheminė analizė

Duomenys šių paprogramių vykdymui buvo gaunami matuojant Versminio ir Duburių upelių debitus ir atliekant jų vandens fizikinių parametrų, bei cheminės sudėties tyrimus. Tuo tikslu Ažvinčių sengirės rezervate, Versminio upelio vagoje ir Skroblaus rezervate, Duburių upelio vagoje, įrengtas hirotechninis įrenginys, upelio patvankos slenkstis, su stacionariu automatiniu vandens lygio matuokliu. Versminio upelyje naudojamas Solinst 3001, Duburių upelyje SOLINST 5 vandens aukščio sensoriai. Šalia vandens lygio matuoklių, didesniam matavimų tikslumui gauti, buvo instaliuoti papildomi tos pačios Solinst firmos atmosferos oro slėgio matuokliai (barologeriai). Sinchroniškai su vandens lygio matuokliu dirbančio atmosferos oro slėgio matuoklio duomenys buvo naudojami tikslesniems upelių debitų skaičiavimams, eliminuojant neigiamą kintančio atmosferos slėgio įtaką matavimams.

Abiejų daviklių, duomenys buvo automatiškai kaupiami juose integruotuose kaupikliuose. Kaupiklių duomenys periodiškai nukraunami ir toliau apdorojami *Levelogger 4.6.2* bei *Exel*. programų formate. Upelio vandens aukščio matavimų tikslumas 1 mm.; matavimų dažnumas - 1 kartą per valandą. Solinst matuoklių teikiamų duomenų kokybei užtikrinti upelio vandens lygis 2-4 savaičių intervalu matuojamas mechaniniu būdu. Atliekant upelių debitų skaičiavimus rankinių matavimų duomenys buvo įvedami į skaičiavimo formules kaip kontroliniai automatinių matavimų patikros elementai. Galutinėje ataskaitoje buvo pateikti apskaičiuoti valandiniai upelio debitai (3 lentelė).

Du kartus per metus buvo atliekami patvankos slenksčio niveliavimo darbai; darbui naudotas lazerinis nivelyras „AutoCros Laser 3“. Metų laike kelis kartus buvo atlikti patvankos dugno valymo ir kiti įrenginio aptarnavimo darbai.

1-2 kartus per mėnesį atliekami upelio vandens fizikinių parametrų (ištirpusio deguonies kiekio vandenyje, vandens temperatūros, laidumo ir rūgštingumo) matavimai (2 lentelė); tuo pat metu paimamas ir mėginys vandens cheminės analizės atlikimui; Mėginiai cheminių tyrimų analizei per 72 valandas nuo mėginių paėmimo pristatomi į Aplinkos tyrimų departamento laboratoriją.

Pastabos: Siekiant užtikrinti WTW multi 3320 sensorių kalibravimą, būtina sudaryti tvarką pastoviam kalibravimui naudojamų buferių (Ph-4.01; PH-7,00; KCH - 0,01m/mol; KCH 3mol) teikimui.

g. Nuokritų kiekis ir cheminė jų analizė

Nuokritoms rinkti buvo naudojami 5 atviri, vieno kvadratinio metro ploto rinktuvai, įrengti šalia intensyvių stebėjimų stacionarų. Į juos patekusios nuokritos buvo paimamos kiekvieno mėnesio pabaigoje. Kadangi žiemos metu nuokritos būna susimaišę su sniego sluoksniu, tai sniegingo laikotarpio bandinys buvo bendras keliems mėnesiams ir paimtas nutirpus sniego dangai. Mėginiai išdžiovinami iki orasausės masės ir pristatomi į VDU miškų monitoringo laboratoriją cheminėms analizėms.

Pastabos: DKMS teritorijoje nuokritos po ilgos pertraukos pradėtos rinkti 2024 metų sezono pabaigose. Kadangi nuokritų rinktuvai turi būti laidus vandeniui bet nepraleisti smulkiausių nuokritų, jų poros pamažu užsikemša, pradeda kauptis drėgmė, kas gali sąlygoti dumblių augimą ir iškreipti cheminės analizės rezultatus. Siekiant to išvengti rekomenduojama atnaujinti AKMS rinktuvus 2026 metais.

Kiti 2021 - 2025 m. laikotarpiu AAA užsakymu **arba VDU iniciatyva** ***Aukštaitijos integruoto monitoringo stotyje atlikti aplinkos tyrimų darbai:***

1) Sunkiųjų metalų atmosferos krituliuose tyrimo programa, vykdytojas - Fizinių ir Technologijos Mokslo Centras (FTMC). Tuo tikslu meteo. bokšte 26 m. aukštyje įrengti 3 kritulių rinktuvai. Mėginiai surenkami kiekvienos savaitės pirmos dienos ryte. Surinkti krituliai sveriami, fiksuojami 40 % HNO3 rūgšties tirpalu ir laikomi šaldytuve. Kiekvieno mėnesio pradžioje jie buvo pristatomi į atitinkamą FTMC laboratoriją.

2) Gyvsidabrio koncentracijų atmosferos krituliuose programa - Fizinių ir Technologijos Mokslo Centras. Tuo tikslu meteo. bokšte įrengtas vienas kritulių rinktuvas. Mėginiai surenkami kiekvienos savaitės pirmos dienos ryte. Surinkti krituliai sveriami, fiksuojami HNO3 rūgštimi ir laikomi šaldytuve. Kiekvieno mėnesio pradžioje pristatomi į atitinkamą FTMC laboratoriją.

3) Gyvsidabrio koncentracijų atmosferos ore nustatymas. Vykdytojas – Aplinkos Apsaugo Agentūra. Oras analizei nepertraukiamai siurbiamas 2 m. aukštyje nuo žemės paviršiaus. Tuo tikslu monitoringo stotyje instaliuotas Tekran firmos gyvsidabrio garų atmosferos ore analizatorius TEKRAN 2537X. Analizatorius veikė nenutrūkstamu darbiniu rėžimu, kas pusvalandiniai matavimų duomenys automatiškai perduodami į Aplinkos apsaugos agentūrą. Du kartus per mėnesį keičiami argono dujų balionai. Reguliarius kalibravimo darbus, filtrų keitimus, atlieka Aplinkos apsaugos agentūros darbuotojai.

4) Kietųjų dalelių KD2,5 ore bandinių paėmimas. Tuo tikslu šalia stoties pastato esančioje meteo. aikštelėje buvo sumontuotas SEQ47/50 kietųjų dalelių bandinių paėmimo įrenginys. Jis užprogramuotas 7-ių dienų bandinių ciklui ir filtrai buvo automatiškai pakeičiami kas 7 kalendorines dienas, kiekvieną pirmadienį. Filtrai šiam įrenginiui buvo paruošiami Aplinkos tyrimų departamento laboratorijoje; kasetės su filtrais - keičiamos nustatytais intervalais.

5) Kietųjų dalelių KD10 bandinių, skirtų Sunkiųjų metalų ir policiklinių aromatinių angliavandenilių koncentracijų ore nustatymui, paėmimas.

6) Benzopirenų koncentracijų atmosferos krituliuose nustatymas - Fizinių ir Technologijos Mokslo Centras. Tuo tikslu šalia stoties esančioje meteo. aikštelėje sumontuotas tam skirtas kritulių rinktuvas. Pagal atitinkamą matodiką renkami suminiai mėnesiniai kritulių bandiniai. Krituliai imami savaitės intervalu, saugomi šaldytuve ir kas mėnesį pristatomi į atitinkamą FTMC laboratoriją.

7) kietųjų dalelių koncentracijos nenutrūkstamas matavimas. Vykdytojas – Aplinkos Apsaugo Agentūra. Tuo tikslu šalia stoties pastato esančioje meteo. aikštelėje sumontuotas kietųjų dalelių ore matavimo FIDAS 200 (PALAS). Nenutrūkstamai matuojama 0,18-18 µm (KD 1/2.5/4/10) spektro dalelės, oro temperatūra, santykinė drėgmė, atmosferos slėgis. Matavimo duomenys nenutrūkstamai tiesiogiai tiekiami į AAA.

8) Radioaktyviosios spinduliuotės matavimas. Vykdytojas – Radiacinės Saugos Centras. Stoties teritorijoje instaliuota radioaktyviosios spinduliuotės matavimo įranga „SARA ENVINET“. Jos teikiami duomenys buvo tiesiogiai nenutrūkstamas tiekiami į valstybės įgaliotą instituciją. Techninės apžiūros ir kalibravimo darbus periodiškai atliko Radiacinės Saugos Centro darbuotojai.

9) Potencialiai pavojingų sveikatai bioaerozolių krituliuose stebėjimo programa – vykdoma nuo 2023 spalio mėn. Tuo tikslu automatinio kritulių rinktuvo NSA viduje instaliuotas biodetektorius ChemProFXi (ENVI BIOSCOUT), ENVIRONICS. Instaliuotas papildomas maitinimo ir signalinis kabeliai su nepertraukiamo maitinimo (UPS) sistema. Duomenys nenutrūkstamai tiekiami Aplinkos apsaugos agentūrai.

10) Nuo 2025 m. Rugsėjo siekiant praplėsti oro cheminės taršos matavimus VDU FOREST 4.0 projekto lėšomis AKMS stoties teritorijoje instaliuoti papildomi HORIBA analizatoriai: O3 – APOA (2 vnt.); NO, NO2 ir Nox – APNA; SO2 - APSA + papildomas PC analizatorių valdymui ir duomenų kaupimui. Naujus analizatorius instaliavo Komsetas. Duomenys 0.5 min. rezoliucija kaupiami naujame Forest 4.0 stoties kompiuteryje ir AAA *Cygwin* duomenų bazėje. Mainais už anlizatorių duomenis AAA atlieka analizatorių priežiūros darbus. Lizimetrų namelyje instaliuotas HORIBA APOA analizatorius duomenis kaupia tik CF kortelėje.

11) Siekiant praplėsti meteorologinius matavimus 2025 metais AKMS miško aplinkoje, po medžių lajomis VDU FOREST 4.0 projekto lėšomis ties lizimetrų nameliu instaliuota LUFFT WS501-UMB meteorologinė stotelė. Matuojama oro drėgmė; oro temperatūra; vėjo kryptis; greitis; saulės radiacija; atmosferos slėgis. Duomenys naudojami pagrindinės meteo stoties duomenų papildymui, kokybės kontrolei.

12) Siekiant praplėsti miško ekosistemos sąveikos su atmosfera tyrimus, 2025 metai VDU FOREST 4.0 projekto lėšomis AKMS stoties teritorijoje pradėti nuolatiniai: oro CO2 matavimai naudojant Licor 850 analizatorių; Dirvožemio CO2 ir CH4 emisijos po 5 medžių lajomis, naudojant Licor 8200-104 ilgalaikes kameras, LI8250 multipleksorių ir LI7810 analizatorių. Duomenys kaupiami VDU kompiuteryje AKMS lizimetrų namelyje.

Neplaniniai KM stočių eksploataciniai darbai, naujos įrangos instaliavimai ar gedimai 2021 - 2025 metų laikotarpiu.

2021

- 2021 metų 4-5 mėnesiais Campbell CR 5000 datalogeryje įvyko eilė įtampos šuolių; kurių pasėkoje buvo paveikti oro temperatūros /200/ ir oro drėgmės daviklių teikiami duomenys; 5 mėn. 31 dieną gedimas pašalintas,
- Sniego dangos storio daviklio SR50A parodymai buvo tokie netikslūs, kad į ataskaitą jie neįtraukti. Matant nekokybišką daviklio darbą, šalia daviklio buvo įrengta sniego dangos storio rankinio matavimo matuoklė ir kiekvienos savaitės pirmadienį fiksuojami jos parodymai.

2022

- Sausio – kovo mėnesiais Campbell CR 5000 datalogeryje įvyko eilė įtampos šuolių; kurių pasekoje buvo paveikti oro temperatūros (2 m.) bei temperatūros gradiento (2; 8; 22 m.) ir oro drėgmės daviklių teikiami duomenys. Atlikus datalogerio perinstaliavimą, pakeitus vidines baterijas, patikrinus atskirus sensorius, jų jungtis rasta įtampos šuolių priežastis. Jai pašalinti laikinai atjungtas oro temperatūros ir oro drėgmės daviklis. Gedimas pilnai pašalintas liepos 16 d. Dalis trūkstamų sekų atstatytos pagal kitų vietovėje vykdomų VDU tyrimų sensorių duomenis. Trūkstamos trumpalaikės pavienių valandų vertės užpildytos interpoliuojant gretimų valandų vertes.
- Sniego dangos storio daviklio SR50A parodymai, antrus metus iš eilės yra netikslūs ir į ataskaitą neįtraukti. Sniego dangos storis registruotas rankiniu būdu kiekvienos savaitės pirmadienį. Duomenys pateikiami meteorologinių duomenų bendrojoje suvestinėje.

2023

- Siekiant užtikrinti savalaikius meteorologinės matavimo įrangos akreditacijos ir kalibracijos darbus, pradėtas bendravimas dėl Aukštaitijos kompleksinės monitoringo stoties įtraukimo į valstybinį Lietuvos Hidrometeorologijos Tarnybos (LHMT) stočių tinklą. Kartu su LHMT atstovais apžiūrėta vietovė, naudojama įranga. Siekiant suvienodinti pagrindinius meteorologinius parametrus, jų technines charakteristikas, sudarytas stoties meteorologinės įrangos atnaujinimo planas:
    - Oro temperatūra + drėgmė - turime tik 2m aukštyje, reikia 1,5 m

Sprendimas – rekomenduojama šalimais instaliuoti naują Vaisala HMP155 1,5 m aukštyje. Po poros metų galėsime palyginti skirtumą ir perskaičiuoti ankstesnius duomenis, bei palikti tik vieną.

- Neaiškios dirvožemio temperatūros sensorių techninės charakteristikos - paklaida. Matavimo gyliai kaip po purenamu dirvožemiu, jie ne po šienaujama veja bet miške.

Sprendimas - papildomai instaliuoti naujus, *Pt-100* arba *Vaisala QMT110* – 3-7 vnt. (20; 40; 80; 120; 160; 240; 360 cm. gyliuose) tuo pačiu atnaujinti senus tikslesniais, bet mums tikslinga juos palikti miške.

- Kritulmatis be vėjo apsaugos ir paklaida ne 1,25 bet 2%

Sprendimas - rekomenduojama keistį į *MPS Systems TRWS415* (su vidiniu šildymu ir Tretjakovo tipo apsauga nuo vėjo).

- Atmosferos slėgio daviklio paklaida per didelė 0,3 vietoj 0,2 hPa

Sprendimas - rekomenduojama keistį į *Vaisala BARO1.*

- Sniego dangos matuoklio paklaida per didelė (10mm vietoj 0,5 mm) -

Sprendimas - rekomenduojama keistį į *Lufft SHM31.*

2024

- Sausio 7 – 9 dienomis per didelius šalčius (-27 °C), aerozolių samplerių spintoje nepalaikoma reikiama temperatūra, didelių šalčių metu pakraščiuose galimai nukrenta žemiau 0 °C. Įjungtas papildomas termokabelis.

- Automatinis kritulmatis NKA 181 šalčių metu nepalaiko pastovios temperatūros, ji svyruoja tarp 0 - 6 °C , Sausio 7-9 dienomis buvo pradėjęs formuotis ledas.

- Sausio 16 dieną laikinas el. dingimas dėl intensyvaus snygio.

- Vasario 26 d. paleistas po remonto gražintas NO_2 sampleris ENVISAM – EMEP 221501. Vietoj jo nuo 2023.10 mėn. dirbo senasis HORIBA su vidiniu siurbliu.

- Kovo 11d. sugedo aerozolių sampleris ENVISAM –SAM NO2-SO2 214802, perduotas remontui, ADRANUI. Panašu jog siurblio gedimas. Laikinai pakeistas senuoju Horiba su išoriniu siurbliu.

- Kovo mėn. sulčių tėkmės srautų medžių balonomis matuoklių (SFM1) testavimas, vidinių baterijų keitimas, el. įtampos stebėjimo sistemos montavimas.

- Kovo 28 d. oro chemijos spintoje, šalia meteo bokšto, išmontuotas sugedęs oro kondicionierius, perduotas „šalna“ servisui. Laikinai pastatytas kilnojamas AC įrenginys.

- Balandžio 2-3 d. elektros dingimas, dėl liūties perkūnijos – nėra duomenų.
- Balandžio 29 d. automatiniame kritulmatyje NKA 181 ir oro chemijos spintoje įjungtas vasaros rėžimas, kondicionavimas.
- Išvalyta Lambrech automatinis kritulmatis.

- Birželio 17 d. WTW Multi 3320 vandens PH sensoriaus gedimas, nepavyksta sukalibruoti, informuota AAA, laukiame naujų pirkimų.
- Birželio 24 d. NKA 181 automatinio kritulių rinktuvo kondicionavimo gedimas. Pakeistas saugiklis, atstatyta.
- Birželio 24 – liepos 1 d. užsikimšęs NKA 181 automatinio kritulių rinktuvo piltuvas, matomai netikslus atskirų savaičių kritulių tūris birželio 17 – Liepos 1 d. (susumuota). Dėl šilumos gali būti pakitusi mėginių cheminė sudėtis.
- Liepos 1 d. – Versminio upelio patvankos niveliavimas.
- Liepos 1d. (+- 2d) šalia stoties einantis žvyrkelis supurkštas dulkėjimą mažinančiais kalcio chloridų junginiais – galimi pokyčiai oro chemijos matavimuose.
- Liepos 13 d. elektros dingimas po liūties, trūksta duomenų ne pilną parą.
- Liepos 29 d 10 val. patvanka Lambrech automatiniame kritulmatyje. Valymo darbai. Suminis kritulių kiekis geras, bet netikslūs pastarojo laikotarpio kritulių pasiskirstymo laike duomenys.
- Rugpjūčio 29 d. atnaujintas vanduo gręžiniuose Versminio baseine.
- Spalio 14 d. užstrigęs oro chemijos sampleris ENVISAM – EMEP 221501 – „Flow error“. Restartavus viskas gerai.
- Spalio 16 d. Kapitalinis rinktuvų valymas, apatinės bokšto dalies plovimas. Galimi matavimų netikslumai
- Spalio 16 – 21 d. neveikė NKA 181 automatinis kritulių rinktuvas. Praleista 3-5 mm kritulių.
- Spalio 14 - 16 d. NO_2 filtras eksponuotas be priešfiltrio, galimas duomenų netikslumas.
- Pastaruosius mėnesius (birželį – lapkričio) nestabilus PALAS KD matuoklio duomenų perdavimas, ryšys su AAA. Matavimai geri, bet nesiunčia duomenų. Kartais padėdavo restartavimas, lizdų perjunginėjimas, pakeitimas – kartais niekas nepadėdavo. Spalio 17 d. taisytas kartu su ADRANO darbuotojais. Perlituotos COM jungtys. Buvo naudojamos tik 3 signalinio kabelio gyslos, jos dabar sudvigubintos (3x2 gyslos). Visos veikia gerai. Vėl paleista išorinė trišakė PALAS meteo stotelės jungtis. Pirmai dėl jos strigdavo, matyt

programinis nesuderinamumas, tad meteo st. kondicionierius buvo laikytas atjungtas. Taisymas nepadėjo – duomenų siuntimas toliau nestabilus, kartais padeda perkrovimai, kartais ne..

- Lapkričio 4 d. užstrigęs oro chemijos sampleris ENVISAM – EMEP 221501 – „Flow error“. Siurblys veikia, bet matyt oro srauto daviklio gedimas, neapskaito prasiurbto srauto (rodo FLOW 0,0) ir po kurio laiko automatiškai išsijungia. Padėjo ZERO vertės sukalibravimas.
- Lapkričio 11 d. pradėta naudoti nauja 40 % HNO sunkiųjų metalų fiksacijai.
- Jau kurį laiką nepasileidžia PALAS oro chemijos analizatorius, nes napasileidžia meteo stotelės matavimai. Lapkričio 19 d. po daugelio nesėkmingų bandymų paleisti matavimus, rastas pasvilimas PALAS meteo stotelės bloke. Aparatas visiškai išjungtas, susisiekta su gamintojais, užsakyta nauja meteo stotelė, senoji perduota Giedriui iš ADRANO.
- Lapkričio 17 d. į 4 gręžinį versminio baseine įkrito dangtelis, kol kas pašalinti nepavyksta. Matavimams ir cheminėms analizėms laikiniai naudojamas gretimai esantis senasis 4 gręžinys.
- Gruodžio 30 d. užstrigęs oro chemijos sampleris ENVISAM – EMEP 221501 – „Flow error“. Siurblys veikia, bet matyt oro srauto daviklio gedimas, neapskaito prasiurbto srauto, nebepavyksta sukalibruoti ZERO vertės. Sampleris perduotas ADRANUI remontui. 2025.01.06 laikinai pakeistas senuoju HORIBA sampleriu.
- Gruodžio 30 d. oro chemijos analiztorius HORIBA su išoriniu siurbliu, pakeistas iš remonto grįžusiu SAM NO2-SO2 214802.
- Siekiant užtikrinti savalaikius meteorologinės matavimo įrangos akreditacijos ir kalibracijos darbus, tęsiamas bendravimas dėl Aukštaitijos kompleksinės monitoringo stoties įtraukimo į valstybinį Lietuvos Hidrometeorologijos Tarnybos (LHMT) stočių tinklą. Kartu su LHMT atstovais apžiūrėta vietovė, naudojama įranga. Siekiant suvienodinti pagrindinius meteorologinius parametrus, jų technines charakteristikas, sudarytas stoties meteorologinės įrangos atnaujinimo planas (pateikta aukščiau).

2025

- 2025.01.04 Sustojęs oro chemijos analizatorius SAM NO2-SO2 214802. analizatorius - „VACEER“. Nustatymuose vacuum padidintas nuo 200 iki 250.
- 2025.01.05 PALAS kietųjų dalelių analizatorius nerodo meteo stotelės duomenų, net pakeitus meteo stotelę nauja. To pasėkoje nėra ir oro chemijos matavimų. Anlizatorius nuvežtas ADRANUI remontui.

- 2025.01.15 Nukrautas Versminio upelio SOLINST levelogeris ir barologeris. Automatiniai levelogerio matavimai buvo sustoję nuo 2025.01.12 dėl perpildytos vidinės atminties. Restartuota, susinchronizuotas žiemos laikas.

- 2025.01.20 Benzo(a)pirenų kritulių rinktuvas suskilęs, dėl ledo, prarasta dalis einamųjų mėginių.

- 2025.01.20 – Envisam sampleris SO2-S, SO4-S, -HNO3+NO3 ir NH3+NH4 bandiniams paimti 10 litrų/min oro srautu, siurbia orą ne iš to kanalo. Persijungė matyt dėl vidinės klaidos, arba šerkšno. 01.27 d. Sujungta 1 ir 2 paėmimo kanalai į vieną. Nepilna pastarosios savaitės filtrų ekspozicija

- 2025.01.27 – Pakeistas laboratorijos signalizacijos GSM modemas, vidinis akumuliatorius, laboratorijos patalpos judesio daviklis. Reikia atnaujinti garsiakalbius.

- 2025.04.10 – Automatinis kritulių rinktuvas NKA 181 perstatytas į vasaros režimą. Įjungtas aerozolių samplerių spintos kondicionavimas.

- 2025.04.28 – Pakaitinio NO2 HORIBA samplerio pakeitimas po remonto grįžusiu nauju ENVISAM sampleriu.

- 2025.05.06 – PALAS kietųjų dalelių anlizatorius naujai paleistas po remonto darbų. Pakeistas visas vidinis kompiuteris.

- Balandžio gegužės mėn. siekiant praplėsti matavimus, VDU FOREST 4.0 projekto lėšomis AKMS stoties teritorijoje pradėti nuolatiniai: oro CO2 matavimai naudojant Licor 850 analizatorių; Dirvožemio CO2 ir CH4 emisijos po 5 medžių lajomis, naudojant Licor 8200-104 ilgalaikes kameras, LI8250 multipleksorių ir LI7810 analizatorių. Duomenys kaupiami VDU kompiuteryje AKMS lizimetrų namelyje.

- 2025.08.09-12 d, ties Versminio patvanka bebrų užtvanka - debito duomenys tvarkant pakeisti interpoliuojant rankiniu būdu.

- Rugsėjo mėn. 18 d. siekiant praplėsti oro cheminės taršos matavimus VDU FOREST 4.0 projekto lėšomis AKMS stoties teritorijoje instaliuoti papildomi HORIBA analizatoriai: O3 – APOA (2 vnt.); NO, NO2 ir Nox – APNA; SO2 - APSA + papildomas PC analizatorių valdymui ir duomenų kaupimui. Naujus analizatorius instaliavo Komsetas. Duomenys kaupiami naujame Forest 4.0 stoties kompiuteryje ir AAA *Cygwin* duomenų bazėje. Mainais už anlizatorių duomenis AAA atlieka analizatorių priežiūros darbus. Lizimetrų namelyje instaliuotas HORIBA APOA analizatorius duomenis kaupia tik CF kortelėje.

- 2025.09.20-23 - Nušveista ir perdažyta lizimetrų namelio išorė, galimas poveikis oro cheminiams matavimams.

- 2025.09.23 Sumontuotos TEKRAN, ir HORIBOS analizatorių APOAx2, APNA, APSA dujų paėmimo ir išmetimo sistemos iš laboratorijos.

- 2025.10.02 ir vėliau Stoties vakarinio galo šveitimas ir dažymas, analizatoriai ir meteo aikštelė laikinai išjungti, kartu ir planinis el. atjungimas visoje stotyje. Duomenų tarpas, galimas poveikis cheminiams matavimams.

- 2025.10.06 siekiant praplėsti meteorologinius matavimus, AKMS miško aplinkoje, po medžių lajomis VDU FOREST 4.0 projekto lėšomis instaliuot ties lizimetrų nameliu instaliuota LUFFT WS501-UMB meteorologinė stotelė. Matuojama oro drėgmė; oro temperatūra; vėjo kryptis; greitis; saulės radiacija; atmosferos slėgis.

- Komsetas pakeitė TEKRAN gyvsidabrio analizatoriaus vidinę pompą - labai garsiai jau burzgė.

- 2025.10.14 Versminio Solinst levelogerio tvarkymo darbai. Nepavyksta nukrauti duomenų.

- 2025.11 - Pelių pragraužta CO2 matavimų įrangos vamzdeliai ir signaliniai kabeliai. Galimi dalies duomenų netikslumai, praradimai.

- 2025.11.05-08 - Siekiant praplėsti medžių fiziologinius matavimus, AKMS miško aplinkoje instaliuoti UGT TalkingTree eduction ir TalkingTree Science komplektai. Talking Tree Education sudaro: DataTaker DT821 datalogeris sujungtas su SVADSS sistema; SFM-5 sulčių tėkmės matavimų įranga (3 vnt.); DRS26 automatiniai dendrometrai (3 vnt.); FRT 15D dirvožemio drėgmės, vandens potencialo ir temperatūros sensoriai (3 vietos, 20 cm. gylyje) ir MOBOTIXM 16 termokamera. Talking Tree Science sudaro: DataTaker DT821 datalogeris; SFM-5 sulčių tėkmės matavimų įranga (5 vnt.); DRS26 automatiniai dendrometrai (5 vnt.) ir SMT-100 dirvožemio drėgmė ir temperatūros sensoriai (3 vnt., 10, 20 ir 40 cm. gyliuose).

- 2025.11.08 restartuota lizimerų namelio meteo stotelė LUFFT WS501-UMB, iš naujo suorientuota pagal vidinį stotelės kompasą, matavimai kas 600s. Stotelės laikas atsilieka 2 val. nuo realaus.

- 2025.11.10 Seni mechaniniai aerozolių prasiurbto oro tūrių kontrolės skaitikliai pakeisti naujais skaitmeniniais - NBIoT PRODIGI LPG. Palygintos naujų ir senų skaitiklių birželio-liepos mėn. vertės. Senų NO2 skaitiklių vertės -5,1% mažesnės, didžiojo (SO2-S, SO4-S, -HNO3+NO3; NH3+NH4) analizatoriaus senų skaitiklių vertės -18.6% mažesnės nei naujų. Vadinasi paskutinius keletą mėnesių aerozolių koncentracijos, dėl neapskaityto viso prasiurbto oro tūrio galimai dirbtinai padidintos.

- 2025.11.17 - nuplauti analizatoriai meteo aikštelėje, automatinis kritulmatis NKA181 pilnai pajungtas žiemos rėžimui - išjungtas vėdinimas, uždengtos ventiliacijos.

- 2025.11.19 - Horiba APOA lizimetrų namelyje paleista, kad O3 duomenis logintų į CF kortelę, ne vidinę atmintį. Vidinėje atmintyje išsaugoma tik kelių paskutinių parų duomenys.

- 2025.11.23 - automatinis sniego dangos daviklis Campbell Scientific SR50A neveikia korektiškai. Nuvalytas pagrindas, sensorius atjungtas ir prijungtas iš naujo, pakeistas silikagelis - vis vien neveikia. Perduota AAA atstovams.

- 2025.12.03 - nuo 11.29 d. 03:15 elektros gedimai lizimetrų namelyje. Sustojęs TTE datalogeris ir visų jo sensorių matavimai, taip pat APOA O3 analizatorius. Restartuotas PC, iš naujo paleistas Li850 (x60sec.) ir meteo st. loginimas.

- 2025.12.29 - Nukrauti Versminio datalogerių duomenys.

- Nėra paviršinio vandens PH duomenų 2024.06.17 – 2025.05.18. PH sensoriaus WTW SenTix 41 gedimas, nebesusikalibruoja.

- 2024 - 2025 metų eigoje registruoti spintos su aerozolių sampleriais klimato kontrolės palaikymo sistemos sutrikimai. Didesnių šalčių metu naudoti papildomai kaitinimo elementai. 2025 kovo 28 d. oro kondicionierius (AC) laikinai pakeistas kilnojamu AC įrenginiu, po remonto darbų 2025.04.28 gražintas senasis integruotas kondicionierius.

- Aerozolių (SO2-S, SO4-S, -HNO3+NO3; NH3+NH4) daugiakasetiniai filtrai gaunami iš AAA laboratorijos dažnai būna nesandarūs, ko pasėkoje, ne visas analizatorių prasiurbtas oro tūris iš tiesų praeina per filtrus. AKMS visi filtrai patikrinami ir perrenkami siekiant užtikrinti sandarumą, tačiau ŽKMS ši kontrolės procedūra neatliekama, ko pesėkoje atitinkamos ŽKMS oro taršos vertės gali būti mažesnės negu yra iš tikrųjų.

- 2025 Metų eigoje registruoti daugkartiniai interneto ryšio sutrikimai, duomenų perdavimo problemos. Rugsėjo - spalio mėn. su Komsetas darbuotojų pagalba pakeisti Mikrotik routerio ir antenos bokšte konfigūravimai, suregistruojant visus IP adresus turinčius prieigą. Atnaujinta pora vietinių maršrutizatorių, pakeistas pagrindinis swich‘as laboratorijoje.

Pagalbiniai darbai Žemaitijos integruoto monitoring stotyje

- 20230704 ties Juodupio patvanka instaluotas naujas SOLINST 5,0 levelogeris ir barologeris. Atliktas patvankos niveliavimas.

- Nuo 2023.08 CR5000 datalogeris ir kartu visi meteorologiniai matavimai ŽKMS stotyje sustoję, priežastis neaiški, AAA darbuotojai informuoti.

- 2025.05.05 Nukrautas Juodupio SOLINST levelogeris ir barologeris, suniveliuota patvanka. Paimtas zoobentoso mėginys.

- 2025.10.15 Nukrautas ŽKMS Juodupio levelogeris ir barologeris, suniveliuota patvanka. Paimtas zoobentoso mėginys. Siekiant suskaičiuoti Juodupio debitą, būtini rankiniai Juodupio aukščio matavimai.
- Juodupio patvankos ir jos aplinkos būklė labai prasta. Tyrimų aplinka ir vandens lygio matavimų šulinėlis užterštas įvairiais plastikais ir tekstile. Meteorologinės stoties daugelio daviklių būklė taip pat apgailėtina. Neberenkami Juodupio aukščio rankiniai matavimai, ko pasėkoje negalimi debitų skaičiavimai. Siekiant tarpusavyje palyginti įvairių integruoto monitoringo stočių duomenis – būtina visiems programų vykdytojams vieningai laikytis metodinių reikalavimų, dalyvauti tiksliniuose mokymuose. Apie situacija informuoti atsakingi programos vykdytojai.

Pagalbiniai darbai Dzūkijos integruoto monitoring stotyje

Dzūkijos inegruoto monitoring stotyje, Duburių upelio baseine paviršinio vandens, gruntinio vandens, polajinių kritulių, nuokritų ir augalijos stebėjimai atnaujinti po ilgos pertraukos.

- 2024 Spalio – gruodžio mėnesiais atstatyta Duburių upelio patvanka, senos patvankos vietoje panaudojant seną patvankos plokštę ir hidrotechninio įrenginio šulinį.
- 2024.11.22 Duburių upelio patvankos niveliavimas
- 2024.12.19 Instaliuotas SOLINS 5 levelogeris ir barologeris, patvankos niveliavimas.
- 2025.02.27 Užšalęs visas upelio paviršius, patvanka ir vanduo šulinėlyje. Ledai ir sąnašos išvalyti.
- 2025.02.28 – Instaliuoti 5 polajinių kritulių rinktuvai, šalia intensyvių stebėjimų stacionaro D100. Pradėtas polajinių kritulių rinkimas.
- Pergręžtas gruntinio vandens gręžinys Nr. 1. Išvalyti senieji gręžiniai Nr. 2 ir Nr. 3, dalinai gręžinys Nr. 4 (sausas).
- 2025.04.01 Į gruntinio vandens gręžinį Nr. 1 įmesta šaka, samanos – išvalyta, išsemtas visas vanduo. Duburių upelio patvankos valymas, niveliavimas.
- 2025.04.26 - Duburių upelio patvankos valymas.
- 2025.05.18 - Duburių upelio zoobentoso mėginių paėmimas, kartu Su GTC darbuotojais.
- 2025.07.01 Duburių upelio patvankos valymas.
- 2025.08.07 - Gruntinio vandens aukščio matavimai atlikti 4 val. po mėginių paėmimų, gali būti ne pilnai atsistatę ir vertės netikslios.
- 2025.09.02 - Duburių upelio patvankos valymas.

- 2025.10.01 Kartu su GTC darbuotojais atkurtas DKMS dirvožemio tyrimų poligonas, 30 x 50 m. Paimti dirvožemio mėginiai. Poligono pietinėje dalyje iškasta perkasa. Paimtas zoobentoso mėginys, perduotas GTC darbuotojams.

- 2025.11.02 Šalia polajinių kritulių rinktuvų instaliuoti nuokritų rinktuvai. Nr. 5 rinktuvas su defektu, ilgainiui reikia atnaujinti.

PVC vamzdeliais paženklintas dirvožemio poligono perimetras, kas 10 m. ir 2025 m. perkasos vieta.

Suniveliuota Duburių upelio patvanka, nukrautas SOLINST levelogeris ir barologeris, pravalytas šulinėlį su upeliu jungiantis vamzdis, patvanka.

- 20251228 Pravalyta Duburių upelio patvanka. Nukrautas upelio levelogeris, Šulinėlio dangtis izoliuotas nuo šalčio.

Dzūkijos integruoto monitoringo stoties mėginių surinkimo vietų koordinatės:

Paviršnis vanduo, Duburių upelio patvanka:
X: 5994639 Y: 519227

Gruntinis vanduo (gręžiniai);
Gręžinys nr 1 *X:* 5994315 *Y:* 519121
Gręžinys nr 2 *X: 5994310 Y:* 519128
Gręžinys nr 3 *X: 5994305 Y:* 519139
Gręžinys nr 4 *X: 5994300 Y:* 519147

Polajiniai krituliai:
Nr.1 *X: 5994278 Y:* 519231
Nr.2 *X: 5994289 Y:* 519234
Nr.3 *X: 5994295 Y:* 519237
Nr.4 *X: 5994308 Y:* 519241
Nr.5 *X: 5994322 Y:* 519246
Kontrolė atviroje vietoje X: 5995190 Y: 518827

LKS94 koordinačių sistema

<u>1 lentelė</u>. *Sutvarkyti Aukštaitijos integruoto monitoringo stoties meteorologiniai duomenys. Duomenų iškarpa.*

Rūgšteliškis, 55.463	47° 26.00413° (WGS-84); Winter time UTC+2																						
Data	Metų d	KRITULIAI		DIRVOŽEMIO T			ORO DRĖ	VĖJAS					SLĖGIS	SAULĖ					SNIEGAS		ORO T	ORO T , gradientui		
Timestamp	Day Of	Precip	Precipitat	Temp_-0.(	Temp_-0.	Temp_-0.:	RH	WindDir	WS_ms	WS_Max	WS_Max_timestamp	WS_MAX_	Pressure	Solar_Rac	SR_PAR	SR_UVA	SR_UVB	Snow_aut	Snow_ma	AirTC_2m	Temp_2m	Temp_8m	Temp_22m
yyyy-mm-dd hh	DOY	mm/V.	mm/SAV	Deg C	Deg C	Deg C	%	Degrees	met/sec	met/sec	yyyy-mm-dd hh:mm:s	Deg	mbar	W/m2	W/m2	W/m2	W/m2	m	m	Deg C	Deg C	Deg C	Deg C
Winter time		Tot	Tot	Avg	Avg	Avg	Smp	Smp	Avg	Max	Winter time	WVc	Avg	Avg	Avg	Avg	Avg	Avg	Smp	Avg	Avg	Avg	Avg
Datestamp	DOY	mm/h	mm/weel	T_0,05m,	T_0,1m, C	T_0,2m, C	RH, %	WD, deg	WS_ms	WS_ms_M	WS_ms_TMx	WS_MAX_	Slėgis_m	SR, W/m2	PAR_W/m	UVA, W/m	UVB, w/m	Sniegas, r	Sniegas ra	T_2m	Temp_2m	Temp_8m	Temp_22m
2024-01-01 00:00	1	0		2.241	2.513	2.896	75.53	111	0.562	3.01	2023-12-31 23:46	46.28	996	0	0	0	0	0.000		-1.744	-1.617	-1.676	-1.857
2024-01-01 01:00	1	0		2.21	2.486	2.878	78.53	47	0.496	1.83	2024-01-01 00:47	37.02	996	0	0	0	0	0.000		-1.893	-1.757	-1.826	-2.024
2024-01-01 02:00	1	0		2.181	2.459	2.86	82.1	68	0.883	2.34	2024-01-01 01:32	42.35	996	0	0	0	0	0.000		-2.091	-2	-2.058	-2.26
2024-01-01 03:00	1	0		2.153	2.433	2.842	81.5	4	1.433	4.23	2024-01-01 02:38	59.09	996	0	0	0	0	0.000		-2.493	-2.323	-2.477	-2.714
2024-01-01 04:00	1	0		2.123	2.406	2.824	80.6	103	1.453	3.68	2024-01-01 03:23	55.73	996	0	0	0	0	0.000		-2.886	-2.692	-2.857	-3.108
2024-01-01 05:00	1	0		2.093	2.38	2.806	81.2	73	1.617	5.11	2024-01-01 04:25	58.9	996	0	0	0	0	0.000		-3.365	-3.103	-3.29	-3.548
2024-01-01 06:00	1	0		2.061	2.351	2.788	80.8	55	1.14	4.04	2024-01-01 05:31	38.3	996	0	0	0	0	0.000		-3.754	-3.534	-3.713	-3.95
2024-01-01 07:00	1	0		2.029	2.322	2.77	82.3	57	1.158	4.06	2024-01-01 06:04	43.55	995	0	0	0	0	0.000		-4.036	-3.792	-3.962	-4.174
2024-01-01 08:00	1	0		1.996	2.292	2.751	80.3	18	1.334	5.84	2024-01-01 07:19	51.43	995	0	0	0	0	0.000		-4.402	-4.106	-4.303	-4.54
2024-01-01 09:00	1	0	28.3	1.963	2.262	2.731	80.8	20	1.33	4.33	2024-01-01 08:08	52.75	995	0	0	0	0	0.000		-4.547	-4.288	-4.482	-4.726
2024-01-01 10:00	1	0		1.929	2.231	2.711	80.5	132	1.42	5.83	2024-01-01 09:11	71.32	995	0	0	0	0	0.000		-4.598	-4.305	-4.489	-4.721
2024-01-01 11:00	1	0		1.894	2.2	2.691	79.46	30	1.314	5.06	2024-01-01 10:59	66.31	995	11.5	7.5	0	0.006	0.000	0	-4.589	-4.325	-4.491	-4.721
2024-01-01 12:00	1	0		1.858	2.168	2.67	77.38	97	1.327	4.91	2024-01-01 11:15	83.8	994	33.6	21.21	0.236	0.016	0.000		-4.808	-4.518	-4.682	-4.908
2024-01-01 13:00	1	0		1.822	2.135	2.648	75.28	134	1.608	5.45	2024-01-01 12:48	78.17	994	68.96	43.19	0.7	0.029	0.000		-4.788	-4.449	-4.645	-4.89
2024-01-01 14:00	1	0		1.787	2.102	2.627	74.69	147	1.502	5.29	2024-01-01 13:15	84.8	994	94.3	58.43	1.006	0.037	0.000		-4.579	-4.236	-4.416	-4.665
2024-01-01 15:00	1	0		1.753	2.071	2.605	76.42	56	1.82	6.09	2024-01-01 14:48	70.53	993	61.15	39.09	0.761	0.031	0.000		-4.597	-4.268	-4.459	-4.714
2024-01-01 16:00	1	0		1.722	2.041	2.584	77.44	38	1.723	5	2024-01-01 15:10	58.84	993	23.52	15.77	0.168	0.014	0.000		-4.858	-4.532	-4.758	-5.009
2024-01-01 17:00	1	0		1.689	2.011	2.563	78.29	107	1.541	7.08	2024-01-01 16:58	49.56	993	3.139	2.629	0	0.002	0.000		-5.123	-4.851	-5.062	-5.32
2024-01-01 18:00	1	0		1.656	1.981	2.542	77.29	1	1.735	7.04	2024-01-01 17:29	51.06	993	0	0	0	0	0.000		-5.517	-5.261	-5.488	-5.732
2024-01-01 19:00	1	0		1.591	1.922	2.499	76.93	92	1.698	7.29	2024-01-01 18:28	51.14	992	0	0	0	0	0.000		-5.531	-5.286	-5.495	-5.741
2024-01-01 20:00	1	0		1.56	1.894	2.478	76.36	41	1.828	7.96	2024-01-01 19:40	54.97	992	0	0	0	0	0.000		-5.743	-5.457	-5.687	-5.931
2024-01-01 21:00	1	0		1.531	1.867	2.458	75.78	150	1.745	6.43	2024-01-01 20:57	49.61	992	0	0	0	0	0.000		-6.176	-5.889	-6.129	-6.383
2024-01-01 22:00	1	0		1.502	1.841	2.437	74.27	78	1.993	6.51	2024-01-01 21:40	79.57	992	0	0	0	0	0.000		-6.649	-6.358	-6.559	-6.809
2024-01-01 23:00	1	0		1.471	1.814	2.416	77.65	95	1.681	5.43	2024-01-01 22:31	55.85	992	0	0	0	0	0.000		-6.888	-6.582	-6.819	-7.071

Pilna duomenų suvestinė - skaitmeninėje laikmenoje.

2a lentelė. *Upelio Versminio, gruntinio ir dirvožeminio vandens mėginių paėmimo laikai 2021-2022 m. Upelio Versminio vandens fizikiniai parametrai, mėginio ėmimo metu.*

AIMS	Mėginiai pristatyti analizei į Aplinkos tyrimų departamentą				Upelio Versminio vandens parametrai			
2021-2022	Up. Versminis	Gręžinio Nr.	Lizimetro Nr.	Protokolo nr.	T, C °	O2, mg/l	PH	Laidis, mg/cm
2021-01-31	+	1/3	-	2021.01	4.8	3.82	#N/A	410
2021-02-28	+	-	-	2021.02	4.8	3.51	#N/A	408
2021-03-28	+	1/3	21/22/23/41/42/43	2021.03	4.8	3.33	#N/A	407
2021-05-03	+	-	21/22/23/41/ - /43	2021.04	5	2.81	#N/A	375
2021-05-31	+	1/2	21/22/23/41/ - /43	2021.05	7	3.2	#N/A	377
2021-06-27	+	-	21/22/23/41/42/43	2021.06	8.5	2.81	#N/A	374
2021-08-01	-	1	-	2021.07	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
2021-08-29	+	-	21/22/23/41/42/43	2021.08	10.9	2.22	#N/A	389
2021-10-03	+	1/1s/2/3	21/ - /23/41/ - / -	2021.09	10.0	2.06	#N/A	406
2021-11-01	+	1/2/3/4	21/ - / - / - / - / -	2021.10	7.6	2.77	#N/A	417
2021-11-28	+	1/2/3/4	21/ - /23/41/42/43	2021.11	7.1	2.14	#N/A	426
2022-01-02	+	-	-	2021.12	4.8	2.46	#N/A	424
2022-01-30	+	1/2/3/4	-	2022.1	5.1	1.42	#N/A	412
2022-02-27	+	-	-	2022.2	4.5	1.43	#N/A	408
2022-04-03	+	1/2/3/4	21/22/23/41/42/43	2022.3	4.6	1.67	#N/A	401
2022-05-02	+	-	21/22/23/41/ - /43	2022.4	5.7	2.54	7.19	392
2022-05-29	+	1/2/3/4	21/22/ - / - / - / -	2022.5	6.9	2.10	7.12	391
2022-06-27	+	-	21/22/23/ - /42/43	2022.6	8.7	1.05	7.11	377
2022-08-01	+	1/2/3/4	21/22/23/ - /42/43	2022.7	9.8	1.06	7.00	374
2022-08-28	+	-	21/22/23/ - / - / -	2022.8	10.5	1.24	7.13	390
2022-10-02	+	1/2/3/4	21/22/23/ - / - / -	2022.9	9.0	0.92	7.03	396
2022-10-31	+	-	21/22/23/ - /42/43	2022.10	8.3	1.15	7.06	393
2022-11-27	+	1/2/3/4	-	2022.11	7.3	1.17	7.10	394

2b lentelė. *Upelio Versminio, gruntinio ir dirvožeminio vandens mėginių paėmimo laikai 2023 m. Upelio Versminio vandens fizikiniai parametrai, mėginio ėmimo metu.*

AIMS 2023	Mėginiai pristatyti analizei į Aplinkos tyrimų departamentą				Upelio Versminio vandens parametrai			
	Up. Versminis	Gręžinio Nr.	Lizimetro Nr.	Protokolo nr.	T, C °	O2, mg/l	PH	Laidis, mg/cm
2023-01-01	+	-	-	2022.12	5.9	0.98	6.99	366
2023-01-29	+	1/2/3/4	-	2023.1	4.5	1.26	7.09	341
2023-02-26	+	-	-	2023.2	4.2	1.29	7.06	345
2023-04-02	+	1/2/3/4	21/22/23/ - /42/43	2023.3	4.4	1.76	7.05	282
2023-05-01	+	-	21/22/ - / - /42/ -	2023.4	6.3	0.86	7.06	343
2023-05-15		-	-		6.6	2.50	7.40	353
2023-05-28	+	1/2/3/4	- /22/ - / - / - / -	2023.5	7.1	1.67	7.10	357
2023-06-25	+	-	- /22/ - / - / - / -	2023.6	8.2	2.05	#N/A	#N/A
2023-07-30	+	1/2/3/4	21/22/23/ - /42/43	2023.7	9.2	1.81	7.30	374
2023-08-18		-	-		10.2	1.62	7.30	362
2023-09-04	+	-	21/22/23/ - /42/43	2023.8	10.2	1.48	7.30	373
2023-09-21		-	-		9.7	1.71	7.20	377
2023-10-01	+	1/2/3/4	21/22/23/ - /42/43	2023.9	9.8	1.58	7.20	360
2023-10-29	+	-	21/22/23/ - /42/43	2023.10	7.6	#N/A	7.20	341
2023-11-14		-	-		7.3	1.99	7.20	338
2023-11-26	+	1/2/3/4	-	2023.11	6.0	2.28	7.30	#N/A
2023-12-31	+	-	21/22/23/ - /42/43	2023.12	4.0	3.34	7.40	#N/A

2c lentelė. *Upelio Versminio, gruntinio ir dirvožeminio vandens mėginių paėmimo laikai 2024 m. Upelio Versminio vandens fizikiniai parametrai, mėginio ėmimo metu.*

AIMS 2024	Mėginiai pristatyti analizei į Aplinkos tyrimų departamentą				Upelio Versminio vandens parametrai				
	Up. Versminis	Gręžinio Nr.	Lizimetro Nr.	Protokolo nr.	Aukštis mm	T, C °	O2, mg/l	PH	Laidis, mg/cm
2024-01-17		-	-		101	3.5	#N/A	7.30	324
2024-01-28	+	1/2/3/4	-	2024.01	103	3.4	3.45	7.40	322
2024-02-19		-	-		106	3.4	3.49	7.20	323
2024-03-03	+	-	21/22/23/ - /42/43	2024.02	121	3.4	3.30	7.30	274
2024-03-17		-	-		111	4.0	3.54	7.30	306
2024-03-31	+	1/2/3/4	-	2024.03	108	5.4	2.80	7.20	314
2024-04-17		-	-		114	6.5	2.49	7.30	314
2024-04-28	+	-	21/22/23/ - /42/43	2024.04	117	6.5	2.53	7.20	286
2024-05-16		-	-		102	7.6	2.19	7.20	333
2024-06-03	+	1/2/3/4	21/22/23/ - / - /43	2024.05	135	9.7	2.21	7.00	291
2024-06-17		-	-		101	9.9	2.17	#N/A	347
2024-07-01	+	1/2/3/4	21/22/23/ - /42/43	2024.06	94	10.9	1.66	#N/A	363
2024-07-17		-	-		102	12.3	1.30	#N/A	353
2024-07-28	+	1/2/3/4	21/22/23/ - /42/43	2024.07	100	12.1	1.40	#N/A	361
2024-08-19		-	-		102	11.9	1.12	#N/A	366
2024-09-01	+	-	21/22/23/ - /42/43	2024.08	96	11.8	1.20	#N/A	374
2024-09-27	+	1/2/3/4	21/22/23/ - /42/43	2024.09	98	11.0	1.06	#N/A	371
2024-10-16		-	-		100	8.8	1.38	#N/A	372
2024-11-03	+	-	21/22/23/ - / - / -	2024.10.	106	7.6	1.70	#N/A	367
2024-11-17		-	-		102	6.7	1.86	#N/A	368
2024-12-01	+	1/2/3/4	21/22/ 23 / - / - /43	2024.11	100	5.9	2.21	#N/A	363
2024-12-17		-	-		110	4.6	3.12	#N/A	355
2024-12-29	+	-	21/22/23/ - / - / -	2024.12	100	5.1	2.34	#N/A	359

2d lentelė. *Upelio Versminio, gruntinio ir dirvožeminio vandens mėginių paėmimo laikai 2025 m. Upelio Versminio vandens fizikiniai parametrai, mėginio ėmimo metu.*

AIMS 2025	Mėginiai pristatyti analizei į Aplinkos tyrimų departamentą				Upelio Versminio vandens parametrai				
	Up. Versminis	Gręžinio Nr.	Lizimetro Nr.	Protokolo nr.	Aukštis mm	T, C °	O2, mg/l	PH	Laidis, mg/cm
2025-01-15		-	-		104	4.3	2.56	#N/A	346
2025-02-02	+	1/2/3/4	-	2025.01	106	5.0	2.56	#N/A	347
2025-02-13		-	-		96	4.8	2.34	#N/A	363
2025-03-02	+	-	21/22/23/ - /42/43	2025.02	100	4.6	2.51	#N/A	362
2025-03-17		-	-		101	4.1	#N/A	#N/A	#N/A
2025-03-30	+	1/2/3/4	21/22/-/ - /-/-	2025.03	97	5.2	2.16	#N/A	354
2025-04-19		-	-		96	6.1	1.83	#N/A	359
2025-04-27	+	-	-/-/-/-/-/-	2025.04	94	6.6	2.14	#N/A	364
2025-05-18		-	-		105	6.8	1.95	#N/A	357
2025-06-01	+	1/2/3/4	21/22/23/ - /42/43	2025.05	110	8.9	1.55	7.22	332
2025-06-19		-	-		102	9.1	1.68	7.2	357
2025-06-29	+	-	21/22/23/ - /42/43	2025.06	101	9.4	1.67	7.3	355
2025-07-17		-	-		104	10.2	1.58	7.3	358
2025-08-03	+	1/2/3/4	21/22/23/ - /42/43	2025.07	109	11.8	1.14	7.31	339
2025-08-13		-	-		101	11.0	1.23	7.29	363
2025-08-31	+	-	-/-/-/-/-/-	2025.08	95	10.0	1.42	7.27	371
2025-09-21		-	-		108	10.2	1.26	7.32	375
2025-09-29	+	1/2/3/4	-/-/-/-/-/-	2025.09	95	9.2	1.69	7.19	373
2025-10-14		-	-		96	8.3	1.82	7.28	373
2025-11-03	+	-	21/22/23/ - /-/43	2025.10.	117	7.8	2.34	#N/A	347
2025-11-16		-	-		100	7.3	1.57	7.13	368
2025-12-01	+	1/2/3/4	21/22/23/ - /42/43	2025.11	98	6.7	1.62	7.14	369
2025-12-14		-	-		98	6.3	1.81	7.15	368
2025-12-29	+	-	-	2025.12	100	6.1	1.65	7.22	369

2e lentelė. *Duburių upelio ir gruntinio vandens mėginių paėmimo laikai DKMS teritorijoje 2025 m. Paviršinio vandens fizikiniai parametrai, mėginio ėmimo metu.*

DIMS 2025	Val.	Mėginiai pristatyti analizei į Aplinkos tyrimų departamentą				Upelio Versminio vandens parametrai				
		Up. Duburių	Gręžinio Nr.	Protokolo nr.	Aukštis mm	T, C °	O2, mg/l	PH	Laidis, mg/cm	Pastabos
2024-12-19	16:00	-	-	-	143	-	-	-	-	Instaliuotas Solinst levelogeris ir barologeris šalia esančiame šulinėlyje
2025-02-27	18:00	-	-	-	140	3.3	-	-	255	Užšalęs visas upelio paviršius ir šulinėlis
2025-02-28	13:30	+	1/2/3	2025.02	147		-	-	-	
2025-04-01	11:00	+	1/2/3/	2025.03	134	6.8	14.37	-	266	
2025-04-26	18:40	+	1/2/3/	2025.04	125	7.5	11.62	-	271	Užnešta smėliu, pravalyta
2025-05-18	14:00				127	9.1	10.7	-	267	
2025-06-03	12:00	+	1/2/3	2025.05	118	12.4	9.86	8.36	272	
2025-07-01	12:00	+	-	2025.06	108	12.8	10.19	8.09	275	Užnešta smėliu, pravalyta
2025-08-07	13:30	+	1/2/3	2025.07	126	13.1	9.95	8.26	269	Užnešta smėliu, nepravalyta
2025-09-02	11:40	+	-	2025.08	116	12.5	9.86	8.18	275	
2025-10-01	13:00	+	1/2/3	2025.09	122	7.6	11.74	8.18	272	
2025-11-02	17:00	+	-	2025.10.	133	7.5	10.78	8.05	264	Užnešta smėliu, pravalytas jungiantis vamzdis
2025-11-30	14:00	+	1/2/3	2025.11	141	3.8	12.25	8.05	258	
2025-12-28	13:30	+	-	2025.12	142	3.4	12.37	8.16	259	
2026-02-02	14:00	+	-	2026.01	144	-0.1	11	8.13	280	Užšalęs visas upelio paviršius- ledus pradaužiau, bet formuojasi ptvanka žemiau - vandens lygis netikslus

3 lentelė. *Upelio Versminio debitų suvestinė. Duomenų iškarpa.*

1	upelio "Versminio" debitų skaičiavimas												vandens Temperatūra daviklio aplinkoje
2			matavimo duomenys ir pirminis jų apdorojimas				debitų skaičiavimas						
3			Hd	hv	Hd-hv	hv	hv	Sv	H	H	Q1	Q2	
4			mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	m	l/s	m3/val.	
5	data	valanda	daviklio mat.	rankinis mat.	/ seka /	išskaičiuotas			hv - Sv	H x 0.001	1343 x H^2.47	Q1 x 3.6	laipsn. C
33520	2024-04-17	12	324.1		210	114.0	114.0	6	108	0.108	5.50	19.80	6.343
33521	2024-04-17	13	322.1		210	111.9	111.9	6	106	0.106	5.24	18.87	6.334
33522	2024-04-17	14	324.3	114	210	114.0	114.0	6	108	0.108	5.50	19.81	6.327
33523	2024-04-17	15	322.4		210	112.1	112.1	6	106	0.106	5.27	18.97	6.323
33524	2024-04-17	16	321.2		210	111.0	111.0	6	105	0.105	5.13	18.46	6.313
33525	2024-04-17	17	322.8		210	112.6	112.6	6	107	0.107	5.33	19.17	6.306
33526	2024-04-17	18	317.1		210	106.9	106.9	6	101	0.101	4.65	16.75	6.299
33527	2024-04-17	19	323.7		210	113.5	113.5	6	108	0.108	5.44	19.60	6.295
33528	2024-04-17	20	330.1		210	120.0	120.0	6	114	0.114	6.28	22.62	6.287
33529	2024-04-17	21	326.4		210	116.3	116.3	6	110	0.110	5.79	20.86	6.283
33530	2024-04-17	22	318.7		210	108.6	108.6	6	103	0.103	4.85	17.46	6.276
33531	2024-04-17	23	317.5		210	107.4	107.4	6	101	0.101	4.71	16.97	6.270
33532	2024-04-18	0	320.6		210	110.6	110.6	6	105	0.105	5.08	18.29	6.263
33533	2024-04-18	1	320.5		210	110.5	110.5	6	104	0.104	5.07	18.26	6.260
33534	2024-04-18	2	321.3		210	111.3	111.3	6	105	0.105	5.17	18.61	6.255
33535	2024-04-18	3	318.0		210	108.0	108.0	6	102	0.102	4.78	17.22	6.254
33536	2024-04-18	4	316.1		210	106.2	106.2	6	100	0.100	4.57	16.45	6.251
33537	2024-04-18	5	315.2		210	105.3	105.3	6	99	0.099	4.47	16.09	6.247
33538	2024-04-18	6	316.8		210	106.9	106.9	6	101	0.101	4.65	16.75	6.244
33539	2024-04-18	7	319.7		210	109.8	109.8	6	104	0.104	4.99	17.98	6.240
33540	2024-04-18	8	317.8		210	108.0	108.0	6	102	0.102	4.77	17.19	6.237
33541	2024-04-18	9	315.5		210	105.7	105.7	6	100	0.100	4.52	16.26	6.233
33542	2024-04-18	10	316.8		210	107.0	107.0	6	101	0.101	4.67	16.79	6.232
33543	2024-04-18	11	310.4		210	100.6	100.6	6	95	0.095	3.97	14.30	6.229

Pilna duomenų suvestinė - skaitmeninėje laikmenoje

4a lentelė. *Santykinė dirvožemio drėgmė (%), Ažvinčių sengirės rezervate, tyrimų poligonas Nr. 0100.*

Gylis	20 cm.			40 cm.				Gylis	20 cm.			40 cm.		
Daviklio nr.	A21	A22	A23	A41	A42	A43		Daviklio nr.	A21	A22	A23	A41	A42	A43
2021-01-15								2022-01-15						
2021-02-15								2022-02-15						
2021-03-28	12.8	16.1	13.3	11.7	17.5	13.4		2022-03-15						
2021-04-11	11.5	15.2	12.1	10.2	15.4	11.7		2022-04-03	12.4	15.1	12.8	10.7	15.2	12.1
2021-05-03	13.4	16.6	8.7	8.6	17.4	8.9		2022-04-18	12.1	15.1	12.2	10.2	15.1	11.6
2021-05-17	11.6	15.1	10.8	11.2	14.9	10.7		2022-05-02	11.8	14.7	11.6	9.9	14.7	11.4
2021-05-31	11.7	15.1	11.5	10.4	15.3	11.6		2022-05-14	10.9	13.5	9.3	8.9	13.6	9.4
2021-06-14	8.5	13.2	7.6	8.3	13.1	8.1		2022-05-29	14.7	16.6	12.5	12.7	17.4	11.7
2021-06-27	12.7	16.6	13.3	10.9	17.9	13.1		2022-06-13	12.3	15.2	12.0	10.2	15.4	11.7
2021-07-19	5.2	10.3	6.7	6.4	11.1	7.1		2022-06-26	12.3	15.0	11.7	10.3	15.4	11.6
2021-08-01	6.3	9.4	6.1	6.1	10.0	5.7		2022-07-17	13.0	15.9	13.2	11.0	16.6	12.7
2021-08-16	9.7	14.7	8.4	9.0	14.5	8.0		2022-07-31	10.5	14.2	9.9	9.1	14.5	9.9
2021-08-29	12.1	15.8	13.7	10.8	16.2	13.1		2022-08-18	9.9	13.6	7.7	9.5	14.5	8.9
2021-09-20	12.1	15.6	9.6	8.2	13.4	9.2		2022-08-28	11.5	14.1	8.2	10.8	13.1	8.1
2021-10-03	10.8	14.3	12.0	9.9	14.6	11.5		2022-09-21	10.4	11.8	7.2	8.7	11.7	7.3
2021-11-01	11.7	15.1	12.9	10.8	15.5	12.3		2022-10-02	13.8	15.9	11.1	12.7	16.1	9.5
2021-11-14	12.1	15.2	13.2	10.8	15.4	12.5		2022-10-19	11.2	14.2	12.1	9.6	14.7	11.6
2021-11-28	12.2	15.1	13.2	10.7	15.3	12.4		2022-10-31	12.7	15.2	13.0	10.7	15.8	12.7
2021-12-15								2022-11-15						
								2022-12-15						

4b lentelė. *Santykinė dirvožemio drėgmė (%), Ažvinčių sengirės rezervate, tyrimų poligonas Nr. 0100.*

Gylis	20 cm.			40 cm.				Gylis	20 cm.			40 cm.				Gylis	20 cm.			40 cm.		
Daviklio nr.	A21	A22	A23	A41	A42	A43		Daviklio nr.	A21	A22	A23	A41	A42	A43		Daviklio nr.	A21	A22	A23	A41	A42	A43
2023-01-15								2024-01-15								2025-01-15						
2023-02-15								2024-02-15								2025-02-02	13.0	16.5	13.4	10.8	16.3	13.1
2023-03-15								2024-03-03	13.3	15.8	13.9	11.9	16.2	13.6		2025-03-02	12.5	15.9	12.7	9.6	14.8	11.9
2023-04-02	15.8	16.7	14.3	13.3	18.2	13.6		2024-03-17	12.2	14.6	12.5	9.9	14.8	12.0		2025-03-30	13.6	16.1	13.3	11.3	16.6	13.0
2023-04-12	12.9	15.0	12.6	10.4	15.3	12.0		2024-03-31	13.5	16.1	13.0	11.0	16.1	12.7		2025-04-19	12.7	14.9	11.6	10.2	15.4	11.5
2023-05-01	11.9	14.1	10.6	9.4	14.2	10.4		2024-04-17	12.4	14.8	12.2	10.1	15.2	11.8		2025-04-27	10.4	13.5		9.3	14.5	10.0
2023-05-15	9.2	12.4	7.4	8.4	13.4	8.8		2024-04-28	13.6	15.9	13.4	11.6	16.3	13.5		2025-05-18	16.5	17.8		13.2	13.5	11.2
2023-05-28	9.7	13.2	7.1	9.4	14.1	8.4		2024-05-16	9.5	13.8	9.7	11.4	14.4	10.4		2025-06-01	14.8	17.2		11.9	17.8	13.3
2023-06-15	8.2	10.5	5.9	8.1	11.7	7.1		2024-06-03	18.3	19.5	14.6	20.0	20.7	14.4		2025-06-19	14.3	17.7		11.0	17.3	12.6
2023-06-25	8.0	9.8	5.8	7.4	11.1	6.8		2024-06-17	12.0	15.0	11.0	10.1	16.0	11.3		2025-06-29	15.0	17.7		11.2	18.2	13.2
2023-07-14	7.7	9.5	5.7	6.5	10.8	6.6		2024-07-01	10.4	13.9	7.8	8.9	15.3	9.2		2025-07-17	15.3	17.1		10.9	17.8	12.3
2023-07-30	10.1	14.0	9.2	9.8	15.1	9.7		2024-07-17	13.5	16.3	12.6	10.9	17.3	12.7		2025-08-03	15.9	18.4		12.1	19.8	13.8
2023-08-18	10.0	13.9	9.6	9.4	15.1	10.2		2024-07-28	13.6	17.0	12.7	11.2	18.0	12.4		2025-08-13	14.4	17.4		10.2	18.7	12.2
2023-09-04	12.1	15.8	11.2	11.5	16.7	10.5		2024-08-19	10.1	14.0	9.0	8.6	15.4	9.6		2025-08-31	11.8	16.1		8.8	17.2	10.1
2023-09-21	9.2	12.9	8.6	8.8	14.2	9.0		2024-09-01	10.0	14.0	8.2	9.2	14.8	9.0		2025-09-29	12.1	15.8		8.7	16.4	10.2
2023-10-01	11.0	14.6	11.8	10.1	15.6	11.8		2024-09-27	9.3	14.1	10.4	8.9	15.4	10.4		2025-10-14	13.4	14.5		8.5	15.3	9.8
2023-10-18	12.6	16.6	13.6	12.1	17.1	13.6		2024-10-16	11.2	16.1	11.9	9.5	14.9	11.1		2025-11-03	15.7	18.4		13.7	19.1	14.6
2023-10-29	12.3	15.6	13.3	11.3	16.0	12.8		2024-11-03	11.6	17.0	13.1	11.9	17.9	12.9		2025-11-16	14.1	17.1		11.0	16.9	13.1
2023-11-14	13.0	16.1	13.9	12.5	16.9	13.8		2024-11-17	12.0	15.6	12.8	11.0	15.9	12.8		2025-12-01	15.9	16.9		12.8	16.5	12.8
2023-12-31	13.9	16.7	14.5	13.7	17.7	14.6		2024-12-01	12.6	16.3	13.3	11.7	17.2	13.4		2025-12-29	14.4	16.8		11.5	16.8	13.0
								2024-12-17	13.4	16.8	13.3	13.0	16.4	13.2								
								2024-12-29	12.7	16.0	13.3	11.2	16.4	13.1								

Duomenys gauti, naudojant Theta Probe ML2x dirvos drėgmės daviklius ir Delta-T, HH2 skaitytuvą.

5a lentelė. *Vandens kiekiai lizimetruose (ml.) 2021-2022 m. Ažvinčių sengirės rezervate, tyrimų poligonas Nr. 0100.*

Gylis	20 cm.			40 cm.		
Lizimetro Nr.	A21	A22	A23	A41	A42	A43
2021-01-03						
2021-01-29						
2021-02-28						
2021-03-28	>5200	>5200	730	2200	550	650
2021-05-03	2530	100	710	1000	0	790
2021-05-31	4200	1600	510	750	0	120
2021-06-27	770	1200	1340	160	450	1130
2021-08-01	0	0	0	0	0	0
2021-08-29	5050	2420	2430	4070	4410	4750
2021-10-03	1940	0	200	330	0	0
2021-11-01	780	0	0	0	0	0
2021-11-28	4400	#N/A	200	410	1570	180
2022-01-02						
2022-01-30						
2022-02-27						
2022-04-03	>5200	>5200	1900	>5200	1430	4340
2022-05-02	4190	1100	440	2500	0	150
2022-05-29	660	810	0	#N/A	0	0
2022-06-26	>5200	3850	1400	#N/A	4000	3500
2022-07-31	3220	4950	1910	#N/A	4010	2700
2022-08-28	470	200	170	#N/A	0	0
2022-10-02	650	630	40	#N/A	0	120
2022-10-31	4940	3530	1730	#N/A	2950	4010
2022-11-27						

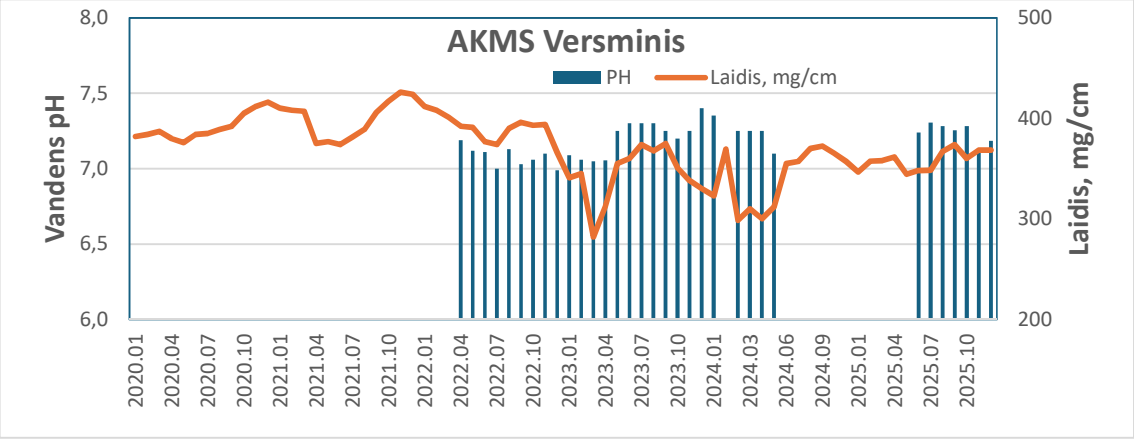
5b lentelė. *Vandens kiekiai lizimetruose (ml.) 2023-2025 m. Ažvinčių sengirės rezervate, tyrimų poligonas Nr. 0100.*

Gylis	20 cm.			40 cm.		
Lizimetro Nr.	A21	A22	A23	A41	A42	A43
2023-01-01						
2023-01-29						
2023-02-26						
2023-04-02	>5200	>5200	>5200	#N/A	>5200	>5200
2023-05-01	120	105	0	#N/A	55	0
2023-05-28	0	320	0	#N/A	0	0
2023-06-25	0	100	0	#N/A	0	0
2023-07-30	530	2070	980	#N/A	1710	1920
2023-09-04	>5200	>5200	>5200	#N/A	>5200	>5200
2023-10-01	1290	3050	1400	#N/A	2400	940
2023-10-29	>5200	3400	1090	#N/A	2050	2380
2023-12-31	>5200	>5200	1720	#N/A	3560	4170
2024-01-28						
2024-03-03	>5200	>5200	2630	#N/A	1480	3620
2024-03-31	0	0	0	#N/A	0	0
2024-04-28	>5200	4970	3700	#N/A	2950	4050
2024-06-03	580	940	510	#N/A	0	330
2024-07-01	270	380	210	#N/A	30	410
2024-07-28	2640	2790	1800	#N/A	2670	2200
2024-09-01	>5200	>5200	3920	#N/A	>5200	>5200
2024-09-27	1040	2860	1260	#N/A	4000	2400
2024-11-03	530	50	180	#N/A	0	0
2024-12-01	2890	290	275	#N/A	0	300
2024-12-29	1450	360	0	#N/A	0	0
2025-02-02						
2025-03-02	5150	1950	610	#N/A	610	670
2025-03-30	1750	420	0	#N/A	0	0
2025-04-27	0	0	0	#N/A	0	0
2025-06-01	>5200	4320	2680	#N/A	4510	4610
2025-06-29	2030	830	410	#N/A	340	950
2025-08-03	4890	3260	2440	#N/A	4100	5150
2025-08-31	0	0	0	#N/A	0	0
2025-09-29	0	0	0	#N/A	0	0
2025-11-03	2800	2410	710	#N/A	0	130
2025-12-01	770	810	190	#N/A	60	200

Lizimetro darbinis plotas – 0,1155 m^2.

6 lentelė. *Dirvožemio įšalo gylis (cm.) 2021-2025m. Ažvinčių sengirės rezervate, tyrimų poligonas Nr. 0100.*

Data	Įšalo gylis cm		Data	Įšalo gylis cm		Data	Įšalo gylis cm
2020-11-29	0		2022-11-18	0		2024-11-03	0
2020-12-13	1		2022-11-27	0		2024-11-17	0
2021-01-03	0		2022-12-10	0		2024-12-01	0
2021-01-17	5		2023-01-01	0		2024-12-17	0
2021-01-31	0		2023-01-19	0		2024-12-29	0
2021-02-16	8		2023-01-29	2.5		2025-01-15	0
2021-03-14	7		2023-02-26	2		2025-02-02	0
2021-03-28	1		2023-03-23	0		2025-02-13	5.75
2021-04-11	0		2023-04-02	0		2025-03-02	1.5
			2023-05-01	0		2025-03-17	0.5
2021-11-28	0					2025-03-30	0
2021-12-14	0		2023-11-14	0		2025-04-19	0
2022-01-02	3		2023-11-26	0		2025-04-27	0
2022-01-17	3		2023-12-15	0			
2022-01-30	0		2023-12-31	0		2025-11-03	0
2022-02-14	0		2024-01-17	5.5		2025-11-16	0
2022-02-27	0		2024-01-28	2.5		2025-12-01	0
2022-03-14	8		2024-02-19	0		2025-12-14	0
2022-04-03	3		2024-03-03	0		2025-12-29	0
2022-04-18	0		2024-03-17	0			
			2024-03-31	0			



7a lentelė. *Gruntinio vandens lygis gręžiniuose (cm.) AKMS, Versminio baseine.*

2021-2022	**Gręžinio nr**					2023-2024	Gręžinio nr					**2025**	**Gręžinio nr**			
Data	**1**	**2**	**3**	**4**		Data	1	2	3	4		**Data**	**1**	**2**	**3**	**4**
2021-01-03	51	110	216	s		2023-01-01	35	70	185	988		2025-01-15	39	39	132	911
2021-01-17	52	111s	218	s		2023-01-19	28	57	164	991		2025-02-02	38	39	134	912
2021-01-31	52	111s	221	s		2023-01-29	46	68	166	987		2025-02-13	43	43	137	911
2021-02-16	54	111s	221	s		2023-02-14	46	68	168	982		2025-03-02	13	41	138	917
2021-02-28	51	111s	218	s		2023-02-26	42	64	162	976		2025-03-17	40	41	138	916
2021-03-14	51	111s	218	s		2023-03-23	26	49	150	966		2025-03-30	42	43	138	915
2021-03-28	48	108	216	s		2023-04-02	24	47	145	965		2025-04-19	44	45	142	918
2021-04-11	50	107	210	s		2023-04-12	37	52	145	959		2025-04-27	45	48	144	919
2021-05-03	46	105	215	s		2023-05-01	40	55	150	949		2025-05-18	40	42	144	921
2021-05-17	51	108	212	s		2023-05-15	43	58	153	943		2025-06-01	36	36	135	923
2021-05-31	51	105	211	s		2023-05-28	44	58	156	940		2025-06-19	43	41	138	922
2021-06-14	55	111s	218	s		2023-06-15	47	66	162	941		2025-06-29	43	42	136	921
2021-06-27	46	99	219	s		2023-06-25	48	69	166	943		2025-07-17	44	38	136	920
2021-07-19	65	111s	228	s		2023-07-14	50	73	171	945		2025-08-03	40	36	129	917
2021-08-01	73	111s	234	s		2023-07-30	47	70	170	948		2025-08-13	44	40	133	924
2021-08-16	64	111s	233	s		2023-08-18	46	63	160	948		2025-08-31	46	40	138	907
2021-08-29	46	111s	225	s		2023-09-04	46	64	163	949		2025-09-29	46	44	141	909
2021-09-20	59	125	232	s		2023-09-21	48	69	169	950		2025-10-14	45	44	142	911
2021-10-03	61	126	231	s		2023-10-01	46	65	166	951		2025-11-03	35	37	136	914
2021-11-01	63	128	235	1032		2023-10-18	44	63	164	953		2025-11-16	44	42	140	916
2021-11-14	59	123	230	1048		2023-10-29	40	57	156	953		2025-12-01	44	43	142	918
2021-11-28	57	121	228	1050		2023-11-14	38	54	151	951		2025-12-14	44	42	142	920
2021-12-14	55	117	225	1050		2023-11-26	40	55	152	949		2025-12-29	44	45	142	920
2022-01-02	58	116	221	1049		2023-12-15	43	58	155	946						
2022-01-17	57	112	217	1049		2023-12-31	22	43	134	944						
2022-01-30	52	109	216	1045		2024-01-17	38	49	139	936						
2022-02-14	54	108	213	1042		2024-01-28	36	47	139	928						
2022-02-27	52	97	199	1040		2024-02-19	36	46	137	922						
2022-03-14	53	99	202	1034		2024-03-03	25	43	127	920						
2022-04-03	53	95	199	1025		2024-03-17	32	43	130	915						
2022-04-18	51	91	196	1022		2024-03-31	36	45	131	909						
2022-05-02	51	90	193	1019		2024-04-17	37	42	128	905						
2022-05-16	51	92	195	1015		2024-04-28	32	41	123	901						
2022-05-29	50	88	194	1013		2024-05-16	40	43	128	897						
2022-06-13	48	82	183	1010		2024-06-03	23	36	130	892						
2022-06-27	48	79	178	1007		2024-06-17	41	45	132	891						
2022-07-17	44	70	171	999		2024-07-01	41	48	135	891						
2022-08-01	41	68	175	993		2024-07-17	36	44	132	894						
2022-08-18	50	80	180	987		2024-07-28	34	43	133	895						
2022-08-28	46	82	182	980		2024-08-19	32	42	129	891						
2022-09-21	45	85	187	982		2024-09-01	34	42	133	891						
2022-10-02	43	82	186	982		2024-09-27	36	43	136	899						
2022-10-19	45	82	184	981		2024-10-16	36	42	136	903						
2022-10-31	45	81	185	983		2024-11-03	34	41	135	904						
2022-11-18	45	81	184	983		2024-11-17	38	41	135	905						
2022-11-27	46	84		985		2024-12-01	40	42	136	905						
2022-12-10	46	85	188	985		2024-12-17	36	38	136	906						
						2024-12-29	41	42	136	909						

7b lentelė. *Gruntinio vandens lygis gręžiniuose (cm.) Dzūkijos integruoto monitoringo stotyje, Duburių upelio baseine.*

DIMS 2025	Gręžinio nr.			
Data	1	2	3	4
2024-12-19		325.0	617.0	974s
2025-02-27	159.0	329.0	625.0	974s
2025-04-01	158.5	330.0	626.5	974s
2025-04-26	160.0	332.0	629.0	974s
2025-06-03	161.0	335.0	631.0	974s
2025-07-01	162.0	336.0	631.0	974s
2025-08-07	158.0	326.0	656.0	974s
2025-09-02	158.0	327.0	614.0	-
2025-10-01	157.5	323.0	606.0	966
2025-11-02	152.0	316.0	603.0	965
2025-11-30	153.0	317.0	607.0	970
2025-12-28	156.0	320.0	612.0	974s

X. Report to Finnish Environment Institute

Overview of Environmental Change and Main Threats to Forest Ecosystems (1994–2025)

The long-term monitoring results from the Aukštaitija, Dzūkija, and Žemaitija Integrated Monitoring Stations (KMS) revealed substantial environmental changes affecting the functioning, stability, and adaptive capacity of forest ecosystems in Lithuania during the 1994–2025 period. The observed changes were closely associated with climate warming, altered hydrological regimes, shifts in precipitation distribution, and changes in atmospheric and soil-related environmental factors.

Climate Warming and Seasonal Shifts

One of the most pronounced environmental changes during the study period was the significant increase in air temperature, particularly in the Aukštaitija and Dzūkija regions, where annual temperatures increased by more than 0.6 °C per decade. Such warming substantially exceeded many projected regional climate trends and resulted in an approximate increase of 2 °C over the 32-year observation period.

Warming was most intensive during autumn and winter, whereas spring warming remained weaker and in some cases even stabilized or declined during the most recent years. The reduction in winter severity and the increasing frequency of warm winters resulted in a drastic decline in soil frost depth and duration. Since 2014, soil frost has nearly disappeared in some years, fundamentally altering soil hydrological processes and groundwater recharge dynamics.

These climatic changes are likely to affect all major biogeocenotic processes, including tree physiology, phenology, nutrient cycling, microbial activity, decomposition, and species interactions within forest ecosystems.

Changes in Precipitation and Hydrological Regime

Precipitation dynamics differed considerably among regions. Aukštaitija exhibited an increasing long-term precipitation trend, particularly during the most recent monitoring period (2021–2025), when annual precipitation frequently exceeded 700–900 mm. In contrast, precipitation in the Dzūkija and especially Žemaitija regions showed decreasing tendencies during several seasons, particularly during spring and early summer.

The redistribution of precipitation throughout the year appears to be more important than changes in annual totals alone. Increasing summer and autumn precipitation in Aukštaitija improved soil water availability and groundwater recharge, whereas declining precipitation in spring and early summer in Žemaitija and Dzūkija may increase drought stress during critical vegetation periods.

The observed hydrological changes indicate the development of contrasting ecosystem trajectories among Lithuanian forest regions. While increased precipitation and soil moisture

may temporarily improve ecosystem resistance in Aukštaitija, decreasing precipitation and increasing evapotranspiration in Dzūkija and Žemaitija may enhance ecosystem vulnerability to drought stress.

Soil Moisture, Groundwater, and Runoff Processes

The disappearance of prolonged soil frost substantially altered soil moisture and groundwater dynamics. Since 2020, soil moisture reserves at the Aukštaitija KMS reached the highest values recorded during the monitoring period, primarily due to frost-free winters, increased cold-season precipitation, and reduced evapotranspiration during cool springs.

Groundwater dynamics showed delayed responses to precipitation changes, often compensating for drought periods through cyclical groundwater recharge processes. However, recent alterations in infiltration intensity, groundwater circulation, and runoff suggest that climate warming is disrupting the traditional water balance of forest ecosystems.

A particularly important finding was that increasing precipitation did not necessarily result in increased stream runoff. Instead, enhanced evapotranspiration and altered groundwater circulation reduced runoff during some periods, indicating increasing instability in ecosystem hydrological regulation.

Such processes may become one of the most important future threats to forest ecosystems, especially under scenarios of continued warming and increasingly irregular precipitation distribution.

Solar Radiation and Microclimatic Conditions

During most of the monitoring period, total solar radiation and photosynthetically active radiation (PAR) increased substantially, particularly during the growing season. Increased radiation availability likely promoted forest productivity and physiological activity of vegetation.

However, since approximately 2013, trends in radiation intensity began to stabilize or even decline slightly, likely due to increased atmospheric humidity and cloudiness associated with higher precipitation. This may indicate the emergence of compensatory climate feedback mechanisms that could partially mitigate future warming intensity.

Changes in radiation regime may significantly influence photosynthesis, evapotranspiration, species composition, and productivity of forest ecosystems.

Ground-Level Ozone and Atmospheric Stressors

Ground-level ozone concentrations generally exhibited decreasing long-term trends, particularly in Aukštaitija and Dzūkija. Nevertheless, during the most recent monitoring period, ozone concentrations began to increase again in some regions, especially in Žemaitija.

Although current ozone concentrations do not yet appear to cause severe damage to tree crowns, increasing ozone levels combined with more frequent heat waves may become an important future stress factor for forest ecosystems. Ozone formation was strongly associated with elevated air temperature, solar radiation, low humidity, and drought conditions.

Climate warming may therefore indirectly intensify ozone-related stress through increased frequency of hot and dry periods.

Emerging Ecological Threats

The obtained results suggest that the main emerging threats to Lithuanian forest ecosystems include:

- increasing climatic instability and extreme weather variability;
- disappearance of stable winter frost conditions;
- altered hydrological balance and groundwater circulation;
- increasing evapotranspiration intensity;
- seasonal redistribution of precipitation;
- more frequent drought and heat-wave events in some regions;
- potential increases in ground-level ozone concentrations;
- destabilization of soil water and nutrient cycling processes.

These processes may significantly affect forest productivity, tree vitality, regeneration capacity, biodiversity, species composition, and ecosystem resistance to environmental stress.

Ecosystem Adaptation and Future Perspectives

Despite increasing environmental pressures, forest ecosystems also demonstrated substantial adaptive responses. Increased precipitation and soil moisture in some regions improved water availability and may partially compensate for warming-related stress. The contrasting environmental trajectories observed among Aukštaitija, Dzūkija, and Žemaitija create valuable natural conditions for studying ecophysiological adaptation mechanisms of forest biota under rapidly changing climatic conditions.

Overall, the monitoring results demonstrate that Lithuanian forest ecosystems are entering a period of accelerated environmental transformation, in which hydrological regime changes, climate warming, and altered atmospheric conditions will become the dominant drivers shaping future ecosystem structure, functioning, and sustainability.

Prognosis of Future Environmental Changes and Their Potential Impact on Forest Ecosystems

Based on the long-term monitoring results obtained during 1994–2025, it can be projected that climate-driven environmental changes in Lithuanian forest ecosystems will continue to intensify during the coming decades. The observed trends suggest that future ecosystem development will increasingly depend on the interaction among climate warming, hydrological regime instability, atmospheric processes, and ecosystem adaptive capacity.

Generalising the obtained results: The long-term monitoring of forest health in the Aukštaitija, Dzūkija, and Žemaitija Integrated Monitoring Stations (KMS) reveals a coherent but spatially differentiated pattern of forest crown condition dynamics over the 1993–2025 period. Despite regional differences in disturbance regimes and climatic sensitivity, all three stations exhibit a broadly similar multi-phase trajectory characterized by periods of decline, recovery, and renewed instability.

During the early monitoring period (1993–2003), forest condition was generally unstable across all stations, with elevated crown defoliation levels. In Dzūkija, this phase was dominated by severe defoliation in Scots pine stands caused by outbreaks of defoliating insect pests, resulting in the poorest forest condition among all stations. In Aukštaitija, relatively high defoliation levels were also recorded, while Žemaitija showed persistently poor but more gradually varying conditions.

The period from approximately 2004 to 2015 represents a general improvement phase in forest health across all monitoring sites. This period was characterized by a consistent reduction in crown defoliation and improved tree vitality, reaching one of the best overall forest condition levels around 2015. The recovery was most pronounced in Aukštaitija, moderate in Dzūkija (especially following pest control measures), and weakest in Žemaitija, where recovery remained limited and more variable.

A short but distinct optimal condition phase was observed around 2015–2020, when forest health indicators reached their most favorable levels across all stations. This improvement was closely linked to favorable climatic conditions, including sufficient precipitation and reduced drought stress, which enhanced tree growth and reduced physiological stress.

However, from approximately 2015 onwards, increasing instability in forest condition became evident, with renewed fluctuations driven by climatic extremes (droughts, heat waves, and wet anomalies) and episodic biotic disturbances. The most recent period (2020–2025) is characterized by increasing divergence between stations. Dzūkija shows the strongest long-term recovery, particularly in pine stands, where defoliation declined to below 20% in 2025. Aukštaitija remains relatively stable but increasingly variable, with signs of renewed stress after the 2020 peak in forest condition. Žemaitija exhibits the highest instability and the strongest sensitivity to disturbances, particularly due to repeated pest outbreaks in spruce stands and weaker recovery capacity.

Across all stations, inter-annual variability has increased, indicating that forest condition is now more strongly influenced by episodic extreme events rather than gradual long-term trends. While the mid-period (2004–2015) reflects a phase of overall improvement, and 2015–2020 represents a short-term optimum, the most recent decade suggests a transition toward greater ecosystem instability.

In summary, Lithuanian forest ecosystems do not show uniform degradation or recovery, but rather a dynamic pattern of cyclical change with increasing spatial divergence and heightened sensitivity to climate extremes and biotic disturbances.

During the study period, substantial tree mortality was recorded across all monitoring stations, with clear species- and region-specific differences. Nearly 30% of Scots pines died in the Aukštaitija KMS, 25% in the Žemaitija KMS, and 56% in the Dzūkija KMS. A significantly higher mortality rate was observed in Norway spruce. Over the 33-year period,

spruce mortality exceeded 63% in both the Žemaitija and Aukštaitija KMS basins, while in the Dzūkija KMS—where spruce occurrence was limited—mortality reached up to 75%.

The main drivers of high spruce mortality were the decline of mature and overmature stands, windthrow and snow damage, and subsequent outbreaks of the European spruce bark beetle (*Ips typographus*), particularly following dry and warm spring periods. Birch (*Betula spp.*) showed the highest mortality rates among all studied species. In the Žemaitija KMS, birch mortality reached 55% over 32 years, while in the Aukštaitija KMS it exceeded 70%. As birch lacks specialized insect pests responsible for large-scale dieback, its mortality is primarily attributed to climatic stressors—especially droughts and heat waves—as well as windthrow and snow damage.

Overall forest condition was strongly influenced by unfavorable climatic conditions, including droughts during the middle of the growing season, which facilitated extensive spruce damage by *Ips typographus*. Windthrow, windbreak, and snow damage had a particularly strong impact in the Žemaitija KMS, as did hot and dry summers. Earlier deterioration phases (1996–1998) can be partly associated with elevated atmospheric pollutant concentrations, while increased defoliation in 2006–2007 resulted from the combined impact of multiple stressors, including acidifying compounds in air and precipitation, heat waves, drought conditions, and peak ozone concentrations in 2006.

In 2020, mortality events included 13 spruces and 1 pine in the Aukštaitija KMS basin, and 23 spruces and 1 aspen in the Žemaitija KMS basin, with bark beetle damage identified as the primary cause. The most severe outbreaks occurred in 2022 in Aukštaitija and 2023 in Žemaitija, when spruce mortality reached one of the highest levels recorded over the entire study period.

In 2024, increased birch mortality was observed due to waterlogging, particularly in plot No. 38. Further detailed analysis of combined environmental drivers is required to fully explain forest condition dynamics during the 2020–2025 period.

Leaf Area Index (LAI) measurements (2010–2025) indicate generally favorable canopy conditions across the monitoring sites. The highest LAI values were recorded in the Aukštaitija KMS (2.0 m^2/m^2), followed by Žemaitija (1.9 m^2/m^2), while Dzūkija showed the lowest values (1.2 m^2/m^2). However, LAI trends show only minor and statistically insignificant increases (approximately 0.008 m^2/m^2), suggesting that improvements in canopy density are largely driven by natural regeneration rather than fundamental structural change.

Across the 32-year period, forest ecosystem productivity remained broadly stable, although a slight declining trend was detected when accounting for net structural changes (approximately −1.2 m^2/ha). This represents a newly identified process in the Aukštaitija KMS, Ažvinčiai old-growth forest area.

The highest volume increment in mixed stands was recorded for spruce (2.3 m^3/ha per year), followed by Scots pine (2.6 m^3/ha per year), while birch showed much lower increment values (0.25 m^3/ha per year). The total live-tree volume increment in the Aukštaitija KMS basin amounted to approximately 5.15 m^3/ha per year, compared with 5.7 m^3/ha per year in 2020.

Dead wood stocks increased markedly from about 43 t/ha at the beginning of the study to 118 t/ha in recent years, corresponding to an average increase of 3.4 t/ha per year over

approximately 22 years. Total biomass increased from 261 t/ha to 330 t/ha (about 3.1 t/ha per year), indicating continued but increasingly offset growth due to mortality processes.

During this period, Scots pine biomass increased most strongly (105 to 119 t/ha), spruce biomass remained relatively stable (~80 t/ha), and deciduous biomass declined significantly (21 to 13 t/ha). In 2025, live biomass decreased to 223 t/ha, while dead biomass increased to 143 t/ha, reflecting the legacy of recent disturbance events, particularly bark beetle outbreaks in 2022.

In 2025, dead wood decomposition stages showed a predominance of highly decomposed material: Mort 1 – 18%, Mort 2 – 9%, Mort 3 – 14%, Mort 4 – 18%, Mort 5 – 33%, and Mort 6 – 51%, indicating that approximately half of all accumulated dead wood is in an advanced decomposition stage.

Finally, between 1993 and 2025, a total of 145 kg/ha of nitrogen was deposited into soils via precipitation or atmospheric exchange, along with 12.8 kg/ha P, 53 kg/ha K, 115 kg/ha Ca, 19 kg/ha Mg, 6 kg/ha Fe, 26 kg/ha Mn, and 32 kg/ha S, reflecting continuous external nutrient inputs shaping long-term ecosystem biogeochemistry.

Over the 31–33 year monitoring period, the Žemaitija KMS basin experienced a pronounced transformation of forest structure driven by high tree mortality, episodic disturbance events, and partial compensatory growth of surviving trees. Although ecosystem productivity was partially maintained, overall stand density and structural stability declined.

Tree density decreased continuously throughout the study. By 2015, the number of living trees had fallen by 38.5% (from 605 to 372 trees/ha), and by 2020 losses reached nearly 45%. In the most recent period (2021–2025), a further reduction of about 20% was recorded, confirming ongoing stand attrition.

Species responses differed significantly. Norway spruce was most strongly affected by bark beetle outbreaks (*Ips typographus*) and wind/snow damage, with mortality reaching ~39% and repeated outbreak peaks, particularly in 2023. Birch showed the highest long-term mortality (~49%), indicating strong sensitivity to drought, heat waves, and hydrological stress. Scots pine was comparatively the most resilient species, with the lowest mortality (~23%) and more stable population dynamics.

Changes in stand structure show a mixed pattern of decline and compensation. Spruce basal area decreased markedly (23.5 → 13 m^2/ha), reflecting strong structural loss, while pine showed a slight increase and birch remained relatively stable. Overall stand basal area declined from 29.4 to 20.1 m^2/ha (−32%). However, the basal area of surviving trees increased from 18.3 to 27.1 m^2/ha (+32.6%), indicating that growth of remaining individuals partially compensated for tree loss.

Productivity, expressed as volume increment, remained driven primarily by spruce, which contributed about 2.4 m^3/ha/year among surviving trees. Pine contributed 0.8 m^3/ha/year and birch only 0.3 m^3/ha/year, resulting in a total increment of approximately 3.5 m^3/ha/year for surviving stands. Thus, while mortality reduced stand density, growth of remaining trees maintained moderate productivity.

Deadwood dynamics reflect both ongoing disturbance and long-term legacy effects. In 2020, deadwood was distributed across decomposition classes, while by 2025 there was a marked increase in both fresh mortality (Mort 1–2) and highly decomposed material (Mort 6

= 40.6 t/ha), indicating simultaneous new dieback events and accumulation of long-decomposed biomass.

The most recent period (2021–2025) represents a renewed disturbance phase, during which stand volume decreased by approximately 20%, largely due to the 2023 bark beetle outbreak. This confirms that insect outbreaks remain a key driver of episodic forest degradation in the basin.

Overall, the Žemaitija KMS forest system is characterized by high long-term mortality, especially in spruce and birch, partial compensatory growth of surviving trees, increasing deadwood stocks, and strong sensitivity to combined climatic stress (drought, wind damage) and biotic disturbances. Spruce remains the most productive but disturbance-sensitive species, pine the most stable, and birch the least resilient under current environmental conditions.

In the Dzūkija KMS basin, the total aboveground biomass of forest stands showed a clear increasing trend over the study period. Biomass of stems, branches, and needles increased from 121 t/ha to 176 t/ha, representing a gain of 55 t/ha (31.2%), or approximately 1.8 t/ha per year (~1% annually). This indicates a generally positive growth balance in living tree biomass despite ongoing disturbances.

At the same time, deadwood (mort) accumulation also increased, from 5 t/ha to 30 t/ha, corresponding to about 0.8 t/ha per year. However, this level of deadwood remains substantially lower than in both the Aukštaitija and especially the Žemaitija KMS basins, indicating lower overall mortality pressure or faster decomposition and removal processes in Dzūkija forests.

The structure of deadwood by decomposition stage shows a relatively balanced but moderately advanced decay profile: Mort 1 (5.8%), Mort 2 (9.4%), Mort 3 (20.6%), Mort 4 (30.0%), and Mort 5 (34.2%). This distribution indicates that approximately 30% of all dead trees have already fully decomposed and lost structural integrity, reflecting past impacts of drought and pest outbreaks, although these disturbances are currently much less pronounced.

Total forest biomass in Dzūkija exceeds 150 t/ha, which is lower than in Aukštaitija (>200 t/ha) but comparable to or slightly higher than in Žemaitija (<150 t/ha). A lower Leaf Area Index (LAI) compared to other stations indicates a more open canopy structure, typical of Scots pine-dominated stands. This results in higher light penetration through the canopy and limited shading from understory vegetation, which contrasts with the denser spruce-dominated forests of Aukštaitija and Žemaitija.

Comparative analysis of bioelement cycling shows that deadwood formation and associated nutrient return to soil is most intensive in the Žemaitija KMS basin, intermediate in Aukštaitija, and lowest in Dzūkija. This reflects lower mortality rates and lower accumulation of dead biomass in Dzūkija, where Scots pine stands dominate and experience comparatively lower disturbance-driven dieback.

Overall, the Dzūkija KMS basin is characterized by relatively stable biomass accumulation, lower mortality and deadwood formation, more open forest structure, and weaker nutrient cycling through deadwood compared to the other monitoring stations.

In the Aukštaitija KMS basin, long-term monitoring reveals a partly contrasting development of forest condition: crown condition shows a slight overall improvement, while tree mortality has increased in recent years. Mean defoliation decreases slowly (about −0.11%

per year), but mortality rises (≈ +0.04% per year), with a sharp increase after 2020 (up to ~5% per year), indicating more frequent disturbance-driven tree losses.

Species respond differently to these changes. Scots pine is the most stable and resilient species, showing decreasing defoliation (−0.12% per year) and declining mortality. Spruce shows mixed behavior: slightly improving crown condition but increasing mortality, reflecting sensitivity to bark beetle outbreaks and climatic stress. Birch is the most vulnerable, with weak improvements in defoliation but increasing mortality, especially in 2023–2024, linked to droughts, excess moisture, and windthrow.

Statistical results confirm that mortality is a key driver of crown condition dynamics, explaining up to ~33% of variability in deciduous trees and spruce, and ~24% in pine. Climate strongly regulates these processes: warm winters generally improve crown condition, while summer heat waves increase defoliation and pest-related damage, especially in spruce and birch. Precipitation has a dual effect—generally beneficial for conifers but often harmful for birch when excessive, due to waterlogging and windthrow risk.

Overall, forest condition in Aukštaitija is controlled by interacting seasonal climate factors and species-specific sensitivity. Pine shows the highest resilience, spruce is highly climate- and pest-sensitive, and birch is the most vulnerable species under current climate variability.

Deadwood dynamics show a two-phase decomposition process. After an initial lag of about 10 years, decay accelerates: early-stage decomposition is slow (especially for pine), while later stages show much faster breakdown. Birch decomposes fastest, spruce intermediate, and pine slowest. Older and larger deadwood persists longer, indicating that structural properties strongly regulate decomposition rates.

In summary, the Aukštaitija KMS forest ecosystem is characterized by climate-driven dynamics, where moderate long-term improvement in crown condition coexists with increasing recent mortality, and where species-specific vulnerability and delayed but accelerating deadwood decay shape overall forest stability and structure.

In the Žemaitija KMS basin, forest crown condition and tree mortality are closely linked, showing a stronger coupling between these processes than in Aukštaitija. Mean defoliation decreases slightly over time (about −0.07% per year), but mortality increases much faster (+0.09% per year), nearly twice the rate observed in Aukštaitija. Since 2018, mortality intensity has risen sharply to 6–7% per year, indicating an escalation of disturbance-driven forest losses.

Species-specific responses differ clearly. Deciduous trees show weak changes in defoliation (−0.06% per year) but relatively low mortality increase. Spruce exhibits the most unstable dynamics: declining defoliation (−0.07% per year) but strongly increasing mortality (+0.12% per year), reflecting high sensitivity to pests and climatic stress. Pine is relatively stable, with slightly increasing defoliation but declining mortality, indicating comparatively higher resilience in this region.

Statistical analysis shows that mortality strongly explains crown condition variability in Žemaitija: up to 65% for deciduous trees, 63% for spruce, and 35% for pine. This confirms that mortality processes are a dominant driver of forest condition change, especially for broadleaved species and spruce.

Climate relationships are broadly similar to those in Aukštaitija but with weaker statistical strength overall. Precipitation plays a key role: higher rainfall in autumn and spring improves spruce condition (explaining up to ~55% of defoliation variability) and reduces mortality (about 45% explained). Pine is less sensitive, with precipitation mainly influencing survival rather than crown condition. For birch and other deciduous species, precipitation has mixed effects—beneficial in spring and autumn but negative during mid-growing season, when excessive moisture increases windthrow and root instability.

Temperature effects are generally weaker than precipitation but still important. Warm winters and autumns improve spruce condition but may increase pest survival and subsequent damage. Pine shows higher thermal stability, with no clear negative effect from heat waves. In contrast, deciduous trees—especially birch—are highly sensitive to combined heat and moisture stress, which increases mortality risk and supports windthrow and physiological decline. Overall, climate variables explain about 61% of spruce defoliation and 63% of spruce mortality, ~56% and 54% for pine, and more than 70% and 66% for birch, making birch the most climate-sensitive species.

Deadwood dynamics follow a two-phase decomposition pattern similar to Aukštaitija. After an initial ~10-year lag, decomposition accelerates. Early-stage decay is slow (0.06–0.02 classes/year depending on species), while later-stage decay becomes faster and more uniform (~0.13–0.14 classes/year). Birch decomposes fastest, pine slowest, and spruce intermediate. As in Aukštaitija, older and structurally larger deadwood decomposes more slowly, indicating strong control of physical structure and age on decomposition rates.

Overall, the Žemaitija KMS forest system is characterized by a stronger coupling between mortality and crown condition than Aukštaitija, higher recent mortality rates, and pronounced spruce instability. Climate—especially precipitation variability combined with temperature extremes—is the main driver of forest dynamics, with birch showing the highest vulnerability, spruce high disturbance sensitivity, and pine the greatest overall stability.

In the Dzūkija KMS basin, long-term analysis shows a contrasting pattern compared to Aukštaitija and Žemaitija. Overall mean crown defoliation decreases strongly (−2.9% per year), while tree mortality also declines slightly (−0.4% per year). This pattern is largely explained by the dominance of Scots pine, a species well adapted to dry and nutrient-poor conditions, where tree death occurs mainly as sporadic events driven by extreme weather such as storms and windthrow rather than continuous decline processes.

Deadwood decomposition also follows a delayed initiation pattern, with decay starting only after approximately 10 years, similar to the other monitoring stations. However, decomposition rates in Dzūkija are distinctly lower overall. Birch decomposes at about 0.17 decay classes per year, while pine decomposes much more slowly at around 0.1 classes per year—both significantly slower than in Aukštaitija and Žemaitija.

The reduced decomposition rate is primarily attributed to the very dry site conditions, lack of understorey vegetation, and high solar radiation at the soil surface. These factors limit moisture availability and biological activity, thereby slowing down deadwood breakdown processes.

Overall, Dzūkija KMS represents a more stable but drought-driven forest system, where pine-dominated stands show relatively low mortality dynamics and slower ecosystem turnover compared to the more disturbance- and pest-driven dynamics observed in northern and western Lithuania.

Long-term monitoring across the three Lithuanian KMS basins reveals a clear spatial gradient in forest dynamics, driven by differences in climate conditions, disturbance regimes, and dominant tree species composition.

In Aukštaitija KMS, forest dynamics are characterized by a moderately stable long-term trajectory of crown condition, combined with a recent increase in mortality intensity after 2020. Although mean defoliation shows a slight long-term decrease, mortality has increased, indicating a growing influence of episodic disturbance events. Spruce and birch are the most sensitive species, primarily affected by droughts, heat waves, and bark beetle outbreaks, while Scots pine shows the highest resilience. Overall, forest dynamics reflect a transitional system where gradual recovery is increasingly interrupted by short-term disturbance pulses.

In Žemaitija KMS, forest condition is more strongly disturbance-driven and less stable. Mortality rates are higher and increase more rapidly than in Aukštaitija, and a strong coupling between crown defoliation and tree mortality is evident. Spruce is highly sensitive to combined climatic stress and bark beetle outbreaks, while birch shows consistently high vulnerability to both hydrological instability and wind-related damage. Scots pine remains the most stable species, but overall forest structure reflects a system under persistent environmental stress, with frequent disturbance events shaping stand dynamics.

In contrast, Dzūkija KMS represents a structurally more stable but drought-adapted forest system dominated by Scots pine. Here, mortality trends are relatively low and even slightly decreasing, while crown condition shows a strong long-term decline that is not directly coupled with mortality dynamics. Tree loss is primarily episodic and associated with extreme weather events such as storms and windthrow rather than chronic biotic or climatic stress. This indicates a system where structural stability is maintained despite reduced canopy condition and slower ecological turnover.

Comparative analysis highlights a distinct ecological gradient among the stations. Mortality intensity is highest in Žemaitija, intermediate and recently increasing in Aukštaitija, and lowest in Dzūkija. The dominant drivers differ accordingly: combined pest–climate interactions in Aukštaitija, strong multi-factor disturbance regimes in Žemaitija, and wind/storm-driven episodic mortality in Dzūkija.

Species-specific responses are consistent across regions, with birch exhibiting the highest climate sensitivity and mortality risk, particularly in Aukštaitija and Žemaitija; Norway spruce showing high vulnerability to biotic and climatic stress in northern and western regions; and Scots pine demonstrating the highest overall resilience, especially in the drought-prone Dzūkija system.

Overall, the results indicate that Lithuanian forest ecosystems are increasingly governed by climate variability and extreme events, but the expression of these drivers is strongly modulated by site conditions and species composition. Aukštaitija represents a transitional system with increasing disturbance pressure, Žemaitija a highly disturbance-

sensitive system, and Dzūkija a drought-adapted but structurally simplified pine-dominated system with comparatively stable mortality dynamics.

Changes in other biota components (air algae as bioindicators)

At the beginning of the monitoring period (1993–1994), the highest abundance of aerial green algae (epiphytic air algae) was recorded in the Aukštaitija KMS basin, while slightly lower levels were observed in the Žemaitija KMS basin. These early differences likely reflected spatial variation in atmospheric nutrient deposition, particularly nitrogen compounds.

During the 2010–2015 period, nitrogen pollution levels in both the Aukštaitija and Žemaitija basins appear to have remained relatively stable or slightly decreased, suggesting a general stabilization of atmospheric nitrogen inputs across the region.

In 2016–2017, no substantial changes were observed in the degree of green algae coverage on Norway spruce needles in the Aukštaitija KMS. However, a clear ecological pattern was identified: algae colonization progressively shifted to older needle age classes, while the condition of monitored spruce trees remained very good. This indicates that although epiphytic algal presence persists, it does not necessarily correspond to declining tree health under current conditions.

In the Žemaitija KMS basin, atmospheric nitrogen pollution also remained relatively stable during this period. A key bioindicator of these conditions is the age of the youngest shoots affected by algal colonization, which reflects the threshold at which nutrient enrichment becomes sufficient to support visible algal growth on needles.

In 2025, spruce needle age in the Aukštaitija KMS reached up to 8 years, a level observed only at the beginning of the monitoring period, indicating very favorable long-term foliage retention. At the same time, mean crown defoliation remained very low (around 5%), and other crown vitality indicators also confirmed a very good overall condition of the spruce stands.

Under these conditions, the abundance of aerial green algae reached near-minimum levels in 2025. The age of the youngest shoots colonized by algae exceeded 3 years, which represents the highest value recorded over the entire study period. This suggests that algal colonization is now limited to much older needles and occurs at a significantly reduced intensity.

These biological indicators are consistent with a decline in atmospheric nitrogen pollution in the Aukštaitija air basin. Chemical analyses confirm reduced concentrations of ammonium and nitrate ions in the air, with total nitrogen levels decreasing by approximately 10% over the last five years. Thus, the observed reduction in green algae abundance provides independent biological evidence supporting the measured decline in atmospheric nitrogen deposition.

In the Žemaitija KMS basin, spruce condition remained generally good, although slightly less favorable than in Aukštaitija, while green aerial algae abundance was higher than

in Aukštaitija but lower than during the peak period of 2018–2020. This indicates a moderate level of atmospheric nitrogen enrichment, with signs of gradual improvement in recent years.

Air chemical analyses show that during 2021–2025, concentrations of ammonium and nitrate ions were lower than in 2015–2020, and total nitrogen levels decreased, in some cases by up to ~10%. However, an exception was observed in 2025, when ammonium concentrations increased markedly in the Žemaitija basin, reaching about 1 μg/m³ and exceeding the average of the previous five-year period.

These results suggest spatial differences in atmospheric nitrogen inputs across Lithuania. In the western region, higher nitrogen levels compared to the northeastern region indicate a likely influence of long-range atmospheric transport as a dominant source of deposition.

In the Dzūkija KMS basin, spruce condition was the poorest among all stations. Green algae abundance was the highest, and colonization of needles began at the youngest shoot age, indicating stronger nutrient enrichment effects. However, due to a lack of comparable atmospheric chemistry measurements, these bioindicator-based conclusions cannot be fully validated by direct chemical data in this station.

Across all stations, aerial green algae and spruce needle colonization patterns reflect differences in atmospheric nitrogen deposition. Aukštaitija shows the lowest nitrogen load and best spruce condition, Žemaitija represents an intermediate state with regional variability and episodic increases, while Dzūkija shows the strongest biological signal of nitrogen influence but lacks corresponding chemical verification. Overall, the results indicate a general decline in nitrogen pollution in recent years, with spatial heterogeneity likely driven by long-range transport and regional atmospheric dynamics.

In the Aukštaitija KMS basin, a clear decline in lichen species diversity was observed over the last decade, decreasing from 10.6 species in 2015 to 8.3 species in 2025. This indicates a reduction in epiphytic biodiversity, although the underlying drivers require further detailed analysis at species and plot level, as well as assessment of individual environmental stress factors.

In contrast, the Dzūkija KMS basin shows a highly variable (fluctuating) stage of lichen community development. This reflects the ongoing formation of natural forest structure in this region, where species composition is still not stabilized and future shifts in diversity are expected as succession progresses.

Despite this variability, Dzūkija KMS currently exhibits the highest overall lichen species richness among the studied sites, with up to 9 recorded species, indicating comparatively high baseline biodiversity but unstable community structure.

The results suggest a regional divergence in epiphytic lichen dynamics: Aukštaitija shows a gradual decline in species diversity, likely reflecting long-term environmental pressure, while Dzūkija represents an early-successional, structurally dynamic system with high but unstable diversity.

Overview of soil oribatid mite communities across KM stations

The analysis of soil oribatid mite communities across the three KM stations reveals a consistent and clear gradient in biodiversity, community structure, and ecological stability.

Aukštaitija is characterized by the lowest biodiversity and the most uneven community structure. The Shannon–Wiener index (H' = 0.96) indicates a species-poor assemblage, while moderate Simpson dominance (D = 0.18) together with very low evenness (J' = 0.28) shows that a small number of species strongly dominate the community. This reflects a simplified and structurally constrained soil microarthropod system.

Dzūkija represents an intermediate condition. The Shannon index (H' = 1.81) indicates moderate diversity, but higher dominance (D = 0.25) and moderate evenness (J' = 0.58) show that the community remains structurally uneven, with several prevailing taxa shaping overall composition. This suggests a transitional system with partial community stabilization but still clear hierarchical structuring.

Žemaitija exhibits the most diverse and balanced community. The highest Shannon index (H' = 2.45), low dominance (D = 0.15), and high evenness (J' = 0.71) indicate a well-structured and ecologically stable assemblage, where species are relatively evenly distributed and no single taxon dominates.

Recent abundance data (2025) refine this pattern by showing a decrease in total abundance in Aukštaitija (131.2 thousand ind./m²) and Žemaitija (197.6 thousand ind./m²), while Dzūkija shows an increase relative to its long-term mean (163.2 thousand ind./m²). This indicates a recent decline in northern and western stations, contrasted by stabilization or recovery tendencies in the southern system.

Overall, the results consistently demonstrate a spatial gradient from low diversity and high dominance in Aukštaitija, through intermediate transitional conditions in Dzūkija, to the most diverse and ecologically balanced communities in Žemaitija.

Overview of macroinvertebrate communities and ecological status of streams across KM stations

The analysis of benthic macroinvertebrate communities in the three KM station streams (Aukštaitija, Žemaitija, and Dzūkija KMS basins) reveals clear differences in taxonomic richness, community structure, and ecological stability, while also indicating generally good to very good ecological conditions across all sites.

In the Aukštaitija KMS Versminis stream, 16 macroinvertebrate taxa were recorded. Community structure showed seasonal differences, with higher taxonomic richness in spring (13 taxa) than in autumn (10 taxa). Spring communities were dominated by stoneflies (Nemoura sp.), water mites (Hydrachnidia), freshwater isopods (Asellus aquaticus), and chironomid larvae. In autumn, A. aquaticus and Nemurella pictetii dominated strongly. Biomass in both seasons was primarily driven by A. aquaticus. Diversity indices (Shannon–Wiener and Simpson) were higher in spring than in autumn. The ecological status was

assessed as good in 2020 but declined to moderate in 2025, although the stream still generally corresponds to a good ecological quality class.

In the Žemaitija KMS Juodupis stream, 26 taxa were identified, with higher richness in autumn (20 taxa) than in spring (11 taxa). The community was strongly dominated by Gammarus pulex in both seasons. Other important groups included stoneflies, caddisflies, and dipterans, with notable seasonal shifts in composition. Compared to 2020, total taxon richness increased slightly, but annual mean abundance, biomass, and diversity indices were marginally lower in 2025. The ecological status remained stable, assessed as good under DIUF and moderate under LUMI, indicating a relatively consistent but slightly variable ecological condition.

In the Dzūkija KMS Duburys stream, the highest overall biodiversity was observed, with 45 taxa recorded across two sampling sites (29 in the upper reach and 41 below the dam). The upstream section was dominated by Baetis mayflies, while stoneflies prevailed in autumn. Caddisflies contributed strongly to biomass in spring, and tipulid dipterans dominated in autumn. The downstream section showed even higher richness and was classified as having very good ecological status based on multiple biotic indices. Sensitive taxa such as mayflies, stoneflies, and caddisflies were consistently abundant, indicating high habitat quality and stable lithophilous conditions. Long-term data confirm strong community stability over 30 years, with persistent dominance of Baetis, stoneflies, caddisflies, and dipterans across seasons.

Comparative assessment shows a clear gradient in ecological quality and biodiversity. Dzūkija KMS exhibits the highest species richness and the most stable, high-quality aquatic ecosystems. Žemaitija KMS represents an intermediate condition with moderate richness, strong dominance effects, and relatively stable but slightly declining indices. Aukštaitija KMS shows the lowest taxonomic richness and a recent decline in ecological quality indicators, although it still maintains generally good ecological status.

Overall, the results indicate that stream ecosystems in Dzūkija are the most diverse and stable, Žemaitija represents a moderately stable but more simplified system, and Aukštaitija shows signs of gradual ecological degradation and reduced diversity, particularly in recent years.

Overview of changes in ground vegetation (2021–2025)

Ground vegetation dynamics across the three IM stations reflect ongoing forest succession, canopy changes, and disturbance-driven restructuring, with clear site-specific patterns.

In Aukštaitija_100, canopy opening due to tree mortality led to a strong increase in herb and shrub layer cover and the highest recorded species richness in the herb layer. Pioneer and light-demanding species (e.g., *Vaccinium myrtillus*, grasses, and other disturbance-associated plants) increased markedly, while species typical of stable, shaded conditions declined. After a temporary decrease in moss cover following increased litter input (2022–2024), recovery was observed in 2025, including rising epixylic moss and lichen diversity. This indicates active post-disturbance restructuring and habitat diversification.

In contrast, Aukštaitija_102 shows the opposite trend: dense spruce regeneration has reduced light availability and suppressed the herb layer to its lowest level in the monitoring history. Shrub cover has become dominant, while many herbaceous species declined. Moss layer conditions are also poorer, although epixylic moss diversity is increasing due to accumulating deadwood. Periodic flooding in 2024–2025 further negatively affected understory vegetation. Overall, this site is shifting toward a closed, low-light spruce-dominated system with reduced herb layer diversity.

In Žemaitija KMS, vegetation changes are less pronounced. Despite nearby spruce decline, canopy structure above plots remains relatively stable, and shrub and moss layers remain near maximum cover. Herb and moss layers show seasonal variability but no strong long-term decline. The system maintains generally stable and productive understory communities, with some species benefiting and others declining, reflecting moderate ecological stability.

In Dzūkija KMS, resumed after a long monitoring gap, vegetation shows gradual successional change from lichen-rich pine forest toward more bilberry- and grass-dominated communities. Increased moss and herb cover and decline of epigeic lichens indicate ongoing enrichment and stabilization of ground vegetation under relatively stable canopy conditions.

Across all stations, ground vegetation dynamics are primarily driven by canopy structure and disturbance intensity.

- Aukštaitija_100 is disturbance-driven and highly dynamic, with strong regeneration and restructuring.
- Aukštaitija_102 is undergoing canopy closure with declining herb diversity.
- Žemaitija remains comparatively stable with moderate fluctuations.
- Dzūkija shows gradual successional development toward more mesic forest conditions.

Overall, understory changes strongly reflect forest succession processes, where canopy opening increases diversity and variability, while canopy closure reduces herb layer diversity but enhances shrub dominance and structural shading effects.

Chemical deposition and canopy fluxes (2011–2025)

Long-term monitoring shows a major transformation in atmospheric deposition and canopy exchange processes across KMS forest ecosystems.

Since 2011–2025, the system has shifted from net canopy leaching of sulfur, nitrate, and ammonium (higher concentrations in throughfall than in open-field precipitation) to a net uptake-dominated regime, indicating reduced atmospheric pollution and stronger biological retention within the canopy. A key structural change is the cessation of sulfur leaching from foliage, marking a new stable stage in sulfur cycling.

Precipitation acidity shows a non-linear trend in Aukštaitija KMS: an initial shift toward neutral conditions (pH increase during 2011–2025) was followed by a recent acidification episode (drop to ~5.5), interpreted as a short-term external atmospheric disturbance. In contrast, Žemaitija shows more stable but consistently more acidic conditions, driven by stronger long-range pollutant transport from Central and Western Europe, with weaker influence from recent external events.

Nitrate dynamics indicate a transition from emission/leaching dominance to canopy uptake dominance in both stations, reflecting a general decline in atmospheric NO_3^- pollution.

Ammonium shows a similar pattern, with uptake now exceeding leaching and resulting in reduced soil inputs.

Chlorine and sodium fluxes are substantially higher in Žemaitija (10–20× compared to Aukštaitija), but follow similar declining post-2010 trends, contributing to reduced canopy wash-off effects and influencing overall precipitation chemistry.

Finally, base cations (K, Ca, Mg) show intensive foliar leaching, suggesting active internal nutrient cycling and enrichment of soil nutrient pools through litter input.

The forest–atmosphere system has transitioned toward lower sulfur and nitrogen pollution, stronger canopy uptake, and altered precipitation chemistry, with regional differences driven mainly by long-range atmospheric transport and episodic external disturbances.

As a consequence of the war in Ukraine: increased S flux with precipitation and increased precipitation acidity.

Norway spruce trees demonstrated the most significant increase in annual BAI, followed by Scots pine trees, whereas silver birch and downy birch trees demonstrated, respectively, stable and decreasing rates in the BAI over investigated period.

Significant increases in air temperature in September and July increased the BAI of the considered coniferous tree species. Only heat and drought in June limited spruce growth intensity at Aukštaitija IMS. A higher moisture regime increased the sensitivity of Scots pine and Norway spruce trees to the drought effect over the vegetative stage.

Neither silver nor downy birch trees in premature and mature age stands were characterised as tree species that are tolerant to drought and heat stress. More abundant precipitation during the vegetative stage and at the beginning of autumn resulted in intensive birch tree growth, whereas a reduction in the growth rate of silver birch trees was mainly attributed to the effect of heat in July, August and September. A reduction in birch tree leaf span could be presented as the key factor in reduced tree productivity in general.

A higher moisture regime significantly increased the tolerance of considered tree species to the negative effects of air concentrations of acidifying compounds and their wet deposition, mainly of sulphur compounds.

Nitrate deposition during the vegetative stage as fertilisation compounds stimulated the tree stem BAI formation of prevailing Lithuanian tree species, especially on nutrition limited mineral soil forest site, where the C/N ratios exceeded 25 or more. On forest site where the C/N ratio did not reach 15, a positive effect from N deposition was not detected.

A negative ozone effect on tree-growth intensity was significant for spruce trees. The effect of ozone on downy and silver birch tree BAI was close to the level of significance. Norway spruce was most likely a more sensitive tree species to ozone-induced injuries compared to Scots pine and birch trees under different site conditions.

The obtained results revealed that the adaptive capacity of Norway spruce trees to recent pressures of environmental changes is well developed due to their intensive regeneration after unfovourable period. Their highest rate of growth occurring under warm and humid growth conditions should ensure their further sustainability in northeastern European forests.

XI. TYRIMŲ SANTRAUKA

Aplinkos kaita ir jos pasėkmės 1994-2025 m.

Daugiametė metinė vidutinės temperatūros kaitos analizė parodė, kad per tiriamąjį laikotarpį reikšmingiausiai didėjo metinė oro temperatūra Aukštaitijos ir Dzūkijos regiono MS. Čia registruojamas reikšmingas virš 0,62 °C augimas per dešimtmetį. Tokio augimo rezultatas būtų 6 °C per šimtmetį, kas viršytų bet kokias pastarojo laikotarpio prognozes. Toks reikšmingas temperatūros kilimas sudarė unikalias sąlygas tirti visus ekosistemoje vykstančio bio- geo- cenotinius procesus, aiškinant galimas grėsmes ekosistemai.

Kiek mažesniu temperatūros augimu pasižymėjo Vakarinis Lietuvos regionas, kur Telšių MS buvo registruojamas apie 0,6 °C augimas per dešimtmetį. Šio augimo reikšmingumo lygmuo buvo taip pat nors ir ne ženkliai, tačiau mažesnis nei Dzūkijoje ir Aukštaitijoje.

Toks intensyvus temperatūros kilimas leidžia teigti kad tik per tiriamąjį 32 m. laikotarpį oro temperatūra pakilo vidutiniškai apie jau 2,0° C. ***Tokius meteorologinius pokyčius Lietuvoje būtų galima vertinti kaip intensyviausios klimato kaitos scenarijų, o miško ekosistemų atskirų biotos komponentų reakcijas, kaip jų prisitaikymo prie tokių naujų sąlygų galimybes ir išgyvenimo perspektyvas ateityje.***

Vertinant aplinkos šiltėjimo intensyvumą konkrečiose kompleksiško monitoringo stotyse (miškų apaugusiame plote) nustatyta, kad Aukštaitijos KM stotyje temperatūros kilimas buvo kiek tai žemesnis negu Dūkšto MS ir siekė apie 0,35 ° C per dešimtmetį. Tai galimai miško medžių poveikis temperatūrų kaitai.

2025 m. duomenimis vidutinė temperatūra toliau mažėjo tik sausio, balandžio ir gegužės mėnesių neartėdama prie reikšmingumo lygmens. Liepos mėnesio temperatūra po paskutiniojo 5 metų laikotarpio pradėjo didėti. Kaip ir toliau kyla vasario – kovo, birželio, rugpjūčio mėnesių oro temperatūros. Tačiau ir šis pokytis yra dar nereikšmingas. Intensyviausiai ir reikšmingai pastaruoju laikotarpiu šyla rugsėjis, lapkritis ir gruodis. Šilimo intensyvumas kiek tai sumažėjo lyginant su praėjusių 5 metų laikotarpiu, bet vis dar viršija 0,06 ℃ per metus.

Apibendrinus metinius temperatūrų parametrus, nustatyta, kad šalčiausi per tiriamąjį laikotarpį buvo 1996, 2003, 2006, 2010, 2017 ir 2022 metai, kada oro vidutinė temperatūra žiemą nukrisdavo žemiau -5°C. Tokiam temperatūros sumažėjimui didžiausios įtakos turėjo žemiausios gruodžio – vasario mėn. temperatūros, kurios buvo žemesnės nei -7°C.

Šilčiausi 2001-2002, 2007, 2014, 2024 ir ypač 2020 m., kai vidutinė oro temperatūra viršijo net 8 °C, kurią reikšmingiausiai sąlygojo rudens ir vasaros mėnesių temperatūros.

Minimalios ir maksimalios mėnesio temperatūros kaitos analizė parodė, kad Aukštaitijos KMS intensyviausiai kyla minimali mėnesio temperatūra, du kartus lėčiau vidutinė mėnesio temperatūra ir stabili išlieka maksimali mėnesio temperatūra. Tai esminiai veiksniai sąlygojantys sėkminga biotos peržiemojimo tikimybę pastaruoju laikotarpiu, kai ypač šylą ramybės laikotarpis.

Žemaitijos NP atskirais metų sezonais pagal oro temperatūros daugiametę kaitą Telšių meteorologinėje stotyje (1994-2025 m.) vidutinė temperatūra rudens ir žiemos laikotarpiu didėjo intensyviausiai, po +0,06°C per 10 m. laikotarpį, kiek mažiau šilo pavasaris ir vasara, po maždaug +0,47 ir +0,41 °C per 10 m. laikotarpį atitinkamai. Lyginant su 2020 m. duomenimis, šiltėjimo intensyvumas reikšmingai slobo ir tik vasaros sezone išliko nepakitęs. ***2020 ir 2024 m. šioje stotyje išskirtiniai. Vidutinė metinė oro temperatūra šioje stotyje pasiekė maksimalią reikšmę per visą tiriamąjį laikotarpį, t.y. 8,6 °C.***

Dzūkijos regione oro temperatūra šilo analogiškai Vakariniam regionui. Intensyviausiai šilo rudens ir žiemos mėnesiai, kai oro temperatūra kilo po 0,82 ir 0,76 °C per dešimtmetį. Kiek silpniau šilo vasaros sezonas – po 0,57 °C per dešimtmetį ir silpniausiai šilo pavasaris – po 0,033 °C per dešimtmetį. Išskirtiniai metai, kaip ir Žemaitijos regione: 2002, 2007, 2014, 2020 ir 2024 m., kai oro temperatūra nuo 8 pakilo iki 9,2 °C. Paskutiniuoju 2020-2025 m. laikotarpiu oro vidutinė temperatūra praktiškai išliko stabili Aukštaitijos ir Žemaitijos regione, Dzūkijos MS duomenimis šiuo laikotarpiu oro temperatūra turėjo nereikšminga tendencija didėti.

Žemaitijos ir Dzūkijos stotyse reikšmingai didėja kovo, birželio rugsėjo ir lapkričio-gruodžio mėnesių vidutinė temperatūra. Abiejose stotyse šis didėjimo trendas siekė ir viršijo 0,08 ℃ per metus. Išskirtinis vidutinės mėnesio temperatūros kitimo bruožas Žemaitijos ir Dzūkijos stotyse – visais mėnesiais vidutinė temperatūra per visą tiriamąjį laikotarpį turi tendencija didėti.

Būtent apie 2010 m. aplinkoje įvyko reikšminga aplinkos temperatūrų kaita. Jeigu iki pastarojo laikotarpio tirtiems regionams buvo būdinga nereikšminga temperatūrų žemėjimo kaita sausio – vasario mėnesiais, tai jau po 2010 metų šių mėnesių vidutinė temperatūra didėja siekdama 0,3℃ per metus, o Dzūkijos KM stotyje siekia net ir reikšminga didžiausią lygį sausio mėnesį – po 0,33 ℃ per metus. Tai ypač intensyvus šio mėnesio šilimas.

Vegetacijos pradžioje arti reikšmingo lygmens pradeda šalti gegužės mėnesis, kuris gali neigiamai sąlygoti visus gyvybinius procesus miško ekosistemų biotos ir ypač augalų ir

medžių būklę ir prieaugį. Reikšmingiausias pokytis registruotas Žemaitijos stotyje, kur iki 2010 m. gegužės mėnesio vidutinė temperatūra didėjo po beveik 0,1 ℃ per metus, o jau po 2011 metų tokiu pat intensyvumu bet jau mažėja. ***Gegužės mėn. temperatūros ir kritulių santykis išreikštas santykine drėgme tapo pagrindiniu veiksnių sąlygojančiu intensyviausius žievėgraužio tipografo pažeidimus eglynuose.***

Viduryje vegetacijos sezono ryškėja intensyvėjantis birželio mėnesio šilimas, kai tuo tarpu likusiais mėnesiais – liepą ir rugpjūtį, vidutinės temperatūros augimas sulėtėjo ir stabilizavosi arti neutralaus lygio, t.y. apie 0℃ per metus.

Reikšmingai pakito ir rudens mėnesių vidutinės temperatūros kaita. Jeigu iki 2010 m. šių mėnesių vidutinė temperatūra reikšmingai didėjo, tai po 2010 m toks šilimas baigėsi, o lapkričio mėnesio temperatūra net pradėjo žemėti.

Tokia atskirų mėnesių vidutinės temperatūros kaita turėjo turėti reikšmingos įtakos visiems bio- geo- cenotiniams ryšiams ir kaitai, sąlygodami bendrą miško ekosistemų vystymosi kaitą.

Skirtingai nei tikėtasi lėčiausiai šyla paviršinio sluoksnio dirvožemis, t.y. 5 cm gylyje. Gyliui didėjant šilimo procesas pasireiškia intensyviau.

Skirtingai negu dirvožemyje, ***skirtingame atmosferos aukštyje oro temperatūros augimo intensyvumas išlieka tas pats, po maždaug 0,0005°C per mėnesį, ar 0,06 °C per metus,*** ką parodė ir vidutinių metinių temperatūrų kaitos intensyvumo rezultatai.

Vidutinei oro temperatūrai kintant nuo -10 iki +20 °C, minimali temperatūra kinta nuo -30 iki +10°C, o maksimali nuo 0 iki 40 °C. Tai reikšmingi pokyčiai galintys turėti reikšmingos įtakos visiems bio- geo sisteminiams procesams vykstantiems sąlygiškai natūraliose miško ekosistemose.

Vidutinės ***oro temperatūros 2 m aukštyje sąsajos su temperatūra 8 ir 22 m aukštyje reikšmingai nesiskiria, tik lygties B koeficientas 8 m aukštyje nesiekia 1, o 22 m aukštyje kiek tai viršija 1 reikšmę.***

Analizuojant oro ir dirvožemio temperatūros sąveikas nustatyta, kad ši tarpusavio priklausomybė turi sezoninį pobūdį. ***Prie tos paties vidutinės oro temperatūros dirvožemio temperatūra pirmoje metų pusėje reikšmingai mažesnė negu antroje metų pusėje. Šis skirtumas didžiausias ties 10 °C riba ir siekia apie 3 °C, t.y. pavasarį neviršija 8 °C, o rudenį siekia 11 °C.***

Dirvožemio temperatūra reguliariai stebima tik Aukštaitijos KMS, kur per 27 metų laikotarpį dirvožemio temperatūros (5, 10 ir 20 cm gyliuose) vidutinė reikšmė didėjo nuo 6,1 2001 m. iki 8,7 °C 2024 m. Didžiausios metų vidutinės temperatūros reikšmės buvo 2000, 2007-2011, 2020 ir 2024 m. Neigiamos vidutinės mėnesio temperatūros buvo nustatytos 2006 (II-III), 2010 (II), 2012 (II), 2014 (I-II), 2016 (I), 2017 (II) ir 2018 (II-III), kurie tapo paskutiniaisiais metais, kad vidutinė mėnesio temperatūra vasario mėnesį buvo neigiama. Šis rodiklis tik pasikartojo 2026 m., bet tai jau kitų metų tyrimo rezultatas.

Mažiausias dirvožemio temperatūros vidurkis per žiemos mėnesius buvo 2012 metų vasarį (-1,4°C), o ilgiausiai neigiama temperatūra laikėsi nuo 2002 metų gruodžio iki 2003 metų kovo. Pagal dirvožemio temperatūrą 2012 metai buvo kontrastiškiausi pagal temperatūros svyravimo amplitudę, maksimalias ir minimalias valandines temperatūras per stebėjimų laikotarpį.

2019-2025 m. laikotarpiu dirvožemio vidutinės temperatūros kaitoje jokių ženklesnių tendencijų nenustatyta. Vidutinė temperatūra žiemą nebuvo nukritusi žemiau 0°C I-III mėnesiais. Paskutiniaisiais 2025 metais nustatytas ir vienas mažiausių skirtumų tarp ramybės ir vegetacijos laikotarpių vidutinės mėnesio temperatūros. Panašus rezultatas registruotas ir 2020 metais, bei 2008-2009 m.

Vidutinės metinės temperatūros skirtinguose dirvožemio gyliuose vertės parodė, kad per tiriamąjį 27 metų laikotarpį, vidutinė temperatūra sekliausiame gylyje didėjo po 0,053 °C per metus, 10 cm gylyje po 0,057 °C ir 20 cm gylyje, kur bendra temperatūra buvo didžiausia, po 0,05°C per m.

Tuo tarpu antruoju tiriamuoju laikotarpiu, t.y. 2011-2025 ir toliau buvo registruojamas ženklus temperatūros augimo tempas, kuris iš esmės nesiskyrė nuo pradinio 1999-2010 m. laikotarpio. Didžiausios dirvožemio temperatūros registruotos 2011 ir 2020 bei 2024 m. Tai išskirtiniai metai, kurie turėjo turėti reikšmingos įtakos procesams, kurie priklauso nuo oro ir dirvožemio temperatūros kaitos.

Didelę įtaką medžiagų išplovimui iš dirvožemio turi įšalo gylis ir dirvožemio drėgmės atsargų kaita. Aukštaitijos KMS įšalo gylis viršijantis 20 cm gyli buvo reguliariai registruojamas iki 2013 metų. Nuo 2014 metų nebesusidaro gilesnis nei 20 cm įšalas, o 2019 metais dirvožemio įšalo visai nebuvo užfiksuota paskutiniuoju laikotarpi įšalo gylis svyravo apie 5 cm.

Nuo 1998 m. periodiškai, kas 3–4 metus, Aukštaitijos KMS kartojosi šaltos žiemos, kai dirvožemis įšaldavo giliau, negu 30 cm ir įšalas laikėsi 4 ir daugiau mėnesių. Per stebėjimų laikotarpį buvo šešios tokio gilaus ir ilgai trunkančio įšalo žiemos: 1998–1999, 2002–2003,

2005-2006, 2009–2010, 2011-2012 ir 2013-2014 m. Nors didžiausias įšalo gylis 1998-2014 m. turėjo tendenciją augti, bet įšalo trukmė mažėjo. Nuo 2014 m. stebimas itin reikšmingas dirvožemio įšalo mažėjimas. Jei dar 2014 m. įšalas siekdamas maksimalią reikšmę -28 cm, tai iki 2025 m. įšalo gylis mažėjo ir jau 2020 m. jo iš viso nebuvo registruojama. Tokia įšalo gylio kaita turėjo esminės įtakos dirvožemio drėgniui.

2025 metais dirvožemio drėgmės atsargos 0-20 ir 0-40 cm gylyje Aukštaitijos KMS buvo didžiausios nuo 2003 m., kai turime matavimus vegetacijos laikotarpiu kas 2 savaites. 2025 metais dirvožemio drėgmės atsargos pagal vidurkį ir kaitą metų bėgyje panašios į 2012 metų, bet mažai kintančios. Po sausringų 2015-2016 metų, 11 metų iš eilės dirvožemio drėgnis šiltuoju laikotarpiu tolygiai didėjo. Per pastaruosius 5 metus didžiausi dirvožemio drėgmės kontrastai (vadinasi ir dirvožemio vandens srauto intensyvumas) buvo 2021 ir 2023 metais

Nuo 1999 iki 2014 m. egzistavo glaudus ryšys tarp dirvožemio vidutinio drėgnio ir įšalo gylio. Po išskirtinų 2014 m. ši priklausomybė tapo atvirkštinė, kai drėgniui didėjant įšalo gylis reikšmingai mažėjo, taip kaip ir bendra įšalo trukmė. Tai išskirtinis procesas geosistemoje galintis turėti reikšmingos įtakos bendrai miško ekosistemų tvariai plėtrai.

Palankūs medžiagų išplovimui pavasarį (dėl menko įšalo ir didelio polaidžio vandens kiekio) buvo 2004, 2008, 2009, 2016 ir 2019-2023 metai. Didžiausi dirvožemio drėgnio kontrastai vegetacijos laikotarpiu buvo 2004, 2006, 2015, 2020, 2021 ir 2023 metais.

Aukštaitijos KMS upelio vandens temperatūra per 27 m. laikotarpį reguliariai didėjo po vidutiniškai 0,055°C per metus, kuris viršijo net oro temperatūros kaitos intensyvumą ore.

Žemaitijos stotyje 22 stebėjimo metų upelio temperatūra praktiškai išlieka stabili, nors oro temperatūra kyla beveik 2 kartus intensyviau negu Aukštaitijos KMS

Didžiausios ir ilgiausiai trukusios upelio vandens temperatūros reikšmės Aukštaitijos stotyje buvo 2009-2010 m. 2010 m. didesnė nei 10°C upelio vandens temperatūra buvo fiksuojama net 2 mėnesius - rugpjūtį ir rugsėjį, bet neviršijo 2009 m. rekordinės reikšmės (10,5°C). 2014 m. vidutinė metinė upelio vandens temperatūra buvo 6,95°C, didžiausia per 1999-2014 m. stebėsenos laikotarpį. Paskutiniuoju laikotarpiu 2020-2025 m. vandens temperatūra neturi aiškesnės tendencijos didėti, nors **2024m. kai buvo registruojami vieni iš šilčiausių metų, vandens temperatūra pasiekė savo maksimaliausią reikšmę –viršijo net 12 °C. Tai galėjo turėti reikšmingos įtakos upelio makro bentoso rūšių įvairovės ir individų gausos pokyčiams o taip pat ir visiems tirpumo ir išplovimo procesams miško ekosistemoje.**

Aukštaitijos KMS ištirpusio deguonies kiekis upelio vandenyje trejus metus buvo didesnis už vidutinę reikšmę (1999-2008 m. vidurkis 1,89 mg/l), o 2010 metais tapo panašus į vidurkį, 1,60 mg/l. Mažiausiai deguonies upelio vandenyje buvo 2002–2003 m., apie 1 mg/l. 2004–2005 ir 2007–2009 metais ištirpusio deguonies kiekis buvo didesnis už vidurkį dėl upelio vandens temperatūros padidėjimo ir režimo.

2015-2016 m. laikotarpiu registruotas vienas didžiausių vandens prisotinimo deguonimi laipsnių, kuris savo maksimalią reikšmę įgavo 2015 m. liepos ir 2016 m. gegužės mėnesiais – apie 5 mg/l. 2017-2018 m. deguonies kiekis upelio vandenyje stabilizavosi, tačiau buvo mažesnis nei daugiametis vidurkis – apie 2,8 mg/l. 2019 m. deguonies koncentracija Versminio upelio vandenyje išliko praktiškai stabili, nežymiai svyruojant apie 2,38 mg/l ribą. Tai truputį mažiau už daugiametį vidurkį dėl sausros ankstyvą pavasarį ir vegetacijos pradžioje. ***2020m. registruojamas reikšmingas deguonies kiekio padidėjimas Versminio upelio vandenyje, o paskutiniaisiais 2025 m. registruojamas reikšmingas vandens prisotinimo deguonimi laipsnio mažėjimas, kuris galėjo turėti reikšmingos įtakos makro bentoso rūšinės įvairovės ir gausos pokyčiams.***

KRITULIAI:

Aukštaitijos KMS pastarąjį dešimtmetį kritulių kiekio kaita buvo ypatinga. Jei pirmąjį 21 amžiaus dešimtmetį sausus laikotarpius keitė drėgnieji, kas tris-keturis metus, tai ***nuo 2014-2025 metų vandens režimas pasikeitė. Oro ir dirvožemio temperatūra ėmė tolygiai augti, menkstantis dirvožemio įšalas sukėlė dirvožemio įmirkimą. Gruntinio vandens cirkuliacijos pagreitėjimas ir bendras garavimas išaugo 2015-2022 m. Viso to pasekmė buvo ekstremaliai didelis upelio nuotėkis 2024-2025 metais.***

Aukštaitijos KMS per paskutiniuosius 40 m. kritulių kiekis pagal Dūkšto MS duomenis didėjo po 1 mm per metus, tačiau ši kaita buvo nereikšminga ($p<0,05$). Per tiriamąjį laikotarpį (1993-2010 m.) šioje MS stotyje kritulių kiekis kito intensyviau, t.y. didėjo po 6 mm per metus, o Aukštaitijos KMS beveik po 4,3 mm per metus. Kritulių kiekis klimatinę normą (1972-2010 m. vidurkį) viršijo 1998, 2000, 2005 ir 2010 m., o nesiekė 1992, 1996, 1999, 2006 ir 2008 m.

Tiriamuoju laikotarpiu 2010 m. Aukštaitijoje iškrito 33% daugiau, negu stebėjimo laikotarpio vidurkis. Didžioji kritulių dalis iškrito vegetacijos laikotarpiu, t.y. birželio-rugpjūčio mėnesiais. 2011-2015 m. laikotarpiu stebimas ryškus kritulių kiekio mažėjimas visais metų laikais. Dėl šios priežasties ir 22 m. kritulių sumos kaita rodo, kad kritulių kiekis pradėjo mažėti.

2017 m. galima būtų įvardinti kaip perteklinės drėgmės metais. Šiais metais kritulių kiekis Aukštaitijos KMS viršijo 1000 mm. Tai rekordinis kritulių kiekis per paskutiniuosius 25 metus.

Paskutinysis 5 metų laikotarpis (2021-2025 m.) išskyrė didesniais kritulių kiekiais lyginant per visą tiriamąjį laikotarpį. Metinis kritulių kiekis viršijo 700 mm. Išskirtiniai 2023 m. kai kritulių kiekis viršijo ir 900 mm riba. Tokiu būdu per 33 metų laikotarpį kritulių kiekio kaitoje nustatyta kritulių kiekio didėjimo tendencija, kuri pasireiškė 3,9 mm per metus didėjimo intensyvumu.

Atskirais sezonais skirtingai negu buvo nustatyta ankstesnėse ataskaitose, kritulių kiekis tiriamuoju laikotarpiu rudenį didėjo po 0,7 mm per m., žiemą po 0,38 mm per m., pavasarį po 0,52 mm per m. ir vasarą po 2,28 mm per mm. Kaip rodo gauti rezultatai ypač intensyviai didėjantis kritulių kiekis vegetacijos laikotarpiu turėjo turėti reikšmingos įtakos visos miško biotos kaitai.

Apibendrinus gautus rezultatus nustatyta, kad jei Aukštaitijos KMS metinis kritulių kiekis per 27 m. laikotarpį (iki 2020 m.) didėjo po beveik 1 mm per metus, tai įskaitant paskutiniuosius 5rius metus (2021-2025 m.), kiekio didėjimo tendencija dar labiau išaugo siekia jau beveik 4 mm per m.

Jei dar 2020 m. buvo mėginama informuoti apie naujai kylančią grėsmę miško ekosistemos, dėl beprasidedančio drėgmės trūkumo, tai paskutinieji 2021-2025 metai paneigė šias prognozes. Dėl intensyviai didėjančio kritulių kiekio Aukštaitijos KMS miško ekosistemos žymiai geriau yra aprūpinamos vandens atsargomis, kas turėjo turėti reikšmingos įtakos visos miško ekosistemos būklei ir jos atsparumui nepalankiems aplinkos veiksniams.

Žemaitijos KMS stebėjimų stotyje metinis kritulių kiekis klimatinę normą (daugiametį 1972-2010 m. vidurkį Vėžaičių meteorologinė stotis, 906,8 mm) viršijo 1995, 1998, 2002, 2005, 2007, 2010-2012m., o paskutiniuoju laikotarpiu tik 2017 m., 2020m. ir 2023 m. Žemiau vidutinės reikšmės kritulių kiekis buvo registruojamas 1992, 1996, 2006 ir ypač 2015, 2018, 2022 ir 2025 m.

Jei dar 2020 m. buvo teigiama, kad Žemaitijos KMS metinis kritulių kiekis per 27 m. laikotarpį didėjo ypač reikšmingai, t.y. po 1,7 mm per metus ir šis intensyvumas palaipsniui auga, tai jau po paskutiniųjų 5rių metų laikotarpio, kritulių dinamika pasikeitė iš esmės, dėl reikšmingo kritulių kiekio sumažėjimo ir ypač 2023 ir 2025 metais.

Dzūkijos KMS kritulių kiekio kaitos analizė atlikta Varėnos MS duomenų pagrindu. Nustatyta, kad kompleksiško programos veiklos laikotarpiu ***nuo 1993 iki 2025 m., kritulių kiekis turėjo tendencija mažėti po 0,73 mm per m. Didėjo tik kritulių kiekis vegetacijos laikotarpiu po 1,3 mm per m. Likusiais metų sezonais kritulių kiekis mažėjo: rudenį po -1,4 mm per m., žiemą po -0,4 mm per m. ir pavasarį po -1,12 mm per m.***

Tokiu būdu pagrindinė grėsmė miško ekosisteminiams procesams ir biotos komponentų būklei gali būti mažėjantis kritulių kiekis Dzūkijos KMS ir ypač Žemaitijos KMS. Didėjantis kritulių kiekis Aukštaitijos KMS, atvirkščiai, turėtų sąlygoti padidintus miško ekosistemos gebėjimus išgyventi stresą bei jos geresnę būklę ir prisitaikymą prie intensyviai kintančios aplinkos. Tokie du priešingi procesai vykstantys ekosistemose sudaro galimybes tirti biotos ekofiziologines reakcijas į besikeičiančią aplinką skirtingose augaviečių tipuose bei klimatiniuose rajonuose.

Aukštaitijos KMS tiriamuoju 32 m. laikotarpiu reikšmingiausiai kito kritulių kiekis liepos mėnesį, demonstruodamas reikšmingą didėjimą po +2,3 mm per metus. Likusiais mėnesiais registruoti tiek kritulių kiekio mažėjimo, tiek ir didėjimo tendencijos kurių reikšmingumas nesiekė 0,1. Kritulių didėjo sausio, balandžio, gegužės, rugpjūčio ir spalio-gruodžio mėnesiais, o mažėjo vasario-kovo ir rugsėjo mėnesį.

Palyginus skirtingus laikotarpius iki 2010 ir po 2011 metų rezultatus išryškėjo esminiai skirtumai kurie galėjo turėti reikšmingos įtakos tiek ir cheminių komponenčių tiek ir biotos komponentų kaitos intensyvumui ar net ir bendram ekosistemos tvarumui ar atsparumui išgyventi stresą. Pirmuoju laikotarpiu kritulių kiekis mažėjo žiemos ir ankstyvo pavasario mėnesiais, tai jau antruoju laikotarpiu šiuo laikotarpiu kritulių kiekis didėja. Reikšmingas pokytis įvyko rugsėjo mėn. kritulių kaitoje, kai paskutiniuoju laikotarpiu kritulių mažėjimas stabilizavosi. Rudens ir ankstyvos žiemos laikotarpiu kritulių kiekio didėjimas, nors ir nereikšmingas išlieka. Reikšmingiausias pokytis įvyko liepos mėn. kritulių, kuris nuo 2011 metų pradėjo didėti po beveik 5 mm per m., kas turėjo turėti reikšmingos įtakos visai Aukštaitijos KMS augalijai, jos būklei ir produktyvumui.

Žemaitijos KMS kritulių taip pat kaip ir Aukštaitijos KMS mažėja vasario – birželio mėnesiais, tačiau jei Aukštaitijos KMS ši kaita buvo nereikšminga, tai Žemaitijos KMS birželio mėn. kritulių kiekis mažėja net po beveik 2 mm per metus, ir šis mažėjimas yra jau reikšmingas. Tačiau čia intensyviau negu Aukštaitijos KMS didėja likusių mėnesių kritulių kiekis. Tokios kaitos rezultatas – 1,7 mm per metus didėjantis kritulių kiekis, kuris buvo nustatytas 2020 m. 2017-2020 m didėjantis kritulių kiekis turėtų teigiamai sąlygoti miško biotos gausos, rūšių įvairovės kaitą, o taip pat ir geresnę medžių būklę bei didesnį prieaugį.

Per tiriamąjį 31 m. laikotarpį reikšmingai mažėjo birželio mėn., o didėjo liepos mėn. kritulių kiekis. Kitų mėnesių kritulių kiekis kito panašiai kaip ir Aukštaitijos KMS. Mažėjo žiemos ir ankstyvo pavasario mėnesių kritulių kiekiai, kurie reikšmingiau pasireiškė pradiniame tiriamajame laikotarpyje, t.y. iki 2010 m. šiame laikotarpyje vasario ir ypač balandžio mėnesių kritulių kiekis mažėjo reikšmingai, maždaug po 1,5 ir 5 mm per m. atitinkamai. Gausesniais krituliais pasižymėjo liepa ir rugpjūtis, kai kritulių kiekis didėjo maždaug po 3,5-5,5 mm per m. atitinkamai. Didėjimo tendenciją demonstravo ir lapkričio mėn. krituliai.

Antrajame tiriamajame laikotarpyje kritulių kiekio kaita pasikeitė. Reikšmingai sumažėjo tik gruodžio mėn. krutulių kiekis, viršydamas net 7 mm per m. ribą. Likusiais mėnesiais kritulių kiekio kaita buvo absoliučiai nereikšminga, nors turėjo išskirtinę mažėjimo tendenciją praktiškai visais likusiais mėnesiais. ***Tai iš tiesų nauja grėsmė Žemaitijos krašto miško ekosistemoms.***

Reikšmingesnių kritulių kiekio kaitos tendencijų Dzūkijos KMS per tiriamąjį laikotarpį nenustatyta. Panašiai kaip ir Žemaitijos KMS, paskutiniuoju laikotarpiu (2011-2025 m.) praktiškai visais mėnesiais mažėja kritulių kiekis ir tik sausio ir spalio mėnesį registruojamas arti reikšmingo lygmens kritulių kiekio padidėjimas. Kokią įtaką tokia kaita turės miško ekosistemoms parodys detalesni ateities tyrimai.

Kritulių kiekio ir santykinės drėgmės palyginamoji analizė parodė, kad 2011-2025 m. laikotarpiu kritulių kiekiui didėjant po 0,003 mm per mėn., vidutinė santykinė oro drėgmė didėjo po 0,0007 % per mėn., o minimali jos reikšmė didėjo net po 0.0013 % per mėn., t.y. kritulių kiekiui padidėjus 1 mm santykinės drėgmės parametrai padidėtų 0,2 ir 0,4 % atitinkamai.

Paskutiniuoju laikotarpiu mažėjantis kritulių kiekis Dzūkijoje ir ypač Žemaitijoje gali tapti nauja grėsme miško ekosistemų tvarumui ateityje.

Dirvožemio drėgnio duomenys Aukštaitijos KMS išmatuoti 2003-2025 metais. Ypač mažas dirvožemio drėgnis nustatytas 2008 metais, o taip pat 2014 ir 2018 m., kai jo reikšmė buvo mažesnė už daugiametį vidurkį.

Pastaraisiais 2020-2025 m. registruojamas reikšmingas dirvožemio drėgnio augimas, kuris paskutiniaisiais 2025 m. pasiekė viso tiriamojo laikotarpio maksimalią reikšmę, t.y. apie 60 mm.

Išskirtinai aukštą 2025 m. drėgnį galėjo sąlygoti pasikartojančios šiltos žiemos, kurių metu nebuvo registruojamas dirvožemio įšalas ir gausūs krituliai ramybės laikotarpiu nuo 2019 m., o taip pat galimai ir labai vėsus pavasaris (kovo-gegužės mėn.), dėl ko galėjo

sumažėti ir evapotranspiracija nuo dirvožemio paviršiaus bei sumažėjęs nuotėkis. Dirvožemio drėgnio pokytis naudojamas skaičiuojant bendrą garavimą. Tokie dėsningumai patvirtina, kad klimato kaita gali turėti reikšmingos įtakos miško dirvožemio fizikinėms savybėms.

Gruntinio vandens lygis, kaip ir kritulių kiekis, banguoja 3–4 metų ciklais, bet dėl metus, pusantrų metų vėluojančio gruntinio vandens atsako į kritulius, esant mažiausiam kritulių kiekiui, ***gruntinio vandens lygis, giliausiuose gręžiniuose pakyla iki aukščiausio lygio per trimetį ciklą***, „kompensuodamas“ ekosistemai sausros pasekmes. : 1999, 2002, 2005, 2008, 2011-2012 ir 2018 metais, kai kritulių kiekis per metus buvo mažiausias, giliajame gręžinyje gruntinio vandens lygis pavasarį buvo aukščiausias arba pakilo kitų metų pavasarį.

Vandens lygio kitimas įvairaus gylio gręžiniuose susijęs su vandens persiskirstymo procesais geoekosistemoje. Gruntinis ir dirvožemio vanduo – tai tarpinė grandis tarp kritulių ir upelio nuotėkio, galintis kompensuoti augalams kritulių trūkumą. Per 25 stebėjimo metų Aukštaitijos stotyje mažiausiai kritulių iškrito 2008, o upelio nuotėkis buvo mažiausias metais vėliau, 2009 metais. Sekliuose gręžiniuose gruntinis vanduo labiausiai nuslūgo jau sausringųjų 2008 metų antroje pusėje, o 2009 metais dar labiau pažemėjo, o tai savo ruožtu lėmė mažiausią upelio nuotėkį. Giliausiame gręžinyje, LT01-104, gruntinio vandens lygis iki žemiausio taško nukrito tik 2009-2010 metais, kai kritulių kiekis buvo didžiausias per stebėjimų laikotarpį

2016-2020 m. ***duomenys rodo, kad*** abiejose stotyse gruntinio vandens dinaminiai ištekliai 2015-2017 metais reikšmingai didėjo, o 2017 m. Aukštaitijos stotyje buvo didžiausi per stebėjimo laikotarpį. ***Nuo 2018 m. reikšmingai žemėti pradėjo gruntinio vandens lygis Aukštaitijos KMS visuose gręžiniuose išskyrus LT-01-101, kuriame vanduo laikosi pačiame sekliausiame lygmenyje. Žemaitijos KMS seklesniuose gręžiniuose tokios tendencijos nustatyti nepavyko. Tik giliausiame gręžinyje vandens lygio sumažėjimas buvo pradėtas registruoti nuo 2018 m. liepos mėn.***

2020 metų kritulių gausa (>1000 mm), kaip ir buvo anksčiau prognozuota sukėlė gruntinio vandens lygio augimą visuose gręžiniuose, tik skirtingu laiku. 2022-2024 m. pasižymėjo vandens lygio pakilimu visuose gręžiniuose abiejose KMS, o giliuosiuose gręžiniuose paskutiniaisiais metais ėmė kristi, pirmiausia, Žemaitijos KMS. 2024 metų buvo pasiekti aukščiausi gruntinio lygiai, 2025 metais prasidėjo lygio kritimas.

Gruntinio vandens dinamika intensyviausia Aukštaitijos KMS giliuosiuose gręžiniuose LT01_102-103-104. Aukščiausias vandens lygis, pasiektas 2024 metų pradžioje (LT01_102 ir 103) ir antrame pusmetyje (LT01_104) buvo laipsniško vandens nuotėkio didėjimo pasekmė, LT01_103 gręžinyje prasidėjusio 2012 metais (minimalus nuotėkis buvo 2010 metais) ir pasiekusio didžiausias reikšmes 2022 metais, t.y. po 10-12 metų. 2024 ir 2025 metais vidutinis gruntinio vandens nuotėkis visuose gręžiniuose buvo mažiausias per stebėsenos laikotarpį, gruntinio vandens lygis LT01_102 ir 103 gręžiniuose nukrito, o LT01_104 gręžinyje – stabilizavosi.

Žemaitijos KMS gręžiniuose (LT03_102-103-104) vidutinis vandens nuotėkis yra daugiau kaip dvigubai lėtesnis, nei Aukštaitijos KMS. Giliajame gręžinyje (LT03_104) nuo žemiausių reikšmių 1998 ir 2007 ir 2010 metais ėmė didėti ir 2018 metais buvo aukščiausias, 2019-2020 metais nukrito, o 2023-2025 laikosi aukštesnės nei vidutinės reikšmės.

2025 metais atnaujintas vandens lygių matavimas Dzūkijos KMS daugiamečių tendencijų negali parodyti. Visuose Dzūkijos KMS gręžiniuose stebimas žemesnis vandens lygis negu buvo 1997-1999 metais, bet sezoninės kaitos amplitudės yra panašios. Giliausiame gręžinyje, LT02_103, rudenį vandens lygis sutapo su 1997-1999 metų duomenimis.

Paviršinio vandens nuotėkio sekoje išsiskiria 5 laikotarpiai, kai nuotėkio reikšmės viršijo daugiametį vidurkį. Tai 1998, 2004-2007, 2011-2013, 208 ir 2023-2025.

2015-2020 m. krituliai turėjo reikšmingos įtakos upelio nuotėkiui, bet ne einamaisiais, o po metų arba net dvejus ateinančius metus. Dėl šios priežasties mažiausias nuotėkis per visą tiriamąjį laikotarpį Aukštaitijos KMS baseine buvo nustatytas 2016 metais, t.y., praėjus metams nuo 2015 m. sausros, nesiekė net 30 mm. 2020 metais upelio nuotėkis buvo dar mažesnis, negu 2019 metais, kai didžiausią įtaką padarė 2018 metų kritulių stygius.

2020 metais iškritę krituliai neviršijo stebėsenos laikotarpio vidurkio, pavasarį dirvožemio drėgmė 0-40 cm gylyje buvo didesnė, negu stebėsenos vidurkis, bet pagreitėjusi gruntinio vandens cirkuliacija ir pradžioje žymiai sumažino Aukštaitijos KMS upelio nuotėkį. ***Šiuo laikotarpiu kritulių kiekiui didėjant šioje stotyje po beveik 5 mm per metus upelio nuotėkis mažėja po 1,6 mm per metus***. ***Toks iškreiptas vandens balanso ciklas rodo, kad šylant klimatui pradeda didėti vandens evapotranspiracija dėl ko mažėja vandens sunkimasis į gilesnius dirvožemio sluoksnius. Tai galėjo tapti naujos, išskirtinės, klimato kaitos sąlygotos, grėsmės miško ekosistemų tvariai plėtrai pradžia.***

Tačiau ketverius metus iš eilės, 2022-2025 metais kritulių kiekiui viršijus daugiamečius vidurkius, jau po metų, 2023-2025 metais upelio nuotėkis pakilo iki didžiausių reikšmių per stebėsenos laikotarpį.

Pagal šį skaičiavimą, bendro garavimo reikšmė stebėsenos laikotarpiu 2000-2025 m. buvo vidutiniškai Aukštaitijos KMS 86%, o Žemaitijos KMS 1998-2010 metais – 80. Kitais metais po labiausiai sausringųjų, 2008, 2015, 2018 ir 2021 metų, bendrasis garavimas Aukštaitijos KMS padidėdavo iki labai didelių reikšmių, atitinkamai 94% (2009 m.), 92-96% (2015-2017 m.) ir 91-96% (2020-2022 m.), o 2024-2025 metais bendrasis garavimas sumažėjo iki rekordiškai mažų 70-74%, nors kritulių kiekis augo, ypač 2023 ir 2024 metų vasarą.

SAULĖ:

Aukštaitijos KM stotyje atlikti tyrimai rodo, kad ***intensyviausiai ir reikšmingiausiai didėja FAR spinduliuotė, kuri per 27 m. laikotarpį didėja vidutiniškai 1,32 w/m² per metus. Bendrosios saulės spinduliuotės kaita yra kiek mažesnė ir siekia 0,6 w/ m² per metus. Maksimalių reikšmių kaitoje stebimas iki 2,2 w/ m² spinduliuotės aktyvėjimas per metus.***

Analizuojant vidutines mėnesines reikšmių kaitos, nustatyta, kad bendroji saulės spinduliuotė reikšmingiausiai didėja gegužės, birželio ir rugpjūčio mėnesiais beveik siekdama 2W/ m^2 per metus reikšmę. Šios spinduliuotės maksimalių reikšmių sekoje išsiskiria sausio, kovo-balandžio ir liepos mėnesiai, kada maksimalios reikšmės didėja vidutiniškai po virš 3 W/ m^2 per metus.

Intensyviausiai didėja FAR spinduliuotė, kuri yra ypač svarbi augalams, t.y. per 27 m laikotarpį intensyviausiai nuo kovo iki net lapkričio mėnesio, savo maksimalias didėjimo reikšmes pasiekdama gegužės-birželio ir rugpjūčio mėnesiais – virš 3,5 W/ m^2 per metus, kai tiesioginė spinduliuotė būna intensyviausia.

II laikotarpiu nuo 2013, kaitos tendencijos pasikeitė iš esmės. Jei maksimalios spinduliuotės didėjimas sušvelnėjo 2 ratus, tai vidutinės ir FAR spinduliuotį Aukštaitijos KMS pradėjo mažėti po 0,07 ir 0,033 w/m² per metus, ką būtų jau galima pradėti sietis ir su temperatūros mažėjimu paskutiniuoju laikotarpiu, nors ši spinduliuotės kaitos tendencija dar nereikšminga.

Saulės spinduliuotės intensyvumo augimas, vienas iš reikšmingiausių aplinkos kaitos rodiklių, gali turėti reikšmingos įtakos gerėjančiai miškų būklei ir didėjančiam produktyvumui, o taip pat ir kitų miško ekosistemų biotos komponentų įvairovei ir gausai. Nuo 2013 m. Saulės spinduliuotės kaitoje stebima mažėjimo tendencija, kuri lėmė ultravioletinės spinduliuotės mažėjimą.

Tyrimai Aukštaitijos KM stotyje parodė, kad ultravioletinė spinduliuotė paskutiniųjų 13 metų laikotarpiu turi tendenciją mažėti: UV A – po 3,8 , o UV B po 0,005 W/m2 per metus. Šią katą reikšmingai sąlygojo bendroji Saulės spinduliuotė, kuri 98 ir 99 proc. paaiškino šių UV spinduliuočių mažėjimo kaitą atitinkamai.

Didesnė santykinė drėgmė ir gausūs krituliai turi reikšmingos įtakos Saulės spinduliuotės pasiekiančios Žemės paviršių intensyvumui slopinti. Tai veiksniai, kuriems didėjant, gali būti sąlygotas ir klimato atšalimas ateityje.

Saulės spinduliuotės intensyvumo pokyčiai gali turėti reikšmingos įtakos gerėjančiai miškų būklei ir produktyvumui, o taip pat ir kitų miško ekosistemų biotos komponentų įvairovei ir gausai.

OZONAS:

Pažemio ozono tyrimų rezultatai parodė, kad ***per 32 m. laikotarpį stebima mėnesio vidutinių koncentracijų mažėjimo tendencija, kuri Dzūkijoje yra statistiškai reikšminga (p<0,05).***

Būtent per šį laikotarpį Dzūkijoje O_3 koncentracija mažėja po 0,015 µg/m^3, Aukštaitijoje 0,011 µg/m^3 ir Žemaitijoje mažiausiai po 0,0003 µg/m^3 per mėnesį. Per paskutinįjį 5 m. laikotarpį vidutinių koncentracijų mažėjimo tendencija slopo. Detalesnė analizė laidžia išskirti laikotarpius, kur ši kaita buvo intensyvesnė. Tai laikotarpiai nuo 1995 iki 2004 m., 2005-2013 ir 2014-2020 m. ***2023 m. nustatyta viena didžiausių O3 koncentracijų KM stotyse per visą tiriamąjį laikotarpį.***

Ramybės ir vegetacijos laikotarpių vidutinių koncentracijų kaita parodė, kad pirmą kartą nuo stebėsenos pradžios Žemaitijos regione pradėtas stebėti O3 koncentracijų augimas ramybės laikotarpiu, t.y. rugsėjo – kovo mėn. laikotarpiu po 0,39 ug/m3 per metus.

Paskutiniuoju laikotarpiu (2011-2025 m.) dėl padidėjusių koncentracijų 2018-2019, o taip pat 2023 ir iš dalies 2024 m., O3 koncentracijos ore ramybės ir vegetacijos laikotarpiais pradėjo augti Dzūkijos KMS ir ypač reikšmingai Žemaitijos KMS. Aukštaitijos KMS 2011-2025 m. laikotarpiu vidutinių koncentracijų kaitoje išlieka mažėjimo tendencija

Eglės CL buvo viršytas beveik visame žemėlapyje pažymėtame Europos regione, išskyrus didelius plotus Skandinavijoje, Islandijoje ir kai kuriose Baltijos šalyse, nedidelį plotą Rumunijoje ir kelias išsibarsčiusias vietoves Bulgarijoje, Vengrijoje, Serbijoje, Lenkijoje ir Vokietijoje. Tačiau beveik kiekvienoje Europos šalyje galima rasti daug mažesnių plotų, kurių POD yra mažesnis už CL.

O3 lygiai taip pat priklauso nuo aplinkos sąlygų ir augalų fenologijos. Pavyzdžiui, didesnės POD1 vertės gali būti tose vietose, kur O3 koncentracija yra mažesnė, bet palankios sąlygos žiotelių laidumui. Kita vertus, mažiausias POD1 lygis paprastai būna tose vietose, kur O3 koncentracija yra mažesnė, pavyzdžiui, Šiaurės Europos regionuose ir (arba) tose vietose, kur aplinkos sąlygos riboja O3 žiotelių laidumą, pavyzdžiui, sausose ir šiltose vietovėse.

Remiantis „Copernicus“ duomenimis, 2023 m. vasara Europoje buvo penkta pagal šilčiausią istoriją, o 2022 m. vasara buvo šilčiausia. Tai gali būti vienas iš paaiškinimų, kodėl 2023 m. vertės buvo santykinai mažesnės, palyginti su 2022 m. Tačiau daugiau kitų veiksnių analizė gali suteikti patikimesnių įžvalgų.

Anova testas parodė, kad vidutinė daugiametė Ozono koncentracija tarp stočių skiriasi reikšmingai ($p<0,05$): ***Aukštaitijos KMS ši reikšmė siekia 52,1 µg/m³, Žemaitijoje 49,7 µg/m³ ir Dzūkijoje 48,8 µg/m³.*** Tam tikrą paklaidą šių duomenų patikimumui gali turėti tas faktas, kad nuo 2000 iki 2006 m. ozono koncentracijų tyrimai Dzūkijoje nebuvo vykdomi.

Metinių maksimalių koncentracijų kaitoje nustatyta reikšminga mažėjimo tendencija Aukštaitijos ir Dzūkijos KM stotyse, kur ji siekė apie 1,49 µg/m³ ir 1,28 µg/m³ per metu atitinkamais. Žemaitijos KMS ši tendencija mažesnė tik 0,5 µg/m^3 per metus.

Aukštaitijos KMS vidutinė mėnesio O_3 koncentracija mažėja nuo gegužės iki lapkričio mėn. imtinai ir šis mažėjimas pasiekia reikšmingumo lygmenį VI-VIII, X ir ypač XI mėnesiais, svyruodamas apie 0,3 µg/m³ per metus lygį. Likusiais ramybės laikotarpio mėnesiais O_3 koncentracija didėja, nors ir nereikšmingai.

Maksimalių koncentracijų kaitoje išryškėja vegetacijos laikotarpis, kai birželio-rugpjūčio mėn. laikotarpiu maksimalios O_3 koncentracijos mažėja reikšmingiausiai siekdamos net ir 1 µg/m³ per metus lygį.

Lyginant O_3 koncentracijų kaitą pirmuoju (1994-2010 m.) ir antruoju (2011-2025 m.) laikotarpiu. Pateikti rezultatai rodo, kad jei pirmuoju laikotarpiu O3 koncentracijos mažėjo V-XI mėnesiais praktiškai visose stotyse, tai jau antruoju laikotarpiu pradėtas registruoti koncentracijų augimas ir ypač Žemaitijos KMS ir kiek silpnesnis Dzūkijos KMS. Aukštaitijos KMS O_3 koncentracijos praktiškai išliko stabilios. ***Tai galimai naujos grėsmės visai miško ekosistemos biotai, jos rūšių įvairovei, gausai ir būklei.***

Tarptautinės prognozės, kad pažemio ozono koncentracijos ateityje turėtų didėti Lietuvos foninio užterštumo teritorijose iki 2020 m. laikotarpio nepasitvirtino. Tačiau paskutinysis 5 m. laikotarpis pakeitė šia išvadą: O3 koncentracijos ore Lietuvoje pradeda didėti.

Priežemio ozonas, kurio koncentracijos pastaruoju laikotarpiu nesiekia 60µg/m^3, neturi reikšmingos įtakos medžių lajų būklei. Karščio bangos ir sausros epizodai, kurių metu augalai besisaugodami nuo išdžiūvimo uždaro žioteles, apsisaugo tuo pačiu ir nuo žalingo, ir kaip taisyklė, tuo laikotarpio padidėjusios ozono koncentracijos.

Ozono koncentracijoms pradėjus didėti, medžių lajų būklė gali pradėti blogėti, o prieaugis mažėti. Tai gali tapti nauja grėsme miško ekosistemoms ateityje.

Išaiškinta daugiametė rūgštinančių komponenčių koncentracijų ore kaitą negalėjo turėti reikšmingos įtakos miško ekosistemų rūšių įvairovei, jų būklei, gausumui bei atsparumo sumažėjimui nepalankiais laikotarpiais.

Saulės spinduliuotė skatina priežemio ozono susidarymą, dėl ko ateityje šio fitotoksikanto susidarymą atetyje gali lemti ir Saulės spinduliuotės kaitą mažėjimo kryptimi..

Labai reikšmingu poveikiu ozonui susidaryti pasižymi ir santykinė oro drėgmė. Didesnė drėgmė panašiai slopina tiek vidutinių, tiek ir maksimalių koncentracijų susidarymą. Ji paaiškina atitinkamai apie 35 ir 45 % šių ozono koncentracijų kaitos. ***Dažnėjančios sausros gali prisidėti prie O3 koncentracijų augimo priežemyje, tačiau prognozuojamas kritulių augimas gali sąlygoti priešingą procesą – intensyvų O3 mažėjimą, kuris iki šiol dar neregistruojamas.***

Vienas iš pagrindinių ozono susidarymą skatinantis veiksnys yra karšio bangos. Gauti rezultatai patvirtino šį teiginį. ***Būtent aukšta oro temperatūra ypač reikšmingai skatina maksimalių ozono koncentracijų susidarymą. Prognozė: ar ateityje O3 koncentracijos didės taip pat priklausys nuo karščio bangų pasikartojamumo dažnio.***

Nenustatytas joks reikšmingesnis kritulių poveikis maksimalių ozono koncentracijų kaitai, tačiau kritulių didesni kiekiai slopina ozono susidarymo procesą, didindami aplinkos santykinę drėgmę. Jų kiekiai paaiškina apie 5 % ozono vidutinių koncentracijų kaitos.

Pažemio ozono koncentracijas taip pat mažina ir vėjas, ypač jo poveikis reikšmingas maksimalioms ozono koncentracijoms susidaryti. Nustatyta, kad tiek vidutinis tiek ir maksimalus vėjo greitis gali paaiškinti atitinkamai iki 20 ir 10 % maksimalios ozono koncentracijos kaitos.

Prognozė ir galimos grėsmės

Todėl pažemio ozono koncentracijų mažėjimą ateityje galėtų skatinti pirmiausiai Saulės spinduliuotės mažėjimas ir debesuotumas lydimas kritulių kiekio didėjimu, kas sąlygotų ir didesnę santykinę drėgmę ir žemesnę bendrą temperatūra, kuri tik dabar pradedama stebėti.

Ir atvirkščiai pažemio ozono koncentracijų didėjimą ateityje galėtų skatinti Saulės spinduliuotės pliūpsniai, sausros, lydimos karščio bangų. Nuo šių veiksnių tolesnės kaitos prognozės priklausys ir priežemio ozono susidarymas, sąlygojantis bendrą miško ekosistemų būklę ir produktyvumą.

MIŠKŲ BŪKLĖ

Aukštaitijos KMS per pradinį 1993-96 metų laikotarpį visų tirtų rūšių vidutinė medžių lajų defoliacija padidėjo 2 kartus. 1998-99 m. laikotarpiu būklė stabilizavosi ir nežymiai pagerėjo. Tai tęsėsi ir 2001 m. 2002-2003 m. medynų būklės pablogėjimą sąlygojo sausra. Iki 2008 m. vyko pakankamai reikšmingas medžių lajų defoliacijos mažėjimo procesas, kurį pakeitė vienas ilgiausių neigiamų procesų miško būklės kaitoje. Išskirtinis 2011-2015 m. laikotarpis, kurio metu registruojamas reikšmingas tirtų medžių lajos būklės atsikūrimas. Šis laikotarpis sutampa su reikšmingu medžių metinio prieaugio padidėjimo procesu. Paskutinysis 2015-20255 m. laikotarpis įvardijamas kaip miškų būklės blogėjimo laikotarpis, kuris signalizuoja apie besiformuojančią naują grėsmę Lietuvos miškams. Pagrindinės priežasties sąlygojančios tokią miškų būklės kaitą Aukštaitijos regione reiktų ieškoti pirmiausiai meteorologinių veiksnių kompleksiškame poveikyje, išskiriant sausrų ir karščio bangų poveikį.

Reikšmingiausiai pablogėjo pelkinėse miško augavietėse augančių beržų būklė, kurių defoliacija 2019 m. padidėjo nuo 20,3% iki 23,6%. Šį pablogėjimą lėmė ypač dominuojančių medyne ir viršaujančių (stambiausių medžių) lajų defoliacijos laipsnio padidėjimas. Tai prasto beržų adaptatyvumo prie dabartinių aplinkos sąlygų rodiklis.

Kiek silpniau blogėjo paprastosios pušies medžių lajų būklė. Per 2019 m. jų vidutinė defoliacija padidėjo nuo 16,4 % iki 18,0 %. Intensyviausiai blogėjo viršaujančių medžių lajų būklė, kas rodo, kad būtent sausra ir karščio bangos turėjo reikšmingiausios neigiamos įtakos patiems didžiausiems ir gerai išsivysčiusiems pušies individams. Tai patvirtina mūsų nustatytus dėsningumus pušynuose, remiantis kuriais yra teigiama, kad stambiausi medyne medžiai yra jautriausi aplinkos kaitai.

Išskirtiniai šiame laikotarpyje 2020 m. kuriais įvyko reikšmingiausi būklės pokyčiai per visą tiriamąjį laikotarpį. Visų tirtų medžių lajų vidutinė defoliacija sumažėjo vidutiniškai 3,5 %, nuo 22.9% iki 19.4%. Tokios geros būklės medynai Aukštaitijos KMS buvo tik tyrimų pradžioje. Tai šiltos žiemos, gausių kritulių praėjusio sezono rudens ir žiemos laikotarpiu bei padidėjusio dirvožemio drėgnio kompleksiško poveikio rezultatas

2020-2025 m. laikotarpis pasižymėjo skirtingo reikšmingumo medžių lajų būklės pablogėjimo procesu. Šiuo laikotarpiu reikšmingiausiai blogėjo beržų lajų būklė ir ne vien dėl priežasties kad viename tyrimo barelyje Nr 38 visi beržai žuvo dėl užmirkimo, vandens lygiui, pakilus iki 20 cm virš žemės paviršiaus. Kiek mažesniu intensyvumo blogėjo ir pušų būklė. Jų vidutinė defoliacija šiuo laikotarpiu didėjo po 0,26 % per m. Eglės kaitoje reikšmingesnės būklės tendencijos nenustatyta, nors 2022 m. išsiskyrė reikšmingu eglės lajų būklės pablogėjimu dėl intensyvaus žievėgraužio tipografo medžių pažeidimų ir žūties.

Apibendrinus paskutiniųjų metų medžių lajų vidutinės defoliacijos kaitos rezultatus galima būtų teigti, kad sausra ir karščio bangos neigiamai sąlygoja visų tirtų Aukštaitijos KMS baseine augančių medžių lajų būklę, tačiau jos poveikis paprastosios eglės medžiams buvo mažiausias.

Dzūkijos KM teritorijoje pušynų būklę tyrimų pradžioje sąlygojo pušinio pjūklelio ir verpiko vienuolio daroma žala. Jei 1993 m. tirtų pušų vidutinė defoliacija buvo 29,5% tai 1996 m. ji pakilo iki 36,4%. Didesni neigiami būklės pokyčiai buvo užfiksuoti viršaujančių ir vyraujančių medyne medžių. 1995m. pradėjus naudoti biologinį insekticidą prieš pušini pjūklelį ir neporinį verpiką pušynų būklė pradėjo atsistatyti.

Atnaujinti tyrimai atskleidė naują Dzūkijos miškų (praktiškai pušynų) būklės kaitos etapą, pasižyminti pušų lajų būklės atsikūrimu. Ypač šis procesas akivaizdžiai matyti paskutiniųjų 3jų metų rezultatuose. 2021-2025 m. visų tirtų medžių rūšių lajų vidutinė defoliacija reikšmingai mažėjo ir 2025 m. net nesiekė 20 proc ribos. Tai geros miškų būklės rezultatas. Viena iš pagrindinių priežasčių kuri lėmė pušynų būklės atsikūrimą - tai spyglių graužiančių kenkėjų populiacijos kontrolė. Paskutiniaisiais metais šių kenkėjų žala registruojama tik pavienėms pušims augančioms šioje stotyje.

Apibendrinus aptartus medžių būklės dinamikos rezultatus Dzūkijos KMS teritorijoje matyti, kad per pirmąjį tiriamąjį laikotarpį (1993-2010 m.) medžių būklė pablogėjo, jų vidutinė defoliacija padidėjo nuo 28,8% iki 35,6%. Per antrąjį tiriamąjį laikotarpį (2011-2025 m.) užfiksuotas žymus būklės pagerėjimas, vidutinė defoliacija

sumažėjo nuo 35,6% iki 27,7%, o jau 2025 m. net nesiekė 20 proc. ribos. Tai geros miškų būklės rodiklis.

Žemaitijos KM teritorijoje augančių medžių būklė kito analogiškai Aukštaitijos KMS medžių būklei. Per pirmąjį dviejų metų laikotarpį vidutinė visų tirtų medžių defoliacija padidėjo nuo 25% iki 33%. Eglynų būklė per šį laikotarpį pablogėjo intensyviausiai. 1996 m. registruojama viena blogiausių Žemaitijos miškų būklė, kuri ne nedideliais svyravimais tęsėsi iki 2007m. Tai metai, kad beržų lajų būklė buvo blogiausia per visą tiriamąjį laikotarpį, o kitų rūšių medžių – viršijo 25%.

Paskutinieji 2018-2025 m. medžių lajų būklės blogėjimo etapas su gana ženkliais lajos defoliacijos sumažėjimo metais: 2022 ir 2024. Tokiems defoliacijos svyravimams įtakos turėjo ir dėl žievėgraužio tipografo žūstančios eglės, kurių būklė po žūties buvo eliminuojama iš skaičiavimų.

Žemaitijos KMS tiriamojo upelio baseino tiriamuose ploteliuose augančių medžių lajų vidutinė defoliacija per tiriamąjį laikotarpį nuo 1994 m. vidutiniškai mažėjo taip pat po 0,06 % per metus. Per paskutiniuosius 5rius metus gerėjimo intensyvumas sumažėjo ir reikšmingiausiai eglių. Sumažėjo ir beržų būklės atsikūrimo intensyvumas. Stabiliausios būklės išliko pušys.

Atspariausios nepalankiems veiksniams Žemaitijos KMS baseine buvo paprastosios pušys. Medžių išsivystymo laipsnis neturėjo esminės įtakos šios rūšies medžių vidutinės defoliacijos kaitai.

2020-2025 m. laikotarpis pasižymėjo skirtingo reikšmingumo medžių lajų būklės pablogėjimo procesu, taip kaip ir Auk6taitijos KMS. Šiuo laikotarpiu reikšmingiausiai blogėjo pušų lajų būklė, kurią reikšmingai galėjo sąlygoti intensyvi lajų snieglauža. Vidutinė lajų defoliacija pušų didėjo po 1,6 % per m. Beržų lajų būklė taip pat reikšmingai di9dėjo po 1,9 % per m., kas patvirtino nustatyta tendenciją Aukštaitijos KMS baseine. Mažiausiu intensyvumu ir mažiausiu reikšmingumu didėjo eglių vidutinė defoliacija, kuri siekė 0,4 % per m. 2023 m. išskirtiniai eglių būklės kaitoje. Kaip ir 2022 Aukštaitijos KMS, Žemaitijos KMS eglynuose buvo registruojamas kenkėjų protrūkis, kurio metu eglės buvo intensyviai pažeistos, o žuvusių medžių skaičius buvo artimas didžiausiam per visą tiriamąjį laikotarpį.

2025 m. tirtų medžių vidutinė defoliacija viršijo net 25 proc ribą, informuodama, kad šio regiono miškai yra jau vidutiniškai pažeisti lyginant su silpnai pažeistais miškais Aukštaitijos KMS baseine.

Lyginant miškų būklę tarp atskirų stočių nustatyta, kad tyrimų pradžioje blogesne medžių būkle dažniausiai pasižymėjo Aukštaitijos KMS teritorijoje augantys medžiai ir tik nuo 2004 m. Žemaitijos KMS teritorijose augančių medžių vidutinė defoliacija pradėjo viršyti Aukštaitijos KMS medžių vidutinę defoliaciją. Dėl spyglius graužiančių kenkėjų antplūdžio, Dzūkijos KMS pušynų būklė tyrimų pradžioje buvo blogiausia lyginant su kitomis KM stotimis.

2009-2015 m. laikotarpis pasižymėjo pakankamai reikšmingu tirtų medžių lajos būklės atsikūrimu. Jei Aukštaitijos KMS šis sumažėjimas buvo reikšmingas ir viršijo 2%, tai Žemaitijos KMS nereikšmingas – 0,8%. ***2015 m. tirtų medžių lajų defoliacija vertintina, kaip viena iš mažiausių per visą tiriamąjį laikotarpį abiejose KM stočių baseinuose***.

2020-2024 m. laikotarpiu Aukštaitijos KMS medžių lajų būklė pasidarė reikšmingai geresnė negu Žemaitijos KMS baseine augančių medžių. Palankios klimatinės sąlygos sąlygojo intensyvų būklės pagerėjimą, po kurio medžių būklė stebimuose baseinuose buvo viena iš geriausių per visą tiriamąjį laikotarpį, ypač Aukštaitijos KMS baseine. Tačiau paskutiniuoju laikotarpiu nustatytas nors dar ir nereikšmingas būklės blogėjimo procesas gali būti kaip traktuojamas kaip pradžia naujų kaitos tendencijų visoje miško ekosistemų biotos būklės ir gausumo kaitoje.

Išskirtinis miškų (pušų) būklės kaitos požymis: jei tyrimų pradžioje pušų būklė buvo blogiausia pfietinėje Lietuvos dalyje, t.y. Dzūkijos regione, tai paskutiniuoju laikotarpiu pušų būklė Dzūkijos KMS yra geriausia lyginant su kitomis stotimis, kuriose pušynų būklė iš esmės nesiskiria.

Per tiriamąjį laikotarpį dėl įvairių priežasčių Aukštaitijos KMS žuvo beveik 30%, Žemaitijos KMS 25 % ir Dzūkijos KMS 56 % šiuose stotyse stebėtų pušų. Žymiai daugiau žuvo paprastųjų eglių. Per 33 m. laikotarpį jų skaičius viršijo 63% ribą Žemaitijos KMS ir Aukštaitijos KMS baseine. Dzūkijos KMS dėl itin mažo stebėtų eglių skaičiaus, jų žuvimo intensyvumas siekė net 75 %. Pagrindinės tokio intensyvaus eglių žuvimo priežastis - brandžių ir perbrendusių eglių vėjovartų ar snieglaužų lydima eglinio žievėgraužio tipiografo invazija, ypač po sauso ir karšto pavasario.

Didžiausiu atkritimo intensyvumu pasižymėjo beržai. Žemaitijos KMS jų atkritimo intensyvumas per 32 m. laikotarpį pasiekė 55%, o Aukštaitijos KMS viršijo net 70 %. Kadangi beržai neturi tiesioginių kenkėjų iš esmės nulemiančių jų žūti, tai pagrindinėmis priežastimis sąlygojančiomis tokį aukštą beržų mirtingumą reiktų laikyti klimatines sąlygas, ir būtent sausras ir karščio bangas, prie kurių ši medžių rūšis yra prisitaikiusi blogiausiai, bei vėjalaužas ir snieglankas.

Užregistruotus neigiamus būklės pokyčius galėjo sąlygoti nepalankios klimatinės sąlygos – sausros vegetacinio sezono viduryje, kurių pasėkoje eglynus intensyviai pažeisdavo eglinis tipografas. Reikšmingos įtakos visų medynų būklei turėjo vėjovartos, vėjalaužos ir snieglaužos - ypač Žemaitijos KMS bei karštos ir sausos vasaros. Jei 1996-1998 m. miškų blogesnę būklę buvo galima aiškinti didesnėmis teršalų koncentracijomis ore ir krituliuose, tai 2006-2007 m. laikotarpiu padidėjusi vidutinė visų medžių defoliacija kompleksiško aplinkos veiksnių poveikio rezultatas, kur išskirtinė įtaka turėjo tekti akivaizdžiai padidėjusioms rūgštinančių komponenčių koncentracijoms ore bei krituliuose bei karščio bangoms, sausrai ir maksimaliomis ozono koncentracijoms 2006 m.

2020 m. Aukštaitijos KMS baseine žuvo 13 eglių ir 1 pušis; Žemaitijos KMS baseine žuvo 23 eglės ir 1 drebulė. Pagrindine eglių žuvimo priežastis buvo eglinių tipografų pažeidimai. Paskutiniuoju laikotarpiu išskirtiniai šiuo atžvilgiu buvo 2022 m. Aukštaitijos KMS ir 2023 m. Žemaitijos KMS, kai eglių atkritimas dėl žievėgraužio žalos siekė vienas iš didžiausių reikšmių per visą tiriamąjį laikotarpį.

2024 m. padidėjusį beržų žuvimą sąlygojo dėl užtvindymo žuvę beržai 38 tyrimo barelyje. Medžių būklės pablogėjimui 2020-2025 m. laikotarpiu išaiškinti bus atlikta detali aplinkos veiksnių kompleksiško poveikio analizė.

Pateikti LAI nustatyti hemisferinio fotoaparatu 2010-2025 m. taip pat įrodo, kad medynų būklė KM stočių baseinų teritorijose gerėja. Palyginus KMS baseine augančių medžių vidutinį LAI indeksą, matyti, kad tankiausia miško danga pasižymi Aukštaitijos KMS, kur LAI siekia 2 m^2/m^2, kiek mažesnis LAI Žemaitijos KMS – 1,9 m^2/m^2 ir mažiausias Dzūkijos KMS LAI – 1,2. ***LAI rezultatai nustatyti hemisferiniu fotoaparatu nerodo esminių medynų pokyčių, dėl intensyvaus miško atžėlimo pažeistuose plotuose. 2010-2025 m. laikotarpiu LAI abiejose stotyse pasidėjo nereikšmingai, vos po 0,008 m^2/m^2.***

Nustatyta, kad per 1993-2020 m. laikotarpį 1 ha plote gyvų medžių vidutiniškai sumažėjo nuo 651 iki 368 vnt., arba (43,5%), kas sudarytų po 1,6% visų stebimų medžių per metus. 2020-2025 m. laikotarpiu, dėl naujų medžių įraukimo į apskaitą jų skaičius 2020 m. pasiekė 461, o jau po 5 metų, dėl nudžiūvimo, sumažėjo vėl iki 390 vnt./ha.

Paprastosios pušies ir eglės medžių dinamika rodo, kad per tiriamąjį laikotarpį pušies medžių sumažėjo nuo 128 vnt iki 108 vnt/ha; medžių iškritimas siekė 16,4%; paprastosios eglės medžių sumažėjo nuo 449 vnt iki 231 vnt/ha; medžių iškritimas siekė 48,5% ir beržų – nuo 63 iki 30 vnt/ha, medžių iškritimas sudarė net 52,3%. Tai sudarytų atitinkamai po 0,61%, 1,8% ir 1,9% šių rūšių medžių per metus.

***Tiriant medžių skersploč**ių sumos (ΣG) pokytį bei išlikusių gyvų medžių skersploč**ių sumos prieaugį, nustatyta, kad eglių ir beržų kamienų skersploč**ių sumos pokytis per 32 m. laikotarpį Aukštaitijos KMS yra neigiamas, t.y. sumažėjęs daugiau negu 2,8 m^2/ha ir 1,2 m^2/ha atitinkamai. Pušų šio rodiklio pokytis yra teigiamas ir viršija 2 m^2/ha.*

***Išlikusių gyvų medžių skersploč**ių sumos prieaugis tarp tirtų rūšių yra priešingas. Didžiausių prieaugiu pasižymėjo išlikusios eglės, kurių šis rodiklis sudarė net 6 m^2/ha per tiriamąjį laikotarpį. Kiek silpnesniu prieaugiu pasižymėjo pušys – apie 4 m^2/ha ir silpniausių ar beveik neregistruojamu prieaugiu pasižymėjo beržai – vos 0,5 m^2/ha per visą tiriamąjį laikotarpį. Tokiu būdu bendras likusių gyvų medžių prieaugis Aukštaitijos kMS baseine sudarė 10,5 m^2/ha.*

Tokiu būdu Aukštaitijos KMS teritorijos medynų skersploč**ių suma 1993-2025 m. laikotarpiu praktiškai išlieka stabili. Jei tyrimų pradžioje siekė 33,3 m^2/ha, tai 2015 m. sumažėjo iki 30,7 m^2/ha, tai 2020 m. padidėjo iki 31,62 m^2/ha, o įskaitant ir prieaugį, t.y. medžius, kurių skersmuo pradėjo viršyti 10 cm – 33,5 m^2/ha (2.9 pav.). ***Paskutiniaisiais 2025 m. skersploč**ių bendra suma pirmą kartą sumažėjo iki 31,5 m^2/ha. Tai brandžių ir perbrendusių medynų vystymosi eigos būdingas bruožas, kai medžių mirtingumas susilygina su atsikūrimu ar jį pradeda lnkti.*

Apibendrinus medžių mirtingumo, atsikūrimo ir prieaugio rezultatus matyti, kad per 32 m. laikotarpį natūraliai besivystančios miško ekosistemos produktyvumas praktiškai išliko stabilus, nors net su priaugusiais medžiais palaipsniui mažėja, t.y. per 32 metus sumažėjo 1,2 m^2/ha***. Tai naujas procesas pirmą kartą užregistruotas Aukštaitijos KMS, Ažvinčių sengirėje.***

Didžiausią tūrio prieaugį mišriame miške demonstravo eglės, po 2,3 m^3/ha per metus. Kiek mažesniu tūrio prieaugiu pasižymėjo pušys - po 2,6 m^3/ha per metus. Beržų tūrio prieaugis sudarė po 0,25 m^3/ha per metus. Tokiu būdu ***Aukštaitijos KMS baseino miškų, kurie priklauso vienam seniausių Ažvinčių sengirės rezervatui, išlikusių gyvų medžių tūrio prieaugis sudarė po 5,15 m m^3/ha per metus, kai tuo tarpu dar 2020 m. Šis rodiklis siekė 5,7 m^3/ha per metus***.

Jei dar tyrimų pradžioje negyvos medienos kiekis tyrimo plotuose siekė vos po 43 t/ha, tai paskutiniaisiais metais jos kiekis jau turėjo sudaryti 118 t/ha, t.y. per 22 m laikotarpį kasmet Aukštaitijos baseine negyvos medienos masė didėjo po 3,4t/ha. Bendras biomasės balansas rodo, kad Aukštaitijos KMS baseino 1 ha bendra biomasė didėjo nuo 261t/ha iki 330 t/ha, arba po 3,1 t/ha per metus, kas sudarytų virš 5 m^3 medienos prieaugio hektare.

Per šį laikotarpį intensyviausiai didėjo pušynų gyvoji biomasė. Padidėjimas sudarė nuo 105t/ha iki 119 t/ha. Stabili biomasė išliko eglynų, kuri svyravo priklausomai nuo metų apie 80 t/ha ir reikšmingai mažėjo lapuočių nuo 21t/ha iki 13t/ha.

2025 m. pasižymėjo naujų medžių indėliu į biomasės kaitą Aukštaitijos KMS ir padidėjusiu atkritimu 2022 m. dėl žievėgraužio pažeidimų. Gyvų medžių masė sumažėjo iki 223 t/ha, o mort masė išaugo nuo 124 t/ha iki 143 t/ha.

2025 m. pagal medžių kamienų suirimo laipsnį mort masė pasiskirstė taip: Mort 1 – 18%, Mort 2 – 9 %, Mort 3 – 14 %, Mort 4 – 18 %, Mort 5 – 33 % ir Mort 6 – 51 %. Galima teigti, kad apie 50 % visų per visą stebėjimą žuvusių medžių mediena yra susiskaldžiusi jau be jokių likusių požymių. Tai sausros ir ypač intensyvios kenkėjų invazijos rezultato padariniai, kurie pastaruoju laikotarpiu Aukštaitijos miškuose jau nestebimi.

Gyvų medžių biomasės kaitoje nustatyti ryškūs pokyčiai. Iki 2020 m. medynų biomasė vidutiniškai padidėjo iki 230 t/ha, įskaitant naujus į apskaitą įtrauktus medžius (prieaugį), o jos pokytis lyginant su 1999 m. padidėjo 25,7 t/ha, arba 1,22 t/ha per metus. Paskutinysis 5 m. laikotarpis parodė, kad gyvų medžių masė reikšmingai sumažėjo iki 223 t/ha, t.y. masės padidėjimas sumažėjo iki 0,7 t/ha per m.

Priklausomai nuo biomasės pokyčių keitėsi ir bioelementų kiekis. Per 1999-2025 metų laikotarpį padidėjo atitinkamai: N +28 kg/ha (1.1 kg/m.); P 4.5 kg/ha (0.17 kg/m.); K 12.5 kg/ha (0.5 kg/m.); Ca 11.2 kg/ha (0.4 kg/m.); Mg 4.3 kg/ha (0.17 kg/m) ir Fe 0 kg/ha (0,0 kg/m.) ir Mn 3.3 kf/ha (0.13 kg/m.). Tai 9-10 % šių lementų kiekio lyginant su 1999 m.

Negyvosios medienos kiekis, kuris per 32 metų laikotarpį dūlėjo bei iš dalies kaupėsi ir praturtino dirvožemį, didėjo nuo 41 t iki 143 t/ha, kas sudarė po 3.2 t/ha per metus. Ypač reikšmingai didėjo eglių mort masė – 73 t/ha arba po 2,3 t/ha per metus; beveik 3 kartus mažesniu intensyvumo padidėjo pušų – 14,7 t/ha arba 0,55 t/ha per metus ir kiek tai dar mažiau lapuočių medžių rūšių – 12,1 t/ha arba 0,38 t/ha per metus.

Per tiriamąjį laikotarpį nuo 1993 iki 2025 į atmosfera grįžo ar pateko į dirvožemį su krituliais 145 kg/ha azoto, 12.8 kg/ha P, 53 kg/ha K, 115 kg/ha Ca, 19 kg/ha Mg, 6 kg/ha Fe, 26 kg/ha Mn ir 32 kg/ha S/ha.

Žemaitijos KMS baseine nustatyta, kad iki 2015 m. laikotarpio 1 ha plote gyvų medžių vidutiniškai sumažėjo nuo 605 iki 372 (38,5% arba 1,8% per metus). Paprastosios pušies ir eglės medžių dinamika rodo (50 pav.), kad pušies iškritimas siekė 22.9% (1,1% per m.). Dėl žievėgraužio tipografo ir nepalankių klimatinių veiksnių (vėjalaužų ir vėjavartų) eglės žuvimo intensyvumas pasiekė 39,2% (1.9% per m.). Beržų iškritimas buvo intensyviausias (kaip ir Aukštaitijos KMS) ir sudarė 48,7% arba 2,3 % per metus.

Iki 2020 m. laikotarpį Žemaitijos KMS tirtų medžių skaičius sumažėjo nuo 584 iki 325 vnt/ha ir tai sudarė beveik 45 % visų stebėtų medžių. Intensyviausiai sumažėjo eglių, kiek mažiau beržų ir mažiausiai pušų.

Per paskutinįjį 2021-2025 m. laikotarpį stebimų medžių skaičius sumažėjo nuo 379 iki 305 vnt./ha. ***ir tai sudarė beveik 20 % visų stebėtų medžių. Intensyviausiai sumažėjo eglių, ypač 2023 m., kiek mažiau beržų ir mažiausiai pušų.***

Per 31 m. laikotarpį Žemaitijos KMS eglių kamienų skersploščių suma sumažėjo nuo 23,5 iki 13 m^2/ha arba apie 0,34 m^2/ha per metus. Pušų kamienų skersploščių sumos pokytis buvo teigiamas ir siekė apie 0,6 m^2/ha, o beržų praktiškai išliko nepakitęs.

Intensyviausiu prieaugiu, kaip ir Aukštaitijos KMS, pasižymėjo išlikusios eglės. Šios rūšies ***medžių vidutinis skersploščių sumos prieaugis per tiriamąjį laikotarpį sudarė net apie 7 m^2/ha. Pušų skersploščių sumos prieaugis sudarė apie 1,2 m^2/ha. Beržų prieaugis buvo mažiausias ir sudarė tik apie 0,6 m^2/ha arba 0,03 m^2/ha per m. Tai sumoje sudaro 8,2 m^2/ha, kas rodo, kad eglių metinis prieaugis ir toliau didėja.***

Įvertinus nudžiūvimą, Žemaitijos KMS teritorijoje augančių medynų skersploščių suma per tiriamąjį 31 m. laikotarpį vidutiniškai pakito nuo 29,4 m^2/ha iki 20,1 m^2/ha, t.y. sumažėjo 9,3 m^2/ha arba 32 %, o išlikusių gyvų medžių skersploščių prieaugis sudarė 8,8 (nuo 18,3 iki 27,1 m^2/ha) arba 32,6 % (1,55 % per metus).

Didžiausią tūrio prieaugį, eliminavus nudžiūvimą, demonstravo per visą tiriamąjį laikotarpį išlikusios gyvos eglės. ***Per 31 m. laikotarpį tik išlikusių gyvų eglių tūris padidėjo po 2,4 m^3/ha per metus. Kiek mažesniu tūrio prieaugiu pasižymėjo pušys, po 0,8 m^3/ha per metus. Beržų tūrio prieaugis po 0,3 m^3/ha per metus. Tokiu būdu Žemaitijos KMS baseino miškų išlikusių gyvų medžių tūrio prieaugis sudarė po 3,5 m^3/ha per metus.***

Apskaičiavus augančių medžių stiebų, šakų spyglių biomasę, nustatyta, kad Žemaitijos KMS 1 ha baseino plote augančių medynų biomasė nuo 1993 iki 1999 metų dėl medžių iškritimo sumažėjo vidutiniškai nuo 196t iki 185t/ha, t.y. apie 10 t/ha arba 5% biomasės. Per antrąjį tyrimų laikotarpį, t.y. nuo 1999 iki 2003 m. biomasė nežymiai dar padidėjo iki 187t/ha, tačiau jau per kitą laikotarpį vėl sumažėjo iki 179 t/ha. Paskutiniuoju 2010-2015 m. laikotarpiu medžių iškritimo intensyvumas buvo vienas iš mažesnių, dėl ko užregistruotas bedros gyvosios biomasės padidėjimas iki 189 t/ha.

Išskirtiniai 2020 m. rezultatai. Per 5 m. laikotarpį gyvų medžių biomasė sumažėjo nuo 190 iki 169 t/ha, t.y 21 t/ha arba daugiau nei 10 %. Toks intensyvus sumažėjimas buvo sąlygotas žievėgraužio tipografo pažeidimų, dėl ko paskutiniuoju laikotarpiu net 36 t/ha padidėjo negyvos medienos kiekis, pagrinde dėl eglių.

Dar intensyvesniu masės sumažėjimu pasižymėjo paskutinysis 2021-2025 m. laikotarpis. Tik per šį laikotarpį medynų tūris sumažėjo 32 m2/ha arba dar beveik 20%. Tai vėl gi įvyko dėl intensyvių kenkėjų pažeidimų 2023 m.

Paskirsčius medieną pagal jos suirimo laipsnį nustatyta, kad 2020 m. švieži sausuoliai sudarė Mort 1 36,5 t/ha, Mort 2 – 12,6 t/ha, Mort 3 29,1 t/ha, Mort 4 11,5 t/ha, Mort 5 28,1 t/ha ir visiškai, be likusių žymių suirę Mort 6 12,5 t/ha.

2025 m. švieži sausuoliai sudarė Mort 1 45,3 t/ha, Mort 2 – 37 t/ha, Mort 3 12,6 t/ha, Mort 4 29,1 t/ha, Mort 5 11,5 t/ha ir visiškai, be likusių žymių suirę Mort 6 40,6 t/ha.

Tokiu būdu eglių atsparumas nepalankiems aplinkos veiksniams buvo aukščiausias Žemaitijos KMS, pušų – Aukštaitijos KMS, o beržų žuvimo intensyvumas, kuris siekė beveik 50% visų tirtų beržų buvo vienodas abiejose stotyse. Tai gali būt pateikiamas kaip įrodymas, kad beržų atsparumas intensyviai besikeičiančioms aplinkos sąlygomis yra, skirtingai negu manytą, pakankamai ribotas.

Dzūkijos KMS baseine apskaičiavus augančių medžių stiebų, šakų, spyglių biomasę, nustatyta, kad Dzūkijos KMS 1 ha baseino plote augančių medynų biomasė per tiriamąjį laikotarpį padidėjo nuo 121 t iki 176 t/ha, t.y. 55 t/ha arba 31,2%, kas sudarytų po 1,8 t/ha arba 1 % per metus atitinkamai.

Per tą patį laikotarpį mort masė išaugo nuo 5 t/ha iki 30 t/ha, kas sudarytų apie 0,8 t/ha per m. Tai ženkliai mažesnis kiekis mort masės lyginant su Aukštaitijos ir ypač Žemaitijos KMS.

Pagal medžių kamienų suirimo laipsnį mort masė pasiskirstė taip: Mort 1 –5,1 arba 5.8%, Mort 2 8,3 arba 9.4 %, Mort 3 – 18,0 arba 20.6 %, Mort4 26,3 arba 30.0%, Mort5 30,0 arba– 34.2%.

Apibendrinus gautus rezultatus galima teigti, kad apie 30 % visų per visą stebėjimą žuvusių medžių mediena, pastaruoju laikotarpiu yra susiskaldžiusi jau be jokių likusių požymių. Tai sausros ir ypač intensyvios kenkėjų invazijos rezultato padariniai, kurie šiandieną Dzūkijos miškuose jau nepastebimi.

Aukštaitijos KMS baseine augančių miškų biomasė 1 ha viršija 200 t/ha, kai tuo tarpu Žemaitijos KMS nesiekia 150 t/ha, o Dzūkijos KMS viršija 150 t/ha ribą. Nustatytas mažesnis LAI Dzūkijos KMS rodo, kad pušų lajos yra labiau ažūrinės, jų lajų ilgiai o ir lajos tūriai yra mažesni nei eglių, dėl ko praeinančios šviesos srautas pro lajas yra didesnis. Taip pat šio srauto nemažina ir pomiškis, kurio buvo gausu Aukštaitijos ir Žemaitijos KMS baseinuose.

Palyginus bioelementų kiekius mort masėje formavimosi intensyvumą tarp stočių nustatyta, kad Žemaitijos KMS mort masė formuojasi intensyviau, bei su ja į dirvožemį patenka daugiau bioelementų negu Aukštaitijos KMS baseine ir ypač Dzūkijos KMS, kur pušų atkritimas kelis kart mažesnis negu kitose KM stotyse..

2020 m. Aukštaitijos KMS teritorijoje iš 592 atrinktų viršaujančių, vyraujančių ir iš dalies stelbiamų miško medžių 65 identifikuoti seni ir švieži pažeidimai, kurie iš esmės turėjo ar galėjo turėti įtakos jų būklę. Paskutiniaisiais 2025 m. tokių pažeidimų registruota 39 vnt.

Daugiausiai pažeista išlieka medžių kamienų apatinė dalis. Pažeidimai šioje srityse jau daugelį metų beveik siekia ar viršija 50% visų užregistruotų pažeidimų. Kiek mažiau pažeistas lajos kamienas – iki 27% pažeidimų. Tai stipraus vėjo padarinys. Kitoms sritims tenka žymiai mažiau pažeidimų. Pažeidimai šaknų ir priekelminėje kamieno srityse indikavo vėjavartas, kurių AKMS baseine buvo užregistruota iki 5,3 % visų medžių. Visame kamiene, viršutiniame kamieno dalyje ir šakose užregistruota maždaug iki 6% visų pažeidimų.

Dažniausiai pasikartojantis pažeidimas buvo: atviros žaizdos. Šis pažeidimas viršijo 46% visų pažeidimų. Tai įvairaus senumo bei intensyvumo elnių nulopyti eglių kamienai. 25% pažeidimų sudarė viršūninio ūglio ar viršūnės netekimas, kurį sąlygojo snieglaužos ir vėjalaužos. Žievėgraužio topografo, ūglių ir lapų pažeidimai 2020 m. viršijo kaip ir 2019 m. 13 %, o vėžiniai susirgimai ir įvairūs kamieno nulenkimai sudarė apie 3 %.

2020 m. daugiausiai pažeistos buvo paprastosios eglės, kurios sudarė virš 80% visų pažeistų medžių, ar apie 30% visų stebėtų eglių. 5% visų pažeidimų teko beržams, ar 1% visų stebėtų beržų ir 10% visų pažeistų medžių pušimas, ar 5% visų stebėtų pušų.

Žemaitijos KMS teritorijoje daugiausiai pažeidimų rasta viso kamieno srityje (4). Pažeidimai šioje srityje padidėjo iki 41% visų užregistruotų pažeidimų. Tai žievėgraužio tipografo medžio pažeidimo sritis. Pažeidimai lajos kamiene siekė 27 %. Padidėjo dėl pasikartojančių sausrų pažeistų lapų ar spyglių (9) – 19 % ir viršutinės kamieno dalies pažeidimų (5) –9 %. Mažiausiai pažeidimų registruota šakų (7) srityje ir apatinėje kamieno dalyje (3). Šaknų ir priekelminėje (1-2) srityse paskutiniaisiais metais pažeidimų nerasta.

Dažniausiai pasikartojantis pažeidimas buvo po pasikartojančių sausrų eglinio tipografo pažeidimai (25). Kurių skaičius lyginant su 2019 m. sumažėjo iki 45%. Dvigubai mažiau pažeidimų registruota lajos kamieno srityje (21) ir ūglių/lapų pažeidimų (24). Jų skaičius šioje srityje sumažėjo iki 20-22 %. Tokį šio pažeidimo registracijų skaičių sąlygojo vėl pasikartojančios vėjalaužos ir snieglaužos. Vos kelis procentus pažeidimų sudarė atviros žaizdos (3), sakotakių pažeidimai (4) ir nulaužtas kamienas (11).

Daugiausiai pažeistos buvo paprastosios eglės, kurios sudarė virš 80% visų pažeistų medžių ir apie 15% pušys.

Apibendrinus 16 metų pažeidimų tyrimo rezultatus Aukštaitijos KMS nustatyta, kad paskutiniuoju laikotarpiu mažėja pažeidimų priekelminėje, šaknų srityje (sumažėjo vėjavartų) ir kamieno srityje, tačiau vėl pradėjo didėti pažeidimai lajoje. Žievėgraužio tipografo pažeidimų intensyvumas Aukštaitijos KMS baseine nors dėl pasikartojančių sausrų padidėjo, bet išlieka maždaug panašiame lygmenyje kaip ir ankstesniais metais.

16 metų pažeidimų tyrimo rezultatai Žemaitijos KMS parodė, kad dėl pasikartojančių sausrų žievėgraužis tipografas dažniausiai pažeidžia visą eglės kamieną, ko pasėkoje tokie medžiai žūna. Šio kenkėjo pažeidimų skaičius viršija 50 % visų registruotų miške pažeidimų ir 12,2% visų stebėtų eglių. Tai besiformuojanti nauja grėsmė brandiems ir perbrendusiems eglynams Vakarų Lietuvos regiono miškams.

Tyrimų pradžioje žymiai intensyviau buvo pažeidžiami Aukštaitijos KMS baseine augantys medžiai. Šis procesas tęsėsi iki 2015 m. Po šių metų, kaip ir medžių lajų būklės kaitoje registruojamas priešingas procesas – Aukštaitijos KMS pažeidimų pradeda mažėti, o reikšmingai išaugo Žemaitijos KMS baseine augančių medžių pažeidimų skaičius, kuris jau paskutiniuoju laikotarpiu (2021-2025 m., reikšmingai viršija pažeidimų intensyvumą, nustatytą Aukštaitijos KMS.

2020 M. ĮVARDINTA GRĖSMĖ DĖL DRĖGMĖS TRŪKUMO šiame Lietuvos regione pasitvirtina. Medžių lajų būklė tapo blogesnė nei Aukštaitijos KMS, o medžių pažeidimo intensyvumas didesnis..

Beržų pažeidimo intensyvumas tiriamosiose stotyse reikšmingai nesiskiria. Tyrimo pradžioje daugiau pažeidimų buvo registruojama Žemaitijos KMS2012-2018 m. laikotarpiu Aukštaitijos KMS ir paskutiniuoju laikotarpiu: 2022-2024 Žemaitijos KMS, o 2025 dėl užtvinimo Aukštaitijos KMS.

Eglės intensyviau buvo pažeidžiamos Aukštaitijos KMS. Tik 2023 m. dėl žievėgraužio protrūkio Žemaitijoje, žuvusių medžių skaičius šio regiono stotyje viršijo pažeidimų skaičių Aukštaitijos KMS. Ryškiausiai skiriasi pušų pažeidimų intensyvumas. Tyrimų pradžioje iki 2015 m. pušų pažeidimo intensyvumas tarp šių stočių buvo nereikšmingas, ar net kiek tai didesnis Aukštaitijos KMS, tai po šių metų pušys Žemaitijos KMS pažeidžiamos 2-3 kartus intensyviau Žemaitijos KMS. Tai stiprių snoieglaužų rezultatas, kai dėl šlapio sniego buvo laužomos šakos ar nulaužiama ir pušies visa laja, dėl ko pušys neišvengiamai nudžiūdavo.

Žuvusių medžių skaičiaus dinamika rodo, kad per tiriamąjį laikotarpį, eliminavus išskirtinius 2010-2011 metus, kasmet vidutiniškai iškrenta apie 1,6-1,7% medžių. 2016-2017

m. I stacionare žuvo atitinkamai 4 ir 2 medžiai, II -jame žuvo 5 ir 0 medžių bei III-jame 1 ir 0 medžių. 2018 m. žuvo po du medžius I ir III stacionaruose, o 1 – II stacionare. Tai vidutinis medžių atkritimo intensyvumas, kuris stebimas stacionaruose nuo pat tyrimų pradžios, t.y. 1993 m.

Paskutiniuoju 2021-2025 m. laikotarpiu stebimas žuvusių medžių augimas visuose trijuose stacionaruose. Ypač daug žuvusių medžių buvo registruojama 2025 m. I ir II stacionare, o III stacionare didžiausias žuvusių medžių skaičius užregistruotas 2023 m.,

Medžių lajų defoliacijos duomenys rodo, kad visų medžių vidutinė defoliacija iki 2004 m. laipsniškai mažėjo. Po nedidelio padidėjimo, defoliacijos mažėjimas dar tęsėsi iki 2015 m. 2016-2025 m. laikotarpių miškų būklė tiriamuose objektuose turėjo tendenciją blogėti. Išimti tik sudaro 2020 m., ***meteorologinės sąlygos, kai po besikartojančių sausrų 2018-2019 m. buvo ypač palankios medžių būklei ir jų augimui. Visuose tyrimų stacionaruose augančių medžių lajų būklė gerėjo kaip ir visame upelio baseine.***

Paskutiniuoju laikotarpiu 2021-2025 m., visų stacionarų medžių lajų būklė pradėjo blogėti, jų vidutinė defoliacija padidėjo apie 2-3 %.

Geriausios ir pakankamai stabilios būklės išlieka pušys. Tik 2010-2013 m. laikotarpiu pušų lajų vidutinė defoliacija buvo padidėjusi iki 18-19 % ribose. Paskutiniuoju laikotarpiu, iki 2020 m. klimatiniai veiksniai taip pat pradėjo sąlygoti pušų būklės atsikūrimą, ir tik 2021-2025 m. laikotarpiu pušų lajų būklė reikšmingai pablogėjo. Jų vidutinė defoliacija išaugo net 5 %.

Žemaitijos stacionare bendras medžių iškritimas per 25 m. laikotarpį siekia 37,6% ar 1,5% per metus. Nustatyta, kad žuvusios eglės yra įvairaus dydžio, nuo smulkių, atsilikusių augime iki stambių, dominuojančių ir viršaujančių medyne. Pagrindinė šių medžių žūties priežastis - entokenkėjai ir vejalaužos, o smulkesnių medžių – natūralus užstelbimas.

. ***2014 m. dėl žievėgraužio topografo žuvo 3 eglės ir tik po 3 metų, 2017 m. vėl žuvo dvi eglės. 2018 m. žuvusių medžių stacionare neregistruota, tik vėl dėl šio kenkėjo pažeidimo, trijų eglių lajų būklė buvo įvertinta kaip labai prasta, t.y. defoliacija siekė 90 %. Tai potencialūs 2019 m. sausuoliai. 2019 m. žuvo 6 eglės.***

2015, 2018, 2020 ir 2025 m. žuvusių eglių tyrimo stacionare neregistruota, tačiau didžiausias jų skaičius nustatytas 2023 m., dėl žievėgraužio tipografo pažeidimų..

2021-2025 m. laikotarpiu eglių defoliacija didėjo dėl pažeidimų, kenkėjų židiniui užgesus, 2025 m. eglių vidutinė defoliacija beveik susilygino su 2020 m. vidutine jos reikšme.

Dzūkijos KMS stacionare didesnis medžių iškritimas buvo registruojamas tyrimų pradžioje, kai Dzūkijos pušynai buvo masiškai pažeisti spyglius graužiančių kenkėjų. Per tiriamąjį laikotarpį registruojamas tik vos 0,5 % intensyvumo pušų džiūvimas, kuris pasireiškė vos per keletą metų. Dėl šios priežasties medžių žūtis ir vidutinė defoliacija šiame stacionare neturėjo jokio tarpusavio ryšio.

Vyraujančių ir atsilikusių augime medžių vidutinės defoliacijos kitimo pobūdis tiriamuoju laikotarpiu buvo analogiškas. Tik didesnių medžių vidutinė defoliacija buvo mažesnė, o žemesnių, atsilikusių augime – didesnė.

Vidutinės defoliacijos kaitos rezultatai parodė pakankamai reikšmingą vidutinės defoliacijos mažėjimo trendą, kuris vidutiniškai siekė po 0,3-0,4 % per metus. Tai geriausias miškų būklės kaitos rodiklis tarp visų tirtų objektų.

2021-2025 m. pušų lajos didėjimo tendencija, kuri buvo nustatyta Aukštaitijos KMS stacionaruose, Dzūkijos KMS nepasitvirtino.

Aukštaitijos KMS I stacionare gyvų medžių tūris per 32 m. laikotarpį padidėjo nuo 388 m^3/ha iki (468 m^3/ha -2020 m.) , kas sudaro 80,5 m^3/ha arba 3,1 m^3/ha per metus. Per tą patį laikotarpį žuvusių medžių tūris didėjo iki 110 m^3/ha, t.y. 4 m^3/ha per metus. Didžiausiu prieaugiu pasižymėjo eglės 59 %, kiek mažesniu pušys 21 %, o beržų tūris sumažėjo 45 %.

II stacionare gyvų medžių tūris padidėjo nuo 632 m^3/ha iki 784 m^3/ha , t.y. 151 m^3/ha arba 5,8 m^3/ha per metus. Per tą patį laikotarpį žuvusių medžių tūris didėjo iki 119 m^3/ha, t.y. 4.6 m^3/ha per metus. Didžiausiu prieaugiu pasižymėjo drebulės, kurių prieaugis per tiriamąjį laikotarpį sudarė daugiau negu 110 %, pušų prieaugis siekė 23 %, o eglių tik 13 %. Beržų prieaugis šiame stacionare buvo vienas iš didžiausių ir siekė 38 %.

III stacionare gyvų medžių tūris dėl intensyvių vėjavartų sumažėjo nuo 410 m^3/ha iki 312 m^3/ha , t.y. 98 m^3/ha. Per tą patį laikotarpį žuvusių medžių tūris didėjo iki 245 m^3/ha, t.y. 9,4 m^3/ha per metus. Labiausiai nukentėjo drebulės. Šios medžių rūšies stacionare neliko. 30 % sumažėjo eglių tūris ir 20 % pušų.

Tirtų medžių rūšių kamieno skersmens ir aukščio analizė parodė, kad per tiriamąjį laikotarpį intensyviausiai visuose stacionaruose į skersmenį ir aukštį augo eglės, kiek mažesniu augimo intensyvumu pasižymėjo beržai ir žemiausiu, ypač į aukštį pušys.

Žemaitijos KMS augalijos tyrimų stacionare gyvų pagrinde eglių tūris per 27 m. laikotarpį padidėjo nuo 407 m^3/ha iki 622 m^3/ha, kas sudaro 215,5 m^3/ha arba 8,3 m^3/ha per metus. Per tą patį laikotarpį žuvusių medžių tūris didėjo iki 67 m^3/ha, t.y 2,6 m^3/ha per metus.

2021-2025 m. laikotarpiu gyvų medžių tūris sumažėjo beveik 100 m3/ha

Intensyviau padidėjo eglių skersmuo, beveik 9,1 cm, arba 0,35 cm kasmet. Tai sudaro 38 % eglės vidutinio skersmens nustatyto 1994 m. Eglių vidutinis aukštis padidėjo beveik 7 m, 33 % nuo buvusio 1994 m. ir atitinkamai 0,27 m kasmet. Tai lėmė tokį didelį prieaugio padidėjimą šiame stacionare.

Dzūkijos KMS tirtų medžių stiebų tūrio analizė parodė, kad augalijos tyrimų stacionare gyvų pušų tūris per 32 m. laikotarpį padidėjo nuo 257 m^3/ha iki 456 m^3/ha, kas sudaro beveik 200 m^3/ha arba 6,2 m^3/ha per metus. Per tą patį laikotarpį žuvusių medžių tūris didėjo iki 0 iki 18 m^3/ha, t.y 0,5 m^3/ha per metus.

Skirtingų rūšių produktyvumo analizė parodė, Kad Aukštaitijos KMS stacionaruose pati produktyviausia medžio rūšis yra drebulė, kurios produktyvumo buvo 0,44m3/m2. Kiek mažesniu produktyvumu pasižymėjo eglės. Produktyviausios jos buvo I stacionare, kiek mažesnio produktyvumo II ir mažiausio produktyvumo III stacionare. Atitinkamai produktyvumo rodiklis kito nuo 0,35 iki 0,23 m3/m2. Žemaitijos eglių produktyvumas buvo 0,29 m3/m2, ir savo reikšme buvo tarp II ir III stacionaro produktyvumo lygmens. Pušų produktyvumas Aukštaitijoje iš esmės nesiskyrė ir sudarė 0,17 m3/m2. Dzūkijos KMS stacionare jis buvo kiek tai mažesnis – 0,13 m3/m2. Beržų produktyvumas buvo žemiausias ir siekė 0,15 m3/m2. Šie produktyvumo lygiai gerai charakterizavo šių rūšių bendrą produktyvumą Lietuvos miškuose.

Medžių lajos būklės ir jų žūties intensyvumo analizė parodė, kad tiriamuoju laikotarpiu Aukštaitijos KMS baseine bendrai medžių lajų būklei mažėjant po -0,11 % per metus, medžių atkritimo intensyvumas didėja po 0,04 % per metus. Nuo 2020 m. atkritimo intensyvumas padidėjo nuo 1 iki 5 % per metus.

Lapuočių medžių šie tirti parametrai kito silpniausiai: Vidutinė defoliacija mažėjo vos po -0,05 % per metus, o atkritimo intensyvumas didėjo po 0,07 % per metus. Tokį atkritimo intensyvumą lėmė paskutiniaisiais metais 2023-2024 m. reikšmingai padidėjęs žuvusių lapuočių, pirmoje eilėje beržų, skaičius.

Spygliuočių medžių rūšių tiriamieji rodikliai ir jų kaita išsiskyrė reikšmingai. Eglių vidutinė defoliacija mažėjo po 0,08 % per metus, kai tuo tarpu jų atkritimas didėjo net po 0,08 % per metus. Pušų lajų vidutinė defoliacija mažėjo intensyviausiai – po -0,12 % per metus o atkritimo intensyvumas mažėjo po -0,05 % per metus. Tai geriausiai prisitaikiusios prie mūsų aplinkos sąlygų medžių rūšies parametrai.

Įvertinus medžių rūšį, nustatyta, kad lapuočių medžių žūtis turi reikšmingos įtakos jų lajų vidutinės defoliacijos kaitai, kai atkritimui didėjant, didėja ir vidutinė defoliacija. Būtent šis rodiklis reikšmingai paaiškino iki 33 % vidutinės defoliacijos kaitos. Tokiu pat

patikimumu eglių atkritimo intensyvumas paaiškino jų vidutinės defoliacijos kaitą. Pušų atkritimo intensyvumas kiek tai silpniau lėmė defoliacijos kintamumą, paaiškindamas iki 24 % pastarosios kaitos.

Klimatinių rodiklių ir tirtų parametrų palyginamoji analizė rodo, kad šiltos žiemos teigiamai sąlygoja medžių lajų būklę, tik karščio bangos vegetacinio laikotarpio viduryje gali turėti neigiamos reikšmės, didindamos medžių lajų defoliaciją, ypač lapuočiams ir eglėms. Klimato atšilimas labiausiai teigiamai paveikė pušų lajų būklę. Daugeliu atveju krituliai mažino ir medžių atkritimą, išskyrus tik lapuočių medžių rūšis, pirmiausiai beržą. Labai drėgnas vegetacijos laikotarpis didino beržų atkritimą, kurį dažniausiai sąlygojo vėjavartos.

Apibendrinus gautis rezultatus buvo sukurti medžių būklės ir atkritimo intensyvumo daugialypės regresijos modeliai priklausomai atskirai nuo kritulių ir temperatūros ir galiausiai bendrai nuo jų kompleksiško poveikio. Tokiu būdu yra išaiškinama,, kurie meteorologiniai veiksniai: temperatūra ar krituliai yra reikšmingesni medžių būklei ir jų išgyvenamumui, intensyviai besikeičiančio klimato sąlygomis.

Aukštaitijos KMS baseine augančių eglių vidutinę defoliaciją lėmė krituliai liepos mėnesį praėjusio sezono kartu su einamojo sezono krituliais žiemos ir pavasario laikotarpio, kurių gausumas mažino defoliacija. Pasitvirtino jau senai nustatytas dėsningumas, kad praėjusio sezono rusens mėnesių kritulių kiekis blogina medžių būklę, indikuodami, kad tuo laikotarpiu medžių būklę teigiamai sąlygoja šiltas ir sausas ruduo. Šie meteorologiniai veiksniai paaiškino iki 60 % eglių vidutinės defoliacijos kaitos.

Eglių atkritimą skatino taip pat kritulių kiekis praėjusio sezono rudens mėnesių, o atsparumą žievėgraužiui tipografui didino praėjusio sezono vegetacijos laikotarpio ir ankstyvo pavasario kritulių kiekis. Būtent dėl ankstyviausios eglių vegetacijos, šio laikotarpio drėgmė sąlygoja eglių didelį atsparumą pažeidimams. Šie veiksniai paaiškino iki 45 % eglių atkritimo intensyvumo.

Kritulių poveikis pušų lajų defoliacijai ir atkritimui buvo kiek tai mažesnis. Praėjusio sezono kritulių kiekis liepos mėn. kartu su ankstyvo pavasario mėnesių kritulių kiekiu teigiamai sąlygojo lajų būklę, tuo tarpu rugsėjo mėn. kritulių kiekis blogino pušų lajų būklę, panašiai kaip ir eglių. Tie patys rodikliai lėmė ir pušų atkritimą. Atsparumą nepalankiems veiksniams čia skatino ne tik praėjusio sezono liepos mėn. kritulių kiekis bet ir visas intensyvaus augimo laikotarpio kritulių kiekis.

Panašiu pušims reikšmingumu kritulių kiekis sąlygojo ir lapuočių medžių defoliacijos ir jų atkritimo intensyvumo kaitą. ***Tie patys rodikliai kurie reikšmingai***

sąlygojo spygliuočių medžių būklę ir išlikimą sąlygojo ir beržų tirtus rodiklius, tik jų poveikis buvo atvirkštinis, indikuojantis, kad beržai blogiausiai yra prisitaikę išgyventi stresą pastarojo laikotarpio klimatinėse sąlygose. Gauti rezultatai rodo, kad dideli kiekiai kritulių vegetacijos laikotarpiu neigiamai veikia lapuočių būklę sukeldami jiems šaknų puvinį, ko pasėkoje tokia medžiai būna pažeidžiami vėjavartų. Dėl šios priežastie lapuočių, pagrinde baržų, atkritimą skatino ankstyvo pavasario ir vegetacijos laikotarpio gausūs krituliai, o kiek tai slopino tik vėlyvos žiemos mėnesių kritulių kiekis.

Temperatūrų poveikis tirtiems rodikliams buvo panašus ar kiek silpnesnis. Eglių vidutinės defoliacijos mažėjimą skatino rugsėjo mėnesio ir žiemos aukštesnės temperatūros, o būklę blogino pavasario ir praėjusio sezono vegetacijos vidurio karščio bangos, po kurių susidarydavo palankios sąlygos kenkėjams plisti. Dėl šios priežastis tai buvo pagrindiniai klimatiniai rodikliai paaiškinantys virš 30 % eglių žūties atvejų.

Skirtingai negu eglės gauti rezultatai, pušų lajų vidutinės defoliacijos mažėjimą skatino rugsėjo mėn. kartu su praėjusio sezono rudens ir einamojo sezono pavasario mėn. aukštesnės temperatūros. ***Nenustatytas nei vieno mėnesio karščio bangų neigiamas poveikis pušų būklei. Medžių atkritimą skatino tik karščio bangos vegetacijos pradžioje.***

Karščio bangos liepos mėn. kartu su šiltų pavasariu turėjo neigiamą poveikį lapuočių lajų būklei. Jų atkritimą skatino bendra vidutinė metų temperatūra, indikuodama, kad ***šylant klimatui beržams išgyventi stresą dėl karščio bangų ir gausesnių kritulių pasidaro vis labiau problematiška. Tai nauja grėsmė visiems Lietuvoje augantiems beržams.***

Apibendrinus gautus rezultatus nustatyta, kad klimatiniai veiksniai Aukštaitijos KMS paaiškino iki 65 % tirtų eglių vidutinės defoliacijos kaitos ir apie 50% jų atkritimo intensyvumo; 60 % pušų vidutinės defoliacijos ir 50 % jų atkritimo kaitos ir virš 65 % beržų vidutinės defoliacijos ir 50 % jų atkritimo intensyvumo.

Sausos medienos irimo greičio analizė rodo, Kad Aukštaitijos KMS baseine sausuolių destrukcija prasideda tik po 10 m. pertraukos. Per 16 metų laikotarpį beržų irimo greitis siekia po 0,06 irimo klasės per metus, eglės sausos medienos – iki 0,04, o pušies vos 0,01 irimo klasės per metus. Per 16 – 33 metų laikotarpį medienos irimo greitis reikšmingai didėja ir siekia“ beržų – po 0,18, eglės 0,20 ir pušies 0,19 irimo klasės per metus. ***Tokiu būdu pradinėje stadijoje po medžio žūties sausos medienos irimo intensyvumas viena klase padidėja daugiau negu per 10 metų, tuo tarpu vėlesniame amžiuje iena irimo klase sausa mediena padidėja per 5-7 metus.*** Didžiausiais tempais ira lapuočių, tame tarpe beržo mediena, o lėčiausiai – pušies mediena. Žuvusio medžio didesnis amžius ir didesni parametrai lėtina sausos medienos destrukcijos greičius.

Žemaitijos KMS baseine medžių lajų būklės kaitai reikšmingos įtakos turėjo medžių žūtis. ir jų žuvimo intensyvumo palyginamoji analizė parodė, kad medžių žūtis ne visada sutapo su blogėjančia medžių būkle. Bendrieji duomenys rodo, kad tarp šių rodiklių, skirtingai negu Aukštaitijos KMS, egzistuoja reikšmingas ryšis. Įvertinus medžių rūšį, nustatyta, kad lapuočių medžių žūtis turi reikšmingos įtakos jų lajų vidutinės defoliacijos kaitai, kai atkritimui didėjant, didėja ir vidutinė defoliacija. Būtent šis rodiklis reikšmingai paaiškino iki 65 % vidutinės defoliacijos kaitos.

Pušų atkritimo intensyvumas taip pat lėmė ir vidutinės defoliacijos kaitą, paaiškindamas iki 35 % pastarosios kintamumo. Eglių žūtis paaiškino net iki 63 % eglių vidutinės defoliacijos kintamumo.

Žemaitijos KMS baseine bendrai medžių lajų būklei mažėjant po -0,07 % per metus, medžių atkritimo intensyvumas didėja po 0,09 % per metus. Tai beveik 2 kartus intensyviau negu Aukštaitijos KMS. Nuo 2018 m. atkritimo intensyvumas padidėjo nuo 1,5 iki 6-7 % per metus.

Lapuočių medžių šie tirti parametrai kito silpniausiai: Vidutinė defoliacija mažėjo vos po -0,06 % per metus, o atkritimo intensyvumas didėjo po 0,04 % per metus.

Spygliuočių medžių rūšių tiriamieji rodikliai ir jų kaita išsiskyrė reikšmingai. Eglių vidutinė defoliacija mažėjo po 0,07 % per metus, kai tuo tarpu jų atkritimas didėjo net po 0,12 % per metus. Skirtingai negu Aukštaitijos KMS, pušų vidutinė defoliacija jau pradėjo didėti po 0,01% per metus, nors atkritimo intensyvumas mažėjo po -0,01 % per metus.

Klimatinių rodiklių ir tirtų parametrų palyginamoji analizė rodo, panašius dėsningumus nustatytus Aukštaitijos KMS baseine augančiuose miškuose. Šiltos žiemos teigiamai sąlygoja medžių lajų būklę, tik karščio bangos vegetacinio laikotarpio viduryje gali turėti neigiamos reikšmės, didindamos medžių lajų defoliaciją, ypač lapuočiams ir eglėms.

Apibendrinus gautis rezultatus, analogiškai Aukštaitijos KMS, buvo sukurti medžių būklės ir atkritimo intensyvumo daugialypės regresijos modeliai priklausomai atskirai nuo kritulių ir temperatūros ir galiausiai bendrai nuo jų kompleksiško poveikio. Tokiu būdu yra išaiškinama, kurie meteorologiniai veiksniai: temperatūra ar krituliai yra reikšmingesni medžių būklei ir jų išgyvenamumui, intensyviai besikeičiančio klimato sąlygomis vakariniame Lietuvos regione.

Priklausomų ir nepriklausomų veiksnių koreliacinė analizė parodė, kad egzistuojantys ryšiai yra reikšmingai silpnesni negu Aukštaitijos KMS. Tam, kad maksimaliai reikšmingai įvertinti meteorologinių veiksnių poveikį medžių lajų defoliacijai ir atkritimui,

palaipsniui buvo trumpinama duomenų sekos, kol ryšiai pasidarė reikšmingi. Tokiu budu meteorologinių veiksnių poveikis buvo analizuotas 2000-2025 duomenų pagrindu.

Nustatyta, kad ***Žemaitijos KMS baseine augančių eglių vidutinę defoliaciją lėmė krituliai praėjusio sezono rudens mėnesių kartu su dviejų sezono kritulių kiekiu pavasario mėnesiais. Nustatytas atvirkštinis ryšys rodo, kad kritulių poveikis šiais mėnesiais teigiamai sąlygojo eglių būklę***, iki 55% paaiškindami jos kintamumą ir didindami jų atsparumą nepalankiems veiksniams – kenkėjų pažaidoms.

Eglių atkritimą skatino taip pat paminėtų mėnesių kritulių kiekis ir papildomai praėjusio sezono vegetacijos laikotarpio krituliai. Šie rodikliai paaiškino 45% eglių atkritimo intensyvumo. Krituliams gausėjant, žuvusių eglių skaičius mažėjo.

Kritulių poveikis pušų lajų defoliacijai ir atkritimui buvo mažesnis, o defoliacijos kaitai net ir nereikšmingas. Tik dviejų sezonų pavasario mėnesių krituliai mažino tikimybę pušims žūti, paaiškindami iki 45 % jų atkritimo kaitos.

Kritulių kiekio poveikis lapuočių medžių defoliacijos ir atkritimo intensyvumui buvo kiek tai reikšmingesnis negu pušims, tačiau mažiau reikšmingas negu eglėms. Rudens mėnesių ir pavasario krituliai teigiamai sąlygojo lapuočių būklę, tačiau vegetacijos vidurio turėjo neigiamą reikšmę, kuri gali būti aiškinama, kad karšti ir drėgni orai nėra tinkami beržams augti, skatindami beržų atkritimą dėl vejavartų.

Temperatūrų poveikis tirtiems rodikliams buvo kiek tai silpnesnis. Eglių vidutinės defoliacijos mažėjimą lėmė aukštesnės rudens mėnesių vidutinės temperatūros, o defoliacijos intensyvumą skatino žiemos mėnesių temperatūra. Tai galimai turėjo esminės įtakos pirmiausiai kenkėjų sėkmingam peržiemojimui ir jo gausai po šiltos žiemos, bet ne fiziologiniams procesams vykstantiems tuo laikotarpiu eglės medžiuose. Tokiu būdu temperatūriniai parametrai paaiškino tik 23 % defoliacijos ir 34 % atkritimo intensyvumo kaitos.

Pušų lajų vidutinės defoliacijos mažėjimą skatino rugsėjo mėn. kartu su praėjusio sezono rudens ir birželio mėn. aukštesnės temperatūros. Nenustatytas nei vieno mėnesio karščio bangų neigiamas poveikis pušų būklei. Tuo tarpu pušų atkritimą skatino tik karščio bangos vegetacijos laikotarpiu ir šiltas žiemos laikotarpis, kuris dažnai buvo lydimas gausaus ir šlapio sniego, dėl ko įvykdavo gausios lajų snieglaužos. Po tokių pažeidimų pušys dažnai žudavo.

Tik žilta žiema ir pavasaris turėjo reikšmingos įtakos lapuočių lajų geresnei būklei. Tuo tarpu jų atkritimą skatino šiltas rugsėjis, kas galėjo skatinti beržų šaknų puvinį bei

vėkavartas šaltuoju laikotarpiu. Kas patvirtina naują grėsmę visiems Lietuvoje augantiems beržams.

Apibendrinus gautus rezultatus nustatyta, kad klimatiniai veiksniai Žemaitijos KMS paaiškino iki 61 % tirtų eglių vidutinės defoliacijos kaitos ir apie 63% jų atkritimo intensyvumo; 56% pušų vidutinės defoliacijos ir 54 % jų atkritimo kaitos ir virš 71 % beržų vidutinės defoliacijos ir 66 % jų atkritimo intensyvumo.

Žuvusių medžių sausos medienos irimo greičio analizė rodo, kad Žemaitijos KMS baseine sausuolių destrukcija prasideda, kaip ir Aukštaitijos KMS, tik po 10 metų pertraukos. ***Per 16 metų laikotarpį beržų irimo greitis siekia po 0,06 irimo klasės per metus, eglės sausos medienos – iki 0,05, o pušies vos 0,02 irimo klasės per metus. Per 16 – 31 metų laikotarpi medienos irimo greitis reikšmingai didėja ir visų tirtų rūšių sausos medienos irimo greitis buvo panašus ir siekė po 0,13-0,14 irimo klasės per metus.*** Tokiu būdu pradinėje stadijoje po medžio žūties sausos medienos irimo intensyvumas viena klase padidėja daugiau negu per 10 metų, tuo tarpu vėlesniame amžiuje iena irimo klase sausa mediena padidėja, panašiai kaip ir Aukštaitijos KMS, per 6-7 metus. Didžiausiais tempais ira lapuočių, tame tarpe beržo mediena, o lėčiausiai – pušies mediena.

Nustatytas tas pats dėsningumas, kaip ir Aukštaitijos KMS - žuvusio medžio didesnis amžius ir didesni parametrai lėtina sausos medienos destrukcijos greičius.

Dzūkijos KMS medžių lajos būklės ir jų žūties intensyvumo analizė parodė, kad tiriamuoju laikotarpiu ***Dzūkijos KMS baseine bendrai medžių lajų būklei mažėjant net po -2,9 % per metus, medžių atkritimo intensyvumas taip pat mažėja po -0,4 % per metus.*** Tokiam kaitos dėsningumui didžiausią įtaką turėjo tas faktas, kad Dzūkijos KMS baseine vyraujanti medžių rūšis yra paprastoji pušis, kuri geriausiai yra prisitaikiusi prie dabartinės aplinkos sąlygomis ir jų žūtis yra atsitiktinė ar dėl ypač nepalankių sąlygų, pirmiausiai audrų, vėtrų ar škvalų.

Žuvusių medžių sausos medienos irimo greičio analizė rodo, kad Dzūkijos KMS baseine sausuolių destrukcija prasideda taip pat tik po 10 metų pertraukos. Kadangi tiriamieji darbai ilgą laiko tarpą nebuvo vykdyti, sausos medienos irimo greičiai nustatyti visam 32 m laikotarpiui.

Nustatyta, kad beržų irimo greitis siekė po 0,17 irimo klasės per metus, o pušies 0,1 irimo klasės per metus, ir ženkliai mažesnis negu Aukštaitijos ir Žemaitijos KMS baseine. Pagrindinė priežastis – sausos miško augavietės, pomiškio stoka ir saulėtas dirvos paviršius. Šie veiksniai stabdo sausos medienos destrukcijos greitį.

KITI BIOTOS KOMPONENTAI

1993-1994 m tyrimų pradžioje didžiausiu gausumu žaliadumbliai pasižymėjo Aukštaitijos KMS. Kiek mažesniu gausumu pasižymėjo Žemaitijos KMS. 2010-15 m. Aukštaitijos ir Žemaitijos KMS baseinų tarša azoto junginiais turėjo išlikti panašiame lygmenyje ar mažėjo . 2016-2017 m. Aukštaitijos KMS stebimų eglių spyglių padengimas žaliaisiais oro dumbliais iš esmės nepakito. Žaliadumbiais padengiami vis senesni spygliai, o stebimų eglių būklė taip pat išlieka labai gera. Žemaitijos KMS oro užterštumas azoto junginiais išliko stabilus. Pagrindinis rodiklis indikuojantis tokią kaitą jauniausio ūglio amžius, kurio spygliai pradedami apaugti žaliaisiais oro dumbliais.

Pasikartojančios sausros Aukštaitijos KMS neturėjo esminės įtakos žaliųjų oro dumblių gausos padidėjimui paskutiniaisiais 2018-2019 m. Pasitvirtino teiginys, kad šiltėjantis klimatas, dėl organinių junginių skaldimosi intensyvumo skatinimo, mažina aplinkos užterštumą N junginiais. Jauniausio eglės ūglio amžius Aukštaitijos KMS 2019 m. padidėjo vidutiniškai iki 2,8 m., kas rodo mažėjantį oro baseino užterštumą šiais junginiais. 2019 m. žaliųjų oro dumblių gausa Žemaitijos KMS didėjo, ir [priešingai negu Aukštaitijos KMS, indikavo didėjanti oro baseino užterštumą N junginiais.

2020 metais registruoti du priešingi procesai žaliųjų oro dublių gausos rezultatuose. Aukštaitijos KMS nustatytas nors ir neženklus šių dumblių gausos padidėjimas, koks buvo registruojamas dar 2006 – 2007 m. Žemaitijos KMS žaliųjų oro dublių gausos tyrimo stotyje nustatyta, kad šių dumblių gausa ant eglių spyglių sumažėjo.

2025 m. rodo, kad tirtų eglių spyglių amžius pastaraisiais metais pasiekė 8 m metų ribą, kuri buvo registruojama tik tyrimų pradžioje. Tirtų medžių vidutinė defoliacija siekė vos 5 %. Vieni didžiausi ūglių spygliuotumo parametrai taip pat indikuoja labai gerą tirtų eglių būklę.

Prie tokių sąlygų ir eglės reakcijų į aplinkos kaitą nustatyta, kad žaliųjų oro dumblių gausa 2025 m buvo arti savo minimalių reikšmių, o jauniausio ūglio amžius, ant kurio spyglių buvo registruojami žaliadumblių pradinės kolonijos viršijo 3 m. Tai didžiausia reikšmė per visą tiriamąjį laikotarpį, kas rodo, kas Aukštaitijos oro baseino užterštumas azoto junginiais taip pat turėtų būti mažiausias per visą tiriamąjį laikotarpį. Cheminių analizių rezultatai rodo, kad amonio jonų ir nitratų koncentracijos ore yra sumažėjusi, dėl ko bendro azoto koncentracija per paskutiniuosius 5rius metus yra sumažėjusi 10 %. Tokiu būdų žaliųjų oro dumblių gausos kaitos rezultatai gerai patvirtina oro cheminių rezultatų kaitą (1.5 skyrius).

Žemaitijos KMS tirtų eglių parametrai buvo taip pat vieni iš geresnių, o žaliųjų oro dumblių gausa kiek tai didesnė negu Aukštaitijos KMS, bet mažesnė negu per paskutiniuosius 2018-2020 metus. Oro cheminių tyrimų rezultatai parodė, kad 2021-2025 m. amonio jonų ir nitratų koncentracijos buvo žemesnės negu 2015-2020 m. laikotarpiu, o bendro azoto koncentracijos paskutiniaisiais metais buvo mažesnės, bent tik iki 10% buvusio lygio. Išskirtiniai tik 2025 m. amonio koncentracijų ore rezultatai, kurie Žemaitijos KMS baseine ženkliai viršija paskutiniųjų 5rių metų vidurkį ir siekia 1 µg/m3.

2021-2025 m. vakarinis Lietuvos regionas yra intensyviau teršiamas šiuo junginio negu šiaurė rytinis regionas, informuodamas, kad pagrindinis taršos šaltinis yra tolimosios oro pernašos. Atnaujinus tyrimus Dzūkijos KMS, kitų metų ataskaitoje bus galimybė įvertinti tolimųjų oro teršalų pernašų poveikį žaliųjų oro dublių gausai visos Lietuvos mastu.

Dzūkijos KMS tirtų eglių parametrai buvo prasčiausi lyginant su kitais dviejų stočių parametrais. Žaliųjų oro dumblių kolonijų gausa šiose stotyje taip pat buvo didžiausios, o ūglio amžius, kurio spygliai buvo padengti pirminėmis dumblių kolonijomis buvo mažiausias. Oro cheminių tyrimo rezultatų stoka neleido patvirtinti šios bioindikacinio parametro išvados.

Epifitinių kerpių gausos tyrimų rezultatai 2025 m. rodo, kad Aukštaitijos KMS kerpių tyrimo stotyje, tirtų medžių kamienų kerpėtumas padidėjo ar išliko maksimaliame lygmenyje registruotą per visą tiriamąjį laikotarpį. Ypač kerpėtumas padidėjo 60 cm ir 1,2 m aukštyje. Vyraujančios kerpės: putliojo plynkėžio gausos rezultatai rodo kiek tai priešingą tendenciją. Šios kerpės gausa sumažėjo paminėtuose aukščiuose. Tokį rezultatą sąlygojo rūšių kaita. Putlųjį plynkėžį šiame aukštyje pradeda keisto Kladonios genties kerpės, kurių gausa priklauso ir nuo apšvietimo sumažėjimo, dėl gerėjančios medžių būklės, ir dėl gausėjančių kritulių, kurie didina oro santykinę drėgmę. Pateikti duomenys rodo, kad ***pastaraisiais metais tirtų medžių kerpėtumas pasiekė savo maksimalią reikšme per visą tiriamąjį laikotarpį, oro užterštumas sieros junginiais – mažiausią.***

Nustatyta, kad 2015 m. nitratų srautas Aukštaitijos KMS sumažėjo nuo 2 kg/ha 2010 m. iki 1,5 kg/ha, o amonio – nuo 3 kg/ha iki 2 kg/ha. 2020 m. šis srautas iekė jau tik 1,3, o paskutiniuoju laikotarpiu dar labaiu mažėja ir 2025 m. sumažėjo jau iki 1,1 kgN/ha. Amonio srautas per tą patį laikotarpį ktio taip: iki 2015 m. mažėjo nuo 2,7-2,8 kg/ha iki 2,5 kg/ha, 2020 m. siekė 2,2 kg/ha ir paskutiniuoju laikotarpiu vėl padidėjo iki 2 kg/ha ribos, ką patvirtino ir oro chemijos tyrimų rezultatai.

Tokiu būdu apskaičiavus bendrą srautą buvo nustatyta, kad 2020 m. azoto srautui sumažėjus nuo 5 kg/ha iki 3,5 kg/ha epifitinių kerpių gausumas reikšmingai padidėjo. Tai kritinis srautas lemiantis epifitinių kerpių reikšmingus pokyčius nitratams būtų apie 1,5 kg/ha, o amonio jonams – apie 2 kg/ha. Bendrai tai sudarytų apie 3-4 kg/ha. Paskutiniojo 2021-2025 m. laikotarpio rezultatai parodė, kad atskirų komponenčių srautas sudaro 1,4+2,2 kg/ha atitinkamai, arba 3,6 kgN/ha bendrai. Šiandieną kritinis N srautas yra 5 kg/ha. Gauti duomenys rodo, kad ši reikšmė jautriose miško ekosistemose turėtų būti mažesnė, t.y. iki 3 kg/ha., ką patvirtina pastarųjų metų tyrimai Skandinavijos šalyse. Viršijantys 3kg/ha srautas iš dalies patvirtina ankstesnę išvada. 2025 m. Aukštaitijos KMS nors ir registruotas vienas didžiausių epifitinių kerpių padengimo lygis, bet jautrių kerpių taršai padengimo lygis mažėjo. Šią kaitą patvirtina ir sulfatų srauti kaita Aukštaitijos KMS baseine.

Nustatyta, kad 2005-2010 m. sulfatų srautas Aukštaitijos KMS siekė apie 2,3-2,6 kgS/ha, 2015 m. maždaug 1,7, o 2018-2022 m. net 1,5. Paskutiniųjų dviejų metų laikotarpiu (2024-2025) registruojamas ženklus sulfatų srauto padidėjimas Aukštaitijos KMS baseine, kuris pradėjo viršyti 2 kg/ha riba ir paskutiniaisiais metais siekia net 2,3 kg/ha. Tai karo Ukrainoje galimas rezultatas.

Panaši S komponenčių srautas buvo registruojamas 15 metų, t.y. 2005-2010 m. Tai nauja tikėtinai trumpalaikė grėsmė sąlygiškai natūralioms miško ekosistemoms, kuri jau pradiniame etape pasireiškė puliojo plynkežio padengimo mažėjimų, bei kitų kerpių, ne tokių jautrų taršai, padengimo didėjimu Aukštaitijos KMS baseine.

Epifitinių kerpių gausos tyrimų rezultatai 2025 m. rodo, kad Žemaitijos KMS, tirtų medžių kamienų kerpėtumas iš esmės nepakito ir liko 2020 m. lygmenyje.

Vyraujančios kerpės: putliojo plynkėžio gausos rezultatai rodo panašią tendenciją, kas indikuotų kad per pastarųjų 2021-2025 m. laikotarpį iš esmės nepakito ir oro užterštumas N ir S komponentėmis, bei iš esmės nepakito ir jų srautai į miško paklotę. Oro chemijos rezultatai rodo, kad per šį laikotarpį S srautas padidėjo nuo 1,5 iki 2 kg S/ha, Amonio praktiškai išliko stabilus, o nitratų skirtingai negu Aukštaitijos KMS padidėjo nuo 2 iki 2,5 kg/ha, Kas bendroje sumoje sudarytų bendro azoto nuo 4 iki 4,5 kgN/ha, kas rodytų, kad N srautas jau pradeda artėti prie savo kritinis reikšmės miško ekosistemoms. Ar tokia koncentracija galėjo reikšmingai sąlygoti epifitinių kerpių rūšių įvairovę ir gausą buvo atsakyta kitame skyriuje, kuriame pateikti detalūs visame baseine augančių kerpių tyrimo rezultatai.

2025 m. pakartoti epifitinių kerpių tyrimai Dzūkijos KMS kerpių tyrimo stotyje parodė reikšmingai padidėjusį kerpėtumą tiek vyraujančių pultliuoju plykėžiu, tirk ir bendrą visų rūšių suminį kerpėtumą.

Aukštaitijos KMS stebėtas ryškus kerpių rūšinės įvairovės sumažėjimas: nuo 10,6 2015 m. iki 8,3 2025 m. Priežastingumui nustatyti reikalinga detali analizė tiek atskiroms rūšims, rūšių pokyčiams konkrečiuose bareliuose, tiek ir įvertinant atskirų veiksnių poveikį.

Žemaitijos KMS kerpių rūšinės įvairovės tendencijos yra fliuktuacijos stadijoje. Natūralių miškų struktūra dar besiformuojanti, tad ateityje galimi įvairūs rūšiniai pakitimai. Dzūkijos KMS nustatyta didžiausia rūšinė įvairovė su 9 unikaliomis rūšimis.

Aukštaitijos integruoto monitoringo stoties dirvožemyje 2025 m. duomenimis mikroartropodų gausumas buvo vidutiniškai 131,2 tūkst. ind./m^2. Dominuojanti grupė – oribatidinės erkės, kurios sudaro vidutiniškai 78 % visų mikroartropodų (3.1.1 lentelė). Jų vidutinis gausumas yra 102,0 tūkst. ind./m^2 (3.1.1 pav.). Gamazidinių erkių vidutinis gausumas – 4,3 tūkst. ind./m^2, jos sudaro 3,3 % visų mikroartropodų. Akaridinių erkių aptikta vidutiniškai 8,3 tūkst. ind./m^2, jos sudaro 6,3 % visų mikroartropodų. Kitos erkės sudaro 6,0 % visų mikroartropodų (vidutiniškai 7,9 tūkst. ind./m^2). Kolembolų vidutinis gausumas – 8,7 tūkst. ind./m^2. Jos sudaro 6,6 % visų mikroartropodų.

Aukštaitijos KM stoties dirvožemio oribatidinių erkių bendrijos įvairovės rodikliai (3.1.3 lentelė) rodo **santykinai nedidelę rūšinę įvairovę ir ryškų bendrijos netolygumą**. Shannon–Wiener indekso reikšmė (H' = 0,96) leidžia vertinti bendriją kaip **mažos įvairovės**, tai gali būti būdinga mažiau palankioms arba labiau selektyvioms aplinkos sąlygoms. Simpsono dominavimo indeksas (D = 0,18) rodo, kad bendrijoje egzistuoja **dominuojančios rūšys**, tačiau dominavimas nėra itin stiprus, o individai pasiskirstę tarp kelių pagrindinių rūšių. Pielou tolygumo indeksas (J' = 0,28) atskleidžia **mažą bendrijos tolygumą**, t. y. rūšių gausumas pasiskirstęs labai netolygiai, ir didžioji dalis individų priklauso nedideliam rūšių skaičiui. Tokia indeksų kombinacija apibūdina **nevienalytę bendrijos struktūrą,** kuriai būdingas ribotas rūšių skaičius ir aiškiai išreikštas atskirų rūšių dominavimas.

Žemaitijos integruoto monitoringo stoties miško dirvožemis pasižymi didesniu mikroartropodų gausumu. Čia jų gausumas vidutiniškai 197,6 tūkst. ind./m^2. Dominuojanti grupė yra oribatidinės erkės, kurios sudaro vidutiniškai 78,0 % visų mikroartropodų. Jų vidutinis gausumas yra 154,9 tūkst. ind./m^2. Gamazidinių erkių vidutinis gausumas – 10,1 tūkst. ind./m^2, jos sudaro 5,1 % visų mikroartropodų. Akaridinių erkių aptikta vidutiniškai 6,8 tūkst. ind./m^2, jos sudaro 3,4 % visų mikroartropodų. Kitų erkių vidutinis gausumas 9,3 tūkst.

ind./m^2, jos sudaro 4,7 % visų mikroartropodų. Kolembolų vidutinis gausumas – 16,5 tūkst. ind./m^2. Kolembolos sudaro 8,4 % visų mikroartropodų.

Žemaitijos KM stoties dirvožemio oribatidinių erkių bendrijos įvairovės rodikliai rodo santykinai vidutinę rūšinę įvairovę ir palyginti tolygų rūšių pasiskirstymą. Shannon–Wiener indekso reikšmė (H' = 2,45) leidžia vertinti bendriją kaip **vidutinės įvairovės**, tai gali būti būdinga palankiai aplinkai, kurioje sąlygos leidžia egzistuoti kelioms reikšmingoms rūšims. Simpsono dominavimo indeksas (D = 0,15) rodo, kad bendrijoje **dominuojančių rūšių yra nedaug**, o individai gana tolygiai pasiskirstę tarp kelių pagrindinių rūšių. Pielou tolygumo indeksas (J' = 0,71) atskleidžia **pakankamai aukštą bendrijos tolygumą**, kas reiškia, kad rūšių gausumas yra gana vienodai pasiskirstęs, o bendrijoje nėra ryškių monopolinių rūšių. ***Tokia indeksų kombinacija apibūdina*** *subalansuotą ir stabilią mikroartropodų bendriją,* ***kuriai būdingas*** *pakankamas rūšių turtingumas ir vidutinis individų pasiskirstymas tarp rūšių****, tai gali rodyti palankias ekologines sąlygas ir tinkamą mitybos bei buveinių įvairovę šioje teritorijoje.***

Dzūkijos KMS miško dirvožemyje nustatytas mažesnis mikroartropodų gausumas, palyginti su Aukštaitijos ir Žemaitijos KM stotyse tirtais dirvožemiais. Čia jų gausumas siekia vidutiniškai 163,2 tūkst. ind./m^2. Mažesnis mikroartropodų gausumas gali būti susijęs su Dzūkijos regionui būdingais smėlingais, mažo humusingumo dirvožemiais.

Dominuojanti grupė yra oribatidinės erkės, kurios sudaro vidutiniškai 81,0 % visų mikroartropodų. Jų vidutinis gausumas yra 132,0 tūkst. ind./m^2. Gamazidinių erkių vidutinis gausumas – 8,1 tūkst. ind./m^2, jos sudaro 5,0 % visų mikroartropodų. Akaridinių erkių aptikta vidutiniškai 5,1 tūkst. ind./m^2, jos sudaro 3,1 % visų mikroartropodų. Kitų erkių vidutinis gausumas – 9,4 tūkst. ind./m^2, jos sudaro 5,8 % visų mikroartropodų. Kolembolų vidutinis gausumas – 8,6 tūkst. ind./m^2. Kolembolos sudaro 5,3 % visų mikroartropodų.

Dzūkijos KMS tiriamos dirvožemio oribatidinių erkių bendrijos biologinės įvairovės rodikliai (3.1.3 lentelė) rodo vidutinę rūšių įvairovę ir santykinai netolygų individų pasiskirstymą. Shannon–Wiener įvairovės indekso reikšmė (H' = 1,81) rodo ***vidutinį rūšinės įvairovės lygį****, būdingą natūralioms, tačiau ne itin turtingoms rūšimis dirvožemio ekosistemoms.* Simpsono dominavimo indeksas (D = 0,25) rodo, kad bendrijoje yra **aiškiai dominuojančių rūšių**, o tai reiškia, kad ***didelė dalis individų priklauso nedideliam rūšių skaičiui***. Pielou tolygumo indeksas (J' = 0,58) patvirtina, kad bendrija yra **vidutiniškai tolygi**, tačiau rūšių gausumas pasiskirstęs netolygiai – kai kurios rūšys yra žymiai gausesnės už kitas. Tokie indeksų deriniai rodo, kad tiriama ***mikroartropodų bendrija yra*** *struktūriškai diferencijuota****, su ryškia dominavimo struktūra (dominuoja oribatidinės erkės).***

Didžiausias mikroartropodų gausumas nustatytas Žemaitijos KM stotyje (197,6 tūkst. ind./m²), kiek mažesnis – Dzūkijoje (163,2 tūkst. ind./m²), o mažiausias – Aukštaitijoje (131,2 tūkst. ind./m²). Tokie skirtumai gali būti susiję su dirvožemio savybėmis: Žemaitijos dirvožemiai yra palankesni dėl didesnio drėgnumo ir organinės medžiagos kiekio, o Dzūkijoje vyrauja smėlingi, mažo humusingumo dirvožemiai, kurie riboja mikroartropodų gausumą.

Biologinės įvairovės indeksai patvirtina šiuos skirtumus. Žemaitijos stotyje nustatytas didžiausias Shannon–Wiener indeksas (H' = 2,45) ir aukštas Pielou tolygumo indeksas (J' = 0,71), rodantys subalansuotą ir tolygią bendriją (3.1.3 lentelė). Dzūkijoje įvairovė yra vidutinė (H' = 1,81), tačiau būdingas didesnis dominavimas (D = 0,25) ir mažesnis tolygumas (J' = 0,58). Aukštaitijoje nustatyta mažiausia įvairovė (H' = 0,96) ir labai mažas tolygumas (J' = 0,28), rodantys stipriai dominuojančią, mažiau įvairią bendriją (3.1.3 lentelė).

2025 m. duomenys rodo sumažėjimą AKMS (131,2 tūkst.ind./m²) ir ŽIMS (197,6 tūkst.ind./m²), o DIMS vidurkis padidėjo (163,2 tūkst.ind./m²) lyginant su ilgamečiu vidurkiu

Aukštaitijos KMS Versminio upelyje buvo identifikuota 16 bestuburių taksonų: 13 pavasarį ir 10 rudenį (2 lentelė). Pagal gausumą, pavasarį dominavo ankstyvės (*Nemoura* sp.), vandens erkės (Hydrachnidia), vandens asiliukai (*Asellus aquaticus*) ir uodų trūklių lervos (Chironomidae). Rudenį dominavo *A. aquaticus* ir *Nemurella pictetii* ankstyvės (1030 ir 547 ind. m^{-2} atitinkamai). Pagal biomasę ir pavasarį, ir rudenį dominavo vandens asiliukai *A. aquaticus* (2 lentelė). Bioįvairovės indeksai, Shannon-Wiener'io ir Simpson'o indeksai Versminio upelyje buvo aukštesni pavasarį lyginant su rudeniu

Versminio upelio kokybė 2020 m. buvo vertinta kaip gera, o 2025 m. kaip vidutinėVersminis upelis priskirtinas prie labai geros ekologinės kokybės upelių. Ar kokybės rodiklių pažemėjimas 2025 m. lyginant su 2020 m. atspindi kokią nors reikšmingą tendenciją, parodys tolimesni tyrimai.

Žemaitijos KMS Juodupio upelyje buvo registruoti 26 bestuburių taksonai, 11 pavasarį ir 20 rudenį. Ir pavasarį, ir rudenį pagal gausumą ir biomasę ryškiai dominavo šoniplaukos *Gammarus pulex* (situacija tokia pati kaip ir 2020 metais). Vegetacijos sezono pradžioje antroje vietoje pagal gausumą buvo *Leuctra* sp. ankstyvės, o rudenį be šoniplaukų dar vyravo vandens erkės, kai kurių rūšių apsiuvos ir dvisparniai. Šiais metais neradome moliuskų, vandens asiliukų, Empididae dvisparnių ir kai kurių kitų vabzdžių. Bet rasta daugiau ankstyvių, kitokių apsiuvų rūšių, lašalų, kurių visai nebuvo 2020 metais.

Lyginant šių metų makrobestuburių rodiklius su 2020 metais matome bendro taksonų skaičiaus padidėjimą (2020 buvo 23 taksonai, o 2025 m. identifikuoti 26), nors metinis

vidurkis yra mažesnis 2025 metais. Individų skaičiaus, biomasės, bioįvairovės indeksų metiniai vidurkiai taip pat nežymiai mažesni 2025 metais nei 2020 m.

Dzūkijos KMS Duburių upelyje dugno bestuburiai 2025 metais buvo rinkti dvejose vietose – aukštupyje ir žemiau patvankos. Duburių upelio aukštupyje identifikuoti 29 taksonai, o žemiau patvankos - 41 taksonas. Per abi vietas Duburių upelyje identifikuoti net 45 dugno bestuburių gyvūnų taksonai (6 ir 8 lentelės).

Individų gausumu Duburių aukštupyje vyravo *Baetis* genties lašalai pavasarį ir ankstyvės (*Isoperla* sp., *Leuctra* sp.) rudenį (6 lentelė). Pagal biomasę, Duburių aukštupyje pavasarį dominavo apsiuvos *Potamophylax latipennis* ir *Rhyacophila fasciata*, o rudenį – Tipulidae šeimos dvisparniai.

Daugelis biologinės įvairovės ir upelio ekologinės būklės rodiklių Duburių upelio aukštupį konstatuoja kaip labai geros ekologinės būklės (7 lentelė). Jautrių taršai taksonų (lašalų, ankstyvių, apsiuvų) rasta po 12 kiekvieną sezoną kas rodo geras litoreofilines sąlygas.

Didelė visų, o ypač jautrių taksonų įvairovė tik įrodo, kad Duburių upelio sąlygos yra itin palankios daugeliui bentosinių bestuburių gyvūnų rūšių. Ekologinės būklės rodikliai DIUF ir LUMI įvertino Duburių vietą žemiau patvankos kaip labai geros ekologinės būklės upelį.

Ilgamečiai tyrimai rodo Duburių upelio faunos stabilumą, nes per 30 metų dominantinės grupės beveik nepakito – pagal gausumą visais metais dominuoja lašalai (*Baetis*), ankstyvės (atskirais atvejais *Leuctra, Isoperla, Nemoura*) ir dvisparniai (Simuliidae), o pagal biomasę apsiuvos (atskirais atvejais *Rhyacophila, Potamophylax, Halesus*) ir dvisparniai (*Tipulidae*).

Lyginant Duburių upelio abi tyrimų vietas, Dauguma makrozoobentoso bendrijos ir vandens kokybės rodiklių buvo aukštesni vietoje žemiau patvankos, tik Shannon-Wiener'io, Simpson'o bioįvairovės indeksai (H ir D) bei ASPT rodiklis didesni buvo aukštupyje

Aukštaitijos KMS Versminio upelyje ekologinė būklė yra GERA. Ji nepakito vertinant DIUF rodiklį ir pablogėjo pagal LUMI. Žemaitijos KMS Juodupio upelio ekologinė būklė nepasikeitė. Yra GERA pagal DIUF ir VIDUTINĖ pagal LUMI. Dzūkijos KMS Duburių upelio ekologinė būklė yra LABAI GERA ir, panašu, kad itin stabili.

ŽOLINĖ AUGALIJA

Remiantis Aukštaitijos, Žemaitijos ir Dzūkijos KMS atliktais žolių ir krūmokšnių, bei samanų ir kerpių ardų rūšių gausumo, dažnumo ir fertilumo matavimais, galima teigti, kad stebėtų bendrijų būklė pastaraisiais (2021 - 2025) metais buvo gana stabili, bet tarpusavyje reikšmingai skyrėsi. Žemaitijos, Dzūkijos ir Aukšatitija_100 poligonuose, dėl palaipsnio viršutinio medžių ardo retėjimo, ūkinės veiklos nebuvimo, mažo trikdymo – apatinių ardų augalija išlieka gana skurdi. Tačiau daugumas klimaksinių, šioms buveinėms tipingų rūšių šiuo metu klesti. Samanų ir krūmokšnių ardas daugelyje vietų ištisinis. Aukštaitija _102 poligone, dėl dominuojančio tankaus jaunų eglių pomiškio, nuokritų gausos - žolių ir samanų ardas vietomis beveik visai sunykęs. Bet dėl išaugusios substratų įvairovės ir poligono heterogeniškumo bendra augalijos įvairovė išlieka didžiausia. Remiantis tirtais augalijos parametrais, aiškiai matyti medynų sukcesinės kaitos įvairialypis poveikis žemesniems augalijos ardams. Žolių ir krūmokšnių, bei samanų ir kerpių ardų rūšinės sudėties, projekcinio padengimo ir dažnumo svyravimai iš esmės atspindi natūralią medynų sukcesiją, tiek tebesitęsiančią po ūkinės veiklos nutraukimo, tiek suintensyvėjusią po didesnių pažaidų medynuose. Labiau pionierinės medžių rūšys (pušys, beržai) po truputį retėja, užleisdamos vietą klimaksinėms rūšims (eglėms). Tai sukelia ryškius tiek apšvietimo, tiek ir mikroklimatinius pokyčius, kurie labiausiai ir veikia apatinių medyno ardų kaitą (4.0.7 pav). Kintantys nuokritų, negyvos medienos kiekiai, sąlygoja epiksilinių samanų ir kerpsamanių įvairovės, gausumo, bei aptikimo dažnumo augimą. Nepaisant tebevykstančios medynų sukcesijos, taip pat akivaizdžiai matyti meteorologinių veiksnių (kritulių kiekio, vėjų, vidutinių temperatūrų, saulės aktyvumo) poveikis. Itin svarbūs ekstremalūs meteorologiniai veiksniai (užsitęsę sausros, vėtros, neįprastai žemos arba aukštos temperatūros), nes būtent po jų pasireiškimo stebimi didžiausi medynų ir visos augalijos pokyčiai. Tolimųjų oro pernašų sąlygotos taršos savitąjį poveikį konkrečioms rūšims išskirti sunku, nes tarša vienodai paveikia visą ekosistemą. Kadangi ekosistema yra labai kompleksiška sistema, superorganizmas, su tolimosiomis oro pernašomis patenkančios taršos poveikis išsisklaido per visas ekosistemos komponentes. T.y. nesant pakankamai ilgos kompleksinių duomenų sekos, sunku įvertinti ar, pavyzdžiui, konkretus oro taršos komponentas atskirą samanų rūšį veikia tiesiogiai, ar jos labiau paveikė medžių lajas ir dėl jų išretėjimo pakito rūšies augimo sąlygos. Todėl šiam tikslui pasiekti būtinas ilgalaikis, nenutrūkstamas, kompleksinių tyrimų vykdymas. Rezervato statusas vykdomiems tyrimams yra būtinas, siekiant užtikrinti sąlyginai natūralų buveinių vystymąsi.

Siekiant įvertinti Versminio, Juodupio ir Duburių upelių hidrografinių baseinų augalijos struktūros ir rūšinės sudėties pokyčius, 2025 metais vykdyti augalijos tyrimai 141 pastoviuose 100 m^2 ploto tyrimų aikštelėse tolygiai išdėstytose per upelių baseinų teritorijas. Žemaitijos ir Aukštaitijos tyrimų poligonuose registruota dalies I ardo eglių žūtis, ko pasėkoje sąlyginai išaugo pušų projekcinis padengimas. Tačiau, žvelgiant kompleksiškai į medžių rūšių gausą ir aptikimo dažnumą žemesniuose medžių, krūmų bei žolių arduose, aiškiai matyti kad pušis neatsikuria ir žuvusių medynų vietose įsitvirtina eglynai. Tad eglė lieka ir ateityje bus pagrindinis edifikatorius, sąlygojantis žemesnių ardo augalijos rūšinę sudėtį ir būklę. Daugeliu atveju tai labiausiai nulemia natūrali medynų sukcesija, o klimato kaita ir tolimųjų oro pernašų sąlygota tarša tai gali pristabdyti arba paskatinti. Dzūkijos poligone, aiškiai visuose arduose, dominuoja ir kurį laiką pagrindine edifikatorine rūšimi išliks pušis. Čia pagrindinis kitų rūšių plitimą ribojantis faktorius yra maisto medžiagų ir drėgmės trūkumas, todėl šiuo atveju tiek meteorologinių sąlygų kaita tiek su tolimosiomis pernašomis atkeliaujančios maistinės ar chemiškai agresyvios medžiagos gali turėti ženkliai didesnį poveikį, nulemiantį kaip sparčiai eglės įsitvirtins medyne.

Žolių ir krūmokšnių ardas Aukštaitijoje ir Žemaitijoje aiškiai plėtėsi tiek bendrai dengiamu plotu tiek ir rūšių skaičiumi. Tai lėmė atsiveriančio naujos aikštelės, kuriose laikinai suklesti žolinė augmenija. Tačiau gera būkle pasižymėjo ne tik šviesamėgės greitai plintančios rūšys, bet ir ilgalaikiai dominantai – mėlynė, paprastasis kiškiakopūstis, kas rodo kad pastarųjų metų sąlygos jiems buvo palankios. Žolių ardo įvairovė labiausiai lemia ir bendrą medynų biologinę įvairovę. Bendras rūšių skaičius didžiausias registruotas Aukštaitijos (153), vidutinis Dzūkijos (143) ir žemiausias Žemaitijos KMS (132). Tačiau dėl ženkliai didesnio rūšių pasiskirstymo tolygumo, arba didesnio tolygiai gausių rūšių skaičiaus, Shanon gama bioįvairovės indeksas aukščiausias būtent Žemaitijoje (3,1). Ir nors Dzūkijoje bendras rūšių skaičius sąlyginai didelis, tačiau dauguma jų dengia labai mažą plotą ko pasėkoje bendras biologinės įvairovės indeksas yra ženkliai žemiausias (2,5).

2025 m. tyrimų duomenys rodo, kad skirtingose tyrimų vietovėse samanų danga išlieka reikšminga ekosistemos dalis, tačiau jos struktūra ir dinamika skiriasi priklausomai nuo regiono ekologinių sąlygų. Aukštaitijoje samanų ardas pasižymi santykinai stabiliu bendru samanų padengimu, tačiau dominuojančios rūšys, tokios kaip Hylocomium splendens ir Pleurozium schreberi, rodo ilgalaikį mažėjimą, o jų vietą palaipsniui užima mažiau gausios, bet plintančios rūšys. Žemaitijoje samanų danga pasižymi didžiausia rūšine įvairove, o bendras padengimas per visą laikotarpį nuosekliai didėjo, rodydamas itin palankias sąlygas samanų bendrijų plėtrai. Dzūkijoje samanų ir kerpių kompleksas sudaro ištisinę dangą,

būdingą sausoms pušynų buveinėms, kur dominuoja sausrai atsparios rūšys, tokios kaip Pleurozium schreberi, Dicranum polysetum ir Cladonia genties kerpės. Lyginant regionus, matyti, kad Žemaitijoje samanų danga plečiasi, Aukštaitijoje ji kinta struktūriškai, o Dzūkijoje išlieka stabili, bet labiau priklausoma nuo sausų buveinių sąlygų. Bendros tendencijos rodo, kad samanų bendrijos visuose regionuose reaguoja į aplinkos pokyčius nevienodai, tačiau išlaiko gebėjimą prisitaikyti ir išlikti svarbia miško ekosistemos dalimi.

Siekiant atskirti tolimųjų oro masių sąlygotą taršos poveikį augalijai nuo savaiminės sukcesinės medyno raidos – būtinas tyrimų tęstinumas ateityje ir detalesnės jau turimų duomenų analizės. Rekomenduojama detaliau išanalizuoti stebėtas atskirų rūšių ar jų grupių reakcijų sąsajas su kitų monitoringo paprogramių duomenų kaita. Tai, jog tyrimai vykdomi gamtinių rezervatų teritorijoje, nesant tiesioginės ūkinės veiklos, suteikia galimybę ateityje įvertinti ne tik tolimųjų oro masių sąlygotos taršos, bet ir klimato kaitos, ūkinės miškų veiklos poveikį augalijai. Išskirtinis dėmesys turėtų būti skiriamas pagrindinio tiriamųjų medynų edifikatoriaus – paprastosios eglės – tyrimams. Nuo pagrindinių edifikatorinių medžių rūšių reakcijų, tiek į aplinkos taršą, tiek ir į klimato kaitą, labiausiai priklauso medynų sukcesinė raida ir žemesniųjų augalijos ardų rūšių būklė. Edifikatorinių medžių rūšių būklės priklausomybė nuo žolinės augalijos ir samanų ardų būklės, grybienos aktyvumo – gali būti įvertinta tik turint ilgalaikę nenutrūkstamų duomenų seką.

CHEMINIŲ KOMPONENČIŲ KONCENTRACIJOS

Karo Ukrainoje pasekmė: S srauto su krituliais ir kritulių rūgštingumo padidėjimas.

2011-2025 m. laikotarpio išskirtinis rezultatas: keičiasi tirtų cheminių komponenčių koncentracijų ir srautų santykis. Jei tyrimų pradžioje palajiniuose krituliuose SO_4^{2-}, NH_4^+ ir NO_3^- koncentracijos ir srautai į miško paklotę viršijo šių komponenčių koncentracijas ir srautus atviroje vietoje, indikuodami intensyvų nuplovimą, tai jau paskutiniuoju laikotarpiu registruojamas atvirkštinis procesas: polajiniuose krituliuose šių komponenčių koncentracijos ir srautai į dirvožemį yra mažesni. Tai reikšmingas pokytis miško ekosistemoje.

2017-2024 m. pirmą kartą registruojamas kritulių rūgštingumo rodiklio priartėjimas ar net viršijimas 6 ribą- 2021 m.. T.y. per pirmą tiriamąjį laikotarpį (iki 2010) pH vertė išliko stabili, kai tuo tarpu per antrąjį tiriamąjį laikotarpį (2011-2025 m.) pH vertė padidėjo vienetu, t.y. kritulių rūgštingumas ženkliai sumažėjo ir priartėjo prie neutralaus

ribos. Tačiau paskutiniaisiais metais šis rodiklis sumažėjo net 0,5 pH iki 5,5, kas sietina su karu Ukrainoje. Tai išskirtinis pokytis Aukštaitijos KMS miško ekosistemoje.

Tokiu būdu Aukštaitijos KMS baseinas reikšmingai išsivalo nuo sieros komponenčių taršos, o didėjantis šarminių katijonų srautas, ypač K, prisideda prie didėjančio miškų produktyvumo ir atsparumo klimato kaitai.

Žemaitijos KMS polajinių kritulių rūgštingumas yra mažesnis negu atviros vietos kritulių. Per visą tiriamąjį laikotarpį pH vertė iš esmės nesikeitė ir polajinių kritulių svyravo apie 5,3, o atviros vietos apie 5.

Reikšmingiausiai mažėja S koncentracijos polajiniuose krituliuose. Per tiriamąjį laikotarpį šio elemento koncentracijos sumažėjo daugiau kaip nuo 3 mg/l iki 0,3 mg/l, t.y. beveik 10 kartų. Tokiam sumažėjimui įtakos turėjo reikšmingas sulfatų ir SO2 koncentracijų sumažėjimas ore, o tuo pačiu ir mažėjantis nuplovimas nuo lapijos paviršiaus. 2021-2025 m. laikotarpiu S komponenčių koncentracija ir jų srautai į miško paklotę išlieka minimaliame lygmenyje lyginant su 2015-2020 m.

Žemaitijos KMS, skirtingai negu Aukštaitijos KMS, nitratų koncentracija krituliuose po laja ir jų rautas reikšmingai nesiskiria nuo nitratų koncentracijos ir jų srauto krituliuose atviroje vietoje. Paskutiniuoju laikotarpiu 2022 - 2025 m. nitratų koncentracijos pradėjo didėti atviroje vietoje.

Amonio koncentracijos ir srautas po laja kito taip pat analogiškai jų koncentracijoms ir srautui atviroje vietoje. Paskutiniuoju laikotarpiu amonio koncentracijos atviros vietos krituliuose ir jo srautas virš 5 kartų viršija amonio koncentracijas ir srautą po medžių lajomis tačiau turi tendenciją mažėti. Mažėjimo intensyvumą slopina, 2019 m., dėl nežinomų dar priežasčių, reikšmingai padidėjusios amonio koncentracijos atviros vietos krituliuose ir jų srautas su krituliais. Išimti sudaro taip pat 2019 ir 2025 m., kai ***atviros vietos krituliuose išaugo amonio koncentracijos, o su jomis ir N rautai padidėjo ir prilygo 2000jų m. koncentracijoms ir srautams. Ar tai karo Ukrainoje pasekmė parodys ateities tyrimai.***

K koncentracija ir srautas polajiniuose krituliuose viršija K koncentracijas ir srautą atviros vietos krituliuose daugiau negu 20 kartų ir šis išplovimo intensyvumas keičiantis klimatui nuolat didėja, nors K koncentracijos atviros vietos krituliuose turi tendenciją mažėti, skirtingai negu Aukštaitijos KMS, kur šio elemento koncentracijos atviros vietos krituliuose didėja.

Apibendrinant gautus rezultatus Žemaitijos KMS galima būtų taip pat teigti, kad miško ekosistemos reikšmingai išsivalo nuo sieros komponenčių taršos, didėjantis šarminių katijonų

srautas prisideda prie didėjančio miškų produktyvumo ir atsparumo klimato kaitai, tačiau tik dėl intensyvesnio šarminių katijonų išplovimo ir audinių. Žemaitijos KMS mažėja K, Na ir K koncentracijos bei srautai su krituliais atviroje vietoje. Cl koncentracijų augimą reiktų vertinti kaip neigiamą veiksnį didinantį kritulių rūgštingumą. Paskutiniaisiais metais(2022-2025 m.) registruojamas Na, Ca ir Mg koncentracijų ir srautų mažėjimas į miško paklotę Žemaitijos KMS

Rūgštinančių komponenčių koncentracijos krituliuose ir jų srautai į miško paklotę Žemaitijos KMS baseine yra reikšmingai didesni negu Aukštaitijos KMS baseine, dėl tolimųjų oro teršalų pernašų iš Vidurio ir Vakarų Europos. Čia karo galimos pasekmės mažiau išreikštos.

KMS baseinuose pasibaigė sieros komponenčių nuplovimas nuo lapijos paviršiaus. Nei S koncentracijos polajiniuose krituliuose nei jų srautai su krituliais reikšmingai neviršija šio elemento koncentracijas ir srautus atviroje vietoje. Tai išskirtinai naujas rūgštinančių komponenčių transformacijos rezultatas KMS baseinuose.

Nitratų NO_3^- kaitoje stebimos dvi skirtingos tendencijos. Tyrimų pradžioje dėl intensyvesnės taršos šiais junginiais nuplovimas nuo augalijos paviršiaus iki 2011-2012 m. viršijo sugėrimą šių junginių per žioteles, viršydamas koncentracijas ir srautus atviroje vietoje. Aukštaitijos KMS ši tendencija tęsėsi tik iki 2002 m. Paskutiniuoju laikotarpiu sugėrimas per žioteles viršija nusėdimą abiejose stotyse, indikuojant mažėjančia bendrą oro tarša nitratais.

Amonio NH_4^+ koncentracijų ir srautų kaitoje praeinant pro medžių lapija esminių skirtumų tarp KM stočių nenustatyta. Pagrindinė tendenciją: iki 2000 m. nuplovimas nuo augalijos paviršiaus reikšmingai viršijo amonio sugerties proceso intensyvumą. Paskutiniuoju laikotarpiu sugerties intensyvumas reikšmingai viršijo nuplovimą dėl ko mažėjo šios komponentės koncentracijos polajiniuose krituliuose bei jos srautai į dirvožemį su krituliais.

Na ir Cl koncentracijos ir srautai iki 10 ir 20 kartų atitinkamai yra didesni Žemaitijos KMS negu Aukštaitijos KMS nors jų kaitoje stebimos identiškos tendencijos. Iki 2010 m. abiejose stotyse didėjo nuplovimas nuo lapijos paviršiaus. Paskutiniuoju laikotarpiu nuplovimas mažėja, dėl ko mažėja ir šių komponenčių koncentracijos polajiniuose krituliuose ir jų srautai, turintys reikšmingos įtakos bendram kritulių rūgštingumui ir jo mažėjimui Aukštaitijos KMS baseine.

K, Ca ir Mg kaitoje stebimas ypač intensyvus šių elementų išplovimas iš lapijos indikuodamas, kad šių elementų kiekiai lapijoje turėtų didėti, o nuokritose mažėti. Tai reikšmingas procesas praturtinantis dirvožemį pagrindiniais maistiniais komponentais.

Aukštaitijos KMS per tiriamąjį laikotarpį ir paskutinįjį (2021-2025 m.) atitinkamai N koncentracijos reikšmingai didėja beržo po 0,225 g/kg per m., dabar po0,17 g/kg per m.; pušies I m. spygliuose po 0,158 g/kg per m. dabar po 0,1 g/kg per m.; nereikšmingai pušies II m. spygliuose po 0,117 g/kg per m. dabar po 0,07 g/kg per m. ir mažėja, nors taip pat nereikšmingai – eglės spygliuose po -0,023 g/kg per m. dabar po -0,005 g/kg per m. Nepaisant šio fakto, per visą tiriamąjį laikotarpį N koncentracija lapijoje vidutiniškai didėja po 0,119 g/kg per m., dabar po 0,08 g/kg per m. Tai geros miško ekosistemos būklės rodiklis (4.1 – 4.2 pav. ir 4.1 lentelė), nors augimo intensyvumas mažėja ir tik mažėjimo intensyvumas eglės spygliuose artėja prie nulio***. Tai gali būti pirmieji objektyvūs pušų ir beržų būklės blogėjimo požymiai.***

P kaitoje stebimos skirtingos tendencijos, t.y. jei 2020 m buvo nustatyta, kad visuose tirtuose lapų/spyglių pavyzdžiuose P koncentracija pakankamai reikšmingai mažėja, tai antruoju laikotarpiu jau registruojama ir šios komponentės augimo tendencija. Eglės ir pušies spygliuose P koncentracijos mažėjo po 0,06g/kg, tai dabar eglės spygliuose P didėja po 0,007, o pušies I m. spygliuose po 0,01 g/kg per m. B lapuose P koncentracijos mažėjo i***ntensyviausiai – po 0,05 g/kg per m., tai dabar tik po -0,007*** g/kg per m. Mažėjimo tendencija išliko ir P II m. spygliuose po -0,002 g/kg per m.

Paskutiniuoju laikotarpiu (2021-2025 m.) stebima P koncentracijų augimo tendencija spygliuose, o beržų lapuose dar išlieka stabili.

Per tiriamąjį laikotarpį ir paskutinįjį (2021-2025 m.) atitinka, nustatyta K koncentracijų didėjimo tendencija 2020 m. beržų lapuose po 0,13 g/kg per m., dabar po 0,08 g/kg per m., pušies spygliuose I metų po 0,104 g/kg per m., dabar po 0,07 g/kg per m. ir II metų po 0,128 g/kg per m., dabar po 0,06 g/kg per m. o eglių spygliuose šio elemento koncentracijos išlieka praktiškai stabilios ar dabar kiek ta didėja tik po 0,007 g/kg per m.

Iš esmės priešinga buvo Ca koncentracijų kaita medžių lapijoje. Per 15 m. tiriamąjį laikotarpį Ca koncentracija pakankamai reikšminga mažėjo beržų lapuose (po -0,259 g/kg per m.) ir pušų I metų spygliuose po 0,08 g/kg per m., o didėjo eglių spygliuose (po +0,146 g/kg per m.), tačiau šis augimas nebuvo reikšmingas.

Didžiausios magnio koncentracijos nustatytos beržų lapuose, kur jos vidutiniškai siekė 1,8 g/kg. Mažesnės koncentracijos nustatytos tirtuose spygliuose: eglės ir pušų, kurios reikšmingai nesiskyrė tarpusavyje ir svyravo apie 0,7-0,8 g/kg.

Per tiriamąjį laikotarpį stebima Mg mažėjimo tendencija ir ypač beržų lapuose (po -0,124 g/kg per m.) ir pušies I m. spygliuose (po -0,08 g/kg per m.). Šio elemento pokyčiai

eglės ir pušies II metų spygliuose yra nereikšmingi. Paskutiniuoju laikotarpiu Mg koncentracijos lapijoje reikšmingai nepakito.

Mn kaitoje stebima mažėjimo tendencija tačiau ji nereikšminga ir tik eglių spygliuose Mn didėja (po 0,044g/kg per m.). Paskutiniuoju laikotarpiu esminių pokyčių Mn koncentracijų kaitoje nenustatyta. Esminiai skirtumai registruojami nuo 2020 metų kai Al koncentracija lapijoje reikšmingai pradėjo didėti.

Iš paminėtų elementų reikšmingiausiai didėja geležies koncentracijos visuose pavyzdžiuose. ***Per paskutinįjį laikotarpį Fe koncentracijos lapijoje dar labiau išaugo, o eglių spygliuose 2023 ir 2025 metais pasiekė maksimalias reikšmes. Veiksnius, kurie galėjo sąlygoti tokį Fe koncentracijų augimą (išskyrus nekokybišką cheminę analizę) šiai dienai įvardyti negalima.***

Žemaitijos KMS eglių ir skirtingo amžiaus pušies spygliuose N koncentracija tik tyrimų pradžioje praktiškai nesiskyrė, tačiau pastaruoju laikotarpiu pušies I metų spygliuose N koncentracijos beveik 2 kartus viršija N koncentracijas eglės spygliuose. ***2021-2025 m. šis skirtumas mažėja, kaip ir beržų lapuose mažėja, o eglės spygliuose kaip ir pušies neturi aiškesnės tendencijos.***

Mažiausiomis P koncentracijomis pasižymėjo antrų metų pušies spygliai. ***Per tiriamąjį laikotarpį, nuo 2005 iki 2020 m. bendrojo fosforo koncentracija turi tendencija mažėti. Reikšmingiausiai mažėja P koncentracija beržų lapuose (po 0,07 g/kg per m.). Kituose tirtuose lapijos pavyzdžiuose reikšmingesnių kaitos tendencijų nenustatyta. 2021-2025 m. išsiskyrė reikšmingai padidėjusiomis P koncentracijomis beržų lapuose. Šio elemento didėjo ir eglės bei pušies abiejų amžių spygliuose. Tai pasikartojantis dėsningumas kaip ir Aukštaitijos KMS. P koncentracijos lapijoje didėja. Tai N:P santykio disbalansas galintis turėti neigiamų pasekmių miško ekosistemų medžių būklei ir atsparumui nepalankiems aplinkos veiksniams.***

K koncentracijos didėja ir ypač intensyviai pušies spygliuose. Po sausrų poveikio šio elemento koncentracijos reikšmingai mažėjo.. Paskutiniuoju laikotarpiu didėjimo tendencija liko tik beržų lapuose, kai tuo tarpu spygliuose K koncentracijos išlieka stabilios.

Per 2005-2025 m. laikotarpį beržų lapuose ir pušies II metų spygliuose Ca koncentracijos turi tendenciją didėti, kai likusiuose pavyzdžiuose išlieka stabilios.

Per tiriamąjį laikotarpį Mn ir Mg koncentracijų kaitoje nustatytos mažėjimo ir panašaus intensyvumo tendencijos eglės ir pušų spygliuose. Beržų lapuose registruojami iš šių elementų padidėjimo ir sumažėjimo laikotarpiai.

Aliuminio koncentracijų kaitoje išaiškinti tie patys esminiai pokyčiai kaip ir Aukštaitijos KMS. 2021-2025 m. kaip ir Aukštaitijos KMS, Al koncentracijos lapijoje reikšmingai padidėjo.

Fe koncentracijos lapijoje turėjo reikšmingos tendencijos didėti, kaip ir Aukštaitijos KMS, Šiuos pokyčius reikšmingai sąlygojo paskutiniojo laikotarpio Fe koncentracijų kaitos rezultatai.

Iki 2020 m. Žemaitijos KMS natrio koncentracijų kaitoje aiškesnių tendencijų nenustatyta. 2021-2025 m. registruojamas reikšmingas šio elemento padidėjimas visuose tirtuose lapijos pavyzdžiuose.

Bepasikartojančios sausros bei intensyvūs krituliai gali turėti reikšmingos įtakos makroelementų koncentracijų kaitai, kaip ir bendrai miško ekosistemų būklei bei jos tvariai plėtrai.

Išanalizavus nuokritų kaitą per visą tiriamąjį laikotarpį nustatyta, kad kasmet jų nuolat didėja po maždaug 66 kg/ha, t.y. jei tyrimų pradžioje Aukštaitijos KMS vidutiniškai susidarydavo tik apie 2500 kg/ha nuokritų, tai paskutiniuoju laikotarpiu nuokritų kiekis jau artėja prie 5000 kg/ha ribos, nepaisant fakto, kad 2025 m. nuokritų kiekis artimas mažiausioms savo reikšmėms per visą tiriamąjį laikotarpį. Tai būtų aiškinama, dėl padidėjusio užterštumo pablogėjusia medžių lajų būkle ir mažesne lapijos biomase paskutiniaisiais metais dėl karo padarinių Ukrainoje.

I stacionare augančių medžių lajų defoliacijos (6.7 pav.) ir nuokritų kiekio kaitos analizė parodė, kad didėjantis nuokritų kiekis indikuoja ir didesnę spyglių masę ir mažėjančią defoliaciją, t.y. nuokritų kiekiui didėjant po 100 kg/ha medžių lajų vidutinė defoliacija mažėja maždaug po beveik 0,2 %. Įskaitant paskutinįjį 5 metų laikotarpį nustatytas dėsningumas nepasikeitė, tik sumažėjo priklausomybės reikšmingumas. Nustatytos 2025 m. tarpusavio priklausomybės tarp nuokritų kiekio ir metinių meteorologinių parametrų buvo labai silpnos ir nereikšmingos.

Išanalizavus nuokritų kaitą per visą tiriamąjį laikotarpį Žemaitijos KMS nustatyta, kad nuokritų kiekis kasmet, kaip ir Aukštaitijos KMS, nuolat didėja po maždaug 68,9 kg/ha, t.y. jei tyrimų pradžioje Žemaitijos KMS baseine vidutiniškai susidarydavo tik apie 3000 kg/ha nuokritų, tai paskutiniuoju laikotarpiu nuokritų kiekis jau dažnai viršijo 7000 kg/ha ribą, tik paskutiniuoju laikotarpiu svyruoja apie 5000 kg/ha. Tai būtų aiškinama, kad dėl blogėjančios būklės, formuojasi mažesnė lapijos biomasė, kuri ir sąlygoja mažesnius nuokritų kiekius.

Didėjantis nuokritų kiekis indikuoja ir didesnę spyglių masę ir mažėjančią defoliaciją, t.y. nuokritų kiekiui didėjant po 100 kg/ha medžių lajų vidutinė defoliacija mažėja maždaug po 0,1 %. Silpnesnį koreliacinį ryšį tarp nuokritų kiekio ir medžių lajų defoliacijos galėjo sąlygoti faktas, kad tyrimai šioje stotyje vykdomi brandžiame eglyne, kuriame reikšmingą dalį nuokritų sudaro smulkios šakelės dažniausiai nulaužomos dėl sniego ar apledėjimo.

Ankstesnių tyrimų rezultatai rodė, kad per sezoną Dzūkijos KMS nuokritų rinkimo stotyje susidaro vidutiniškai 3.770 kg/ha nuokritų arba iki 25% daugiau negu Aukštaitijos KMS. Tai sąlygoja medynų, kuriuose registruojamos nuokritos, struktūra. Dzūkijos nuokritų rinkimo stotis įkurta jaunesniame pušyne, kuriame pušys auga žymiai tankiau negu Aukštaitijos nuokritų stotyje.

Ilgalaikiai arbatos pakelių įrimo intensyvumo tyrimai parodė, kad sunkiai irančios arbatos segmentai nesuyra net ir per 4 metų laikotarpį, kai tuo tarpu greitai irančios arbatos, po keturių metų laikotarpio jų segmentų jau nerandama. Gauti rezultatai patvirtina ir sausos medienos irimo greičius, pagal kuriuos, sausa mediena miške ir jau nuvirtusi ant žemės pradeda irti tik po 10 metų pertraukos.

Aukštaitijos KMS nuokritose tirtų maistinių elementų kaitai įtakos turėjo ir sezoniškumas, ir nuokritų struktūros ypatumai. Bendrojo azoto ir fosforo koncentracijų kaitoje išsiskiria laikotarpis, kada šių elementų koncentracijos nuokritose didžiausios, tai pavasario mėnesiai, kada nuokritose pradeda vyrauti ne lapija ar žievė, o pumpurų ir stabilų žvyneliai. Mažiausios N ir P koncentracijos nuokritose registruojamos rudens mėnesiais, kada krenta trečių metų pušies spygliai ir beržų lapai. Per žiemos mėnesius lietus ir sniegas, matyt, išplauna šiuos elementus iš spyglių ir lapų, dėl ko koncentracijos šių elementų nuokritose taip pat vienos iš mažiausių.

Per tiriamąjį laikotarpį iki 2020 m. ***bendrojo azoto kiekis nuokritose turėjo tendenciją didėti po 0,093 mg/g, dabar (įskaitant 2021-2025 m.) didėja jau po 0,08 mg/g per m. N didėjo praktiškai visais metų laikais. N koncentracijų kaita nuokritose yra reikšminga.***

2021-2025 m. N koncentracija nuokritose pasiekė savo maksimalią reikšmę (2025 m.), vidutiniškai siekdama 10g/kg ribą.

Bendrojo fosforo kiekis nuokritose per tiriamąjį laikotarpį, kaip ir lapijoje dabartiniu laikotarpiu, taip pat didėjo po 0,006 g/kg per m. Išsiskiria 2016 m., kai P koncentracijos nuokritose pasiekė savo didžiausią reikšmę per visą tiriamąjį laikotarpį ir ypač nuokritose surinktose per šaltąjį laikotarpį (I).

2021-2025 m. pasižymėjo padidintomis P koncentracijomis nuokritose, o 2025 m. P koncentracija, kaip ir N, pasiekė didžiausią reikšmę – apie 0,9 g/kg.

Per tiriamąjį laikotarpį iki 2020 m. vidutinė ***kalcio koncentracija nuokritose turėjo pakankamai aiškią tendenciją mažėti (po -0,115 g/kg per m.) ir ypač rudens nuokritose (po -0,254 g/kg per m.). 2021-2025 m. tyrimo rezultatai rodo padidėjusias Ca koncentracijas nuokritose dėl ko jo bendra tendencija per visą tiriamąjį laikotarpį pasikeitė. Ca koncentracijos nuokritose palaipsniui didėja po 0,07 g/kg ir artėja prie reikšmingo lygmens. Didžiausios Ca koncentracijos nustatytos 2015-2016 m. laikotarpiu. 2025 m. Ca koncentracijos buvo arti savo maksimalios reikšmės, t.y. apie 5 g/kg.***

Kalio koncentracijoms nuokritose išaiškinta mažėjimo tendencija (po 0,007 g/kg per m.. Intensyviausiai šio elemento mažėja vegetacijos laikotarpio nuokritose. Kritulių stoka galėjo sąlygoti K jonų mažesnį išplovimą iš negyvųjų organų, dėl ko K koncentracijos nuokritose 2018 – 2019 m. didėjo. Gausūs krituliai žiemos ir pavasario laikotarpiu galėjo turėti reikšmingos įtakos K koncentracijų sumažėjimui 2020 m., kai šio elemento vidutinė koncentracija nuokritose pasiekė 1,39 g/kg. 2021-2025 m. registruojamas palaipsnis K koncentracijų nuokritose augimas nuo maždaug 0,7 g/kg 2020 m. iki 1,5 g/kg 2025.

Per tiriamąjį laikotarpį labai panašiai kito Mn ir Mg koncentracijos nuokritose. Mg kaip ir Ca koncentracija nuokritose didėjo po 0,006 g/kg, o Mn kaip ir K mažėjo po -0,003 gt/kg Tačiau skirtingai nuo ankstesnių metalų koncentracijų kaitos, šios kaitos intensyvumas nebuvo abiems atvejais reikšmingas.

Per tiriamąjį laikotarpį Fe ir Al koncentracijos nuokritose turėjo tendencijas didėti ir ypač vasaros pabaigos ir rudens laikotarpio nuokritose. Al kaitos intensyvumas bendrai 1,66 ir buvo nereikšmingas, o Fe viršijo net 4 mg/kg ir buvo reikšmingas, dėl ypač didelių koncentracijų 2021-2025 m. laikotarpiu.

2018-2019 m. sausros turėjo reikšmingos įtakos Zn ir Na koncentracijoms nuokritose mažėti, o palankiais 2020 m. šių elementų koncentracijos nuokritose vėl padidėjo ir pasiekė 2017 m. lygmenį. 2021-2025 m. registruojamas šių elementų padidėjimas Aukštaitijos KMS nuokritose.

Apibendrinus tyrimo rezultatus gautus Aukštaitijos KMS baseine nustatyta, kad paskutiniuoju laikotarpiu dėl bepasikartojančių sausrų poveikio reikšmingai nuokritose pradėjo mažėti K, ir Mn, o didėjimo tendencijos nustatytos N, P, Ca, Fe ir Al koncentracijoms.

Žemaitijos KMS nuokritų cheminė analizė parodė, kad bendrojo N ir P koncentracijų kaitai esminės įtakos, kaip ir Aukštaitijos KMS, turėjo nuokritų sezoniškumas, tačiau

skirtingai nei Aukštaitijos KMS, didžiausios bendrojo azoto ir fosforo koncentracijos stebimos pavasario (II) ir vasaros (III) mėnesiais, kiek mažesnės žiemos (I) ir mažiausios vėlyvo rudens (IV) mėnesiais.

Per tiriamąjį laikotarpį bendrojo azoto ir kalio koncentracijos nuokritose turėjo skirtingas tendencija. Nuo tyrimų pradžios iki 2012-2014 m. šių elementų koncentracijos nuokritose turėjo tendenciją didėti ir jau paminėtais metais pasiekė savo maksimalias reikšmes. Vėliau, 2016-2017 m. didelės koncentracijos dar kartą kartojosi, o paskutiniuoju laikotarpiu išliko artis savo maksimalios vertės, t.y. N – apie 10 g/kg. Tokiu būdu per visą tiriamąjį laikotarpį bendrojo azoto koncentracijos nuokritose didėjo po 0,023 g/kg per m., ir ši didėjimo tendencija, skirtingai nei iki 2020 m., išliko per visus metus.

P kaitoje aiškesnės tendencijos nenustatyta. Per visą tiriamąjį laikotarpį P koncentracija nuokritose mažėja po -0,002 g/kg ir ši tendencija yra nereikšminga.

2015-2019 ir 2023 m. stebimas ženklus P koncentracijų nuokritose mažėjimas iki beveik 0,6 g/kg, o jau paskutiniaisiais metais koncentracijos vėl padidėjo ir 2024 m. pasiekė maksimalią reikšmę – apie 12 g/kg.

K koncentracijų daugiametėje iki 2020 m. kaitoje akivaizdi buvo šio elemento didėjimo tendencija praktiškai visus metus. Intensyviausiai didėjo šio elemento vegetacijos pradžios nuokritose, net po 0,12 g/kg per m. ir ši kaita buvo reikšminga. Po 0,03 g/kg per m. didėjo K koncentracijos ir vasaros bei rudens laikotarpiu nors ir nereikšmingai. Tokia sezoninė koncentracijų kaita sąlygojo, kad vidutiniškai K koncentracija nuokritose per šį tiriamąjį laikotarpį didėja po 0,042 g/kg per m. ir ši kaita yra beveik reikšminga (4.6 lentelė).

2021-2025 m. tyrimo rezultatai reikšmingai pakeitė šią nusistovėjusią tendenciją. Per visą31 m. tiriamąjį laikotarpį K koncentracijos nuokritose nors ir nereikšmingai bet pradėjo mažėti po 0,002 g/kg per m. Didėjimo tendencija išliko tik pavasario mėn. nuokritose, tačiau tik dėl didelių šio elemento koncentracijų 2014-2020 m. laikotarpiu. Paskutiniaisiais metais K koncentracijos reikšmingai mažėja ir šio laikotarpio nuokritose. Galima grėsmė ekosistemoms – reikšmingas K koncentracijų mažėjimas nuokritose 2020-2025 m. laikotarpiu.

Ankstesnių tyrimų rezultatai parodė, kad sausros ar nepakankamas kritulių kiekis atrodo, kad turi įtakos šio elemento gausai nuokritose, dėl sumažėjusio jo išplovimo iš organinio substrato. 2020 m. padidėjus kritulių kiekiui, K koncentracija nuokritose sumažėjo iki 2,32 g/kg, kaip ir buvo sumažėjusi 2017 m. iki 2,1 g/kg. Kokią įtaką turi K srautai su krituliais bus galima įvertinti gavus detalia šio elemento kaitos ore ir krituliuose ataskaitą iš Fizikos instituto mokslininkų.

Kalcio koncentracijų kaitoje sezoniškumo poveikio nustatyti nepavyko, tačiau ***per tiriamąjį laikotarpį iki 2020 m., analogiškai kaip ir Aukštaitijos KMS, nustatyta šio elemento koncentracijų reikšmingas panašaus intensyvumo mažėjimas*** visais metų laikais (po -0,18 -0,23 g/kg per m.) (6.15 pav. ir 6.6 lentelė). Vienos didžiausių šio elemento koncentracijų nustatyta buvo 2016 m. Intensyviu išplovimu 2017 m. būtų galima aiškinti Ca sumažėjimą nuokritose 2017m. Jei ***2018 m. Ca koncentracijų nustatymo patikimumas kėlė abejonių, tai 2019 m. Ca koncentracijos vėl nustatytos vienos iš mažiausių per visą tiriamąjį laikotarpį.***

Analogiškai K koncentracijų kaitos atveju, Ca koncentracijos paskutiniuoju 20020-2025 m. laikotarpiu reikšmingai padidėjo. Dabar, įskaitant ir šį laikotarpį, Ca koncentracijos nuokritose vidutiniškai didėja po 0,07 g/kg per m.ir didžiausios koncentracijos nustatytos žiemos mėnesių nuokritose, kurios Žemaitijos KMS baseine dėl smulkių šakučių gausos juose, siekia maksimalias reikšmes.

Žemaitijos KMS nuokritose iki 2020 m. mažėjo Mg tačiau didėjo Mn koncentracijos praktiškai ištisus metus. Būtent Mn koncentracija nuokritose lemia kritulių kiekis, dėl ko 2017 ir 2020 m. Mn koncentracijos nuokritose buvo mažesnės už 1,5 g/kg, o sausros metais jos viršydavo 1,6-1,8 g/kg. 2020 m. šių elementų nuokritose sumažėjo: Mg iki 1,42 g/kg, o Mn iki 1,4. Tokia priklausomybė nuo kritulių galėjo sąlygoti nereikšmingą nei sezoninę nei daugiametę kaitą.

2020-2025 m. nustatytos koncentracijos pakeitė šį dėsningumą. Kaip ir Aukštaitijos KMS nuokritose pastaruoju laiku mažėja Mn koncentracijos po 0,008 g/kg per m., o Mg didėja po 0,008 g/kg per m. Tai paskutiniųjų etų tyrimo rezultatų išdavą, kuriai reikšmingos įtakos turėjo turėti ir šių elementų srautai su krituliais.

Per tiriamąjį laikotarpį iki 2020 m. Fe ir Al koncentracijos nuokritose, turėjo tendenciją mažėti. Šių elementų mažėjimo intensyvumas buvo panašus ir sudarė po -2,0 ir 2,7 mg/kg per metus, nors ši kaita buvo nereikšminga. Paskutinysis 2020-2025 m. laikotarpis pakeitė Fe koncentracijų kaitos pobūdį, kuris tapo teigiamas, t.y. per visą tiriamąjį laikotarpį Fe koncentracijos nuokritose pradėjo didėti po 1,6 mg/kg per m. ir šis koncentracijos didėjimas tęsėsi per visą metų sezoną. Al koncentracijos dabartiniu laikotarpiu mažėja po -0,27 mg/kg per m. Šių elementų kaitą Žemaitijos KMS baseine yra nereikšminga.

Zn koncentracijos per visą tiriamąjį laikotarpį praktiškai išlieka panašiame lygmenyje, 2020 m. jo koncentracija pasiliko apie 50 mg/kg lygmenyje, kai tuo tarpu Na koncentracijoje nustatytas ryškus padidėjimas iki 210 mg/kg. Tai didžiausia reikšmė per visą

tiriamąjį laikotarpį ir ji turėtų būt siejama su Baltijos jūros įtaka ir vyraujančių vėjų kryptimi. 2025 m. Xn koncentracijos reikšmingai nepakito, o Na kiek tai mažėjo ypač 2023 m.

Išskirtinis nuokritų cheminės analizės rezultatų bruožas - daugeliu atveju sausra sąlygojo tirtų elementų didėjimo procesą, dėl jų sumažėjusio išplovimo krituliais ir priešingai, gausūs krituliai išplaudavo elementus, dėl ko jų koncentracijos nuokritose turėjo tendenciją mažėti.

Santykis ir balansas tarp elementų:

Aukštaitijos KMS nuokritose vidutiniškai azoto sumažėjo 2 kartus, t.y. maždaug nuo 14 mg/g iki 7 mg/g. Nepaisant fakto, kad N koncentracijos turi tendenciją nors ir nereikšmingą didėti, o jų santykis turi tendenciją mažėti, po -0,008 per m.

P koncentracijos nuokritose vidutiniškai mažėja daugiau kaip 2,5 karto, t.y. nuo 1,4 mg/g lapijoje iki 0,8 mg/g nuokritose. Dėl didėjančių P koncentracijų nuokritose jų santykis turi tendenciją mažėti po -0,02 per m., tačiau, kaip ir N atveju, ši tendencija yra nereikšminga.

Na nuokritose skirtingai nei N ir P koncentracijos yra iki 1,5 karto didesnės negu lapijoje. Tiriamuoju laikotarpiu – pradžioje šis santykis didėjo nereikšmingai, svyruodamas apie vieneto reikšmę, tai paskutiniuoju laikotarpiyu Na koncentracijos lapijoje pradėjo viršyti šio elemento kiekius nokritose.

Chloro kaitoje matyti, kad lapijoje šio elemento yra daugiau, o jai senstant ir nukrentant, dėl šio elemento lakumo, koncentracijos nuokritose yra vidutiniškai virš 2 kartus mažesnės negu lapijoje. Paskutiniuoju laikotarpiu ši tendencija pasitvirtino tik iš dalies.

Pagrindinių šarminių katijonų Ca, K, Mg kaitoje stebima bendra tendencija: Nuokritose jų koncentracijoms mažėjant didėja santykis tarp jų koncentracijų lapijoje ir nuokritose. Tai rodo šiltėjančio klimato ir gausėjančių kritulių didėjanti išplovimo ir lapijos audinių intensyvumą.

Aukštaitijos KMS nuokritose kaupiasi daugiau Ca negu lapijoje ir šis santykis po truputį artėja prie 1 didėdamas po 0,0025 per m. Ir indikuodamas, kad skirtumas tarp šio elemento koncentracijų gyvojoje lapijoje ir nuokritose mažėja.

Mg iš lapijos yra intensyviai išplaunamas, todėl jo koncentracijos nuokritose yra mažesnės negu lapijoje. Per tiriamąjį laikotarpį Mg santykis nors ir nereikšmingai didėja po 0,02 per m. Indikuodamas, kad išplovimo procesas intensyvėja.

K intensyviausiai iš lapijos išplaunamas elementas. Šio elemento koncentracijos nuokritose iki 4 kartų mažesnės negu lapijoje. Per tiriamąjį laikotarpį šis santykis turi tendenciją didėti dėl K koncentracijų didėjimo lapijoje ir mažėjimo nuokritose po 0,05 per m.

Reikšmingiausiai kito suminis tirtų šarminių katijonų sumažėjimo nuokrituose snatykis. Jei tyrimų pradžioje nuokritose šių elementų buvo tik apie 1,2 karto mažiau negu lapijoje, tai paskuriniuoju laikotarpiu šis santyukis padidėjo iki beveik 2 kartų 2019-2020m. Paskutiniuoju laikotarpiu šis santykis vėl pradėjo mažėti dėl didėjančių koncentracijų lapijoje iki 1,5 karto.Tai klimato kaitos ir tolimųjų oro pernašų rezultatas.

Žemaitijos KMS baseinas

Azoto ir fosforo koncentracijos nuokritose dėl šių elementų panaudojimo fiziologiniuose procesuose iki 2020 m. mažėjo lyginant su koncentracijoms lapijoje iki 1,4 ir 1,8 karto atitinkamai, o jų santykis turėjo tendenciją mažėti. Paskutinysis laikotarpis pakeitė šią tendenciją: N santykis didėja po 0,007, o P santykis didėja po 0,009 per m. Tai pagrinde dėl šių elementų koncentracijų mažėjimo nuokritose, kurį sustiprina papildomai nors ir nereikšmingas N koncentracijų augimas lapijoje.

Pagrindinių šarminių katijonų kaitoje stebima skirtinga tendencija negu Aukštaitijos KMS: Nuokritose šių elementų koncentracijoms mažėjant, dėl mažėjančių koncentracijų lapijoje ir krituliuose patenkančiuose su tolimosiomis pernašomis į dirvožemį, mažėja taip pat santykis tarp jų koncentracijų lapijoje ir nuokritose.

Išsiskiria tik Ca koncentracijų kaita, kur santykis tarp Ca koncentracijų lapijoje ir nuokritose visą tiriamąjį laikotarpį praktiškai išlika stabilus ir artimas 1, nors registruojamas šio santykio mažėjimas po 0,005 per m.

K išplaunamas iš lapijos audinių intensyviausiai. Jo koncentracijoms didėjant lapijoje, bet išliekant stabiliomis nuokritose, santykis didėja po 0,027 per m.

Mg iš lapijos yra išplaunamas paskutiniuoju laikotarpiu silpniau negu tyrimų pradžioje ir jo santykis pradėjo mažėti po 0,014 per m. Tai lėmė mažėjanti Mg koncentracija lapijoje ir didėjanti koncentracija nuokritose. Šio elemento patenka mažiau su tolimosiomis pernašomis dėl ko jo koncentracija pradeda mažėti ir lapijoje. Dėl šios priežasties santykis tarp Mg koncentracijų lapijoje ir nuokritose 2025 m sumažėjo iki 1,5 karto.

Nepaisant skirtingų kaitos tendencijų, nustatytą didėjantį santykį iki 2020 m., 2025 metai pakeitė jau silpnai mažėjantis santykis – po 0,006 karto per m., nors suminis šių elementų kiekis tiek lapijoje tiek ri nuokritose turėjo tendenciją didėti.

Apibendrinus Žemaitijos KMS rezultatus nustatyta, kad N ir P koncentracijos nuokritose dėl šių elementų panaudojimo fiziologiniuose procesuose mažėja lyginant su koncentracijoms lapijoje iki 1,4 ir 1,8 karto atitinkamai, nors per visą tiriamąjį laikotarpį turi tendenciją didėti dar po 0,007-0,009 karto per m. Na ir Cl koncentracijos dėl aiškesnės tendencijos nebuvimo, praktiškai buvo stabilios, taip pat kaip ir jų santykis, kurį

reikšmingai pakeitė nevienareikšmiškai paskutiniųjų metų duomenys. Mg iš lapijos yra išplaunamas paskutiniuoju laikotarpiu silpniau negu tyrimų pradžioje ir jo santykis pradėjo mažėti po 0,014 per m. Tai lėmė mažėjanti Mg koncentracija lapijoje ir didėjanti koncentracija nuokritose. K išplaunamas iš lapijos audinių intensyviausiai. Jo koncentracijoms didėjant lapijoje, bet išliekant stabiliomis nuokritose, santykis didėja po 0,027 per m. Išsiskiria tik Ca koncentracijų kaita, kur santykis tarp Ca koncentracijų lapijoje ir nuokritose visą tiriamąjį laikotarpį praktiškai išlika stabilus ir artimas 1. ***Šią kaitą esminiai galėjo sąlygoto didėjantis K, Ca ir Mg srautas su krituliais, kuris didino šių elementų koncentracijas lapijoje.***

Srautų su nuokritomis lyginamoji analizė.

Tirtų elementų srautų analizė parodė, kad Aukštaitijos KMS mišriame ir perbrendusiame pušyne su nuokritomis į paklotę azoto vidutiniškai patenka apie 2,7 g/m^2, kai tuo tarpu Žemaitijos KMS bręstančiame eglyne beveik 2 kartus daugiau, apie 5,1 g/m^2. Per tiriamąjį laikotarpį šio elemento srautas su nuokritomis didėja po 0,07 g/m^2 per m., abiejose stotyse vienodai, tik Aukštaitijos KMS jis buvo reikšmingas, o Žemaitijos KMS – per 2020-2025 m. laikotarpį sumažėjo nuo 0,12 iki 0,07 g/m^2 per m.

Aukštaitijos KMS mišriame ir perbrendusiame pušyne su nuokritomis į paklotę fosforo vidutiniškai patenka apie 0,22 g/m^2, kai tuo tarpu Žemaitijos KMS bręstančiame eglyne taip pat beveik 2 kartus daugiau, apie 5 g/m^2. Per tiriamąjį laikotarpį Aukštaitijos KMS šio elemento srautas su nuokritomis didėja po 0,005 g/m^2 per m., o Žemaitijos KMS vos po 0,002 g/m^2 per m.

Aukštaitijos KMS mišriame ir perbrendusiame pušyne su nuokritomis į paklotę Mg vidutiniškai patenka virš 0,2 g/m^2, kai tuo tarpu Žemaitijos KMS bręstančiame eglyne apie 0,3 g/m^2. Per tiriamąjį laikotarpį Aukštaitijos KMS šio elemento srautas su nuokritomis didėjo po 3,2 mg/m^2 per m., o Žemaitijos KMS intensyviau, po 7,3 mg/m^2 per m.

Aukštaitijos KMS mišriame ir perbrendusiame pušyne su nuokritomis į paklotę Ca vidutiniškai patenka apie 2 g/m^2, kai tuo tarpu Žemaitijos KMS bręstančiame eglyne apie 2,5 g/m^2. Per tiriamąjį laikotarpį Aukštaitijos KMS šio elemento srautas su nuokritomis didėja po 0,037 g/m^2 per m., o Žemaitijos KMS intensyviau, po 0,049 g/m^2 per m.

Aukštaitijos KMS mišriame ir perbrendusiame pušyne su nuokritomis į paklotę K vidutiniškai patenka apie 0,50 g/m^2, kai tuo tarpu Žemaitijos KMS bręstančiame eglyne apie 1,2 g/m^2. Per tiriamąjį laikotarpį abiejose stotyse K srautas su nuokritomis išliko stabilus paminėtame lygmenyje.

Aukštaitijos KMS mišriame ir perbrendusiame pušyne su nuokritomis į paklotę Fe vidutiniškai patenka apie 50,0 mg/m^2, kai tuo tarpu Žemaitijos KMS bręstančiame eglyne apie

80 mg/m^2. Per tiriamąjį laikotarpį Aukštaitijos KMS šio elemento srautas su nuokritomis didėja po 2,63 mg/m^2 per m., o Žemaitijos KMS kiek mažiau po 1,93 mg/m^2 per m.

Aukštaitijos ir Žemaitijos KMS su nuokritomis į paklotę Al vidutiniškai patenka vienodai apie 90 mg/m^2. Per tiriamąjį laikotarpį Aukštaitijos KMS šio elemento srautas su nuokritomis didėja po 2,02 mg/m^2 per m., o Žemaitijos KMS kinta nereikšmingai, vos po 0,78 mg/m^2 per m. (6.17 pav.).

Didėjantys maistinių medžiagų srautai su nuokritomis nuokritomis gali paskatinti trumpalaikį maistinių medžiagų įsisavinimą bei didesnį ekosistemos produktyvumą, tačiau jų ilgalaikė ekologinė reikšmė priklauso nuo dirvožemio kaupimo ir reasimiliacijos procesų efektyvumo, kuris galiausiai lems, ar miško ekosistemos ateityje, veikiant aplinkos veiksniams, veiks kaip kaupiančioji, ar kaip išeikvojanti maistinių medžiagų sistema.

DIRVOŽEMIS IR VANDENYS

Aukštaitijos KMS geosistemos dirvožemiui būdingos mažesnės organinės medžiagos atsargos todėl vandens apykaitos pokyčiai ir įtaka ekosistemai ryškiau matyti, negu Žemaitijos KMS geosistemoje, kur organinės medžiagos, pasižyminčios buferinėmis savybėmis ir didele sorbuojančiąja galia, neutralizuoja vykstančius pokyčius.

Abiejose KMS dėl vandens apytakos sulėtėjimo, ilgesnio kontakto tarp dirvožemio skystosios ir kietosios fazių, didėja dirvožemio, gruntinio ir upelio vandens rūgštumas.

Vienas svarbiausių pokyčių Aukštaitijos KMS baseine yra dirvožemio vandens atsargų reikšmingas didėjimas nuo 2018 m., kuris turėjo turėti reikšmingos įtakos visiems bio-, geo sisteminiams procesams vykstantiems ekosistemoje.

Aukštaitijos KMS dirvožemio vandens pH 2004-2013 metais buvo neutralus, bet augant dirvožemio drėgnumui 2015-2025 metais rūgštėjo. Žemaitijos KMS dirvožemio vanduo buvo rūgštus nuo stebėsenos pradžios, bet tapo dar rūgštesnis 2025 metais, pasiekdamas žemiausias pH reikšmes nuo stebėsenos pradžios 20 cm gylyje. Tai galimai ***nauja grėsmė Lietuvos vakarinės dalies miško ekosistemoms, KURIĄ GALĖJO SĄLYGOTI KARO VEIKSMAI UKAINOJE.***

Besikeičiančios aplinkos sąlygos ir tolimųjų oro teršalų kaita per visą tiriamąjį laikotarpį turi didinantį dirvožemio vandens rūgštėjimą poveikį. Tai reikšmingas veiksnys galintis ateityje turėti esminės įtakos miško ekosistemų bendram tvarumui.

Toks vandens rūgštingumo didėjimas ir SiO_2 koncentracijos mažėjimas Aukštaitijos KMS gali sustiprinti globalios aplinkos kaitos naujų grėsmių poveikį šio regiono miško ekosistemoms, kuris gali pasireikšti per rūšių įvairovės nykimą, miškų atsparumo nepalankiems veiksniams mažėjimą bei jų bendros būklės ir produktyvumo mažėjimą. ***Tai nauja registruojama grėsmė Aukštaitijos KMS miško ekosistemoms***

Išskirtinai palankus ekosistemoms reiškinys yra sulfatų kiekio reikšmingas sumažėjimas dirvožemio vandenyje. Aukštaitijos KMS beveik 4-5 kartus, Žemaitijos KMS net iki 10 kartų mažiau negu tyrimų pradžioje. ***Paskutiniuoju laikotarpiu Aukštaitijos KMS 2021 ir 2024 metais registruotas pakankamai ženklus sulfatų padidėjimas vandenyje, o Žemaitijos KMS jau nuo 2020 m. sulfatų kaitą galima būtų vertinti kaip didėjančią. Ar tai naujai besiformuojančios grėsmės pradžia*** parodys ateities tyrimai.

Dirvožemio vandens didėjanti rūgštingumą galėjo sąlygoti Ca, K ir Mg koncentracijų mažėjimo tendencija, kuri reikšmingiausiai pasireiškė Ca – Aukštaitijos KMS, o Mg ir K abiejų stočių dirvožemio vandenyje. ***Tai nepageidautinas reiškinys, kuris gali sąlygoti reikšmingesnius neigiamus pokyčius miško ekosistemoje per dirvožemio ir jo vandens rūgštingumo tolesnį didėjimą.***

Kalio koncentracijų mažėjimas dirvožemio vandenyje gerai siejasi ir su jo koncentracijų mažėjimu lapijoje. Pagrindinių priežasčių, lemiančių K jonų mažėjimo tendencijas reiktų ieškoti kritulių cheminės analizės rezultatuose, bei bendrame šio elemento srauto kaitoje.

Tokie beprasidedantys nauji neigiami pokyčiai miško ekosistemose galėjo turėti reikšmingos įtakos visuminio N ir P pokyčiams, kurie jau kai kuriuose dirvožemio gyliuose pradėjo mažėti, ką būtų galima sieti su gyvųjų organizmų veiklos intensyvėjimo mažėjimu, pedobijontų rūšinės sudėties ir gausumo mažėjimu. Tik Žemaitijos KMS visuminio V koncentracija paviršinio sluoksnio vandenyje 201-2025 m. laikotarpiu reikšmingai didėja.

Azoto, fosforo bei tirpios organinės anglies koncentracijų sumažėjimą dirvožemio vandenyse galėjo sąlygojo po sausrų gausūs kritulių kiekiai, dėl ko dirvožemiai tapo drėgnesni.

Na koncentracija dirvožemio vandenyje toliau didėja abiejose stotyse. Mn koncentracijos per visą tiriamąjį laikotarpį ženkliai mažėja nepriklausomai nuo kritulių kiekio.

Paskutiniuoju laikotarpiu Fe ir Al koncentracijos dirvožemio vandenyje reikšmingai nekinta, išlikdamos pakankamai stabiliame lygmenyje.

Nustatytas dėsningumas: iki 2020 m. medžiagų koncentracijos dirvožemio vandenyje turi nevienodas tendencijas. Tirpiausius junginius sudarančių elementų

koncentracijos Cl, K, Na turi tendenciją mažėti, o mažai tirpius arba gebančius formuoti kompleksinius junginius su organinių medžiagų skilimo produktais (Si, Al fosfatų P)– augti. 2025 m. Tyrimų rezultatai parodė priešingas tendencijas. Toks ryškus pasikeitimas galėjo sąlygoti neigiamus pokyčious miško ekosistemose, ypač Aukštaitijos KMS baseine.

2020 – 2025 m. laikotarpiu nustayta, kad sekliausiame vandens rūgštingumas didėja, kaip ir dirvožemio vandenyje. gilesniuose gręžiniuose stebimas atvirkščias procesas, pH reikšmė palaipsniui auga ir tik giliausiame gręžinyje pH reikšmė išlieka stabili. Žemaitijos KMS, kaip ir dirvožemio vandens, gruntinio vandens rūgštingumas yra padidėjęs lyginant su 2004-2012 m.

Dėl nevienodų gruntinio vandens mitybos ypatybių ir debito kaitos specifinis laidumas stebėjimo laikotarpiu Aukštaitijos ir Žemaitijos KMS turi skirtingas tendencijas; Aukštaitijos stotyje mažėjo (iki 2017-2019), o Žemaitijos didėjo.

Reikšmingas pokytis galintis turėti reikšmingos įtakos miško ekosistemų tvarumui – Cl koncentracijų kaita gruntiniuose vandenyse: nuo tyrimų pradžios iki 2013-2014 metų Aukštaitijos KMS koncentracijos svyravo apie 6, po šių metų iki 2025 sumažėjo ir svyruoja apie 2 mg/l; Žemaitijos KMS baseine iki nustatyto laikotarpio svyravo apie 4, paskutiniuoju laikotarpiu padidėjo iki 6-8 mg/l, nors paskutiniaisiais metais turi tendenciją mažėti.

Visuminio fosforo ir fosfatų koncentracija gruntiniuose vandenyse 2003-2013 metais buvo pakilusi, o vėliau sumažėjo. 2024-2025 metais Žemaitijos KMS vėl fosfatų koncentracija ėmė didėti – tai dėsningai sutapo su mažesniu gruntinio vandens rūgštingumu, būdingu tiems laikotarpiams.

Al koncentracijos Žemaitijos KMS gruntiniuose vandenyse 2014-2020 m. pasiekė mažiausias reikšmes per visą laikotarpį**.** Priešingai, pastaraisiais metais Aukštaitijos KMS, ypač trečiajame gręžinyje nustatytos didžiausios aliuminio koncentracijos, tikėtina dėl pastaraisiais metais fiksuojamo augančio gruntinio vandens debito trečiajame gręžinyje ir su tuo susijusio padidėjusio mineralų dūlėjimo. 2024-2025 m. Al koncentracijos abiejose stotyje pasiekė savo minimaliausias reikšmes.

Gruntiniame vandenyje ištirpusios organinės anglies koncentracija Aukštaitijos KMS sekliųjų gręžinių vandenyje 2012-2020 metais buvo stabili arba mažėjo. Didžiausia per stebėsenos laikotarpį visuminės anglies koncentracija gruntiniai vandenys pasižymėjo Aukštaitijos KMS 2021-2024 metais, o Žemaitijos KMS 2022 metais, kai eglynai buvo masiškai pažeisti kenkėjų.

Palyginus sulfatų koncentracijas tarp stočių, nustatyta, kad didžiausios išliko Žemaitijos KMS – koncentracijos sumažėjo nuo 20 iki 4 mgS/l, kiek mažesnės Dzūkijos

KMS – koncentracijos sumažėjo nuo 15 iki 3 mgS/l ir mažiausios Aukštaitijos KMS – koncentracijos sumažėjo nuo 15 iki 1-2 mgS/l. Tai reikšmingiausias pagrindinės rūgštinančios komponentės sumažėjimas.

Paskutiniuoju laikotarpiu Ca ir Mg koncentracijos Aukštaitijos KMS išlieka stabilios.

Nitratų ir amonio jonų kaitos ***rezultatas, bendrojo azoto kiekio mažėjimas KMS baseinų gruntiniuose vandenyse. Padidėjimas Aukštaitijos KMS gruntiniuose vandenyse registruojamas 2022 m., o Žemaitijos KMS gruntiniame vandenyje 2023 m.***

Medžiagų koncentracijų kaita gruntiniame vandenyje stebėsenos laikotarpiu pagal rūgštumo kaitos tendenciją panaši į dirvožemio vandens: vandens rūgštumas šiek tiek didėja, Žemaitijos KMS gruntiniame vandenyje rūgštumo pokytis yra ryškesnis. Tirpiųjų elementų koncentracijų kaitos tendencijos Aukštaitijos ir Žemaitijos stotyse skiriasi: Žemaitijos gruntiniame vandenyje yra augimo tendencijos (Cl, SEl), o Aukštaitijos KMS gruntiniame vandenyje, ypač gilesniųjų gręžinių, tirpiųjų elementų koncentracijos mažėja.

Dzūkijos KMS gruntiniuose vandenyse pH reikšmė, visuminio P, NO3, Fe koncentracijos liko nepakitusios, kai tuo tarpu SEL, Cl, K, Na, SO4, Ca, Mg, NH4, Si, Mn sumažėjo.

Išskirtinis laikotarpis: 2013-2014 m., kai tirtų komponenčių koncentracijų kaita gruntiniuose vandenyse keitė pobūdį ar kai šiuo laikotarpiu buvo registruojamas koncentracijų ar padidėjimas, ar priešingai sumažėjimas.

Aukštaitijos KMS upelio nuotėkio vidutinis intensyvumas (debitas) buvo mažiausias 2009, 2015-2016 ir 2019-2020 metais, o didžiausias: ***2005-2006, 2013 ir 2024-2025. Tai išskirtiniai metai, į kuriuos privalu atkreipti dėmesį analizuojant pokyčius ekosistemoje ir aiškinat ateities grėsmes stabilumui.***. Žemaitijos KMS upelio debitas kinta beveik cikliškai, bet palyginus su Aukštaitijos KMS upelio nuotėkiu, metais „vėluoja“

Upelio vandens rūgštingumas mažėjo Aukštaitijos KMS baseine siekdamas beveik po 0,006 pH per metus. Žemaitijos KMS upelio rūgštingumas paskutiniuoju laikotarpiu priešingai pradėjo didėti po 0,007 pH per m. Ypač rūgštingumas šioje stotyje padidėjo 2020-2025 m. laikotarpiu.

Šarmingumo ir specifinio elektrinio laidumo reikšmės per stebėjimų laikotarpį turi tendenciją augti Aukštaitijos KMS, o Žemaitijos KMS mažėti. Šie rezultatai reikšmingai siejasi su vandens rūgštingumą indikuojančio rodiklio kaitos ypatumais. Mažai kito ir Dzūkijos KMS vidutinis upelio vandens šarmingumas: 1998 metais buvo 143, o 2025 metais buvo 144 mg/l.

Specifinio elektrinio laidumo reikšmių kaitoje stebimos skirtingos tendencijos: Aukštaitijos KMS upelio vandenyje šis parametras turi tendenciją didėti, o Žemaitijos KMS baseino upelio vandenyje – priešingai mažėti.

Reikšmingiausia kaita abiejų KM stočių upelio vandenyse nustatyta sulfatų ir ypač Aukštaitijos KMS baseine. Čia sulfatų koncentracija mažėja po -0,6 mg/l per metus. Žemaitijos KMS upelio vandenyje sulfatų mažėjimo intensyvumas beveik 2 kartus silpnesnis ir siekia po -0,25 mg/l per metus.

Upelio vandenyje ištirpusių sulfatų kiekis reikšmingai mažėja ir Dzūkijos KMS, kur vidutinė sulfatų koncentracija upelio vandenyje 1998 metais buvo 15,5 mg/l, o 2025 metais daug mažesnė – 9,9 mg/l. Tai ekosistemų išsivalymo nuo S junginių rezultatas.

Nitratų (NO_3^- N) ir amonio (NH_4^+ N) kito beveik sinchroniškai. Nustatytas daugiametis trendas rodo, kad šių junginių koncentracijos upelio vandenyje turi tendenciją mažėti, išskyrus tik nitratus Aukštaitijos KMS upelio vandenyje.

Dzūkijos KMS amonio azoto upelio vandenyje 2025 metais yra aukšta: metų vidurkis 1998 metais buvo 0,025 mg/l, o 2025 metais daug didesnis – 0,056 mg/l; nitratų azoto vidutinė reikšmė nekinta 1998 metais buvo 0,112 mg/l, o 2025 metais – 0,113 mg/l.

Fosfatų ir visuminio fosforo koncentracijos Aukštaitijos KMS upelio vandenyje keičiasi skirtingai: fosfatų koncentracijos, nors ir nereikšmingai turi tendenciją didėti, o visuminio P koncentracijos, nors taip pat nereikšmingai, turi tendenciją mažėti. Paskutiniaisiais metais šių junginių koncentracijos buvo padidėjusios.

Dzūkijos KMS upelio vandenyje fosfatai 1998 metais nebuvo matuojami, o 2025 metais buvo 50,3 µg/l; visuminio fosforo kiekis 1998 metais buvo 92,5 µg/l, o 2025 metais – 139,2 µg/l.

Visuminio fosforo koncentracijos tirtų upelių vandenyje mažėja, tik 2024-2025 metais abiejose stotyse išaugo visuminio P iki didžiausių reikšmių nuo 1998 metų.

Išskirtinis SiO2 koncentracijos bruožas 2022-2023 m. ženkliai išaugusios šio junginio koncentracijos abiejų stočių vandenyse.

Per visą tiriamąjį laikotarpio Cl elemento koncentracijų daugiametė tendencija yra neigiama. Abiejų KM stočių upelio vandenyse chloro mažėja beveik vienodu intensyvumu, t.y. po 0,04-0,06 mg/l per metus. Tačiau paskutiniuoju laikotarpiu stebimas Cl koncentracijų upelių vandenyse augimas, ypač 2021 ir 2022 m.

KM stotyse kalcio, magnio bei sulfatų koncentracija upelių vandenyje palaipsniui mažėjo nuo tyrimų pradžios iki 2015 metų sausros, 2018-2025 m. laikotarpiu Ca

koncentracijos Aukštaitijos upelio vandenyje vėl pradėjo didėti, kai tuo tarpu Žemaitijos KMS upelyje toliau palaipsniui mažėjo.

Didžiausiu koncentracijų kaitos stabilumu pasižymi Na ir K koncentracijos. Per tiriamąjį laikotarpį šių elementų koncentracijos iš esmės nesikeitė nei Aukštaitijos, nei Žemaitijos KMS upelių vandenyse.

Dzūkijos KMS natrio vidutinė koncentracija 1998 metais buvo 3,54 mg/l, o 2025 metais – 3,61 mg/l; magnio upelio vandenyje 1998 metais buvo 10,0 mg/l, o 2025 metais buvo 5,7 mg/l; 1998 metais kalio buvo 0,43 mg/l, o 2025 metais – 0,84 mg/l.

Aukštaitijos KMS upelio vandenyje aliuminio koncentracija neviršija mažiausios nustatymo ribos ir mažėja po -1,65 ug/l per m., tai Žemaitijos upelio vandenyje didėja po 2,5 ug/l per m. ir 2019-2025 m. laikotarpiu viršija net 100 ug/l ribą.

Dzūkijos KMS aliuminio koncentracija upelio vandenyje 2025 metais buvo 29,7 µg/l; mangano kiekis 1998 metais buvo 26,1 µg/l, o 2025 metais – 14,6 µg/l; geležies kiekis 1998 metais buvo 80,0 µg/l, o 2025 metais – 82,7 µg/l. Tai kiekiai panašūs į nustatytus Žemaitijos KMS upelyje.

Visuminio organinio anglingumo kreivės rodo, kad šio elemento kaitoje jokios ryškesnės kaitos tendencijos nenustatytos iki 2020 m. Paskutiniaisiais metais gausūs krituliai padidino organinės anglies išplovimą iš miško ekosistemų ir ypač Aukštaitijos KMS, kur šio elemento koncentracija išaugo iki 3 kartų.

Dzūkijos KMS iki 2003 metų upelio vandens visuminis organinis anglingumas (DOC) nebuvo matuojamas, o 2025 metais vidutiniškai buvo 7,54 mg/l, didžiausias, 31,6 mg/l, 2025 metų rugsėjo mėnesį. Tai yra Dzūkijos KMS upelio DOC buvo panašus į Aukštaitijos upelio vidutinį DOC 2007-2016, 2019 ir 2020 metais.

Geležies (Fe) koncentracijos Aukštaitijos KMS upelio vandenyje neturi reikšmingos kaitos tendencijos per visą tiriamąjį laikotarpį. Didžiausias geležies koncentracijos padidėjimas registruojamas tik paskutiniaisiais 2024-2025 m. Žemaitijos KMS upelio vandenyje geležies koncentracijos yra iki 10 kartų didesnės negu Aukštaitijos KMS upelio vandenyje. Reikšmingas koncentracijų padidėjimas registruotas tik 2007 m. 2018-2025 m. laikotarpiu registruojamas ženklus Fe koncentracijų augimas Žemaitijos KMS upelio vandenyje.

Reikšmingiausią įtaką upelio vandens cheminės sudėties kaitai pastaraisiais metais turi sausringi metai bei klimato šiltėjimas. Sausringais metais padidėjusį organinių medžiagų skaidymąsi rodo nuoseklus Mn, amonio bei nitratų azoto koncentracijų upelio vandenyje išaugimas, nors ir ne visada lydimas visuminės organinės anglies bei geležies

koncentracijos padidėjimo. Silicio koncentracijų didėjimas liudija apie mineralinės ekosistemos dalies dūlėjimo intensyvėjimą. Medžiagų išplovimo upelio vandeniu skyriuje šie dėsningumai turėtų būti ryškesni.

Organinės anglies, azoto ir fosforo junginių koncentracijų <u>staigų išaugimą dirvožemio, gruntiniame ir upelio vandenyje lemia po sausrų atėjusių lietingų laikotarpių vandens srautų tirpdomoji veikla.</u> Tų pačių metų rudenį arba kitų metų pavasarį išauga organinės anglies koncentracija, o vėliau, vykstant tolimesniam atsparių organinių junginių skilimui padidėja visuminio azoto ir nitratų bei fosforo koncentracija ir išnešimas upelio vandeniu. Sausros poveikyje organinės anglies, azoto ir fosforo koncentracija dirvožemio ir gruntiniame vandenyje padidėja du ir daugiau kartų. 2020 metais, palyginus su 2019 daugiau kaip du kartus padidėjo visuminio azoto ir fosforo koncentracija dirvožemio vandenyje.

Nors upelio nuotėkio modulis per stebėsenos laikotarpį mažėjo, bet ir organinių, ir mineralinių azoto junginių išplovimas turi tendenciją augti. Didėjantį azoto junginių išplovimą iš Aukštaitijos KMS ekosistemos patvirtina ir visuminio azoto kiekio sumažėjimas visame dirvožemio profilyje - tai gali liudyti apie nepalankią ekosistemai organinės dirvožemio dalies transformaciją, mažinančią sorbuojančią dirvožemio galią.

2025 m. rodo naujų procesų miško dirvožemyje pradžią.

Dirvožemio rūgštingumas pradėjo didėti visose stotyse ir dirvožemio profilio visuose gyliuose. Katijonų mainų talpa taip pat yra sumažėjusi lyginant su tyrimų pradžia, nors paskutiniuoju laikotarpi lyginant su 2020 m. turi tendencija didėti. Prisotinimas bazėmis laipsnis per visą tiriamąjį laikotarpį išliko pakankamai stabiliame lygmenyje, o judraus aliuminio ir geležies santykis reikšmingai sumažėjo. Visuminės organinės anglies reikšmingai padidėjo Aukštaitijos ir Dzūkijos dirvožemio gilesniuose sluoksniuose, o Žemaitijos KMS dirvožemyje išliko panašiame lygmenyje kaip ir 2020 m. Visuminio azoto mažėjo Aukštaitijos KMS dirvožemyje išliko panašiame lygmenyje Dzūkijos KMSir kiek tai mažėjo Žemaitijos KMS dirvožemyje. Visuminio P koncentracijos mažai pakito Aukštaitijos ir Dzūkijos KMS dirvožemiuose bet pradėjo mažėti Žemaitijos KMS dirvožemyje.. Priešingai sieros koncentracijų kaitoje nustatyta, kad šio elemento vėl pradėjo didėti Aukštaitijoje, nors S srautas su krituliais šioje stotyje minimalus ir ypač reikšmingai Žemaitijos KMS, kas būtų galima jau vardinti kaip galima ateities grėsmė Vakarų Lietuvos miškų ekosistemoms.

SUNKIEJI METALAI

Aukštaitijos KMS grėsmę miško ekosistemoms galėtų kelti paskutiniaisiais metai reikšmingai padidėjusios Cr koncentracijos ir šio elemento srautai su krituliais, o taip pat reikšmingai didėjanti Cu koncentracija krituliuose ir šio elemento srautas į miško paklotę.

Teigiami pokyčiai, kurie galėtų skatinti atitinkamų biotos komponentų rūšių įvairovę ir gausą turėtų būti reguliariai mažėjanti vienų toksiškiausių sunkiųjų metalų Pb ir Cd koncentracijos krituliuose ir jų srautai.

Žemaitijos KMS sunkiųjų metalų koncentracijų ir jų srautų kaita neturėtų sukelti naujų grėsmių miško ekosistemos biotos komponentams. Teigiami pokyčiai ekosistemoje galėtų būti siejami su reguliariu Pb koncentracijų ir jo srautų mažėjimu, o taip pat su sumažėjusiomis Zn, Ni ir Cu koncentracijomis krituliuose ir jų srautais į miško paklotę.

Sunkiųjų metalų metinių srautų su krituliais į miško paklotę analizė parodė, kad Žemaitijos KMS krituliai labiau užteršti sunkiaisiais metalais negu Aukštaitijos KMS. Tai tolimųjų pernašų iš Vidurio ir Vakarų Europos rezultatas.

Palyginus sunkiųjų metalų srautus į miško paklotę nustatyta, kad reikšmingai mažėja abiejose stotyse Pb srautas: Aukštaitijos KMS po -103 µg/m^2 per m., o Žemaitijos KMS net 7 kartus intensyviau, po 748 µg/m^2 per m. ***Cd srautas*** Aukštaitijos KMS mažėja po 3,5 µg/m^2 per m., o Žemaitijos KMS – apie 4 kartus intensyviau – 13,8 µg/m^2 per m. Aukštaitijos KMS nustatytas papildomai reikšmingas Cu srauto augimas po 277 µg/m^2 per m.

2021-2025 m. laikotarpis išsiskyrė sunkiųjų metalų srautų su krituliais padidėjimu su mažėjimo tendencija iki 2025 m. Koncentracijų kaitoje pavojingų tendencijų visumoje nenustatyta, išskyrus Cr koncentracijų padidėjimą Aukštaitijos ir Žemaitijos KMS 2023-2024 m. laikotarpiu. Paskutiniaisiais metais šio elemento koncentracijos sumažėjusios. Ar tai karo Ukrainoje pasekmė parodys ateities tyrimai.

Beržų lapai ir pirmų metų pušies spygliai sunkiųjų metalų kaupia daugiau negu eglės įvairaus amžiaus spygliai ir antrų metų pušies spygliai. Kaip ir makro elementus, krituliai matyt išplauna iš audinių ir sunkiuosius metalus, kurių koncentracijos senesniuose audiniuose mažėja.

Aukštaitijos KMS Pb koncentracija lapijos pavyzdžiuose mažėja, o beržų lapuose ir pušies II m. spygliuose, net reikšmingai, po -0,1 mg/kg ir -0,05 mg/kg per metus. Eglės ir pušies I metų spygliuose mažėjimas buvo nereikšmingas.

Mažėja taip pat ir Cu koncentracijos lapijos pavyzdžiuose, nors jo srautai su krituliais ir koncentracijos krituliuose pakankamai reikšmingai didėjo. Reikšmingiausiai šis mažėjimas pasireiškia senesniuose pavyzdžiuose, t.y. eglės II metų pušies spygliuose.

Aukštaitijos KMS tirtų medžių lapijos pavyzdžiuose per paskutinįjį 2005-2020 m. laikotarpi didėja Zn, Na ir Cd koncentracijos, mažai keičiasi Cr ir Ni ir mažėja Cu ir bei reikšmingiausiai Pb koncentracijos.

Žemaitijos KMS intensyviausiai Pb mažėja beržų lapuose – po 0,09 mg/kg per m. ir pušies spygliuose: po 0,04 mg/kg per metus. Eglės spygliuose Pb mažėjimas silpniausiai išreikštas ir siekia tik -0,05 mg/kg per m.

Žemaitijos KMS tirtų medžių lapijos pavyzdžiuose per paskutinįjį 2005-2020 m. laikotarpi didėja Zn koncentracijos, *mažai keičiasi ir mažėja* Na ir mažėja Cd, Cr, *Ni ir Cu, bei reikšmingiausiai Pb koncentracijos.*

Apibendrinus gautus rezultatus, nustatyta, kad sunkiųjų metalų koncentracijos krituliuose ir jų srautai su krituliais į miško paklote nėra pagrindinis veiksnys lemiantis sunkiųjų metalų koncentracija lapijoje ir jų kaitą laike. Tik Pb ir Cr koncentraciją ir jų srautų mažėjimas tiesiogiai atsispindi ir šių elementų koncentracijose lapijos pavyzdžiuose.

Sunkiųjų metalų koncentracijos krituliuose nėra pagrindinis veiksnys lemiantis lapijos užterštumą šiais elementais.

2021-2025 m. esminių pokyčių ar galimų grėsmių miško ekosistemoms sunkiųjų metalų koncentraciją lapijoje kaitoje nenustatyta, tačiau dar nežymūs padidėjimai gali būti siejami su karo veiksmais Ukrainoje.

1994-2025 m. laikotarpiu, nustatyta, kad Aukštaitijos KMS reikšmingiausiai didėjo Cd koncentracija nuokritose – po 0,004 mg/kg, Zn – po 0,94 mg/kg per m., Cu – po 0,043 ng/kg per m., Na – po 2,5 mg/kg per m. ir K – po 4,3 mg/kg per m. Reikšminga ir mažėjimo tendencija nustatyta Pb – po -0,09 mg/kg per m. ir Cr po -0,04 mg/kg per m. Zn ir Mn koncentracijų sekose reikšmingos kaitos nenustatyta. ***Išskirtiniai 2021-2024 m. tyrimo rezultatai. Šiuo laikotarpi reikšmingai padidėjo Na, Cu Cd koncentracijos nuokritose.***

1994-2025 m. laikotarpiu ***nustatyta, kad tyrimų pradžioje sunkiųjų metalų srautus su nuokritomis sąlygojo nuokritų kiekis, tai paskutiniaisiais, išskirtiniais 2019 m., srautus į miško ekosistemą sąlygojo sunkiųjų metalų koncentracijos nuokritose. Reikšmingai didėjo Cd srautas su nuokritomis – po 0,003 mg/m^2 per m., Na – po 1,5 mg/m^2 per m., Na – po 1,5 mg/m^2 per m. ir reikšmingiausiai Cu – po 0,04 mg/m^2 per m. ir K – po 13 mg/m^2 per m. Per tiriamąjį laikotarpį reikšmingiausiai mažėjo tik Cr srautas, po -0,007 g/m^2 per m. ir Pb po 0,023 mg/m^2 per m.***

Daugiametė rezultatų analizė rodo, kad sunkiųjų metalų srautus didžiąja dalimi lemia ir nuokritų kiekis, kuris 1,5 k yra didesnis negu Aukštaitijos KMS, ir sunkiųjų metalų koncentracijos nuokritose.

Žemaitijos KMS stabilios jau daugelį metų išlieka Cu, Zn koncentracijos nuokritose. Mažėjimo tendencija stebima Cd, Cr, Ni ir Pb koncentracijose, o didėja Na. Išskirtinės Mn ir K koncentracijų nuokritose kaitos: iki 2014-2015 m. šių elementų koncentracijos turėjo pakankamai aiškią tendenciją didėti, po šio laikotarpio iki 2025 m. turi tendenciją mažėti. ***2021-2025 m. išsiskyrė padidėjusiomis koncentracijomis Na ir Cu.***

Per tiriamąjį laikotarpį Pb srautas mažėja po 0,09 mg/m^2, o Cr – po -0,024 mg/m^2 per m. Mažėja ir Ni srautas su nuokritomis, po 0,016 mg/m^2 per m. Stabilus išlieka Cu ir Zn srautas, o besikeičiantis nustatytas Mn ir k, tik didėjimo tendencija šių metalų srautų tęsėsi iki 2018 m., o paskutiniaisiais metais pakankamai ženkliai koncentracijos pradėjo mažėti.

Sunkiųjų metalų kaitos tendencijos KM stočių dirvožemio vandenyje parodė, kad Cu koncentracija abiejų gylių dirvožemio vandenyje Aukštaitijos KMS išliek stabiliame lygmenyje per visa tiriamąjį laikotarpį. Išskirtinė, tik vieną kartą nustatyta didelė šio elemento koncentracija 2011 m. Aukštaitijos KMS dirvožemio vandenyje 40 cm gylyje. 2021-2025 m. laikotarpyje Cu koncentracijos minimaliame lygmenyje papildomai dar palaipsniui mažėja.

Žemaitijos KMS dirvožemio vandenyje Cu koncentracijos yra kiek tai mažesnės negu Aukštaitijos KMS, tačiau taip pat ryškesnės šio elemento kaitos tendencijos nenustatyta.

Cd koncentracijos nuo 2013 m. Aukštaitijos KMS dirvožemio vandenyje neturi tendencijos kisti, išskyrus tik vienkartinę didelę nustayta koncentraciją 2020 m., Tai Žemaitijos KMS dirvožemio vandenyje dėl nustaytų didesnių koncentracijų 2018 ir 2024 m. turi tendenciją didėti. Padidėjusios koncentracijos čia nustatytos ir 2021-2025 m. laikotarpiu.

Cr koncentracijos reikšmingai didėja Aukštaitijos KMS su nustatyta maksimalia koncentracija 2023 m. 20 cm gylyje. Žemaitijos KMS šio elemento koncentracijos išlika stabili.

Zn koncentracijų kaita Aukštaitijos KMS priešinga: 20 cm gylyje Zn reikšmingai mažėja, kai 40 cm gylyje turi tendenciją didėti. Žemaitijos KMS Zn koncentracijos dirvožemio vandenyje nuo 2009-2010 m. reikšmingai nekinta.

Ni apie 10 kartus daugiau yra užterštas Aukštaitijos KMS dirvožemio vanduo, kur šio elemento koncentracijos svyruoja apie 20 µg/l ir turi aiškią tendenciją didėti. Žemaitijos KMS Ni koncentracijos svyruoja apie 1,5-2 µg/l ir tik 2024-2025 m. nustatytos jo didesnės koncentracijos dirvožemio vandenyje.

Pb kaitoje nustatytos panašios kaitos tendencijos abiejų stočių abiejų gylių dirvožemio vandenyse: nuo 2007-2008 m. šio elemento koncentracijos išlieka praktiškai stabiliame lygmenyje tik Aukštaitijoje su neženkliu didėjimu, o Žemaitijoje mažėjimu.

Nepaisant šių tendencijų paskutiniaisiais metais Pb koncentracija Aukštaitijos KMS dirvožemio vandenyje siekia 2 µg/l, kai tuo tarpu Žemaitijos KMS 7 kartus daugiau - apie 15 µg/l.

Gruntinio vandens tyrimai parodė, kad Mn koncentracija nustatoma tik iki 2 µg/l ribos, kuri yra didesnė nei koncentracijos nustatytos ankstesniais metais. 2018-2019 m. sausra neturėjo reikšmingos įtakos Mn koncentracijų kaitai gruntiniuose vandenyse.

Didžiausios Fe koncentracijos gruntiniuose vandenyse nustatytos 2008-2011 m. abiejų stočių gruntiniuose vandenyse. Nuo šio laikotarpio iki 2019 m. Fe koncentracijos turi tendencija mažėti. Reikšmingesnė Fe koncentracijos priklausomybė nuo kritulių kiekio nenustatyta.

Gruntiniame vandenyje 2010-2011 metais sunkiųjų metalų koncentracijos buvo padidėjusios iki didžiausių reikšmių per stebėsenos laikotarpį,

2017-2020 m. pažymėtinas dėsningumas - gruntinio vandens užterštumo Cu mažėjimas. Išsiskiria 2017 m. reikšmingai padidėjusios Cu koncentracijos gruntiniuose vandenyse Aukštaitijos KMS. Paskutiniaisiais metais Cu koncentracijos abiejų stočių gruntiniuose vandenyse išlieka stabilios panašiame lygmenyje, t.y. apie mažiau negu 5 µg/l.

Cd koncentracijos Aukštaitijos KMS nuo 2011 m. išlieka minimaliame lygmenyje apie 0,1-0,2 µg/l. Padidėjusi koncentracija buvo nustatyta tik 2020. Žemaitijos KMS, dėl tyrimų tikslumo ribotumo Cd koncentracijos tiksliai nustatyti nepavyksta. Ji yra mažesnė negu 0,1 µg/l.

Didžiausios Cr koncentracijos buvo nustatytos 2010 m. Paskutiniuoju laikotarpiu koncentracija reikšmingai sumažėjo ir svyruoja minimaliame lygmenyje apie 1 µg/l.

Pb koncentracijos gruntiniuose vandenyse, taip pat nuo 20012 m. išlieka stabilios minimaliame lygmenyje apie 1-2 µg/l Aukštaitijos KMS ir apie 2-4 µg/l lygmenyje Žemaitijos KMS gruntiniuose vandenyse.

Analogiškai kito ir Zn bei Ni koncentracijų kaitoje. Nuo 2013 m. esminių pokyčių šių elementų koncentracijų kaitoje nenustatyta. Ženklus Ni koncentracijų padidėjimas Aukštaitijos KMS buvo registruotas 2018m. Paskutiniuoju laikotarpiu Ni koncentracijos šioje stotyje pasiekė savo įprastinį daugiametį vidurkį. Žemaitijos KMS Ni koncentracijos jau daugiau kaip 6 m išlieka stabilios 2 µg/l lygmenyje.

2017-2020 m. pažymėtinas dėsningumas - gruntinio vandens užterštumo sunkiaisiais metalais mažėjimas, sinchroniškas geležies koncentracijų mažėjimui.

Sunkiųjų metalų upelių vandenyse tyrimų analizė parodė, Cu ir Cr koncentracijų augimo tendenciją. Cu kaitoje 2010-2012 m. ir 2015 m. registruojami šio elemento didžiausi kiekiai. Po šių metų iki 2025 m. registruojamas laipsniškas Cu koncentracijų mažėjimas, 2025 m. pasiekiant minimaliausią reikšmę per visą tiriamąjį laikotarpį.

Cd koncentracijų kaitoje stebima šio elementu didėjimo tendencija abiejose stotyse, tačiau priežastis gali būti ir dėl cheminių analizių atlikimo tikslumo. Paskutiniuoju laikotarpi Cd koncentracijos, kurių reikšmė yra žemesnė negu 0,1 µg/l yra nenustatomos. Cr analizę riboja cheminių tyrimų tikslumo ribos, kurios yra didesnės negu Cr koncentracijos vandenyje.

Cd koncentracijos reikšmingai upelio vandenyse mažėja ir paskutiniuoju laikotarpiu jo minimalios koncentracijos yra mažesnės negu cheminių tyrimų galimybės. Paskutiniuoju laikotarpiu Cd koncentracija upelio vandenyje, retai viršija mažiausią nustatymo ribą. 0,1 µg/l.

Ni ir Cr koncentracijos per tiriamąjį laikotarpį išlieka stabilios. 2015 m. sausra turėjo reikšmingos įtakos Cr koncentracijų padidėjimui Aukštaitijos KMS upelio vandenyje. Paskutiniaisiais metais Cr koncentracijos šios stoties vandenyse vėl sumažėjo iki daugiamečio vidurkio, o Žemaitijos KMS upelio vandenyje padidėjo, viršydama 1ug/l ribą.

Zn koncentracijos upelių vandenyse reikšmingai nesiskiria tarp stočių ir išlieka minimaliame lygmenyje praktiškai per visą tiriamąjį laikotarpį.

Paminėtina Pb koncentracijų kaita upelių vandenyse, kuri abiejose stotyse mažėja po maždaug 0,02-0,05 ug/l per m.. Paskutiniaisiais metais Aukštaitijos KMS upelio vandenyje šio elemento koncentracija išlieka stabili, o jo kaitą lemia cheminių analizių tikslumas, tai ***Žemaitijos KMS 2019 m. užregistruotas padidėjęs upelio vandens užterštumas šiuo sunkiuoju metalų, ypač 2023 m.***

Palyginus metalų koncentracijų kaitą tarp KMS, nustatyta, kad sunkiaisiais metalai tirtų upelių vandenys yra užteršti tam pačiame lygmenyje, ir jų kaitos tendencijos yra panašios.

Apibendrinus 35 m. tyrimo rezultatus nustatyta kad Aukštaitijos KMS reikšmingai mažėja tik švino, chromo ir kadmio koncentracijos samanose. Cu koncentracijos iki 2025 m. taip pat mažėjo reikšmingai, tačiau 2025 m. nustatyta viena didžiausia šio elemento koncentracija pakeitė jo kaitos trendą ir reikšmingumą. Ni kaitoje taip pat nustatyta didžiausia per visą tiriamąjį laikotarpį šio elemento koncentracija samanose. Tai galimai karo Ukrainoje rezultatas.

Žemaitijos KMS per šį laikotarpį įvyko tie patys pokyčiai nustatyti Aukštaitijos KMS: reikšmingai mažėjo Pb, Cr ir Cd koncentracijos ir tik Cu koncentracijos 2025 m., skirtingai negu Aukštaitijos KMS, nepakeitė šio elemento kaitos pobūdžio, nors koncentracijos išliko tame pačiame lygmenyje kaip ir 2010-2020 m. Panašiai kito ir Ni koncentracijos.

Apibendrinus rezultatus galima teigti, kad Žemaitijos KMS miško ekosistemų samanose kaupiasi daugiau sunkiųjų metalų negu Aukštaitijos KMS, tačiau čia išsivalymo procesai vyksta intensyviau negu Aukštaitijos KMS.

Metalų koncentracija dirvožemio paviršiniuose horizontuose (0...5 cm gylyje) mažėjo, bet padidėjo chromo, vario ir nikelio koncentracija gilesniuosiuose dirvožemio horizontuoje, geocheminiuose dirvožemio barjeruose.

Oro kokybės pablogėjimui bei biotos rūšių ir gausumo sumažėjimui bei jų bendrosios būklės pablogėjimui įtakos galėjo turėti jau keletą metų besitęsiantis karas Ukrainoje.

Aukštaitijos kompleksiško monitoringo stoties veikla

Darbų atlikimo laikotarpiu, Utenos rajone Rūgštėliškio kaime esančioje Aukštaitijos kompleksiško monitoringo stotyje ir Ažvinčių sengirės tyrimų poligone, buvo atlikti visi sutartyje numatyti, sąlygiškai natūralių ekosistemų kompleksinio monitoringo ICP KM ir EMEP programų reikalavimus atitinkantys, gamtinės aplinkos stebėjimai ir tyrimai; vykdyti kiti Aplinkos apsaugos agentūros inicijuoti gamtinės aplinkos stebėjimo – tyrimo darbai; atlikti reikalingi Stoties priežiūros – eksploatacijos darbai ir su tuo susiję apmokėjimai.

Sutarties vykdymo laikotarpiu buvo:

Užtikrinta ICP KM programos reikalavimus Aukštaitijos kompleksinio monitoringo stoties priežiūra ir eksploatacija, sudarant kokybiškas sąlygas efektyviam tolimųjų oro pernašų įtakos Lietuvos oro baseino kokybei tyrimui. Tai apima elektros sąnaudų, reikalingų tyrimų aparatūros darbui užtikrinti bei patalpų ir vandens šildymui, nesudarant vietinės taršos, apmokėjimą; automobilio eksploataciją; pastatų ir tyrimų įrangos eksploatavimo einamuosius darbus; privalomų mokesčių valstybei, bei administravimo mokesčio Universitetui įvykdymą. Aukščiau išvardintų Stoties priežiūros – eksploatavimo sąlygų užtikrinimas sudarė prielaidas Stotyje ir tyrimų poligone vykdyti kompleksišką ekosistemos tyrimą. Darbų vykdymo laikotarpiu Stotyje buvo sudarytos darbo sąlygos visiems kompleksinio monitoringo programos dalyviams, turintiems atlikti darbus pačioje stotyje arba šiame regione esančiuose tyrimų poligonuose. Tai Aplinkos apsaugos agentūros, Fizikinių tyrimų mokslo centro, VDU ir kiti pagal atskiras sutartis dirbantys ar paskiriems darbams laikinai samdomi darbuotojai.

Užtikrintas stotyje instaliuotos ir naudojamos mokslinės įrangos kvalifikuotas naudojimas, techninė priežiūra ir savalaikis gedimų šalinimas . Visu 2020 m. kalendoriniu laikotarpiu buvo saugoma ir prižiūrima stotyje, šalia jos ir tyrimų poligone sumontuota tyrimų aparatūra - įranga. Nustatytu laiku buvo atliekami visi einamieji tyrimų aparatūros techninio aptarnavimo darbai, esant reikalui vietoje keičiami ir koreguojami aparatūros darbo režimai, šalinami gedimai.

Atlikti aplinkos būklės parametrų tyrimai (fizikiniai, meteorologiniai, oro, vandens), privalomi pagal ICP KM reikalavimus. Tuo tikslu Aukštaitijos kompleksinio monitoringo stotyje ir Ažvinčių sengirės rezervate įrengtame tyrimų poligone buvo atliekami sekantys režimo bandinių paėmimo ir aplinkos būklės parametrų matavimo -tyrimo darbai:

- nepertraukiamas aplinkos meteorologinių faktorių fiksavimas (oro ir dirvos temperatūrų, vėjo krypties ir greičio, saulės aktyvumo, santykinės oro drėgmės, kritulių kiekio, atmosferos slėgio matavimai);

- dujinių ir aerozolinių atmosferos cheminių priemaišų - SO2-S, SO4-S, NO2, - HNO3+NO3 ir NH3+NH4 nustatymas;

- nepertraukiamas pažemio ozono koncentracijos ore matavimas;

- nepertraukiamas gyvsidabrio koncentracijos ore matavimas;

- mėnesinių “bendrų” ir savaitinių “šlapių“ kritulių surinkimas;

- savaitinių mėginių, sunkiųjų metalų koncentracijai krituliuose nustatyti, surinkimas;

- savaitinių oro mėginių KD 2,5 /2,5 mikrono dydžio kietųjų dalelių/ analizei paėmimas;

- 72 val. oro mėginių KD 10 /10 mikrono dydžio kietųjų dalelių/ sunkiųjų metalų ir policiklinių aromatinių angliavandenilių analizei paėmimas;

- Versminio upelio vandens lygio ir fizikinių parametrų (temperatūra, rūgštingumas, laidumas, ištirpęs deguonies kiekis) matavimai;

- gruntinio vandens lygio matavimai;

- gruntinio vandens bandinių paėmimas;

- dirvožemio vandens bandinių paėmimas;

- paimti mėnesiniai poląjiniai kritulių bandiniai;

- paimti mėnesiniai medžių lajų nuokritų bandiniai;

- paimti Versminio upelio vandens bandiniai;

- atlikti dirvožemio drėgnumo ir įšalo gylio matavimai.

Įvykdytas sutartyje numatytas duomenų ir bandinių pristatymas tyrimams į atitinkamas laboratorijas numatytu laiku. Kiekvieno mėnesio pradžioje paimti upelio, gruntinio ir dirvožemio vandens bandiniai, per 48 val. nuo paėmimo momento, buvo pristatomi tyrimams į Aplinkos tyrimų departamento laboratoriją. Mėnesinių ir savaitinių kritulių bandiniai, poląjiniai krituliai, oro chemijos bandinių filtrai kiekvieną mėnesį buvo pristatomi į Aplinkos tyrimų departamento laboratoriją. Bandiniai, skirti sunkiųjų metalų atmosferos krituliuose, Gyvsidabrio koncentracijai atmosferos krituliuose bei BP koncentracijai krituliuose kiekvieną mėnesį buvo pristatomi į atitinkamas Fizikinių tyrimų mokslo centro laboratorijas. Medžių nuokritų bandiniai - pristatyti į VDU Miško monitoringo laboratoriją. Meteorologiniai ir kiti duomenys pagal pareikalavimą būdavo perduodami laboratorijoms, dalyvaujančioms kompleksiško monitoringo programoje.

Aukštaitijos kompleksinio monitoringo stotyje atlikti aplinkos tyrimų darbai:

1) sunkiųjų metalų atmosferos krituliuose tyrimo programa /vykdytojas Fizikinių mokslo tyrimų centras/.

Tuo tikslu meteo. bokšte buvo įrengti du kritulių rinktuvai. Kritulių rinktuvai buvo keičiami kiekvienos savaitės pirmos dienos ryte. Surinkti krituliai buvo pasveriami, apdorojami rūgšties tirpalu ir laikomi šaldytuve. Kiekvieno mėnesio pradžioje jie buvo pristatomi į atitinkamą FTMC laboratoriją.

2) gyvsidabrio koncentracijų atmosferos krituliuose programa /vykdytojas Fizikinių technologijų mokslo tyrimų centras/.

Tuo tikslu meteo. bokšte buvo įrengtas vienas kritulių rinktuvas. Jame surinkti kritulių bandiniai buvo paimami kas dvi savaitės . Surinkti krituliai buvo pasveriami, apdorojami fiksuojančiu tirpalu ir laikomi šaldytuve. Kiekvieno mėnesio pradžioje jie buvo pristatomi į atitinkamą FTMC laboratoriją.

3) gyvsidabrio koncentracijų atmosferos ore nustatymas /vykdytojas AAA/.

Tuo tikslu monitoringo stotyje buvo instaliuotas Tekran firmos gyvsidabrio garų atmosferos ore analizatorius TEKRAN 25378. Oras analizei buvo imamas 2m.aukštyje nuo žemės paviršiaus. Analizatorius veikė nenutrūkstamu darbiniu ręžimu, kompiuteryje fiksuojami kas pusvalandiniai vidutiniai matavimų duomenys. Matavimų duomenys kiekvieną dieną automatiškai buvo perduodami į Aplinkos apsaugos agentūrą. Reguliarius prietaiso patikros darbus atliko AAA specialistai.

Prietaiso eksploatacijai reikalingos argono inertinės dujos buvo pastoviai perkamos 10 l. talpos balionais iš „ELME MESSER LIT“ firmos padalinio Vilniuje.

4) kietųjų dalelių KD2,5 ore bandinių paėmimas.

Tuo tikslu šalia stoties pastato esančioje meteo. aikštelėje buvo sumontuotas SEQ47/50 kietųjų dalelių bandinių paėmimo įrenginys. Jis užprogramuotas 7-ių dienų bandinių ciklui ir filtrai buvo automatiškai pakeičiami kas 7 kalendorinės dienos, kiekvieną pirmadienį. Filtrai šiam įrenginiui buvo paruošiami Aplinkos tyrimų departamento laboratorijoje; kasetės su filtrais - keičiamos kas trys mėnesiai

Prietaiso tecninį aptarnavimą atliko Aplinkos apsaugos agentūros specialistai.

5) kietųjų dalelių KD10 bandinių , skirtų Sunkiųjų metalų ir policiklinių aromatinių angliavandenilių koncentracijų ore nustatymui, paėmimas.

Tuo tikslu šalia stoties pastato esančioje meteo. aikštelėje buvo sumontuotas SEQ47/50 kietųjų dalelių bandinių paėmimo įrenginys. Jis užprogramuotas 3-jų dienų bandinių ciklui ir filtrai buvo automatiškai pakeičiami kas trys kalendorinės dienos; kasetės su filtrais - keičiamos kas mėnesį

Prietaiso tecninį aptarnavimą atliko Aplinkos apsaugos agentūros specialistai.

6) benzopirenų koncentracijų atmosferos krituliuose nustatymas /vykdytojas Fizikinių mokslo tyrimų centras/.

Tuo tikslu šalia stoties esančioje meteo. aikštelėje buvo sumontuotas tam skirtas kritulių rinktuvas. Šio rinktuvo pagalba buvo renkami mėnesiniai kritulių bandiniai, kurie kiekvieną mėnesį buvo pristatomi į atitinkamą FTMC laboratoriją .

7) kietųjų dalelių KD2,5 ore nenutrūkstamas matavimas / nenutrūkstamas ręžimas/.

Tuo tikslu šalia stoties pastato esančioje meteo. aikštelėje buvo sumontuotas kietųjų dalelių ore koncentracijų matavimo įrenginys BAM-1020. Jo teikiami duomenys buvo tiesiogiai tiekiami į AAA.

Techninį prietaiso aptarnavimą atlikdavo tiek AAA atitinkamo skyriaus darbuotojai tiek Rūgštėliškio stoties darbuotojas.

8) Radioaktyviosios spinduliuotės matavimas

Prižiūrima - aptarnaujama radioaktyviosios spinduliuotės matavimo įranga „SARA ENVINET“. Jos teikiami duomenys buvo tiesiogiai /nenutrūkstamas ręžimas/ tiekiami į AAA.

Remiantis ilgalaikiais Lietuvos miško ekosistemų (Aukštaitijos, Žemaitijos ir Dzūkijos KMS) monitoringo duomenimis, pateikiamos pagrindinės politikos ir valdymo **rekomendacijos:**

1. Oro taršos kontrolės stiprinimas
   - Tęsti ir stiprinti tarpvalstybinę oro taršos kontrolę, ypač azoto junginių (NO_3^-, NH_4^+) ir sieros (SO_2, SO_4^{2-}) atžvilgiu.
   - Aktyviai dalyvauti ES lygmens politikoje, mažinant tolimąsias oro pernašas iš Vidurio ir Vakarų Europos, kurios reikšmingai veikia Žemaitijos regioną.
   - Atsižvelgti į tai, kad taršos dinamika dabar labiau priklauso nuo regioninių ir geopolitinių veiksnių, todėl būtina stipresnė tarptautinė koordinacija.
2. Kritulių chemijos stebėsenos tęstinumas
   - Užtikrinti ilgalaikį kritulių pH, sulfatų, nitratų ir amonio jonų monitoringą, nes šie rodikliai jautriai reaguoja į išorinius pokyčius.
   - Ypač svarbu stebėti staigius pH svyravimus (pvz., naujausias rūgštėjimo epizodas Aukštaitijoje), kurie gali rodyti trumpalaikius, bet reikšmingus atmosferos pokyčius.
   - Pradėti fosforo koncentracijų tyrimus krituliuose.
3. Miško ekosistemų atsparumo didinimas
   - Skatinti mišrių miškų struktūrą, nes skirtingos medžių rūšys (ypač pušis, eglė ir beržas) skirtingai reaguoja į klimato ir taršos veiksnius.
   - Ypatingą dėmesį skirti beržų ir eglių pažeidžiamumui, nes jos jautriausios klimato ekstremumams ir taršos svyravimams.
   - Remti miškų valdymo praktikas, didinančias dirvožemio maisto medžiagų balansą (K, Ca, Mg ciklus).
4. Klimato kaitos ir ekstremalių reiškinių valdymas
   - Integruoti tyrimų rezultatus į klimato kaitos adaptacijos strategijas, nes karščio bangos ir ekstremalūs krituliai daro tiesioginį poveikį miškų būklei.
   - Kurti ankstyvo perspėjimo sistemas, susijusias su sausromis, vėtrų ir liūčių rizika, nes šie veiksniai lemia staigius ekosistemų pokyčius.
5. Taršos šaltinių vertinimas ir geopolitinis aspektas
   - Įvertinti galimą geopolitinių procesų (pvz., karo Ukrainoje) netiesioginį poveikį atmosferos chemijai, ypač sieros ir azoto junginių kaitai.
   - Plėtoti regioninius tyrimus, leidžiančius atskirti lokalią taršą nuo tolimosios atmosferinės pernašos.
6. Ilgalaikio monitoringo ir duomenų analizės stiprinimas
   - Užtikrinti nepertraukiamą daugiamečių duomenų rinkimą, nes tik ilgos laiko eilutės leidžia identifikuoti tikrąsias tendencijas.
   - Investuoti į pažangius duomenų analizės metodus (įskaitant dirbtinį intelektą) kompleksiniam ekosistemų vertinimui.
   - Bendradarbiauti su ES projektu „Forest – 4.0“

Atsižvelgiant į tai, kad šiame tyrime pirmą kartą buvo kompleksiškai įvertinta medžiagų migracijos grandinė nuo atmosferinių iškritų per dirvožemio vandenį iki gruntinio vandens, ateities tyrimuose tikslinga didžiausią dėmesį skirti šių procesų tarpusavio sąveikai, reakcijos vėlavimo efektui ir naujų klimato bei geopolitinių veiksnių poveikiui. Tokie tyrimai sudarys prielaidas patikimiau prognozuoti ilgalaikį hemiborealinių miško ekosistemų atsparumą globalios aplinkos kaitos sąlygomis.

Lietuvos miško ekosistemos šiuo metu pereina į **mažesnės sieros ir azoto taršos, bet didesnio klimatinio kintamumo fazę**. Nors bendras oro užterštumas mažėja, ekosistemų stabilumą vis labiau lemia **ekstremalūs klimato reiškiniai ir regioniniai atmosferos pokyčiai**, todėl būtinas integruotas aplinkos, klimato ir miškų politikos valdymas.

TRŪKUMAI, kuriuos pašalinus būtų gaunami reikalingi ir patikimi duomenys kompleksiško monitoringo programos tikslams įgyvendinti:

Žemaitijos KM stotis:

Neveikia ir reikia pakeisti nauju upelio debito matuoklį - limnigrafą

Taip pat deguonies daviklis upelio vandenyje neveikia jau daug metu.

Cheminių rezultatų tikslumas ir patikimumas kelia abejonių

Tikslingas būtų ir fosforo kiekio krituliuose tyrimas, kadangi jo kaita ekosistemoje siekia reikšmingą lygmenį, o priažasčių išaiškinimas, neturint su krituliais patenkančio šio elemento kiekių, yra labai ribotas.

Projekto Forest 4.0 indėlis vykdant VAMP 2024-2029 užduotis.

KMS baseinuose augančių medžių apskaita lazerinio skenavimo LIDAR technologijomis pagrindu

Aukštaitijos KMS baseine auga – 24 465 identifikuoti medžių
Žemaitijos KMS baseine auga – 41 861 medis
Dzūkijos KMS baseine auga – 139 434 medžių

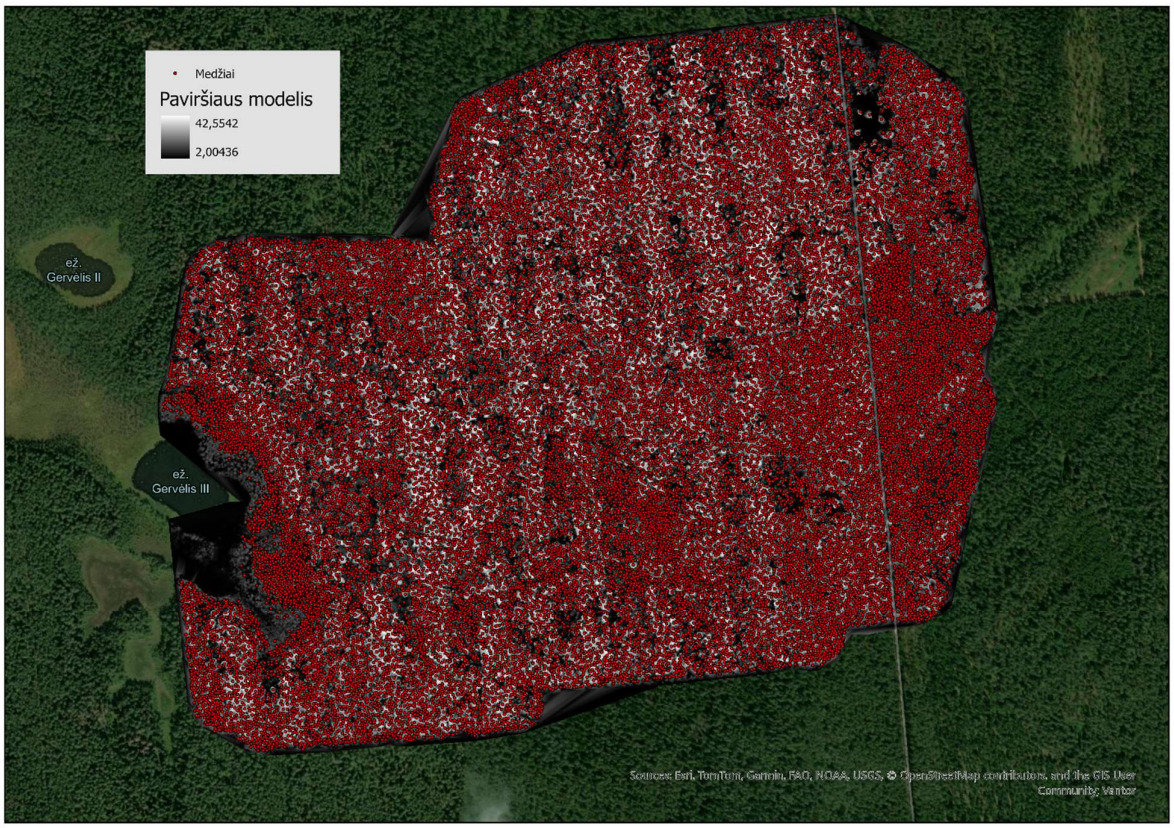
Ekofiziologinių tyrimų stotis medžių vandens naudojimo efektyvumui vertinti Aukštaitijos ir Žemaitijos KMS stotyse

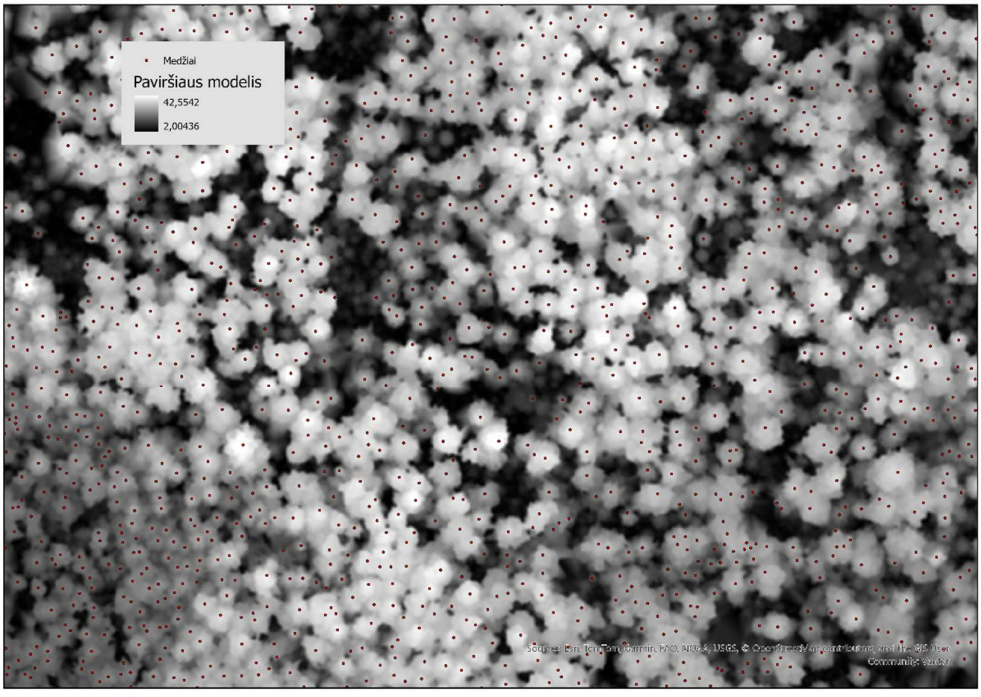
Šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijų į dirvožemio matavimas ir bendro anglies ciklo vertinimas kintančiomis sąlygomis

Forest – 4.0: This research at Aukštaitija IMS has received funding from European Union Horizon Europe research and innovation programme (HORIZON), call Teaming for Excellence (HORIZON-WIDERA-2022-ACCESS-01-two-stage)—Creation of the center of excellence in smart forestry "Forest 4.0", No. 101059985, and co-funded by the European Union under the project "FOREST 4.0—Centre of Excellence for the development of a sustainable forest bioeconomy", No. 10-042-P-0002.

KMS baseinuose augančių medžių apskaita lazerinio skenavimo LIDAR technologijomis pagrindu

Aukštaitijos KMS baseino visų medžių aukščio (Z) statistinė analizė





Aukštaitijos KMS baseinas ir jame identifikuoti augantys medžiai.

Aukštaitijos KMS baseine išanalizuoti 24 465 medžių aukščio matavimai. Tyrimo teritorijoje vyrauja pušynai su eglės ir beržo priemaiša, būdingi Aukštaitijos smėlingoms ir priesmėlingoms dirvoms. Vidutinis medžių aukštis siekia 27,48 m, mediana – 28,17 m, standartinis nuokrypis – 5,80 m (variacijos koeficientas CV = 21,12 %). Aukščiai svyruoja nuo 15,00 m iki 41,54 m.

Pagrindiniai statistiniai rodikliai

Rodiklis	Reikšmė
Imties dydis (n)	24 465
Vidurkis	27,48 m
Mediana	28,17 m
Standartinis nuokrypis	5,80 m
Dispersija	33,68 m²
Minimumas / Maksimumas	15,00 m / 41,54 m
Q1 / Q3	23,22 m / 31,92 m
IQR	8,70 m
P10 / P90	18,88 m / 34,75 m
Variacijos koeficientas	21,12 %
Asimetrija / Ekscesas	−0,26 / −0,78
Išskirtys (1,5 × IQR)	0 (0,00 %)

Pasiskirstymo asimetrijos koeficientas As = −0,26, ekscesas Ex = −0,78. Pasiskirstymas yra artimas simetriškam su neigiama asimetrija, būdingu brandaus, vienaamžių pušynų aukščių struktūrai. Vidurkis ir mediana skiriasi 0,69 m, kas patvirtina neigiamo asimetriškumo tendenciją – dauguma medžių yra aukštesni už vidurkį. Tarpkvartilinė amplitudė IQR = 8,70 m: pirmasis kvartilis Q1 = 23,22 m, trečiasis Q3 = 31,92 m. 10-asis percentilis P10 = 18,88 m, 90-asis P90 = 34,75 m. Išskirčių pagal 1,5 × IQR kriterijų užfiksuota 0 (0,00 %), todėl duomenų kokybė vertintina kaip gera.

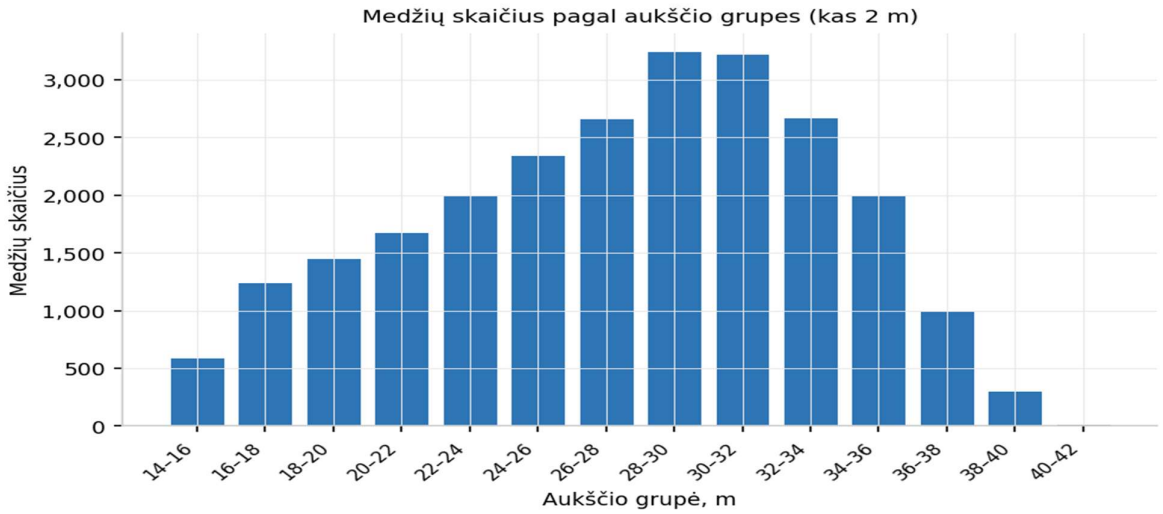
Analizuojant aukščių pasiskirstymą kas 2 metrus, didžiausia medžių koncentracija užfiksuota intervale **28–30 m** – čia sutelkta **3 244** medžių, t. y. **13,26 %** visos imties. Pusė visų stebėjimų patenka tarp 23,22 m ir 31,92 m. Vyrauja brandi aukštū medžių zona: 26–34 m intervale sutelkta apie 48 % visų medžių. Jaunuolių (žemiau 18 m) dalis yra maža – tik 8 %, kas liudija brandų, gerai užaugusį medyną.

Aukščio grupė (m)	Medžių skaičius	Dalis (%)
14–16	592	2,42
16–18	1 246	5,09
18–20	1 452	5,94
20–22	1 681	6,87
22–24	1 997	8,16
24–26	2 351	9,61
26–28	2 664	10,89
28–30	3 244	13,26
30–32	3 222	13,17
32–34	2 674	10,93
34–36	2 006	8,20
36–38	1 008	4,12
38–40	307	1,25
40–42	21	0,09

Aukštaitijos KMS paviršiaus modelis ir užtvindymo pasekmės (kairėje)

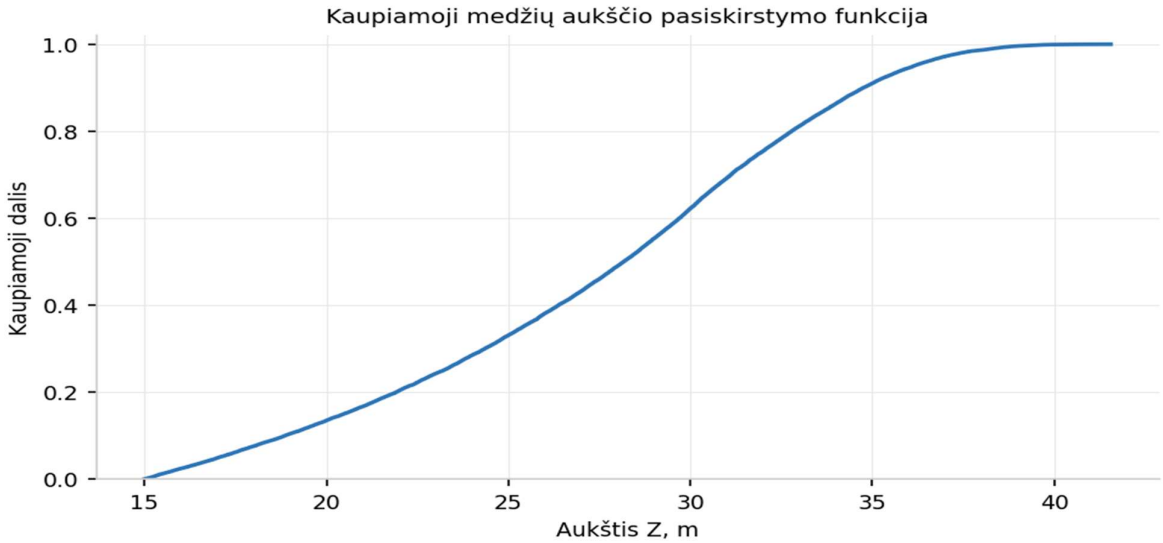
Grafinė analizė

Toliau pateikti grafikai leidžia įvertinti tiek absoliutų medžių skaičių aukščio grupėse, tiek pasiskirstymo formą, kumuliacinę struktūrą ir galimas išskirtis.



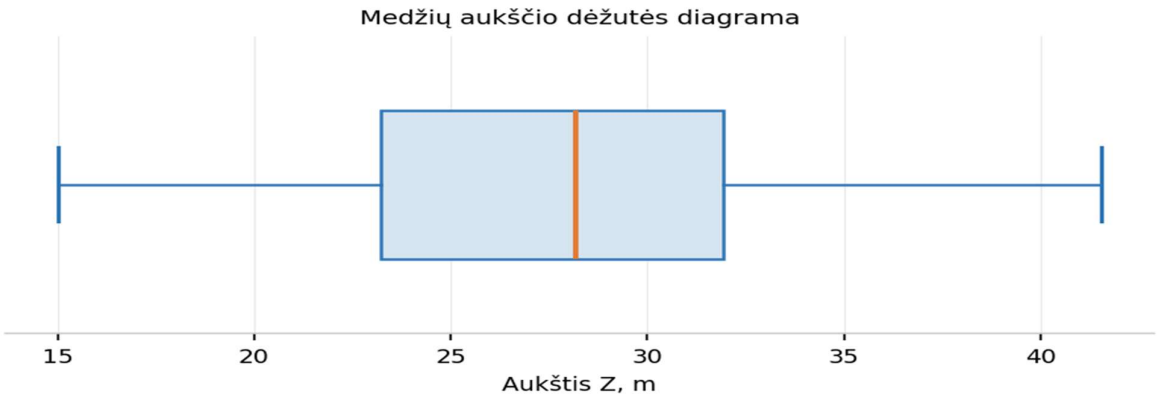
1 pav. Medžių skaičius pagal aukščio grupes, sugrupuotas kas 2 m.

Stulpelinė diagrama rodo aiškią viena viršūne pasižymintį pasiskirstymą su piku ties 28–30 m. Kairėje pusėje (14–22 m) stulpeliai žemesni, dešinėje (30–42 m) palaipsniui mažėja – būdingas simetriško skirstinio pobūdis su neigiamos asimetrijos požymių.



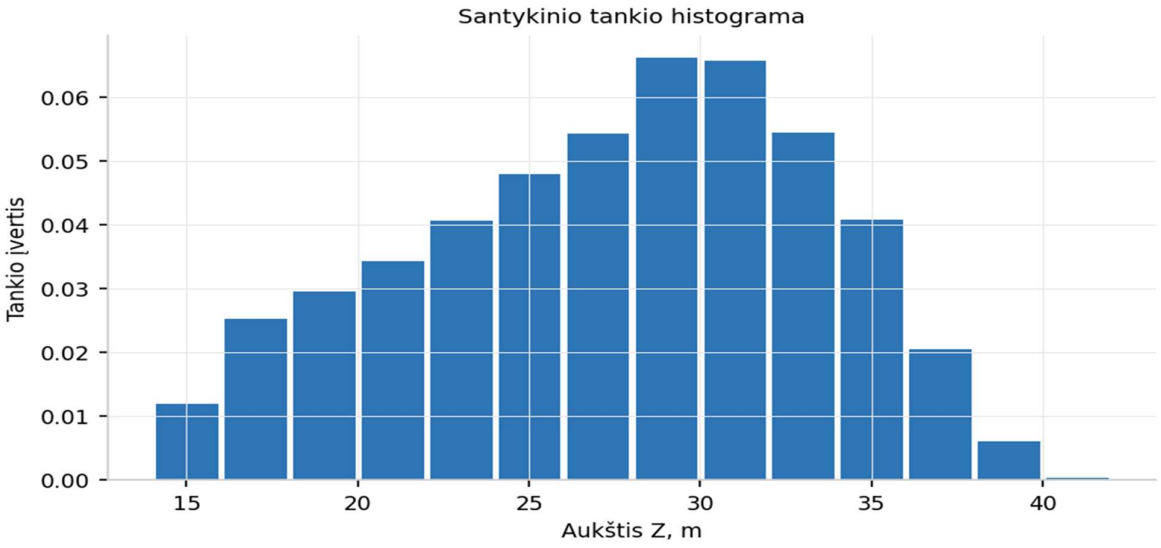
2 pav. Kaupiamoji pasiskirstymo funkcija (ECDF).

Kaupiamoji kreivė kyla gana tolygiai, be ryškių šuolių – tai rodo, kad medžių aukščiai pasiskirstę vienodai per visą diapazoną. Kreivės statumo zona apie 22–32 m atitinka centrinį imties dalį.



3 pav. Dėžutės diagrama (medianą, kvartilius ir potencialias išskirtis).

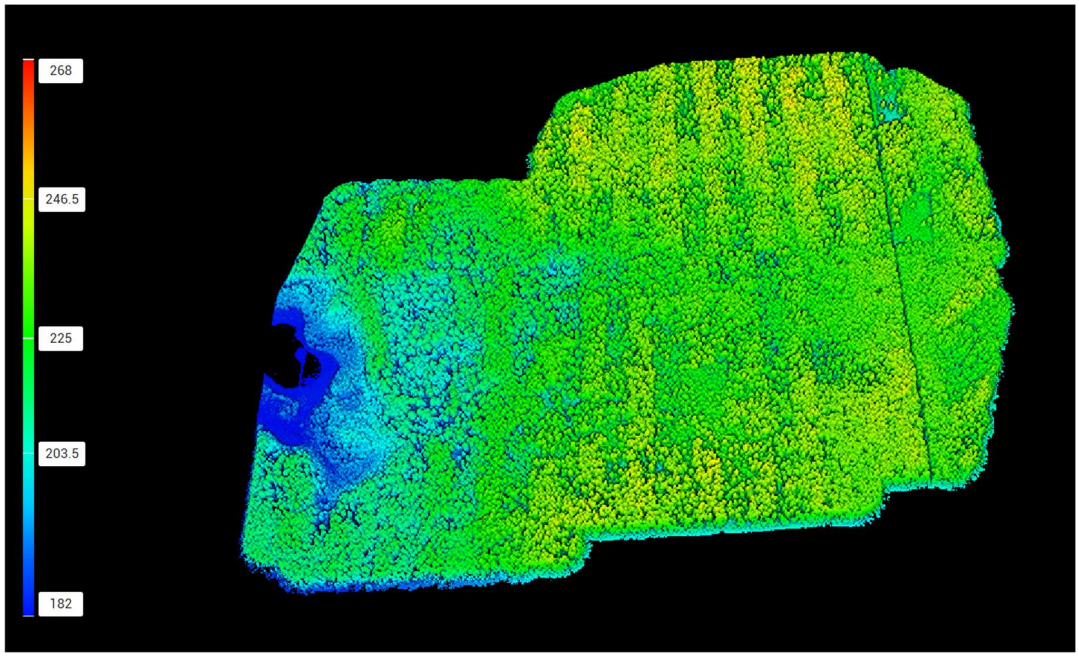
Dėžutės diagrama patvirtina kompaktišką centrinį imties dalį: IQR = 8,70 m. Išskirčių nėra, o ūsai gana simetriški – tai liudija vienodą medžių aukščių struktūrą.



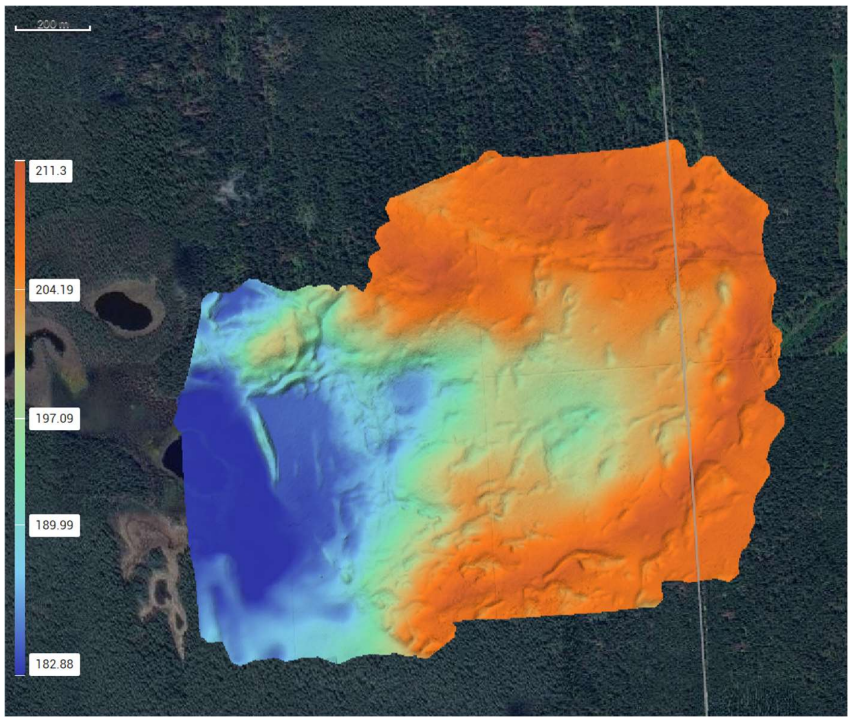
4 pav. Santykinio tankio histograma.

Santykinio tankio histograma patvirtina normaliajam artimą viršūnės formą ties 28–30 m. Kairės pusės mažesnis tankis atspindi, kad jauname pušyne beveik nėra mažų medelių.

Apibendrinant, **Aukštaitijos** regiono medynų aukščių skirstinys apima intervalą nuo 15,00 m iki 41,54 m, su centrine dalimi sutelkta apie 27,48–28,17 m. Mažas variacijos koeficientas (21,12 %) ir simetriškas skirstinys būdingi vienaamžiams pušynams, kuriuose medžiai auga vienodai ir pasiekia panašų aukštį.

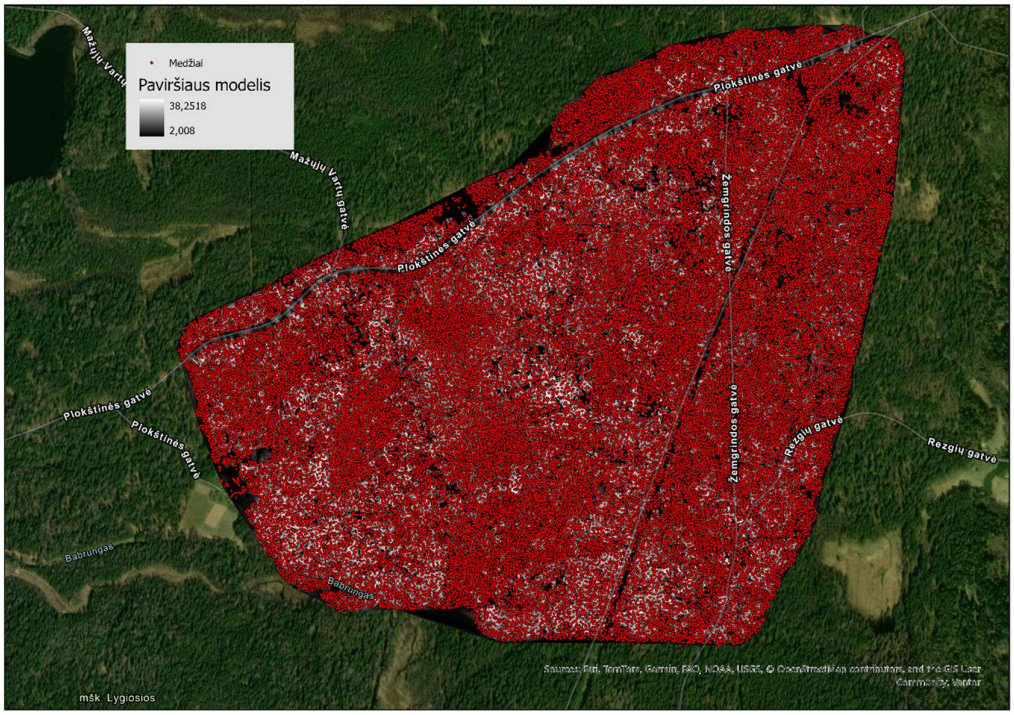


Aukštaitijos KMS baseino LIDAR taškų masyvas

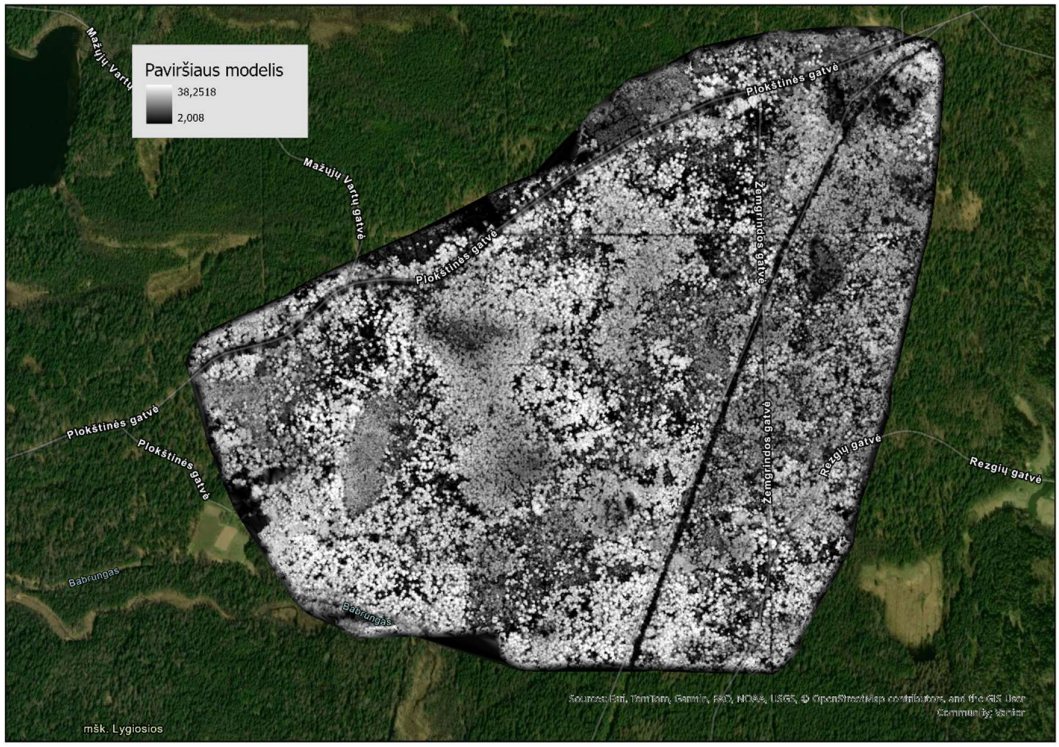


Aukštaitijos KMS žemės paviršiaus modelis

Žemaitijos KMS baseino visų medžių aukščio (Z) statistinė analizė



Žemaitijos KMS augančių medžių identifikavimas



Žemaitijos KMS paviršiaus modelis

Žemaitijos KMS baseine išanalizuoti **41 861** medžių aukščio matavimai. Žemaitijoje vyrauja mišrūs medynai su dideliu eglės kiekiu, augantys drėgnose molingose ir priemolingose dirvose. Vidutinis medžių aukštis siekia **16,63 m**, mediana – **16,31 m**, standartinis nuokrypis – **7,86 m** (variacijos koeficientas CV = 47,25 %). Aukščiai svyruoja nuo **5,00 m** iki **38,51 m**.

Pasiskirstymo asimetrijos koeficientas As = 0,23, ekscesas Ex = −1,11. Pasiskirstymas artimas simetriškam su silpna teigiama asimetrija, būdinga įvairaus amžiaus mišriems medynams. Vidurkis ir mediana skiriasi 0,32 m, kas rodo, kad pasiskirstymas artimas simetriškam ir didelių nuokrypių nuo simetrijos nėra. Tarpkvartilinė amplitudė IQR = 13,82 m: pirmasis kvartilis Q1 = 9,20 m, trečiasis Q3 = 23,02 m. 10-asis percentilis P10 = 6,58 m, 90-asis P90 = 27,56 m. Išskirčių pagal 1,5 × IQR kriterijų užfiksuota **0** (0,00 %), todėl duomenų kokybė vertintina kaip gera.

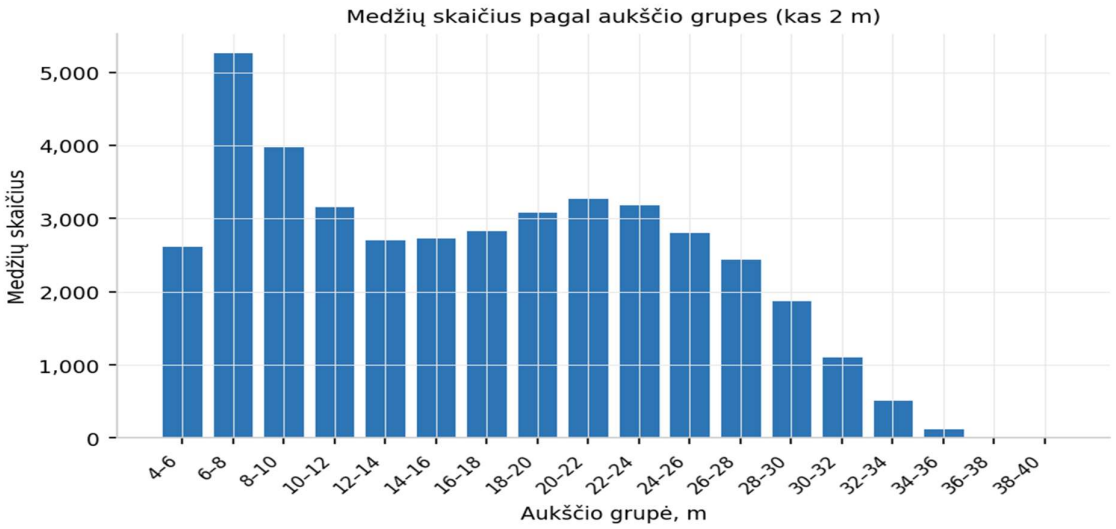
Rodiklis	Reikšmė
Imties dydis (n)	41 861
Vidurkis	16,63 m
Mediana	16,31 m
Standartinis nuokrypis	7,86 m
Dispersija	61,74 m²
Minimumas / Maksimumas	5,00 m / 38,51 m
Q1 / Q3	9,20 m / 23,02 m
IQR	13,82 m
P10 / P90	6,58 m / 27,56 m
Variacijos koeficientas	47,25 %
Asimetrija / Ekscesas	0,23 / −1,11
Išskirtys (1,5 × IQR)	0 (0,00 %)

Analizuojant aukščių pasiskirstymą kas 2 metrus, didžiausia medžių koncentracija užfiksuota intervale **6–8 m** – čia sutelkta **5 267** medžių, t. y. **12,58 %** visos imties. Pusė visų stebėjimų patenka tarp 9,20 m ir 23,02 m. Ryškiai išsiskiria jaunuolių ir jaunų medžių persvara: apie 56 % medžių yra žemesni nei 18 m. Tai būdinga eglės medynams su aktyvia natūralia kaita.

Aukščio grupė (m)	Medžių skaičius	Dalis (%)
4–6	2 623	6,27
6–8	5 267	12,58
8–10	3 984	9,52
10–12	3 163	7,56
12–14	2 716	6,49
14–16	2 744	6,56
16–18	2 839	6,78
18–20	3 099	7,40
20–22	3 282	7,84
22–24	3 194	7,63
24–26	2 811	6,72
26–28	2 456	5,87
28–30	1 887	4,51
30–32	1 112	2,66
32–34	524	1,25
34–36	134	0,32
36–38	23	0,05
38–40	3	0,01

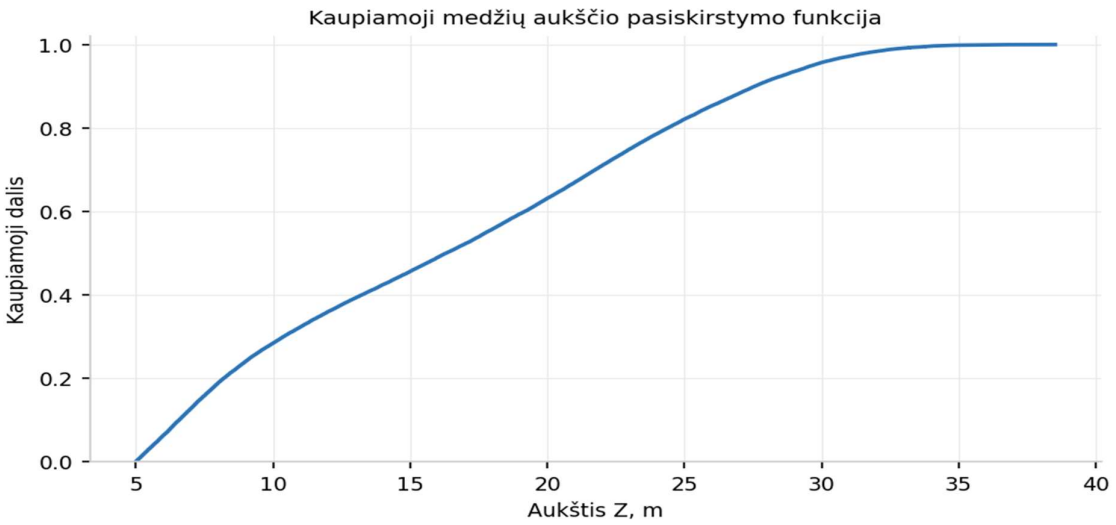
Žemiau pateikiami keturi grafikai, vizualiai atskleidžiantys Žemaitijos medynų aukščių struktūrą.

LIDAR taškų masyvo profilis



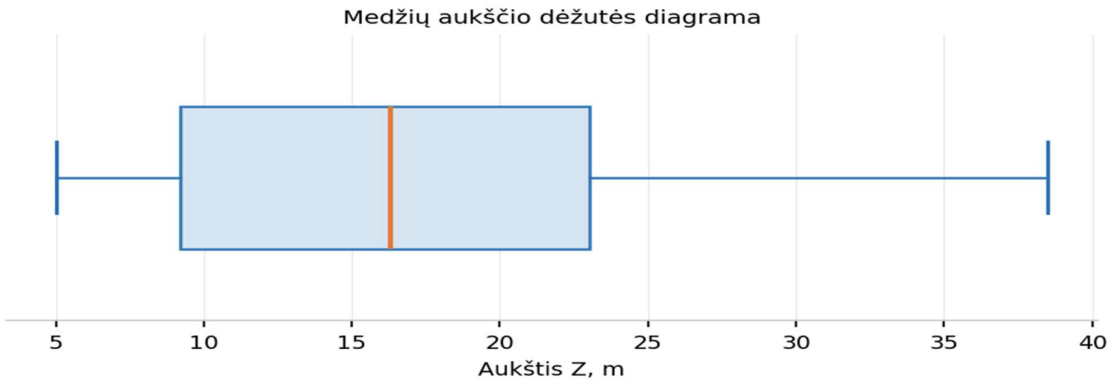
1 pav. Medžių skaičius pagal aukščio grupes, sugrupuotas kas 2 m.

Stulpelinė diagrama atskleidžia platų pasiskirstymą be aiškios aiškios viršūnės. Didžiausia koncentracija 6–8 m grupėje po to palaipsniui mažėja iki 38 m – tai atspindi aktyvų eglės atsinaujinimu žemesnio ūgio zonose.



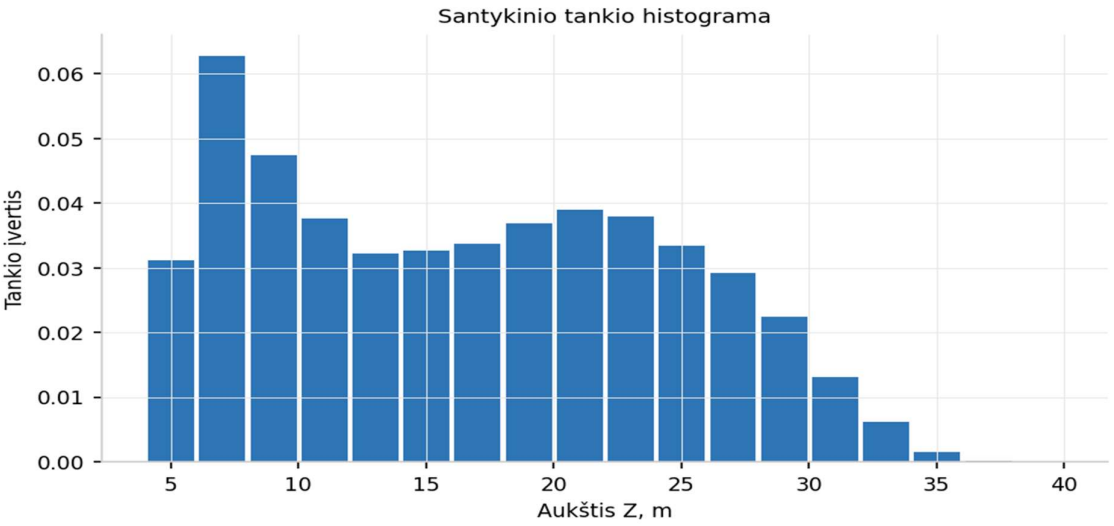
2 pav. Kaupiamoji pasiskirstymo funkcija (ECDF).

Kaupiamoji kreivė kyla greičiau žemesnėje dalyje (5–15 m), vėliau lėtėja – tai rodo, kad didesnė imties dalis sutelkta jaunesnių medžių aukščių zonoje.



3 pav. Dėžutės diagrama (medianą, kvartilius ir potencialias išskirtis).

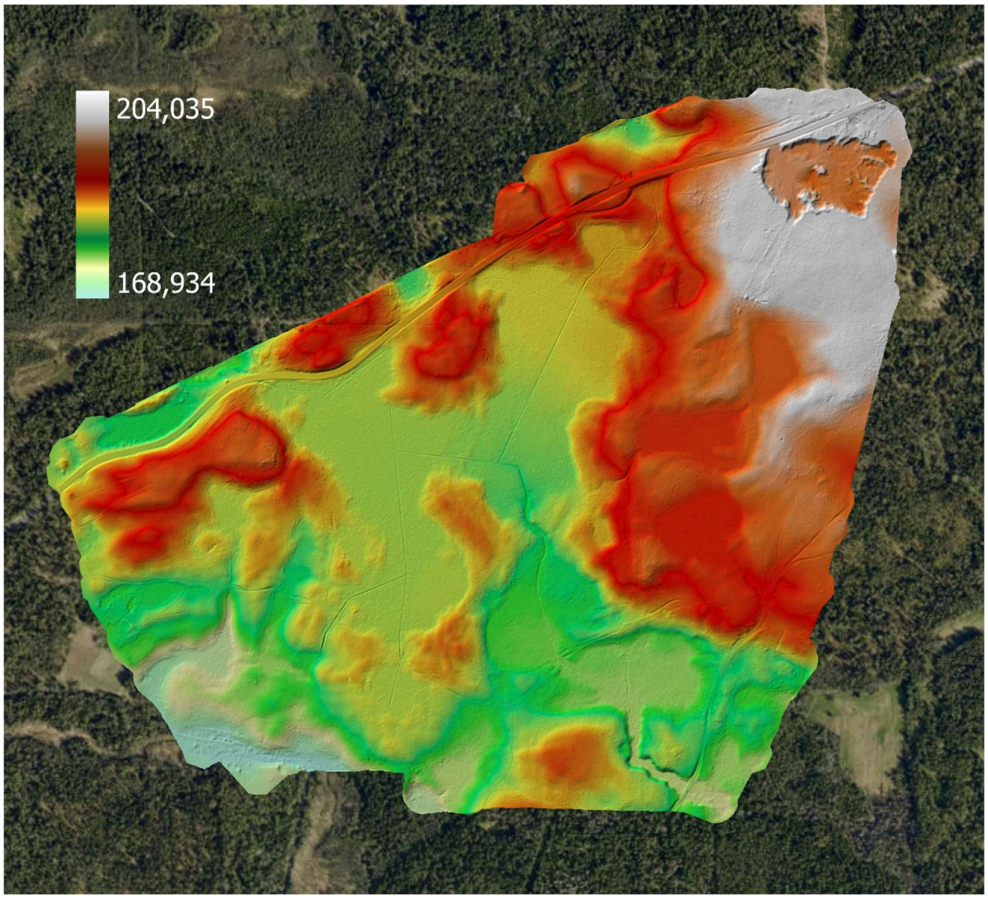
Didelė IQR = 13,82 m verte dėžutės diagramoje liudija platų centrinės imties zonos diapazoną – tai tipiškas įvairaus amžiaus miškų požymis, kur vienoje teritorijoje auga ir jauni, ir brandūs medžiai.



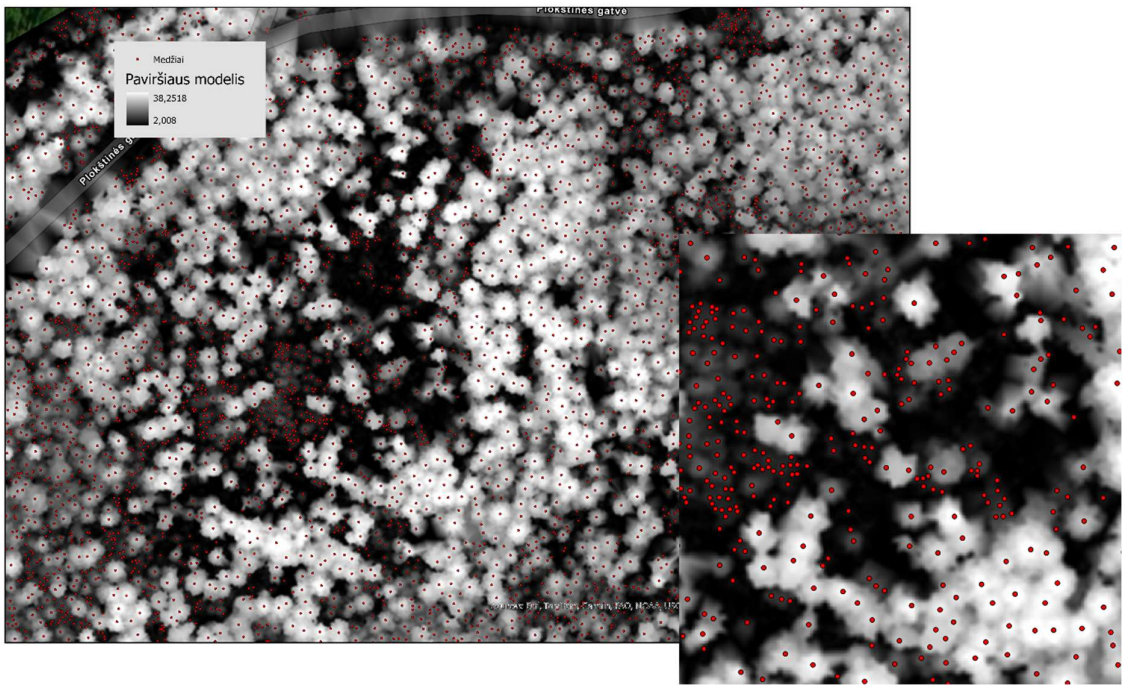
4 pav. Santykinio tankio histograma.

Tankio histograma rodo nuolaidžią kreivę su aukščiausiu tankiu ties 6–8 m ir laipsnišku mažėjimu – tai būdinga eglynams, kai jaunesnų medžių daugiau nei brandžių.

Apibendrinant, **Žemaitijos** regiono medynų aukščių skirstinys apima intervalą nuo 5,00 m iki 38,51 m, su centrine dalimi sutelkta apie 16,63–16,31 m. Didelis CV (47,25 %) ir plati IQR rodo didelę aukščių įvairovę, būdingą natūralios regeneracijos miškams su skirtingo amžiaus eglėmis ir kitomis rūšimis.



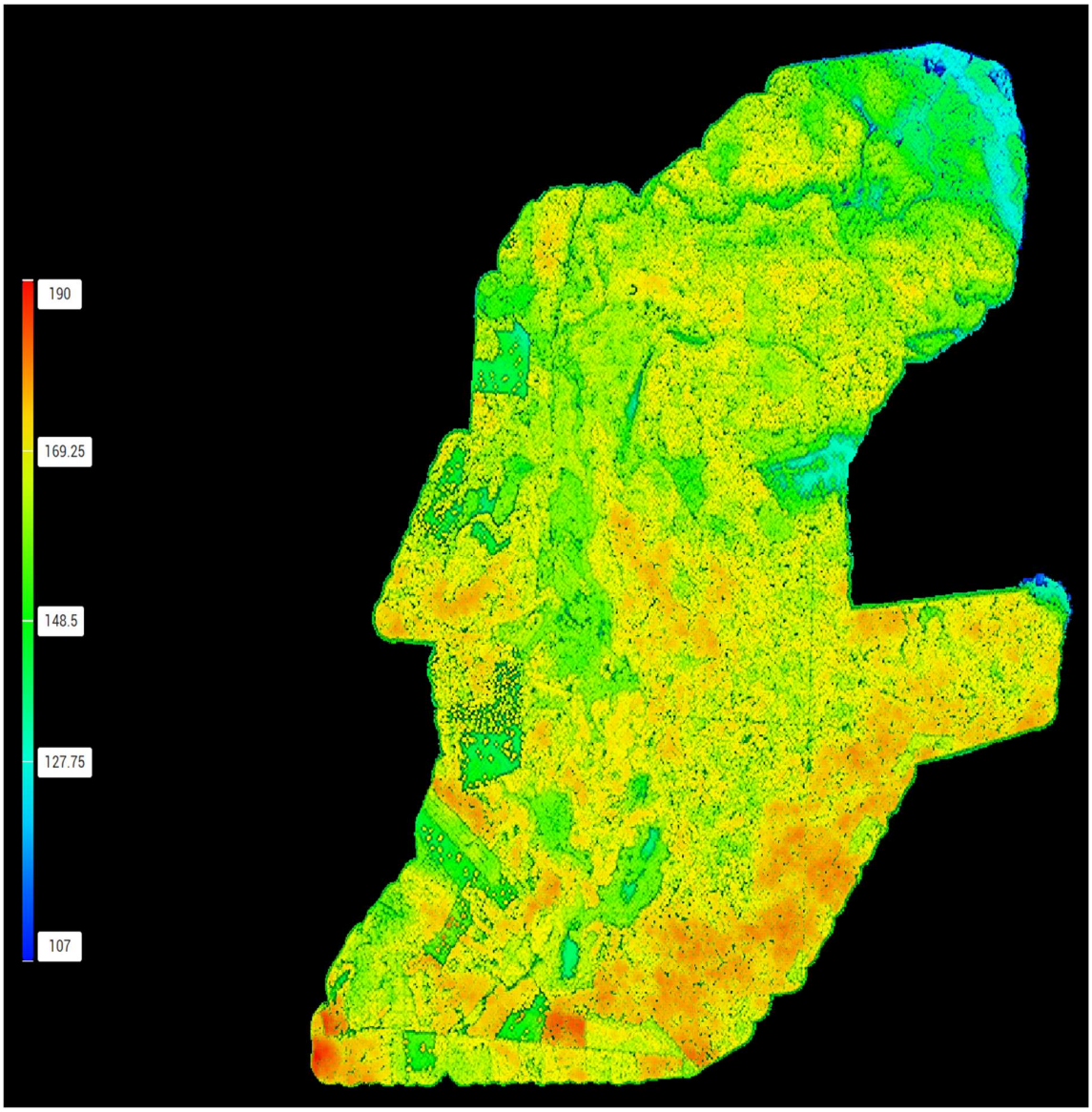
Žemaitijos KMS žemės paviršiaus modelis



Žemaitijos KMS baseine identifikuoti augantys medžiai

Dzūkijos KMS baseino visų medžių aukščio (Z) statistinė analizė

Išanalizuoti **139 434** medžių aukščio matavimai. Dzūkijos teritorijoje vyrauja brandus miškas, augantis smėlingose ir priesmėlingose Dzūkijos KMS baseine. Vidutinis medžių aukštis siekia **21,88 m**, mediana – **23,55 m**, standartinis nuokrypis – **6,92 m** (variacijos koeficientas CV = 31,62 %). Aukščiai svyruoja nuo **5,00 m** iki **42,14 m**.



Dzūkijos KMS baseino LIDAR taškų masyvas

Pasiskirstymo asimetrijos koeficientas As = −0,69, ekscesas Ex = −0,30. Pasiskirstymas yra neigiamo asimetriškumo, rodantis aukštaūgį medžių persvarą tiriamoje teritorijoje. Vidurkis ir mediana skiriasi 1,67 m, kas patvirtina neigiamo asimetriškumo skirstinį – dauguma medžių yra aukštesni už vidurkį. Tarpkvartilinė amplitudė IQR = 9,48 m: pirmasis kvartilis Q1 = 17,60 m, trečiasis Q3 = 27,08 m. 10-asis percentilis P10 = 10,85 m, 90-asis P90 = 29,38 m. Išskirčių pagal 1,5 × IQR kriterijų užfiksuota **4** (0,00 %), todėl duomenų kokybė vertintina kaip gera.

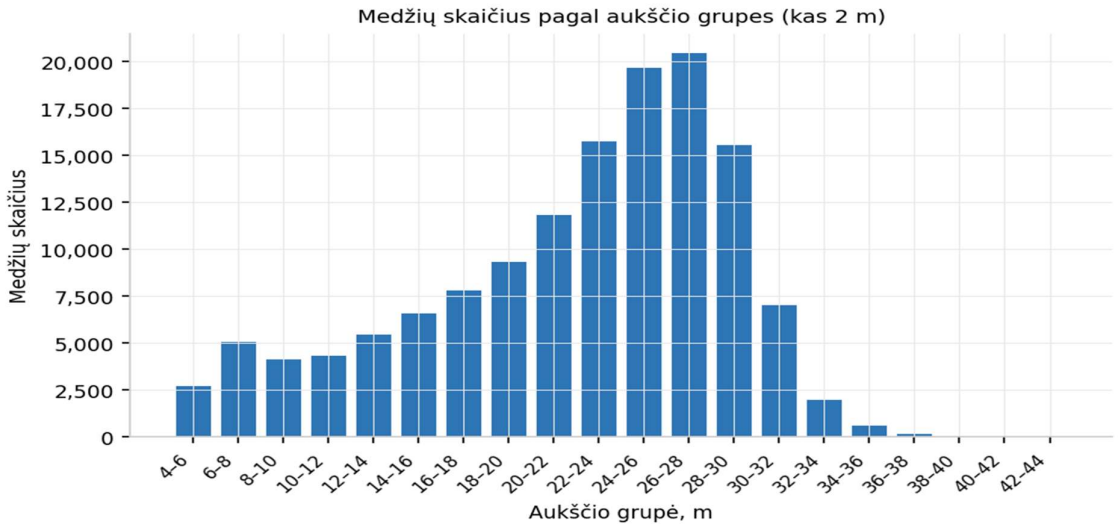
Rodiklis	Reikšmė
Imties dydis (n)	139 434
Vidurkis	21,88 m
Mediana	23,55 m
Standartinis nuokrypis	6,92 m
Dispersija	47,88 m²
Minimumas / Maksimumas	5,00 m / 42,14 m
Q1 / Q3	17,60 m / 27,08 m
IQR	9,48 m
P10 / P90	10,85 m / 29,38 m
Variacijos koeficientas	31,62 %
Asimetrija / Ekscesas	−0,69 / −0,30
Išskirtys (1,5 × IQR)	4 (0,00 %)

Analizuojant aukščių pasiskirstymą kas 2 metrus, didžiausia medžių koncentracija užfiksuota intervale **26–28 m** – čia sutelkta **20 475** medžių, t. y. **14,68 %** visos imties. Pusė visų stebėjimų

patenka tarp 17,60 m ir 27,08 m. Ryškią viršūnę formuoja 22–30 m intervalas, kuriame sutelkta apie 37 % visų medžių. Jaunų medžų (aukštis iki 10 metrų) dalis maža – apie 9 %, o senų medžių (aukštis virš 30 m) – apie 7 %.

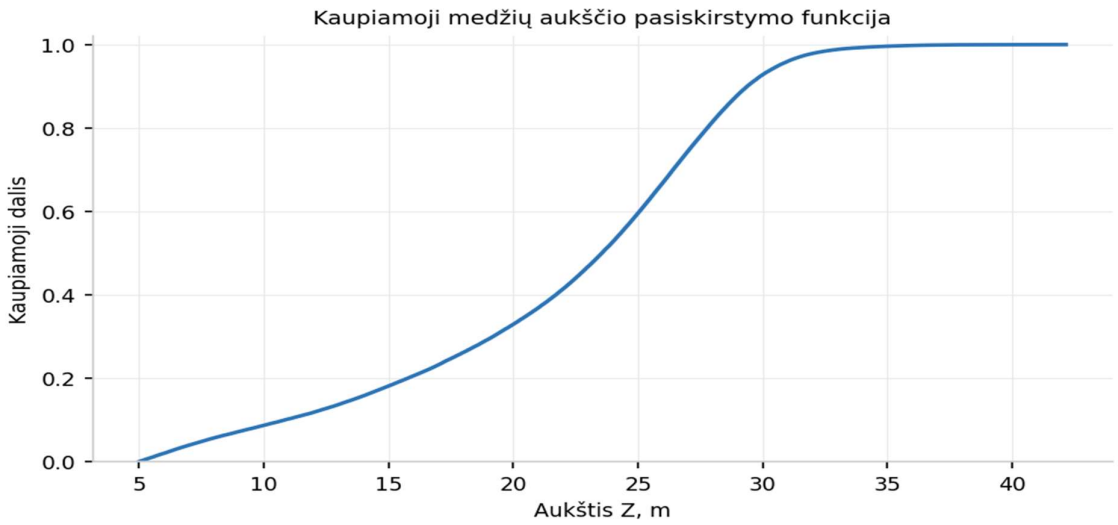
Aukščio grupė (m)	Medžių skaičius	Dalis (%)
4–6	2 782	2,00
6–8	5 135	3,68
8–10	4 210	3,02
10–12	4 385	3,14
12–14	5 517	3,96
14–16	6 649	4,77
16–18	7 857	5,63
18–20	9 372	6,72
20–22	11 882	8,52
22–24	15 782	11,32
24–26	19 726	14,15
26–28	20 475	14,68
28–30	15 619	11,20
30–32	7 073	5,07
32–34	2 023	1,45
34–36	645	0,46
36–38	234	0,17
38–40	53	0,04
40–42	14	0,01
42–44	1	0,00

Žemiau pateikiami keturi grafikai, vizualiai atskleidžiantys Dzūkijos medynų aukščių struktūrą.



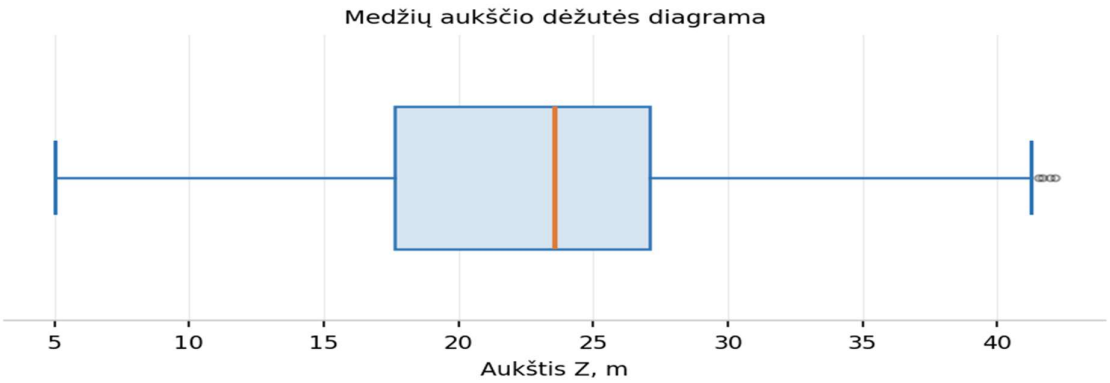
1 pav. Medžių skaičius pagal aukščio grupes, sugrupuotas kas 2 m.

Histogramoje aiškiai matoma dešinėje pašlieta (neigiamojo asimetriškumo) kreivė: stulpeliai auga nuo 4 m iki viršūnės ties 26–28 m, po to sparčiai mažėja. Tai būdingas brandaus miško, kur dominuoja brandūs medžiai, aukščių skirstinys.



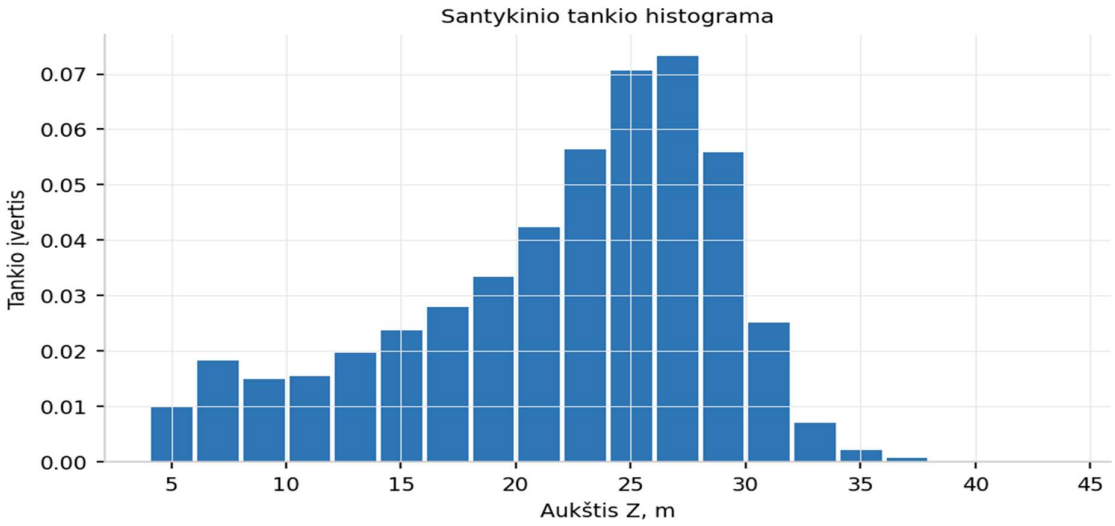
2 pav. Kaupiamoji pasiskirstymo funkcija (ECDF).

Kaupiamoji kreivė lėtai kyla žemajame diapazone (5–15 m), paskui labai staigiai kyla 20–30 m zonoje – tai rodo aukštų medžių didelę dalį. Pusė visų stebėjimų (50-asis percentilis) atitinka 23,55 m.



3 pav. Dėžutės diagrama (medianą, kvartilius ir potencialias išskirtis).

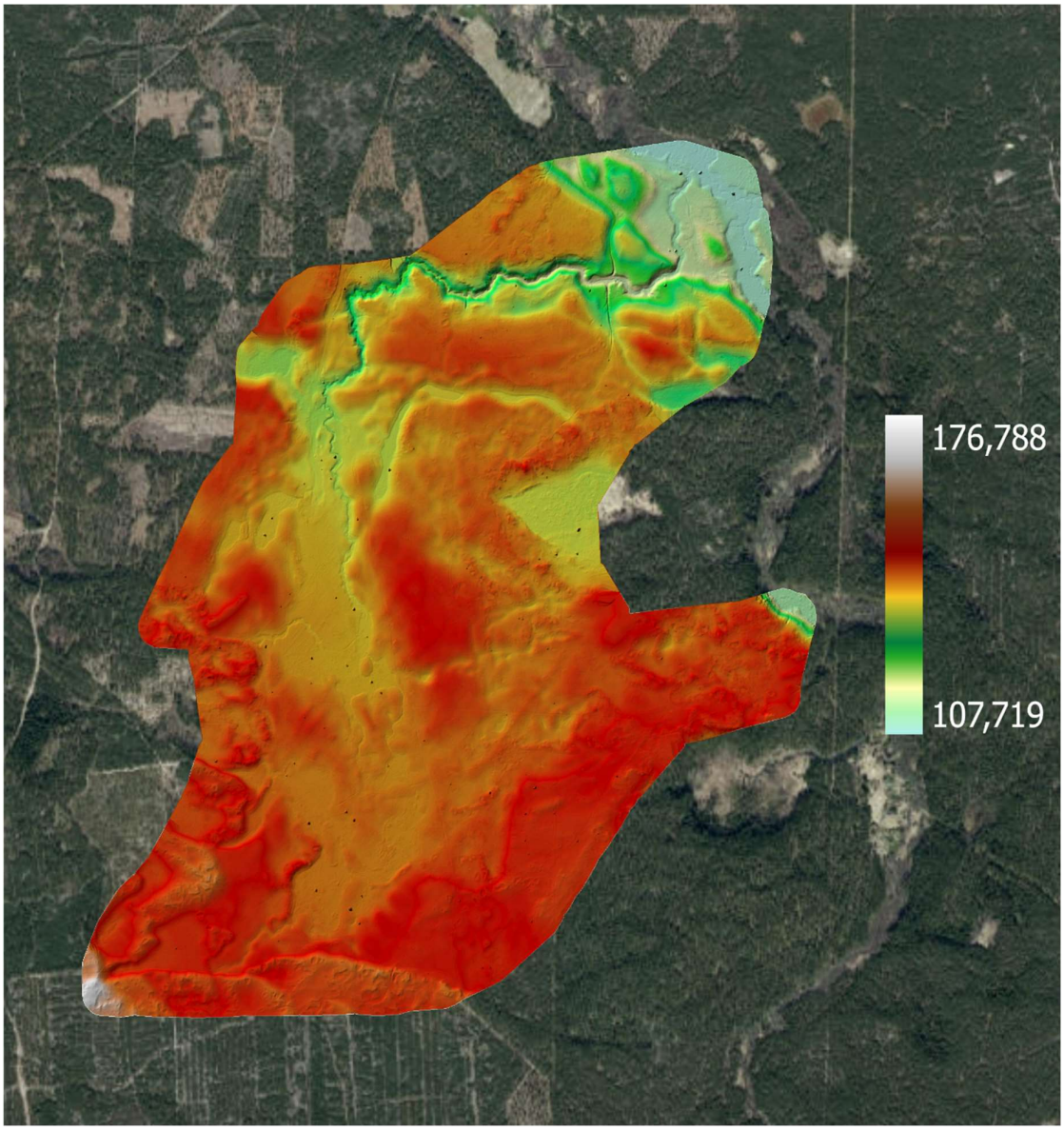
Dėžutės diagrama rodo, kad centrinė imties dalis (IQR = 9,48 m) susispietusi gana siaurame intervale 17,6–27,1 m. Kairysis ūsas tęsiasi iki 5 m – tai jauni augantys medeliai, dešinysis iki 42 m – aukščiausi brandūs medžiai. Išskirčių tik 4.



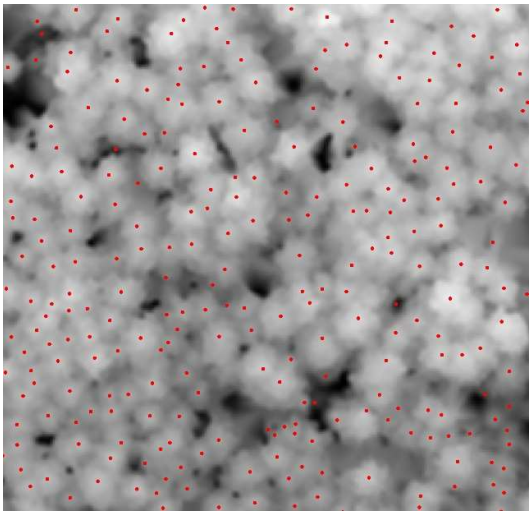
4 pav. Santykinio tankio histograma.

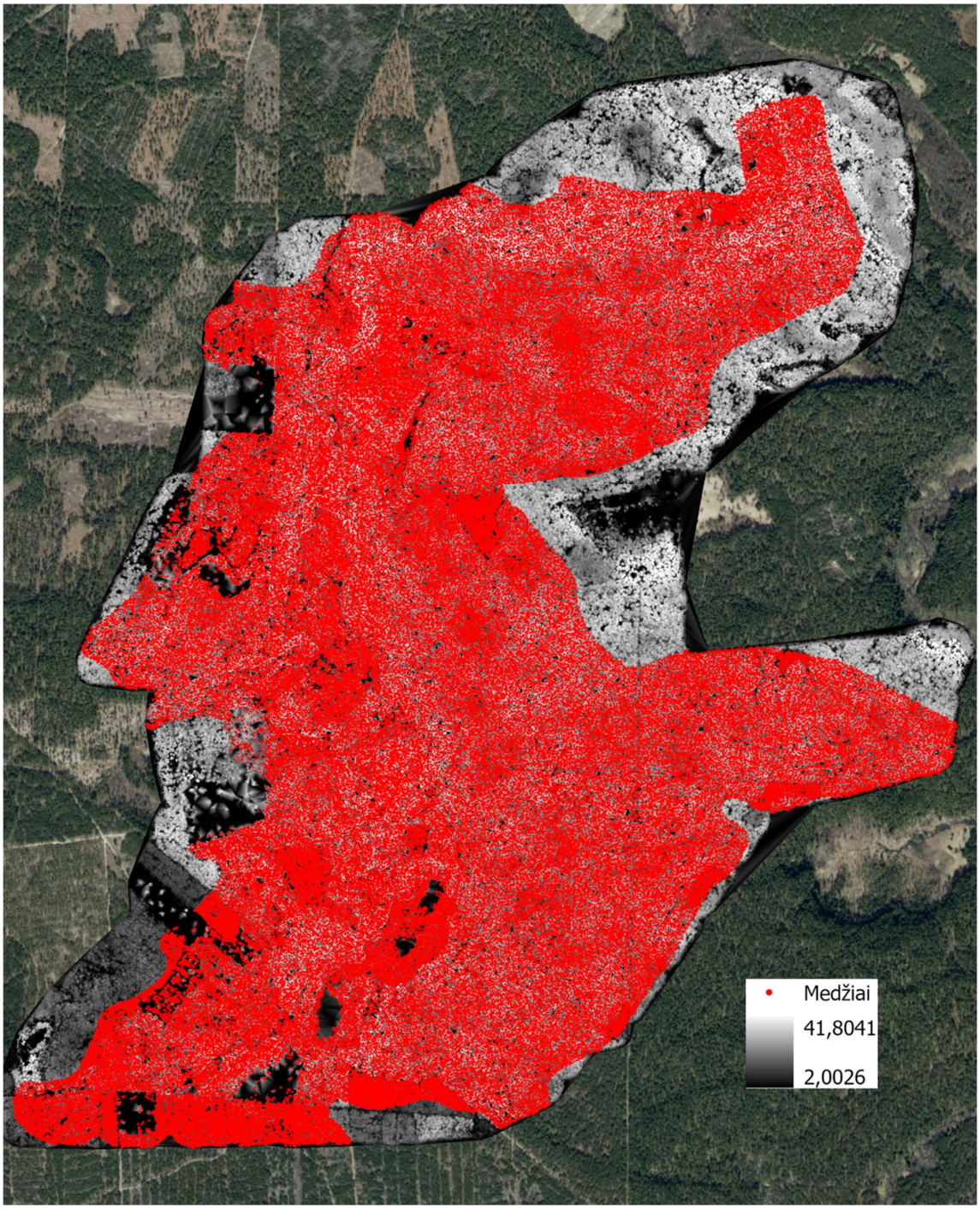
Tankio histograma gerai parodo skirstinio viršūnės asimetrišką pobūdį: kairėje pusėje tankis žemas (maža jaunuolių), o dešinėje palaipsniui mažėja – tai atspindi medyno brandos etapą.

Apibendrinant, **Dzūkijos** regiono medynų aukščių skirstinys apima intervalą nuo 5,00 m iki 42,14 m, su centrine dalimi sutelkta apie 21,88–23,55 m. Neigiamas asimetriškumas (As = −0,69) ir dominuojantis 26–28 m intervalas leidžia teigti, kad Dzūkijos Baseino teritorijos miškai yra brandūs su didelių medžių persvara ir maža jaunuolynų dalimi.



Dzūkijos KMS žemės paviršiaus modelis





Dzūkijos KMS baseine identifikuoti augantys medžiai

IŠVADOS

Aukštaitijos KMS baseine išanalizuoti 24 465 medžių aukščio matavimai. Tyrimo teritorijoje vyrauja pušynai su eglės ir beržo priemaiša, būdingi Aukštaitijos smėlingoms ir priesmėlingoms dirvoms. Vidutinis medžių aukštis siekia 27,48 m, mediana – 28,17 m, standartinis nuokrypis – 5,80 m (variacijos koeficientas CV = 21,12 %). Aukščiai svyruoja nuo 15,00 m iki 41,54 m.

Analizuojant aukščių pasiskirstymą kas 2 metrus, didžiausia medžių koncentracija užfiksuota intervale **28–30 m** – čia sutelkta **3 244** medžių, t. y. **13,26 %** visos imties. Pusė visų stebėjimų patenka tarp 23,22 m ir 31,92 m. Vyrauja brandi aukštų medžių zona: 26–34 m intervale sutelkta apie 48 % visų medžių. Jaunuolių (žemiau 18 m) dalis yra maža – tik 8 %, kas liudija brandų, gerai užaugusį medyną.

Aukštaitijos regiono medynų aukščių skirstinys apima intervalą nuo 15,00 m iki 41,54 m, su centrine dalimi sutelkta apie 27,48–28,17 m. Mažas variacijos koeficientas (21,12 %) ir simetriškas skirstinys būdingi vienaamžiams pušynams, kuriuose medžiai auga vienodai ir pasiekia panašų aukštį.

Žemaitijos KMS baseine išanalizuoti **41 861** medžių aukščio matavimai. Žemaitijoje vyrauja mišrūs medynai su dideliu eglės kiekiu, augantys drėgnose molingose ir priemolingose dirvose. Vidutinis medžių aukštis siekia **16,63 m**, mediana – **16,31 m**, standartinis nuokrypis – **7,86 m** (variacijos koeficientas CV = 47,25 %). Aukščiai svyruoja nuo **5,00 m** iki **38,51 m**.

Didžiausia medžių koncentracija užfiksuota intervale **6–8 m** – čia sutelkta **5 267** medžių, t. y. **12,58 %** visos imties. Pusė visų stebėjimų patenka tarp 9,20 m ir 23,02 m. Ryškiai išsiskiria jaunuolių ir jaunų medžių persvara: apie 56 % medžių yra žemesni nei 18 m. Tai būdinga eglės medynams su aktyvia natūralia kaita.

Žemaitijos regiono medynų aukščių skirstinys apima intervalą nuo 5,00 m iki 38,51 m, su centrine dalimi sutelkta apie 16,63–16,31 m. Didelis CV (47,25 %) ir plati IQR rodo didelę aukščių įvairovę, būdingą natūralios regeneracijos miškams su skirtingo amžiaus eglėmis ir kitomis rūšimis.

Išanalizuoti **139 434** medžių aukščio matavimai. Dzūkijos teritorijoje vyrauja brandus miškas, augantis smėlingose ir priesmėlingose Dzūkijos KMS baseine. Vidutinis medžių aukštis siekia **21,88 m**, mediana – **23,55 m**, standartinis nuokrypis – **6,92 m** (variacijos koeficientas CV = 31,62 %). Aukščiai svyruoja nuo **5,00 m** iki **42,14 m**.

Didžiausia medžių koncentracija užfiksuota intervale **26–28 m** – čia sutelkta **20 475** medžių, t. y. **14,68 %** visos imties. Pusė visų stebėjimų patenka tarp 17,60 m ir 27,08 m. Ryškią viršūnę formuoja 22–30 m intervalas, kuriame sutelkta apie 37 % visų medžių. Jaunų medžų (aukštis iki 10 metrų) dalis maža – apie 9 %, o senų medžių (aukštis virš 30 m) – apie 7 %.

Apibendrinant, **Dzūkijos** regiono medynų aukščių skirstinys apima intervalą nuo 5,00 m iki 42,14 m, su centrine dalimi sutelkta apie 21,88–23,55 m. Neigiamas asimetriškumas (As = −0,69) ir dominuojantis 26–28 m intervalas leidžia teigti, kad Dzūkijos Baseino teritorijos miškai yra brandūs su didelių medžių persvara ir maža jaunuolynų dalimi.

Medžių ekofiziologinių reakcijų tyrimas Aukštaitijos KSM baseine

Šio darbo tikslas – remiantis ilgalaikio (2016–2025 m.) monitoringo duomenimis, išanalizuoti radialinio prieaugio ir transpiracijos dinamiką bei įvertinti meteorologijos įtaką skirtingų medžių rūšių fiziologinei būklei ir vandens naudojimo efektyvumui. Tokia analizė leidžia ne tik identifikuoti miško „išgyvenimo strategijas“ ekstremalių sausrų laikotarpiais, bet ir prognozuoti Lietuvos miškų ekosistemų raidą kintančio klimato sąlygomis.

Šio darbo tikslas – remiantis ilgalaikio (2016–2025 m.) monitoringo duomenimis, išanalizuoti radialinio prieaugio ir transpiracijos dinamiką bei įvertinti meteorologijos įtaką skirtingų medžių rūšių fiziologinei būklei ir vandens naudojimo efektyvumui. Tokia analizė leidžia ne tik identifikuoti miško „išgyvenimo strategijas“ ekstremalių sausrų laikotarpiais, bet ir prognozuoti Lietuvos miškų ekosistemų raidą kintančio klimato sąlygomis.

Metodas: Pasitelkdami karščio bangos plitimo metodu veikiančius sulčių tėkmės jutiklius ir itin jautrius dendrometrus, galime stebėti medžių hidraulinį aktyvumą bei jų augimo dinamiką, o tai leidžia kur kas giliau pažinti vidinį miško gyvenimą bei jo reakcijas į aplinkos pokyčius

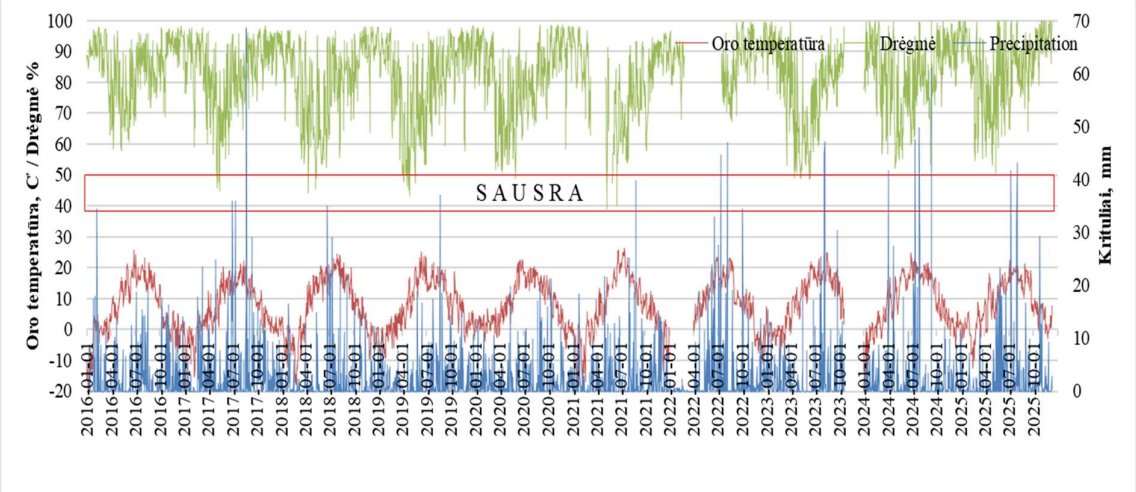
2 pav. Aukštos skiriamosios gebos dendrometras 3 transpiracijos matuokliai ant skirtingų medžių rūšių (pušies, eglės, beržo)

Radialusis kamieno prieaugis 1,3 m aukštyje buvo matuojamas rankiniais ir aukštos skiriamosios gebos elektroniniais dendrometrais (DRL26, EMS Brno), kurių tikslumas atitinkamai lygus ±0,1 mm ir 0,001 mm.

Sulčių tėkmė balanoje buvo išmatuota karščio bangos plitimo metodu (Burgess et al. 2001), naudojant SFM1sensorius (ICT International, Australia). Sulčių srauto intensyvumas nustatomas pagal temperatūrų pokytį po karščio impulso. Didesnis temperatūrų skirtumas indikuoja intensyvesnę sulčių tėkmę balanoje.

Meteorologijos dinamika

Ilgalaikio monitoringo duomenų analizė atskleidžia kompleksinį klimato veiksnių poveikį miško ekosistemos gyvybingumui. Nagrinėjamu laikotarpiu stebimas progresuojantis vasaros temperatūros ekstremumų dažnis, pasiekęs kulminaciją 2018–2019 m., kas išprovokavo intensyvią augalų transpiraciją ir padidino audinių vėsinimo poreikį. Šią terminę įtampą ženkliai sustiprina hidrologinis deficitas. Nors metinė kritulių suma gali išlikti artima normai, stebimas didelis jų pasiskirstymo netolygumas – ilgi sausringi periodai keičiami epizodinių liūčių, kurios dėl paviršinio nuotėkio neefektyviai papildo šaknų zoną. Tokios kritulių anomalijos, ypač ryškios 2019 m. ir 2021 m., tiesiogiai koreliuoja su medžių vegetacijos stagnacija ir prieaugio nuostoliais, indikuojant miško ekosistemos jautrumą kintančiam hidroterminiam režimui.



1 pav. 2016-2025 m. Kritulių kiekis, oro temperatūra ir drėgmė

🟢 Meteorologinės sąlygos buvo artimos optimalioms, todėl medžiai galėjo maksimaliai vykdyti fotosintezę ir formuoti plačias metines rieves.

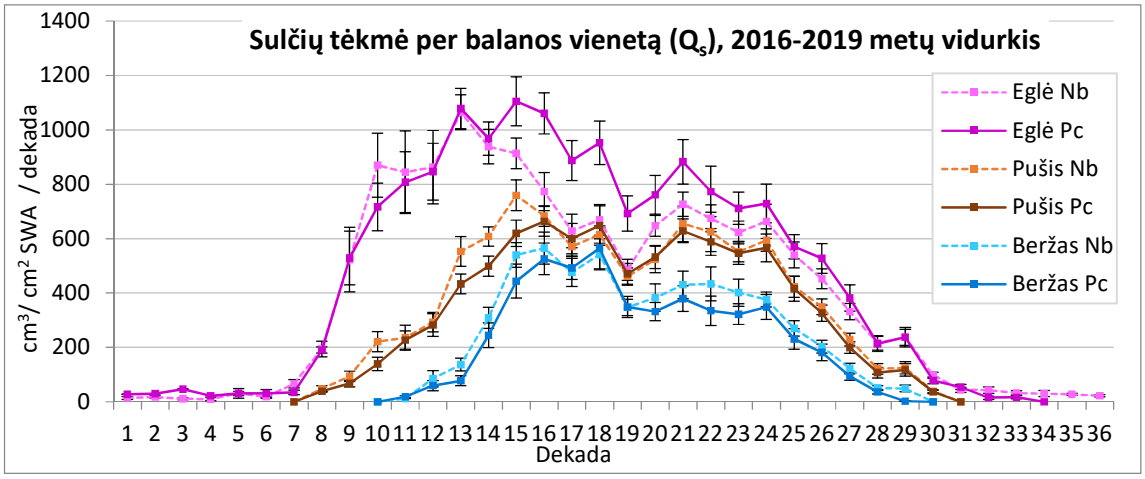
- 2017 m. – Hidrologinis pikas: Tai buvo patys palankiausi metai per visą tiriamą laikotarpį, pasižymėję rekordiniu kritulių kiekiu – 1018,0 mm. Esant žemai vidutinei temperatūrai, dirvožemis prisisotino drėgmės iki giliausių sluoksnių, o tai leido medžiams netaupyti vandens ir pasiekti maksimalų radialinį prieaugį.
- 2024–2025 m. (prognozuojamas atsigavimas): Matomas drėgmės kreivės grįžimas į saugią zoną (82–84 %) ir kritulių stabilizavimasis virš 800 mm ribos, kas leidžia medynams atsistatyti po ankstesnių sausrų.

🔴 Streso metai: Fiziologinio išsekimo periodai

Šiais metais medžiai pateko į „išgyvenimo režimą“, kai dėl vandens trūkumo ir karščio buvo stabdomi visi nebūtini gyvybiniai procesai.

- 2018–2019 m. – fiziologinio streso metai. 2018 m. kritulių kiekis nukrito iki minimumo (617,1 mm), o 2019 m. užklupo karščio bangos, skatinusios medžius apsisaugant nuo perkaitimo užverti žioteles.
- 2021 m. – Santykinės drėgmės deficitas: Nors kritulių kiekis šiek tiek padidėjo, santykinė oro drėgmė pasiekė žemiausią tiriamojo laikotarpio tašką – 78,4 %. Tai sukėlė didelę garavimo įtampą, kai sausas oras tiesiog „siurbė“ vandenį iš spyglių ir lapų sparčiau, nei šaknys spėjo jį pasisavinti.

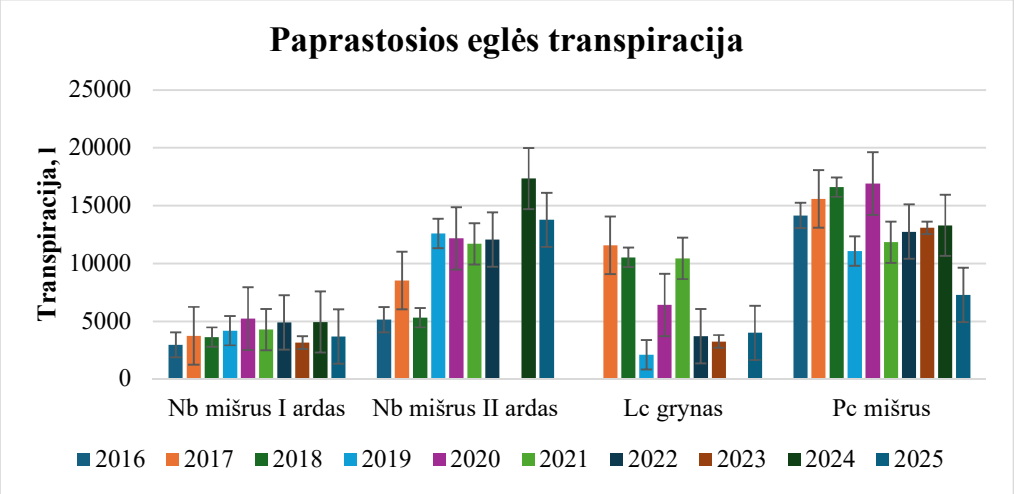
Transpiracijos intensyvumas



2 pav. Atskirų rūšių sulčių tėkmė per balanos ploto vienetą (Q_s) per dekadą skirtingose augavietėse. 2016–2019 vidurkis su standartinėmis paklaidomis

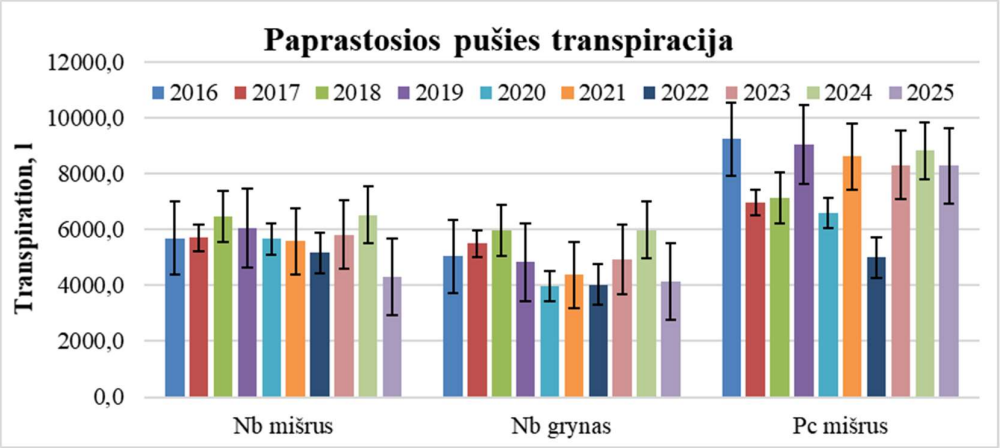
Vertinant sulčių tėkmės intensyvumo kaitą sezono eigoje, itin aukštomis vertėmis aiškiai išsiskiria abiejų augaviečių eglių sulčių tėkmė per balanos ploto vienetą vegetacijos sezono pradžioje, 9–15 dekadomis, kuomet kitų rūšių sulčių tėkmė tik pamažu kyla kartu su kylančia aplinkos temperatūra (3.14 pav.). Tai greitesnio dirvožemio įšilimo ir laisvos drėgmės prieinamumo rezultatas. Antrą vertus tai būtų galima traktuoti ir kaip galimai gerą eglių prisitaikymą prie žemesnių aplinkos temperatūrų, bei geba išnaudoti lapuočių medžių fenologijos sąlygotas geresnes apšvietimo sąlygas vegetacijos pradžioje, kadangi beržai 50 % lapų išsiskleidimo pasiekia tik 130-tą parą (DOY 130). Tokio eglių prisitaikymo rezultatas – didesnis metinis prieaugis bei metinės sulčių tėkmės kiekis – eglės geba intensyviai transpiruoti (matomai ir fotosintetinti bei augti) nuo pat ankstyvo pavasario (9 dekados), kai lapuočiai dar neužpavėsinę apatinių šakų, o vidutinė paros oro temperatūra tesiekia 1,6 °C. Įdomu, jog 19–20 dekadomis, matomai dėl visus keturis metus iš eilės pasikartojusio neįprastai vėsaus ir lietingo laikotarpio (3.8–3.9 pav.), visos medžių rūšys sinchroniškai laikinai sumažino sulčių tėkmės intensyvumą.

Paprastoji eglė pasižymi jautria, nuo paviršinės drėgmės priklausoma vandens apykaitos strategija, kurią tiesiogiai veikia miško augavietės ypatumai. Paveikslas (3pav.) rodo, kad transpiracijos intensyvumas pasiekia maksimumą Pc mišrioje miško augavietėje – tai indikuoja, jog šioms ekosistemoms būdingas gebėjimas laikinai akumuliuoti drėgmę yra gyvybiškai svarbus eglės fiziologiniam aktyvumui palaikyti. Tačiau dėl seklios šaknų sistemos ši rūšis itin greitai reaguoja į viršutinio dirvožemio sluoksnio džiūvimą; sausros laikotarpiais eglės priverstos drastiškai mažinti transpiraciją, kad apsisaugotų nuo perkaitimo. Tai patvirtina, jog eglė yra pažeidžiama rūšis, kurios „pulsas“ tiesiogiai priklauso nuo momentinio vandens prieinamumo.



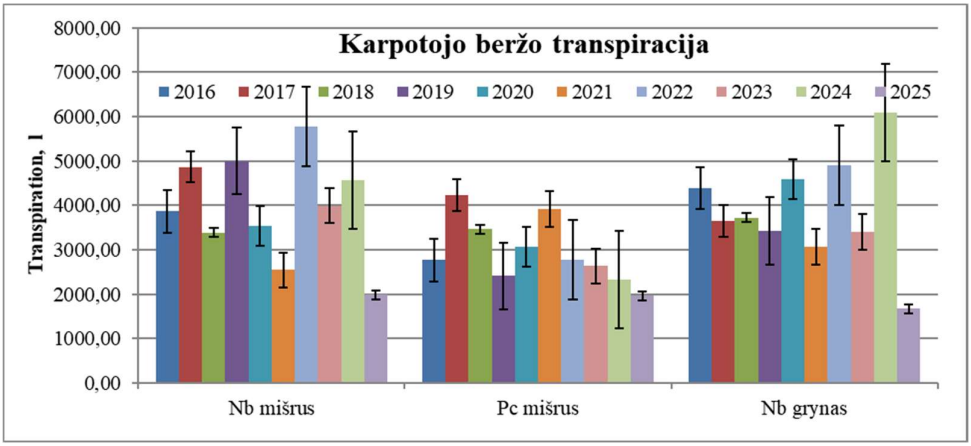
3 pav. Paprastosios eglės transpiracija 2016-2025 m.

Priešingai nei eglė, paprastoji pušis demonstruoja stabilią vandens naudojimo elgseną, leidžiančią išlaikyti ekosistemos procesų tolygumą net ir nepalankiomis sąlygomis. Nors pušų transpiracijos srautai taip pat varijuoja tarp augaviečių (didžiausi fiksuojami Pc mišrioje miško augavietėje), bendra jų vandens apykaita išlieka palyginti pastovi viso monitoringo laikotarpiu. Net ir ekstremaliais 2018–2019 m. sausros periodais, kai kritulių kiekis pasiekė žemiausią tašką, pušys sugebėjo išlaikyti savo fiziologinį ritmą be didelių nuokrypių. Toks atsparumas rodo aukštą rūšies adaptacinį potencialą ir gebėjimą efektyviai reguliuoti vidinius vandens išteklius, užtikrinant medyno gyvybingumą net ir ilgalaikio drėgmės deficito sąlygomis.



7. **pav.** Paprastosios pušies transpiracija 2016-2025 m.

Karpotojo beržo vandens garinimo intensyvumas pasižymi aukštu ekofiziologiniu plastiškumu, kurį tiesiogiai moduliuoja dirvožemio savybės ir hidrologinis režimas. Analizuojant transpiracijos srautus (5 pav.), matyti, kad Nb gryno ir Nb mišraus medyno plotuose beržai maksimaliai išnaudoja drėgmės resursus, ypač palankiais 2017 m. bei 2024 m., kai prietaisai fiksavo didžiausias tiriamojo laikotarpio vertes. Priešinga dinamika būdinga Pc mišraus miško augavietei – nors dėl savo struktūros ji gali laikinai sukaupti vandenį, sausros periodu ši terpė išdžiūsta sparčiausiai, provokuodama staigų beržo transpiracinio aktyvumo nuosmukį. Toks jautrumas patvirtina, kad beržas veikia kaip indikatorinis organizmas, operatyviai reaguojantis į aplinkos drėgmės deficitą žiotelių reguliavimu.

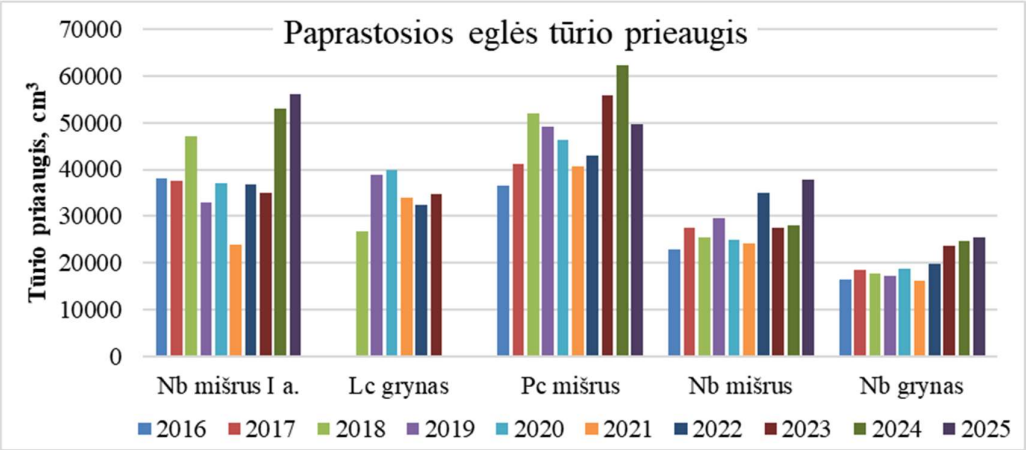


5 pav. Karpotojo beržo transpiracija 2016-2025 m.

2025-ieji monitoringo istorijoje išsiskiria kaip unikalios pauzės metai, kai visų tirtų medžių rūšių gyvybinis pulsas sinchroniškai sulėtėjo, reaguodamas ne į drėgmės deficitą, o į neįprastą šilumos trūkumą. Nors kritulių kiekis išliko palankus ir siekė 792,9 mm, drastiškai iki 7,8 °C nukritusi vidutinė metinė temperatūra tapo pagrindiniu fiziologiniu barjeru, privertusiu mišką „sulaikyti kvėpavimą“. Tiek eglės, tiek pušys bei beržai fiksavo itin menkus transpiracijos srautus, nes vėsus oras sulėtino metabolinius procesus ir apribojo vandens garinimą per lapiją. Šis masinis gyvybinių funkcijų prislopimas demonstruoja miško ekosistemos gebėjimą kolektyviai pereiti į energijos taupymo režimą, kai abiotinės sąlygos tampa nepakankamos aktyviai biomasės produkcijai palaikyti.

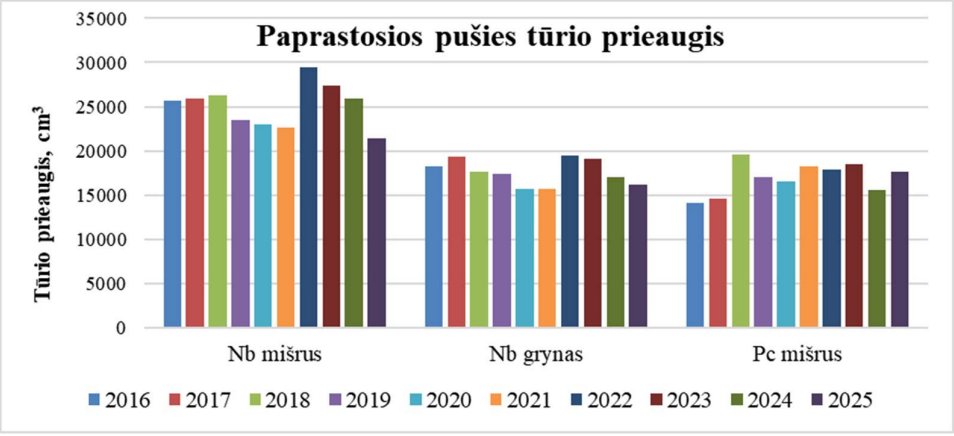
Medžių prieaugis

Paprastosios eglės (*Picea abies*) tūrio prieaugis (6 pav.) tiesiogiai priklauso nuo augavietės hidrologinių savybių: didžiausias produktyvumas fiksuojamas Pc mišraus bei Nb mišraus (I a.) medynų plotuose, kur palankiomis sąlygomis prieaugis viršija 50 000–60 000 cm^3. Priešingai, Nb gryno medyno augavietėje augimo tempas išlieka stabiliai žemiausias, o tai rodo didesnį šios aplinkos ribotumą eglės biomasei kaupti. Itin svarbus 2025 m. rezultatas atskleidžia eglės adaptacinį lankstumą – nors dėl nepalankių meteorologinių sąlygų medžiai maksimaliai apribojo transpiraciją, jie sugebėjo išlaikyti aukštą tūrio prieaugį, pasinaudodami sukauptais vidiniais resursais ir optimizuota metaboline veikla.



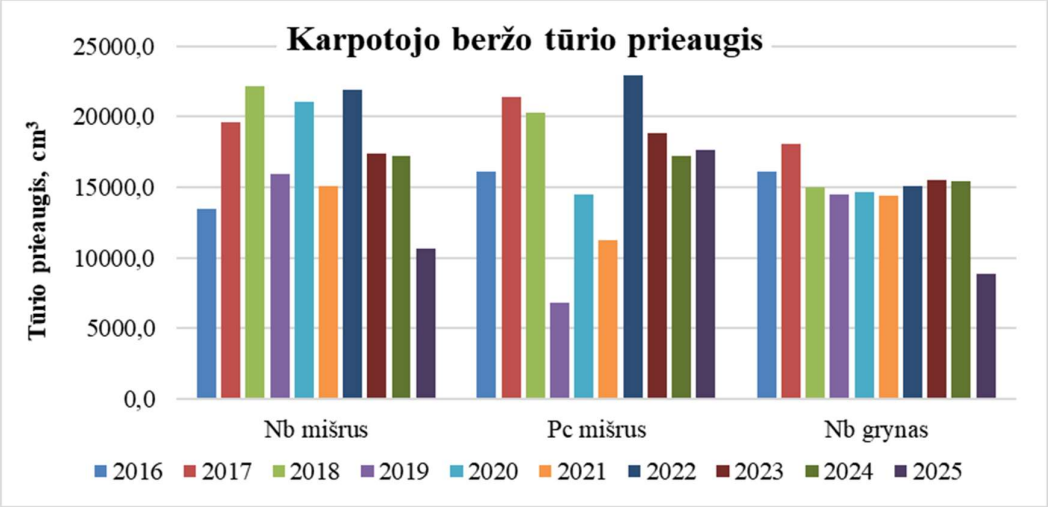
6 **pav.** Paprastosios eglės tūrio prieaugis 2016-2025 m.

Paprastosios pušies (*Pinus sylvestris*) tūrio prieaugis (7 pav.) pasižymi išskirtiniu stabilumu, kurį lemia konservatyvi vandens naudojimo strategija. Pušys išlaikė tolygią transpiraciją ir pastovų augimo tempą net ir pačiais nepalankiausiais 2018–2019 m. sausros laikotarpiais, kas rodo jų gebėjimą itin ekonomiškai naudoti drėgmės resursus. Nors 2025 m. fiksavo bendrą miško gyvybinio „pulso“ sulėtėjimą dėl žemos vidutinės temperatūros (7,8 °C), pušies tūrio prieaugis išliko santykinai stabilus visose augavietėse, ypač Nb mišraus medyno plotuose. Tai patvirtina, kad pušis, skirtingai nei jautrioji eglė ar oportunistiškas beržas, pasižymi didžiausiu hidrauliniu atsparumu ir gebėjimu išlaikyti produktyvumą net esant ryškiems meteorologinių sąlygų svyravimams.



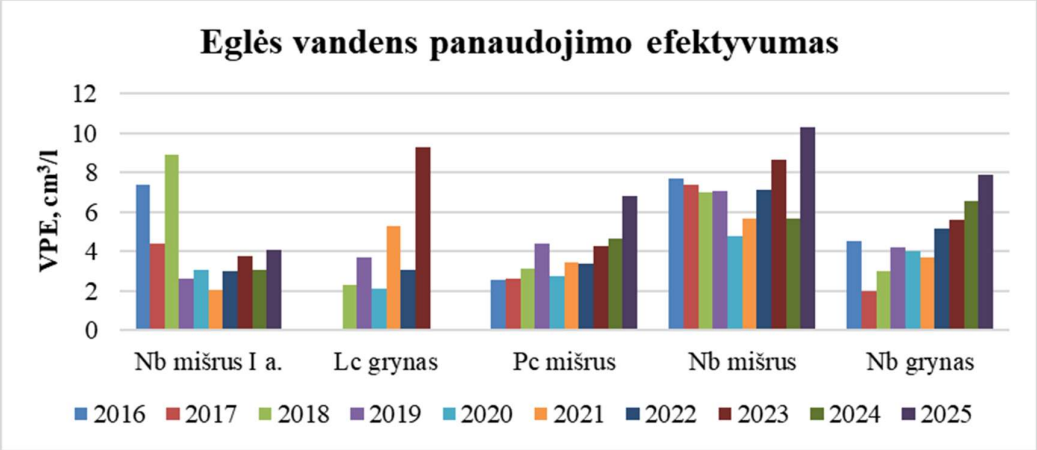
7 pav. Paprastosios pušies tūrio prieaugis 2016-2025 m.

Karpotojo beržo (*Betula pendula*) tūrio prieaugio rodikliai (8 pav.), atspindi itin aukštą šios rūšies fiziologinį jautrumą aplinkos drėgmės fluktuacijoms. Tyrimas parodė, kad beržas pasižymi operatyviu atsaku į palankias hidrologines sąlygas: 2017 m. ir 2022 m. stebimi ryškūs prieaugio šuoliai, ypač Pc mišraus miško augavietėje, tačiau bet koks drėgmės deficitas (pvz., 2018–2019 m. ar 2021 m.) sukelia staigų produktyvumo kritimą. Galutinį beržo, kaip labiausiai pažeidžiamos rūšies, statusą patvirtina 2025 m. duomenys – dėl neįprasto šilumos trūkumo ši rūšis visose augavietėse pirmoji fiksavo drastišką augimo tempų lėtėjimą, taip pademonstruodama tiesioginę priklausomybę ne tik nuo vandens prieinamumo, bet ir nuo šiluminės energijos balanso ekosistemoje.



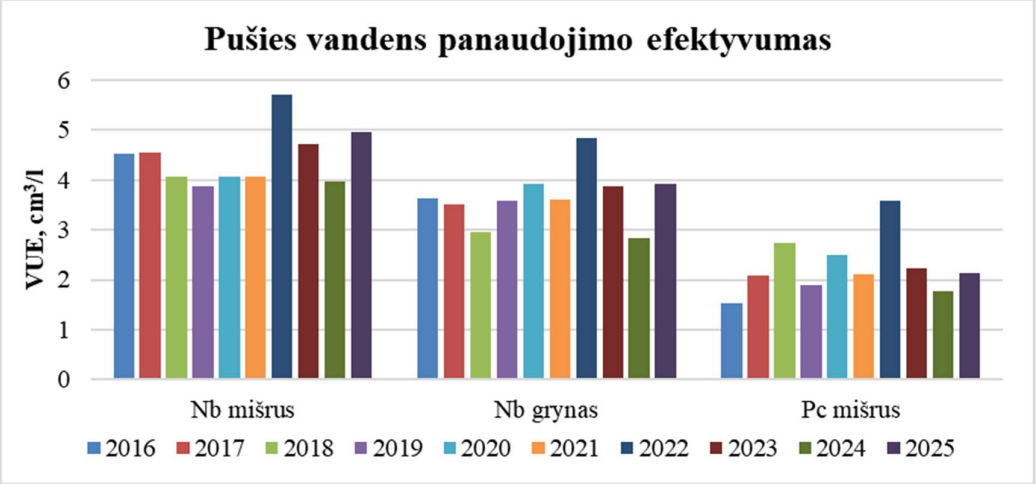
8 pav. Karpotojo beržo tūrio prieaugis 2016-2025 m.

Eglės vandens panaudojimo efektyvumo (VPE) rodikliai atskleidžia stebėtiną šios rūšies gebėjimą prisitaikyti prie kritinių aplinkos sąlygų (9 pav.) 2025 m. užfiksuotas VPE rekordas daugelyje augaviečių indikuoja aukštą metabolinį naudingumą: nors dėl vėsaus ir drėgno meteorologinio fono medžiai transpiravo minimaliai, jų tūrio prieaugis išliko solidus. Tai rodo, kad eglė sugeba optimizuoti vidinius resursus ir „išmoksta“ vandenį naudoti itin taupiai – kiekvienas sunaudotas litras virto maksimalia medienos mase, efektyviai išnaudojant ankstesnio vegetacijos sezono metu sukauptas energines atsargas.



9 pav. Paprastosios eglės vandens panaudojimo efektyvumas 2016-2025 m.

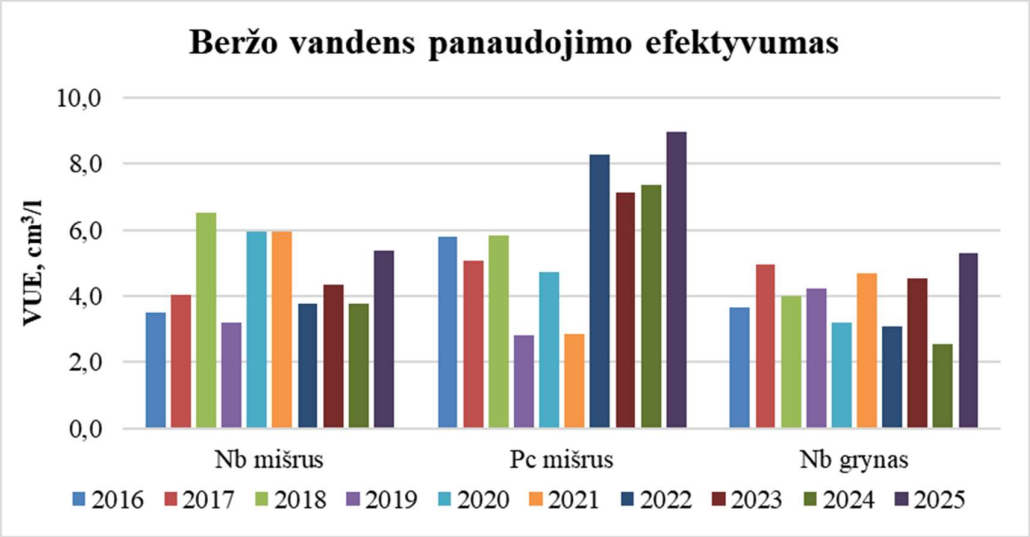
Priešingai nei dinamiškoji eglė, paprastoji pušis demonstruoja stabilų vandens vartojimo modelį (VUE) (10 pav.) Stebėjimai rodo, kad pušies produktyvumo ir vandens sąnaudų santykis išlieka stabilus nepriklausomai nuo ekstremumų – tiek 2018–2019 m. sausrų, tiek 2025 m. šilumos deficito laikotarpiais. Šis nekintantis „ekonominis režimas“ įrodo aukštą pušies hidraulinį atsparumą: ji veikia kaip stabili ekosistemos grandis, užtikrinanti pastovų biomasės kaupimą net ir esant drastiškiems meteorologinių sąlygų svyravimams.



10 pav. Paprastosios pušies vandens panaudojimo efektyvumas 2016-2025 m.

Karpotojo beržo (*Betula pendula*) vandens panaudojimo efektyvumo (VUE) dinamika, užfiksuota 2016–2025 m. laikotarpiu (11 pav.) atskleidžia šią rūšį kaip itin jautrų ir dinamišką ekosistemos dalyvį. Tyrimo duomenys rodo, kad beržas maksimalų produktyvumą pasiekia drėgmės pertekliumi pasižyminčiose laikinai užmirkusiose (Pc) augavietėse, kur gausūs vandens resursai leidžia medžiams funkcionuoti pilnu pajėgumu. Tačiau ekstremalių sausrų

periodais (2019 m. ir 2021 m.) rūšies strategija tampa neefektyvi: medis sunudoja didelius kiekius vandens baziniams fiziologiniams procesams palaikyti, tačiau nesugeba jo transformuoti į tūrio prieaugį, taip tapdamas savotišku „išteklių švaistūnu“. 2025-ieji metai išryškino beržo gebėjimą prisitaikyti prie šilumos deficito – aukštas VUE rodiklis indikuoja priverstinį perėjimą į „ekonominį režimą“, kai ribota transpiracija buvo naudojama itin tikslingai biomasės kaupimui. Visgi ši adaptacija išlieka trapi, nes bet koks ilgalaikis aplinkos stresas greitai suardo pasiektą balansą, patvirtindamas beržą esant vieną jautriausių rūšių.



11 pav. Karpotojo beržo vandens panaudojimo efektyvumas 2016-2025 m.

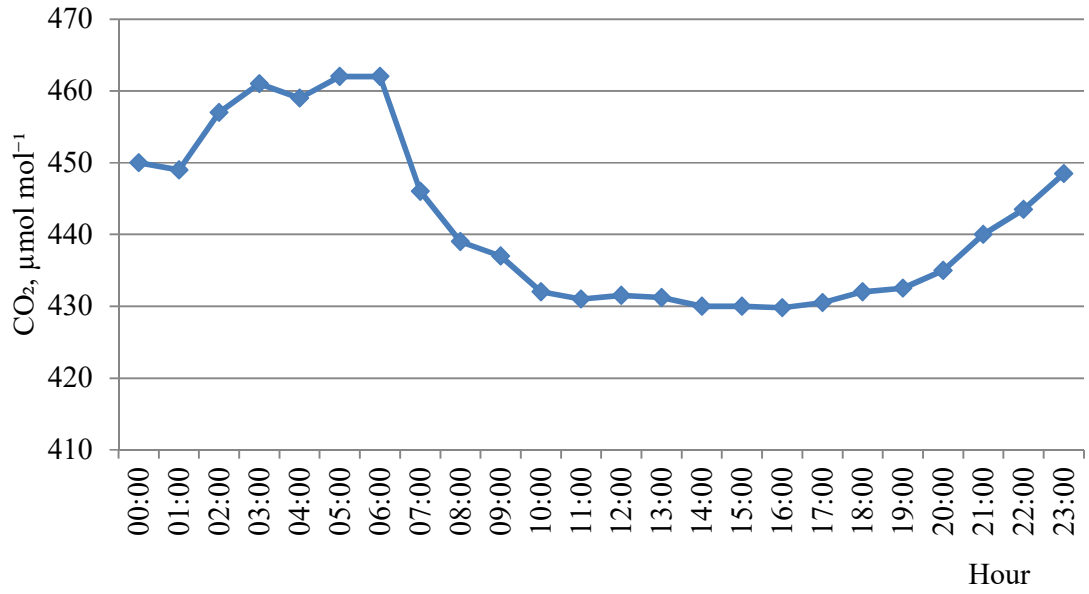
Apibendrinant 2016–2025 m. tyrimų duomenis, miško medžių rūšinis atsparumas ir produktyvumas kintančiomis meteorologinėmis sąlygomis tiesiogiai priklauso nuo jų pasirenkamos vandens valdymo strategijos: paprastoji pušis (Pinus sylvestris) pasižymi didžiausiu hidrauliniu stabilumu ir konservatyviu vandens naudojimu, užtikrinančiu pastovų prieaugį net sausrų metu, tuo tarpu paprastoji eglė (Picea abies) demonstruoja aukštą fiziologinį lankstumą, gebėdama optimizuoti vidinius resursus ir pasiekti didelį efektyvumą net esant drėgmės deficitui, o karpotasis beržas (Betula pendula) išlieka dinamiškiausia ir jautriausia rūšimi, kurios produktyvumas dėl didelio jautrumo drėgmės ir šilumos trūkumui nepalankiais metais drastiškai mažėja. Šio tyrimo prasmė yra kritiškai svarbi prognozuojant miškų ekosistemų gyvybingumą klimato kaitos kontekste, nes jis leidžia identifikuoti, kaip skirtingos medžių rūšys adaptuojasi prie dažnėjančių ekstremalių meteorologinių anomalijų, bei suteikia mokslinį pagrindą tvariam miško želdinimui ir rūšinės sudėties planavimui, siekiant išlaikyti miškų produktyvumą ateityje.

Medžių ekofiziologinių reakcijų tyrimo aikštelė Žemaitijos KMS

2025 m. buvo įrengta nauja paprastosios pušies, paprastosios eglės ir karpuotojo beržo ekofiziologinių reakcijų tyrimo aikštelė.

Šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijų iš dirvožemio tyrimas, bendram anglies ciklui nustatyti Aukštaitijos KMS

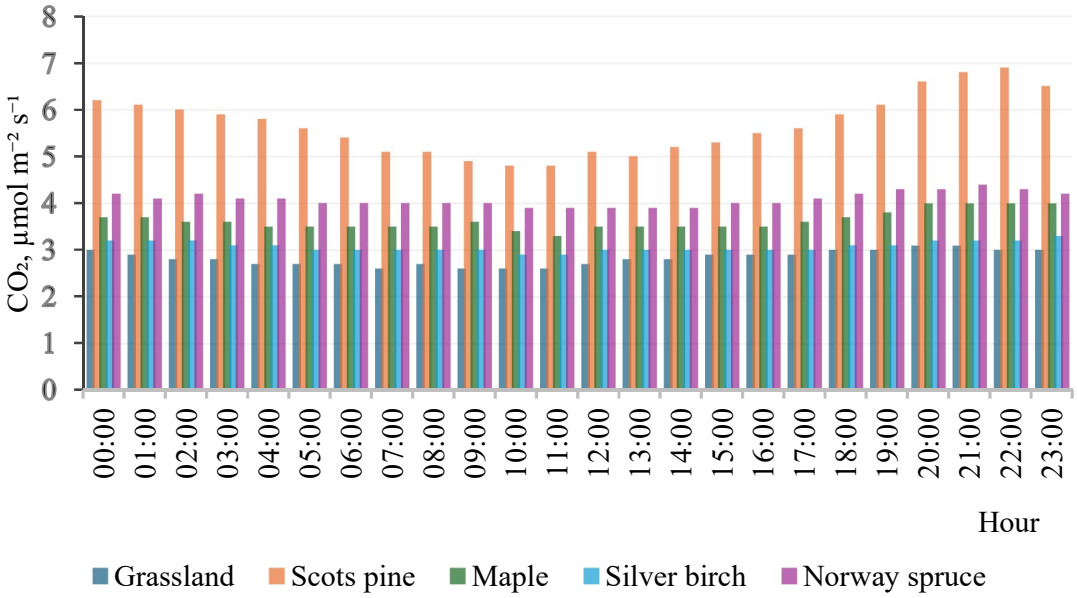
Aukštaitijos integruoto stebėjimo stotyje atlikti automatiniai šiltnamio efektą sukeliančių dujų (ŠESD) matavimai, įskaitant atmosferos ir dirvožemio CO_2 matavimus bei nuolatinį aplinkos parametrų monitoringą, siekiant ištirti miško ekosistemos anglies dinamiką, įvertinti ŠESD srautų svyravimus laike ir įvertinti aplinkos veiksnių įtaką šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijai. Tam buvo atlikti nuolatiniai atmosferos CO_2 koncentracijos matavimai naudojant Li-850 CO_2/H2O analizatorių, detektorių įrengus 3 metrų aukštyje virš miško paklotės (1 pav.). Be to, buvo atlikti dirvožemio šiltnamio efektą sukeliančių dujų srauto matavimai naudojant penkias automatines kameras su LI-8200 CO_2/CH_4/H2O analizatoriumi (2 pav.). Nuo 2025 m. gegužės mėn. vykdomi nuolatiniai ŠESD emisijų matavimai.



1 pav. Vidutinė valandinė CO_2 koncentracija ore 2025 m. birželio mėn

Pirmieji nuolatinio atmosferos CO_2 stebėjimo matavimo rezultatai atskleidė aiškų CO_2 koncentracijos atmosferoje dieninį modelį. Didžiausios CO_2 koncentracijos buvo užfiksuotos nakties ir ankstyvo ryto valandomis (apie 00:00–06:00), kai fotosintezės aktyvumas yra minimalus dėl saulės šviesos nebuvimo, o kvėpavimo procesai augaluose ir dirvožemyje tęsiasi. Per šį laikotarpį iš augmenijos ir dirvožemio išmetamas CO_2 kaupiasi šalia miško paklotės, todėl atmosferos koncentracija padidėja. Po saulėtekio CO_2 koncentracija palaipsniui mažėjo, nes fotosintezė suintensyvėjo ir augalija pradėjo aktyviai absorbuoti anglies dioksidą iš

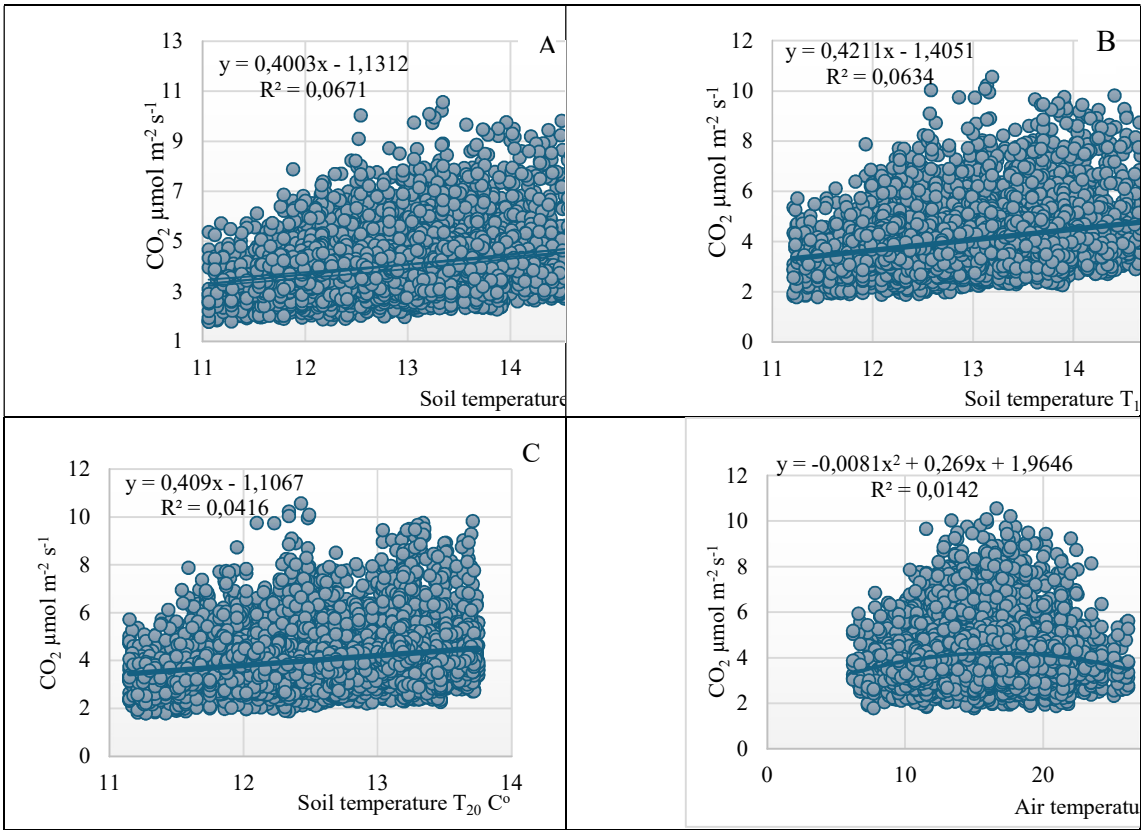
atmosferos. Mažiausios koncentracijos buvo stebimos dienos ir popietės valandomis (apie 10.00–17.00 val.), kurios sutampa su didžiausio fotosintezės aktyvumo periodu. Vakare CO_2 koncentracija vėl pradėjo didėti, nes sumažėjo saulės spinduliuotė ir susilpnėjo fotosintezė, o augalų ir dirvožemio kvėpavimas tęsėsi. Ši atmosferos CO_2 koncentracijos dinamika buvo glaudžiai susijusi su dirvožemio kvėpavimo matavimais, kurie taip pat parodė aiškius CO_2 srautų paros svyravimus prie skirtingų medžių rūšių ir atvirame plote (2 pav.).



2 pav. Vidutinės valandinės dirvožemio CO_2 koncentracijų srautas per s skirtingose medžių mikro buveinėse ir atviroje vietoje.

Šie matavimai atskleidė reikšmingus dirvožemio CO_2 srautų skirtumus tarp skirtingų medžių rūšių ir atviros teritorijos (pievos). Didžiausi dirvožemio CO_2 srautai užfiksuoti prie paprastosios pušies, kur srauto vertės siekė apie 6–7 µmol m^{-2} s^{-1} vakaro ir nakties valandomis. Priešingai, mažiausi dirvožemio CO_2 srautai buvo stebimi atvirame plote (pievose), kur vertės išliko artimos 2,5–3,1 µmol m^{-2} s^{-1} visą dieną. Tarpiniai srautai matuoti po klevų, sidabrinių beržų ir paprastosios eglės medynais.

Taip pat buvo nustatytas aiškus dirvožemio CO_2 srautų paros modelis. Mažiausi srautai paprastai buvo stebimi ryto ir vidurdienio valandomis (apie 08:00–14:00), o po pietų srautai palaipsniui didėjo ir didžiausią lygį pasiekė vakaro ir nakties laikotarpiais (apie 18:00–23:00). Šis modelis daugiausia susijęs su šaknų kvėpavimo pokyčiais, taip pat su dirvožemio ir oro temperatūros pokyčiais (3 pav.).



3 pav. Dirvožemio temperatūros, išmatuotos skirtinguose gyliuose (A – 0,5 cm, B – 10 cm, C – 20 cm) ir oro temperatūros (D) įtaka dirvožemio CO_2 srautams.

3 pav. pateikti rezultatai atskleidė teigiamus ryšius tarp dirvožemio CO_2 srautų ir temperatūros visais atvejais. Apskritai CO_2 srautai didėjo didėjant dirvožemio temperatūrai, o tai rodo, kad aukštesnė temperatūra skatina biologinį aktyvumą dirvožemyje, įskaitant autotrofinį kvėpavimą (šaknų kvėpavimą) ir heterotrofinį kvėpavimą (mikrobinis skaidymas), todėl padidėja CO_2 emisija iš dirvožemio paviršiaus.

D skydelis rodo ryšį tarp dirvožemio CO_2 srautų ir oro temperatūros. Dirvožemio CO_2 srautai paprastai didėjo kylant oro temperatūrai iki maždaug 15–18 °C, o po to ryšys tapo ne toks ryškus. Tai rodo, kad oro temperatūra turi įtakos dirvožemio kvėpavimo procesams; tačiau CO_2 emisijas dirvožemyje taip pat kontroliuoja papildomi aplinkos ir biologiniai veiksniai.

Apskritai, pirmieji nuolatinio atmosferos ir dirvožemio šiltnamio efektą sukeliančių dujų stebėjimo rezultatai parodė aiškius CO_2 koncentracijos ir dirvožemio CO_2 srautų pokyčius miško ekosistemoje. Buvo nustatyti reikšmingi dirvožemio CO_2 emisijų skirtumai tarp skirtingų medžių rūšių ir atviros teritorijos, o tai rodo, kad miško medynų sudėtis ir vietovės sąlygos stipriai veikia ekosistemos anglies dinamiką. Šios išvados suteikia svarbių pradinių duomenų,

leidžiančių suprasti skirtingų miško buveinių poveikį šiltnamio efektą sukeliančių dujų išmetimui, ir gali būti vertingas etalonas būsimiems ilgalaikiams stebėjimo tyrimams.

Nuolat veikianti automatinė stebėjimo stotis teikia labai vertingus didelės raiškos duomenis, kurie gali būti naudojami kuriant ir patvirtinant naujus modelius, skirtus prognozuoti būsimą šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisiją besikeičiančiomis klimato sąlygomis. Nuolatiniai atmosferos ir dirvožemio procesų matavimai pagerina mūsų supratimą apie ekosistemų reakciją į aplinkos kintamumą ir klimato kaitą.

2026 metais tyrimai bus tęsiami integruojant automatinį medžių dendrometrinių parametrų stebėjimą kartu su nuolatiniais automatiniais sulos srauto matavimais, leidžiančiais visapusiškiau įvertinti medžių fiziologinį aktyvumą, anglies mainų procesus, jų sąveiką su šiltnamio efektą sukeliančių dujų srauto dinamika.

Gauti pirminiai rezultatai sudaro mokslinį pagrindą VAMP 2024-2029 m. programos, VII skirsnio II priemonę ateityje vykdyti: atlikti šiltnamio efektą sukeliančių dujų (CO_2, CH_4 ir N_2O) cirkuliacinių srautų virš augalinės dalies monitoringą, siekiant įvertinti sąlygiškai natūralių ekosistemų prisitaikymą prie naujai besiformuojančių aplinkos sąlygų ir galimybes švelninti dėl globalios klimato kaitos kylančias naujas grėsmes.

Įrengta tyrimų stotis prie Aukštaitijos KMS

Rūgštinančių komponenčių ir papildomai paviršinio ozono tiesioginis matavimas Aukštaitijos KMS stotyje. Nuo 2025 m vidurio matuojami parametrai: O_3, SO_2, NO, NO_2, NOx

Aukštaitijos KM stotyje įrengtas naujas tiesioginio matavimo modulis

Rekomendacijos žaliojo kurso efektyvumui vertinti

Šiltnamio efektą sukeliančių dujų (ŠESD) tyrimų bokštas – tai mokslinių tyrimų ir oro monitoringo (stebėsenos) bokštas, aprūpintas specialia įranga ŠESD koncentracijoms ir srautams matuoti bei jų pokyčiams miško ekosistemose vertinti.

Idėjos iniciatorius ir įrangos pirkėjas – Forest – 4.0 projektas.

Tikslas: politinių sprendimų palaikymas ŠESD apskaitai Lietuvos pasirinkto Žaliojo kurso efektyvumui vertinti.

Mokslinis pagrindimas

Miško ekosistemos yra vienos svarbiausių gamtinių ekosistemų balansuojančių šiltnamio efektą sukeliančių dujų (ŠESD) absorbcijas, vykdant fotosintezę, ir emisijas, medžiams kvėpuojant ir organinėms medžiagoms yrant. Ši svarba klimato kaitos kontekste tik didėja, kadangi priklausomai nuo šių procesų santykio, miško ekosistemos gali tiek spartinti klimato kaitą, netinkamai jose ūkininkaujant, tiek ir slopinti ją, ugdant tvarius ir atsparius nepalankiems aplinkos veiksniams padidinto produktyvumo, grynus ar pagal galimybę mišrius medynus. Nuo šių procesų intensyvumo priklauso anglies koncentracijos ore ir anglies kiekio sausumos ekosistemoje santykis, užtikrinantis miškų tvarų vystymąsi. Todėl miško ekosistemų, kaip svarbiausio anglies balanso formavimo komponento tyrimai Lietuvoje turėtų įgauti kokybiškai naują pobūdį ir apimti CO_2 koncentracijų miškuose tyrimus, įgalinančius vertinti ir prognozuoti miškų būklę, skirtingo ūkinio rėžimo miškuose, kintant balansui tarp anglies asimiliacijos miško ekosistemose ir jos emisijos, kintančio klimato bei naujai priimamų politinių sprendimų, valdant ŠESD emisijas, sąlygomis.

Miško ekosistemų, taršos ir meteorologiniai duomenys, papildyti CO_2 koncentracijos ore tyrimų rezultatais, sudarytų galimybę išskirti anglies balanso efektyvumą miško ekosistemoms bendrame aplinkos veiksnių kompleksiškame poveikyje. Siekiant išaiškinant miško ekosistemų pagrindinius anglies balansą sąlygojančius veiksnius bei galimas grėsmes ateityje, būtina pradėti vykdyti šiltnamio efektą sukeliančių dujų (ŠESD) – CO_2, metano (CH_4), azoto suboksido (N_2O) kartu su vandens garų (H_2O) ir karščio srautų virš miško lajų dangos atmosferos sluoksnyje tyrimus. Gauti rezultatai papildytų išmetamų į atmosferą šiltnamio efektą sukeliančių dujų kiekio monitoringą. Pradėjus tokius srautų tyrimus, atsirastų galimybė patikimiau vertinti miškų prisitaikymą prie besikeičiančios aplinkos sąlygų ir jų gebą švelninti klimato kaitos pasekmes. Tokie papildomi stebėjimai leistų prisijungti prie šiltnamio efektą sukeliančių dujų balanso stebėsenos tinklo ICOS (*Integrated Carbon Observation Systems*), įgalinančio geriau suprasti anglies balanso ir ŠESD susidarymą bei sklaidą Europiniu mastu.

Dėl vegetacijos laikotarpio kaitos vis aktualesni tampa ir pažemio ozono poveikio augalams tyrimai. Ozono (O_3) pirmtakų (lakiųjų organinių junginių, CO_2, NO_x, N_2O) kiekio, kaip ir oro temperatūros augimas ateityje turėtų sąlygoti ozono koncentracijos augimą globaliu mastu. O_3 – vienas iš pagrindinių fitotoksikantų, turinčių reikšmingą įtaką fotosintezei vykti, augalams kvėpuoti, medžiagoms pasiskirstyti ir fitomasei susidaryti, slopina šių procesų intensyvumą. Ozonas turi didelę įtaką ir dirvožemio faunai, ypač jos rūšių įvairovei, nuo kurios sudėties ir gausos priklauso organinių medžiagų irimo greitis, t. y. CO_2 kiekio grįžimas į atmosferą. Todėl, veikdamas visas pagrindines anglies balansą formuojančias funkcijas, O_3 lieka pagrindiniu miško ekosistemų ir klimato kaitos tyrimų veiksniu, o jo sinerginis poveikis su kitais teršalais Lietuvos miškams dar nėra visapusiškai ištirtas. Todėl būtina O_3 koncentracijų tyrimus paros bėgyje papildomai praplėsti 10, 20, 30 ir 40 m aukščiuose, taip įvertinant miško poveikį šio fitotoksikanto stabilumui šiaurės rytinio Lietuvos regiono būdingoje miško ekosistemoje. Tokiems matavimams ir vertinimams atlikti yra reikalingas specialus ŠESD tyrimams skirtas mokslinių tyrimų ir oro monitoringo bokštas, kokio šiuo metu Lietuvoje nėra.

Tokiu būdu daugiamečiai Aukštaitijos kompleksinio monitoringo stoties (KMS) aplinkos ir miškų tyrimų duomenys papildyti ŠESD koncentracijos įvairiame aukštyje duomenimis, gautais naujame ŠESD tyrimų bokšte, suteiktų naujų duomenų apie miškų gebą kaupti atmosferos anglį, taip švelninant klimato kaitos intensyvumą, o ŠESD srautų duomenys gauti (bent 50 m aukštyje) sudarytų sąlygas fiksuoti galimą nacionalinių antropogeninių taršos šaltinių poveikį aplinkai ir atskleisti su klimato kaita susijusias naujas grėsmes. Galutiniame rezultate, tai įgalintų sukurti mokslinį pagrindą ne tik vertinti priimtų politinių sprendimų dėl ŠESD emisijų mažinimo efektyvumą, bet ir kurti miškų tvarios plėtros kriterijus, užtikrinančius miško ekosistemų stabilų vystymą Lietuvoje.

ŠESD tyrimų bokštas yra numatytas kaip vienas iš svarbių infrastruktūros objektų įgyvendinant projektą *Forest 4.0* pagal Europos Sąjungos bendrąją mokslinių tyrimų ir inovacijų programą „Europos horizontas“. Naujame bokšte gautus ŠESD tyrimų rezultatus numatoma plačiai panaudoti kuriant bei vystant skaitmeninėmis technologijomis paremtus naujus miškų politikos, miškų valdymo ir praktinio miškininkavimo sprendimus. Tokių moksliškai pagrįstų sprendimų paieška – paties projekto *Forest 4.0* ir šio projekto metu kuriamo kompetencijos centro vieni iš svarbiausių veiklos uždavinių.

Politinis ir teisinis pagrindimas

Miško ekosistemos, jų stebėsena ir valdymas yra tiesiogiai susiję su ES klimato valdymo politika ir atitinkamu ES lygmens teisiniu reguliavimu, taip pat ir nacionalinio lygmens klimato kaitos švelninimo ir prisitaikymo veiksmų koordinavimu ir teisiniu reguliavimu. ŠESD tyrimo įvairiuose priežemio atmosferos sluoksniuose bokšto įrengimas būtinas įgyvendinant Lietuvos Respublikos Vyriausybės 2024 m. birželio 26 d. nutarimu Nr. 527 patvirtintą Valstybinę aplinkos monitoringo 2024–2029 metų programą (VAMP 2024-2029), kuri savo ruožtu glaudžiai siejasi su šių ES teisės aktų nuostatų įsipareigojimais:

- 2018 m. gegužės 30 d. Europos Parlamento ir Tarybos reglamentas Nr. (ES) 2018/841 dėl šiltnamio efektą sukeliančių dujų išmetamų ir absorbuojamų dėl žemės naudojimo, žemės naudojimo keitimo ir miškininkystės, kiekio įtraukimo į 2030 m. klimato ir energetikos politikos strategiją teikimo;
- 2016 m. gruodžio 14 d. Europos Parlamento ir Tarybos direktyva (ES) 2016/2284 dėl tam tikrų valstybėse narėse į atmosferą išmetamų teršalų kiekio mažinimo;
- 2013 m. gegužės 21 d. Europos Parlamento ir Tarybos reglamentas Nr. 525/2013 (ES) dėl šiltnamio efektą sukeliančių dujų išmetimo stebėsenos bei ataskaitų ir kitos su klimato kaita susijusios nacionalinio bei Sąjungos lygmens informacijos teikimo;
- 2006 m. lapkričio 7 d. Komisijos reglamentas (EB) Nr. 1737/2006 dėl miškų ir aplinkos sąveikos monitoringo Bendrijoje įgyvendinimo.
- 2001 m. spalio 23 d. Europos Parlamento ir Tarybos direktyva 2001/81/EB dėl tam tikrų į atmosferą išmetamų teršalų nacionalinių limitų (NEL direktyva) įgyvendinimo.

Nacionalinėje klimato kaitos valdymo darbotvarkėje, patvirtintoje Lietuvos Respublikos Seimo 2021 m. birželio 30 d. nutarimu Nr. XIV-490, nustatyta iki 2030 m. sumažinti 30 proc. išmetamų ŠESD kiekį, palyginti su 2005 m., o iki 2050 m. turi būti užtikrintas išmetamų ŠESD poveikio klimatui neutralumas. Siekiant vertinti esamą situaciją ir įgyvendinti Jungtinių Tautų bendrosios klimato kaitos konvencijos ir Paryžiaus susitarimo ir jų įgyvendinamųjų ES teisės aktų reikalavimus, VAMP 2024–2029 keliamas uždavinys nacionaliniu mastu stebėti ir vertinti antropogeninės kilmės išmetamų ir absorbuojamų ŠESD kiekį ir jo pokyčius visuose Lietuvos ūkio sektoriuose. Programos įgyvendinimo metu būtina tikslinti nacionalinę ŠESD kiekio apskaitą, kurioje būtų daugiau remiamasi nacionaliniais taršos rodikliais, ir naudoti aukštesnio lygmens tikslesnius apskaitos metodus. Tai labai svarbu dėl Lietuvai Europos Parlamento ir Tarybos reglamentu (ES) 2023/857 nustatytų įpareigojimų 2021–2030 m. laikotarpiu sumažinti

išmetamų ŠESD metinį kiekį ir Reglamentu (ES) 2018/1999 įtvirtinto griežtesnio 21 proc. ŠESD sumažinimo 2030 m. tikslo, palyginti su 2005 m. ir Europos Komisijos įgyvendinamaisiais reglamentais patvirtintų ambicingų metinių ŠESD kvotų 2021–2030 m.

Išvysčius mokslinius tyrimus naujame ŠESD tyrimų bokšte surenkamų duomenų pagrindu atsirastų unikali galimybė pagrįstai vertinti ES Žaliojo kurso numatytų priemonių efektyvumą, įskaitant ir įprastų energetinių šaltinių pakeitimo atsinaujinančiais efektyvumą bei jo poveikį ne tik ekosistemų tvarumui, bet ir klimato kaitos švelninimo intensyvumui.

Gauti naujausi duomenys tyrimų bokšte tiesiogiai prisidėtų prie VAMP 2024-2029 7 priedo sąlygiškai natūralių miško ekosistemų srityje uždavinių sprendimo, įgyvendinant tarptautinių sutarčių aplinkosaugos srityje nuostatas: Konvencijos dėl poveikio aplinkai vertinimo tarpvalstybiniame kontekste, Jungtinių Tautų Tolimųjų tarpvalstybinių oro teršalų pernašų konvencijos ir jos protokolų, Jungtinių Tautų bendrosios klimato kaitos konvencijos Kioto protokolo Dohos pakeitimo, Paryžiaus susitarimo, priimto pagal Klimato kaitos konvenciją, Pasaulinės meteorologijos organizacijos konvencijos, Vienos konvencijos dėl ozono sluoksnio apsaugos, Europos kraštovaizdžio konvencijos bei Konvencijos dėl teisės gauti informaciją, visuomenės dalyvavimo priimant sprendimus ir teisės kreiptis į teismus aplinkosaugos klausimais.

Sprendimams priimti 2024–2029 metais keliamas atskiras uždavinys rinkti ir vertinti informaciją apie klimato sąlygas, siekiant mažinti klimato kaitos padarinius, susijusius su atmosferos reiškinių intensyvėjimu, ekstremalėjimu ir dažnėjimu. Dėl šios priežasties Aukštaitijos kompleksinio monitoringo stotį numatyta įtraukti į Lietuvos meteorologinių stočių tinklą, kaip pirmą stotį įrengtą mišku apaugusioje teritorijoje, o meteorologinių veiksnių kaitos aukščio gradientas ir srautai nuo priežemio iki 50 m aukščio ŠESD tyrimų bokšte, įgalintų vertinti miško ir meteorologinių veiksnių sąsajas.

Įgyvendinant Vienos konvencijos dėl ozono sluoksnio apsaugos, Monrealio protokolo dėl ozono sluoksnį ardančių medžiagų, Europos Parlamento ir Tarybos 2024 m. vasario 7 d. reglamento dėl ozono sluoksnį ardančių medžiagų reikalavimus, numatyta tęsti bendrojo ozono kiekio, ultravioletinės A ir B saulės spinduliuotės (UVA ir UVB) stebėseną. Šiems reikalavimams įgyvendinti, ozono kiekio kaita įvairiame aukštyje mišku apaugusioje teritorijoje įgalintų spręsti šio fitotoksikanto, kaip klimato kaitą skatinančio elemento, susidarymo ypatumus bei poveikį fotosintezės intensyvumui. Esant papildomam poreikiui įvairiuose priežemio sluoksniuose galėtų būti pradėti ir UVA bei UVB tyrimai bei jų tarpusavio sąsajos su medžių fiziologinių procesų intensyvumu.

Miško ekosistemų srityje (VAMP 2024-2029 7 priedas) tyrimų tikslas - rinkti, vertinti ir prognozuoti, pagal Oro taršos poveikio ekosistemoms integruoto monitoringo tarptautinio bendradarbiavimo ICP KM programą, sąlygiškai natūralių miško ekosistemų būklę ir jos ilgalaikius pokyčius, vertinant oro teršalų (ypač S ir N junginių) pernašų iš Vakarų ir Vidurio Europos valstybių srautų, O_3, ŠESD ir sunkiųjų metalų kaitą bei kompleksišką poveikį biologiniams ir geocheminiams procesams, vykstantiems ekosistemose, atsižvelgiant į regioninius ypatumus ir klimato pokyčius. Tikslo įgyvendinimas įgalina gauti tarpvalstybiniu mastu svarbius ir palyginamus duomenis, kurie leidžia ne tik kompleksiškai vertinti oro teršalų (įskaitant tarptautinių tolimųjų oro teršalų pernašų ir priežemio ozono) poveikį sąlygiškai natūralioms miško ekosistemoms, teikti informaciją apie gamtinės aplinkos pokyčių priežastis, sekti teršalų apkrovas miško ekosistemoms ir tikslinti kritines jų reikšmes, bet ir sudaro mokslinį pagrindą vertinti sprendimų dėl nacionalinės šiltnamio efektą sukeliančių dujų kiekio apskaitos tikslumą ir išmetamų teršalų kiekio mažinimo efektyvumą.

Papildomai, šio priedo 1.2 priemonė įpareigoja atlikti šiltnamio efektą sukeliančių dujų (CO_2, CH_4 ir N_2O) cirkuliacinių srautų virš augalinės dalies monitoringą, išskirtinį dėmesį skiriant anglies balansui, siekiant įvertinti sąlygiškai natūralių ekosistemų prisitaikymą prie naujai besiformuojančių aplinkos sąlygų ir galimybes švelninti dėl globalios klimato kaitos

kylančias naujas grėsmes. Tai vienas svarbiausių pastarojo laikotarpio mokslinių tyrimų iššūkių miškotyros mokslo srityje, kurio įgyvendinimas glaudžiai siejasi su naujojo ŠESD tyrimų bokšto įrengimu.

Tokiu būdu tyrimai vykdomi pagal sąlygiškai natūralių miško ekosistemų kompleksiško monitoringo programą (VAMP 2024-2029), turi būti papildyti steigiamame tyrimų bokšte gautais ŠESD srautų 50 m aukštyje ir jų koncentracijų sklaidos įvairiuose priežemio atmosferos aukščiuose rezultatais, kad deramai atlieptų svarbiausius politinius ir mokslinius įsipareigojimus ekosistemų tvaraus vystymosi ir klimato kaitos švelninimo srityje tiek europiniu, tiek ir nacionaliniu lygmenimis.

ŠESD tyrimų bokšto paskirtis ir nauda

Nustatyti ŠESD (CO_2, CH_4 , N_2O), H_2O ir karščio **cirkuliaciniai srautai** 50 m aukštyje, leis vertinti Europos Sąjungos Žaliojo kurso priemonių ir iniciatyvų taikymo pramonėje ir žemės ūkyje efektyvumą, teritorijoje nutolusioje nuo bokšto iki 150 km atstumu pavėjine, vyraujančia vėjo kryptimi.

Vandens **cirkuliaciniai srautai** virš miško dangos ir vandens garų **koncentracijos** įvairiame aukštyje bus naudojami bendrai evapotranspiracijai, kurią lemia augalų transpiracija ir vandens garavimas iš dirvožemio (evaporacija), nustatyti, ir vandens panaudojimo efektyvumui miško ekosistemose bei bendram jo ciklui vertinti, siejant gautus rezultatus su fotosintezės intensyvumu ir CO_2 asimiliacija. Tai suteiktų naujausios informacijos VAMP programos vandens resursų valdymo srityje atitinkamiems politiniams sprendimams priimti.

ŠESD **koncentracijos** kartu su priežemio ozono ir vandens garų **koncentracijomis** priežemio profilyje: 2, 10, 20, 30, 40 m aukštyje, bus panaudoti miškų prisitaikymui prie naujai besiformuojančių aplinkos sąlygų, pirmiausiai klimato kaitos, nustatyti bei jų svarbai slopinti pačią klimato kaitą per CO_2 sugerties procesų spartinimą, vertinti. Tai vienas iš svarbiausių uždavinių miškotyros srityje vertinant miško ekosistemų stabilumą klimato kaitos kontekste.

ŠESD **koncentracijų** kaitos skirtingai ūkininkaujamuose miškuose palyginimas su rezultatais gautais ŠESD tyrimų bokšte saugomoje teritorijoje su ribota ar visai uždrausta ūkine veikla, leis reikšmingai prisidėti prie išmaniosios miškininkystės mokslinių pagrindų kūrimo, į tvaraus miškininkavimo pagrindus įtraukiant ir eksperimentiniais metodais nustatytą anglies balansą.

Realiu laiku stebimi sudėtingi geo-bio-sisteminiai procesai susiję su klimato pokyčiais ekosistemose, įgalins geriau suprasti klimato kaitą sukeliančias priežastis, kiekybiškai įvertinti ŠESD emisijas ir anglies asimiliaciją, jų dinamiką, kalibruoti modelius, naudojamus išmaniosios miškininkystės grandyse, taip pat vertinti ES Žaliojo kurso efektyvumą.

NEL direktyvos 9 straipsnio ES svarbių natūralių buveinių tyrimų srityje, tyrimų bokšte gauti ŠESD duomenys, kaip kontroliniai, būtų naudojami mobilių stotelių pagalba gautiems ŠESD duomenims ES svarbiose natūraliose buveinėse rezultatams vertinti.

ŠESD tyrimų bokšto statybos vieta

Šiaurės rytinio Lietuvos regiono, Aukštaitijos nacionalinio parko teritorijos, ūkinėmis priemonėmis intensyviau nepaveiktame miško masyve esantis mišrus bręstantis pušynas su eglių ir beržų priemaiša. Siūloma bokšto padėtis šiame rajone būtų optimali ir įgalintų vertinti Lietuvos pastangas mažinti ŠESD emisijas, o gautus rezultatus lyginti su mūsų kaimyninių valstybių pastangomis mažinti klimato kaitą sukeliančių dujų koncentracijas ore, atsižvelgiant į vėjo kryptį: Lietuvos indėlis - vėjo krypčiai esant iš vakarų ir pietvakarių (vyraujantį vėjo kryptis), Baltarusijos indelis - kai oro masės juda iš rytų ir pietryčių, Latvijos indėlis – vėjo krypčiai esant iš šiaurės ir šiaurės rytų.

NEL direktyvos reikalavimas vykdyti neigiamo oro taršos poveikio ekosistemoms stebėseną yra pagrįstas stebėjimo vietų tinklu, kuris apima valstybei būdingų tipų gėlo vandens, pievų ir miškų natūralias ar pusiau natūralias ekosistemas. Veiklą siūloma koordinuoti su kitų ES stebėsenos programų tinklais, (kaip pvz.: ICP IM), taip padidinant bendrą ekosistemas

reprezentuojančių stebėjimų vietų skaičių bei tarptautinius reikalavimus atitinkančių stebėsenos duomenų apimtis.

ICOS (*Integrated Carbon Observation Systems*) tinklui, kuris reglamentuoja ŠESD srautų tyrimus Europoje, taip pat keliami analogiški reikalavimai. Todėl steigiant ŠESD tyrimų bokštą jo vieta buvo derinama ne tik su Aukštaitijos KMS vietą (ICP IM), bet ir atsižlegiama ir į pagrindinius ICOS tinklo reikalavimams, prie kurio ateityje numatoma jungtis. Pagal šio tinklo reikalavimus ŠESD srautų matavimai turi būti vykdomi bokšte įsteigtame miško masyve, kuriame nevykdoma ūkinė veikla, ar vykdoma tik tokia veikla, kuri iš esmės nepakeičia žemės dangos intensyvumo ir paskirties. Dėl šios priežasties tyrimams pasirinkta nacionalinio parko teritorija, kurios miškuose bet kokie plynieji kirtimai yra draudžiami, o vykdomi medynų priežiūros darbai neturi reikšmingos įtakos oro masių ir energijos turbulenciniams srautams, užtikrinantiems gaunamų rezultatų kokybę.

ICOS programos reikalavimams atitinkantis bokštas turi būti steigiamas tam regionui būdingoje miško ekosistemoje. Dėl šios priežasties pasirinkta vieta yra brėstantis mišrus spygliuočių – lapuočių medynas, atspindintis Lietuvos miškų rūšinę sudėtį: natūraliai drėkinamos, vidutinio derlingumo miško augavietės mišrus spygliuočių-lapuočių medynas su vyraujančia šiam regionui ir Lietuvos miškams medžių rūšimi – paprastąja pušimi. Gauti rezultatai, kaip kontroliniai, bus naudojami ŠESD emisijai ar jų absorbcijai įvairiose kitose ekosistemose ar ES svarbiose buveinėse bei ūkinėmis priemonėmis paveiktuose miško sklypuose vertinti.

ŠESD srautų duomenims analizuoti, koreguoti bei prognozuoti ateityje ir atkurti praeityje, būtina sąlyga – artimoje kaimynystėje vykdyti ilgalaikius abiotinių aplinkos veiksnių (meteorologinių veiksnių, tolimųjų oro pernašų bei ozono) tyrimus. Šį reikalavimą atliepia Aukšaitijos KM stotis, kuri Aukštaitijos NP įsteigta dar 1993 m. ir yra nutolusi apie 2 km atstumu nuo pasirinktos bokšto statybos vietos.

Šalia ICOS programos reikalavimo vykdyti CO_2, CH_4, N_2O, H_2O ir karščio srautų tyrimus, būtini ilgalaikiai miško ekosistemų tyrimai, įgalinantys nustatyti ŠESD kaitos poveikio ekosistemoms reikšmingumą bei prisitaikymo prie intensyviai besikeičiančių aplinkos sąlygų laipsnį. Pasirinkta vieta atitinka šiuos reikalavimus, kadangi Aukštaitijos nacionalinio parko Minčiagirės girininkijoje miško ekosistemų tyrimai pradėti dar 1986 m. Jonavos AB „Azotas“ poveikiui miško ekosistemoms vertinti. Ūkinių priemonių efektyvumui vertinti tyrimai vykdomi ir šio parko Ažvinčių sengirės rezervate, esančiame apie 4 km atstumu nuo stoties ir 6 km atstumu nuo bokštui parinktos vietos. Šiame rezervate papildomai 1993 m. pradėti tyrimai pagal tarptautinę kompleksiško monitoringo programą (ICP IM), skirti VAMP 2024-2029 7 priedo uždaviniams spręsti.

Bokšte sumontuotai įrangai yra būtinas nuolatinis nepertraukiamas elektros tiekimas požemine žemos įtampos (400V) elektros kabelio linija, ją įrengiant nuo artimiausios tinkamos prijungimui esamos elektros linijos. Vieta taip pat turi būti tinkama sunkiajai technikai (sunkiasvoriui kranui ir auto vilkikui) kartu privažiuoti.

Reikalavimams įgyvendinti buvo pasirinktas Aukštaitijos NP Minčiagirės girininkijos 170 ar 171 kv, IV miškų grupės miško tipingos medžių rūšinės sudėties sklypas, esantis apie 2 km atstumu nuo Aukštaitijos KM stoties, įsteigtos Rūgšteliškio kaime. Bokštas, kuriam eksploatuoti reikalingas 1 aro plotas, numatomas įrengti sklypo mikro aikštelėje, taip sumažinant kertamų medžių skaičių.

VAMP 2024-2029 ir jos 7 priedas:

STATYBŲ VIETA