



PĀRSKATS

par Meža attīstības fonda atbalstīto pētījumu

PĒTĪJUMA NOSAUKUMS:

**Veco mežu loma klimata pārmaiņu
mazināšanā: informācija Latvijas un Eiropas
Savienības meža un saistīto nozaru politiku
veidotājiem**

LĪGUMA NR.:

Nr. 25-00-S0INZ03-000019

PĒTĪJUMA NORISES LAIKS: 16.04.2025.–05.12.2025.

Latvijas Valsts mežzinātnes institūts "Silava"

PĒTĪJUMA VADĪTĀJS:

Endijs Bāders, LVMI "Silava" vadošais pētnieks

Salaspils, 2025

Kopsavilkums

Pētījuma mērķis ir sagatavot un nodot informāciju Latvijas lēmumu pieņēmējiem un ieinteresētajām pusēm par senajiem mežiem un vecām mežaudzēm, kā arī gudrās mežsaimniecības dzīvo laboratoriju ES Bioloģiskas daudzveidības stratēģijas un klimata politiku prasību kontekstā.

Pētījuma mērķa sasniegšanai plānota šādu darba uzdevumu izpilde:

- organizēt piekto starptautisko seno mežu konferenci "*Old-growth forests: policy and practice*" (16.–17.10.2025.);
- raksturot oglekļa uzkrājumu senā mežā Latvijā;
- raksturot dominējošo koku atmiršanas un audzes vertikālās struktūras pārmaiņu dinamiku vecajās audzēs (viena suga);
- ievākt SEG emisijas (CO₂, CH₄) datus bērzu audzēs veģetācijas sezonā (otrā sezona, analīze, apkopojums);
- paplašināt izpratni par SEG emisiju analīzi klimata politiku prasību kontekstā, izmantojot gudrās mežsaimniecības dzīvajā laboratorijā, iegūtos datus, aprobējot SEG emisiju datu ieguves metodiku meža masīva līmenī platībās ar ierobežotu ūdens noteci meliorācijas sistēmā;
- organizēt konferenci "*EuroDendro 2025*" (15.–19.09.2025.).

Pieņemot lēmumus par zemes lietošanai nosakāmiem mērķiem un ierobežojumiem, būtiski balstīties uz kvalitatīvu zinātnisko informāciju. To uzsver gan klimata pārmaiņu mazināšanas politikas, definējot, ka aprēķini balstāmi tikai uz verificētu (publicētu) informāciju, gan bioloģiskās daudzveidības saglabāšanas politika t.i. Eiropas Savienības (ES) Bioloģiskās daudzveidības stratēģija 2030 un ar tās ieviešanu saistītie normatīvi. Eiropas Komisija 2023. gada pavasarī publicēja Vadlīnijas, kas apraksta principus, kā identificēt, definēt, monitorēt un aizsargāt senus mežus. Latvijai tāpat kā katrai no ES dalībvalstīm ir pienākums līdz 2025. gada beigām nodrošināt to, ka vadoties pēc Vadlīnijās noteiktajiem obligātajiem un papildus kritērijiem un indikatoriem, tiek nodrošināta visu valstī identificētie vecie mežu kartēšana. Līdztekus zinātniskajai izpētei senajos mežos un vecajās mežaudzēs Latvijā, aktuāli ir nodrošināt informācijas izplatīšanu rīcībpolitikas veidotājiem un ieinteresētajām pusēm, veicinot pārdomātu un Latvijas interesēm atbilstošu politiku veidošanu kā nacionālā, tā Eiropas mērogā. Papildus pieaugot zemes platībām, kurās galvenais mērķis nav saimnieciskā darbība, pētījumā iegūtās atziņas un apzinātās tendences, piemēri Eiropā var dot ieguldījumu turpmākajā darbā pie nacionālās rīcībpolitiku izstrādes, piemēram, priekšlikumus zinātniski pamatotu indikatoru izvēlei senu mežu izdalīšanai, atbilstoši Latvijas hemiborealo mežu ekosistēmu raksturojumam.

Projekta secinājumi Latvijas un ES meža politikas veidotājiem balstīti uz empīriskiem datiem, attālo izpēti, kā arī realizēto ilgtermiņa starptautisko zinātnisko sadarbību, turpinot un paplašinot Meža attīstības fonda (MAF) projektu un Lauksaimniecībā izmantojamo zinātnes pētījumus: 21-00-SOMF10-000019, 22-00-SOMF10-000045, 23-00-SOINZ03-000004 un 24-00-SOINZ03-000032. Turpmākajos gados būtu nepieciešams nodrošināt veco mežaudžu monitoringu – veicot audžu pārmērīšanu ik pēc pieciem gadiem. Tādējādi tiktu veidotas ilglaicīgas datu rindas precīzākai audžu attīstības dinamikas novērtēšanai, kā arī nodrošinātas references vērtības (par atmirušās koksnes dinamiku, audžu strukturālajām izmaiņām, sugu un augšanas apstākļu ietekmi) uz kurām tiek ties arī daudzfunkciju mežaudzēs, kas nodrošina dažādas ekosistēmu pakalpojumus. Īpašs uzsvars liekams uz atmirušās koksnes raksturošanu ļoti ilgstoši saimnieciskās darbības neietekmētos mežaudzēs, lai iegūtu references vērtības, ko būtu iespējams pielietot arī izstrādājot dabai tuvākā meža apsaimniekošanā. Tāpat nepieciešams novērtēt klimata pārmaiņu un dabisko traucējumu ietekmi uz veco mežaudžu attīstību meža ainavas līmenī.

Saturs

1. Informācijas sniegšana Latvijas lēmumu pieņēmējiem un sabiedrībai.....	4
1.1. Piektā starptautiskā konferences “Old-growth forests: policy and practice” (16.–17.10.2025.).....	4
1.2. Dalība ar datu un atziņu sniegšanu starptautiskos pasākumos.....	5
1.3. Starptautiskā konference "EuroDendro 2025" (15.–19.09.2025.).....	6
2. Datu ievākšana un analīze	6
2.1. Oglekļa uzkrājuma raksturojums senā mežā	6
2.2. Dominējošo koku atmiršanas un audzes vertikālās struktūras pārmaiņu dinamiku vecās bērzu mežaudzēs	7
2.2.1. <i>Pētījuma raksturojums un metodika</i>	7
2.2.2. <i>Dominējošo bērzu atmiršanas un audzes vertikālās struktūras pārmaiņu dinamika</i>	9
2.2.3. <i>Secinājumi</i>	12
2.3. Meliorācijas ietekme uz SEG emisijām (CO ₂ , CH ₄) vecās bērzu mežaudzēs	12
2.3.1. <i>Pētījuma raksturojums un metodika</i>	12
2.3.2. <i>Augsnes kopējās (RtCO₂) un heterotrofās (RhCO₂) CO₂ emisijas vecās bērzu mežaudzēs ar un bez hidrotehniskās meliorācijas (Nd, Ks meža tipos)</i>	13
2.3.3. <i>Augsnes CH₄ emisijas vecās bērzu mežaudzēs ar un bez hidrotehniskās meliorācijas (Nd, Ks meža tipos)</i>	16
2.3.4 <i>Secinājumi</i>	17
3. SEG emisijas datu ieguvē meža masīva līmenī platībās ar ierobežotu ūdens noteci meliorācijas sistēmā	17
3.1. SEG emisiju (N ₂ O) teorētiskais apraksts par to nozīmi meža ekosistēmā.....	18
3.2. SEG emisiju (CO ₂ , CH ₄) datu ieguve meža masīva līmenī platībās ar ierobežotu ūdens noteci meliorācijas sistēmās.....	20
Secinājumi un rekomendācijas	24
Literatūras saraksts	25

1. Informācijas sniegšana Latvijas lēmumu pieņēmējiem un sabiedrībai

1.1. Piektā starptautiskā konference “Old-growth forests: policy and practice” (16.–17.10.2025.)

Lai sasniegtu pētījuma mērķi – sagatavot un nodot informāciju lēmumu pieņēmējiem un ieinteresētajām pusēm – projekta ietvaros jau piekto gadu kā centrālais projekta pasākums tiek organizēta **starptautiska konference “Old-growth forests: policy and practice”** (Seni meži: politikas un prakse). Konference norisinās no 16. līdz 17. oktobrim un konferencē piedalījās 63 dalībnieki no 16 valstīm, tostarp pārstāvji no ASV, Somijas, Zviedrijas, Vācijas un citām valstīm. Šī starptautiskā konference ir veltīta seno mežu izpētei un ilgtspējīgai apsaimniekošanai, kā arī tā kalpo kā platforma, lai informētu ne tikai Latvijas lēmumu pieņēmējus par šo tēmu un aktualitātēm tajā, bet arī iepazīstinātu citu valstu pētniekus (piem. SLU, WUR, NIBIO, EMU, University of Freiburg, LBTU, LU, DU), ieinteresētas puses (piem. Dabas aizsardzības pārvalde, Valsts vides dienests, AS Latvijas Valsts meži, SIA Rīgas meži, LATbio, OECD, MPKC) un lēmumpieņēmējus (ZM, VARAM, IZM, KEM), par Latvijā veiktajiem pētījumiem un iegūtajiem rezultātiem.

Šī gada konferences galvenā tēma bija bioloģiskā daudzveidība senajos mežos. Deviņos mutiskajos ziņojumos tika prezentēti jaunākie pētījumu rezultāti par koku mikrodzīvotņiem, briofītiem (sūnaugiem), kā arī attālās izpētes metodēm, kas ļauj noteikt meža teritorijas ar potenciāli īpaši augstu vērtību dabas aizsardzības kontekstā (*high conservation value*). Dienas centrālais notikums bija Vermontas Universitātes profesora William S. Keeton (ASV) referāts, kurā viņš aplūkoja seno mežu ekoloģiju, to aizsardzības un atjaunošanas iespējas Eiropā. Profesora pieredze saistībā ar mežu strukturālo daudzveidību un dabisko atjaunošanos senajos mežos ir būtiski arī Latvijas un Baltijas reģiona kontekstā. W.S. Keeton ziņojumā “A global perspective on temperate old-growth forest ecology, conservation, and restoration” tika uzsvērti šādu vecu mežaudžu un senu mežu daudzveidība, tajos notiekošu procesu būtiskums – koku atmiršana vecuma, dabisko traucējumu ietekmē, kā arī notiekošo klimata pārmaiņu ietekme uz šādām ekosistēmām un to attīstību. Šobrīd ne tikai Eiropas, bet arī pasaules līmenī strauji attīstās šādu senu mežu un vecu mežaudžu atjaunošana un pielāgošana (*restoration and adaptation*), lai nodrošinātu šo ekosistēmu funkcionalitāti ilgtermiņā. Tāpat tika uzsvērt nepieciešamība vērtēt ne tikai audžu struktūras, bet arī to funkcijas, lielāku uzsvāru liekot tieši uz šādu mežaudžu funkcionalitāti. Konferences ietvaros bija iepazīties arī ar stenda referātu ziņojumiem par pētījumiem, kas saistīti ar konferences galveno tēmu.

Otrajā konferences dienā dalībnieki devās lauka ekskursijā, apmeklējot senas bērzu un priežu mežaudzes (1.1. att.). Ekskursijas noslēgumā AS “Latvijas valsts meži” Vidusdaugavas mežsaimniecības plānošanas reģiona vadītājs Jānis Belickis iepazīstināja ar sugu dzīvotņu un biotopu kvalitātes uzlabošanas pasākumiem Zvirgzdes kāpā, demonstrējot praktiskos piemērus dažādu vērtību saglabāšanā un atjaunošanā mežā.

LVMI “Silava” pētnieki konferencē aktīvi piedalās ar vairākiem ziņojumiem saistībā ar vecu mežaudžu izpēti:

Ķēniņa L., Bāders E., Elferts D., Jaunslaviete I., Jaunslaviete E. Tree biomass changes over the last century in old-growth forest stands: case from Slītere National Park;

Samariks V., Ķēniņa L., Ozoliņš K., Jansons Ā. Organic soil greenhouse gas emissions in drained and periodically waterlogged old-growth Scots pine forests in hemiboreal Latvia.

Informācija par konferenci – konferences programma, ziņojumi un pašu norisi publicēta LVMI Silava mājas lapā:

<https://www.silava.lv/en/events/old-growth-forests-conference-2025>

<https://silava.lv/en/international-conference-old-growth-forests-policy-and-practice-on-october->

Tāpat sagatavotas arī preses relīzes un informācija LVMI “Silava” sociālajiem kontiem – LinkedIn un Instagram:

<https://www.silava.lv/aktualitates/noslegusies-starptautiska-konference-old-growth-forests-policy-and-practice>

<https://www.silava.lv/en/news/5th-international-conference-old-growth-forests-policy-and-practice>



1.1. attēls. Piektās starptautiskās konferences “Old-growth forests: policy and practice” meža izbraukuma dalībnieki vecā bērzu mežaudzē un Zvirgzdes kāpā (17.10.2025).

1.2. Dalība ar datu un atziņu sniegšanu starptautiskos pasākumos

Projekta ietvaros tika nodrošināta arī dalība ar datu un atziņu sniegšanu Ekonomiskās sadarbības un attīstības organizācijas (OECD) – Latvijas ekspertu seminārā “*Forestry for the future: Uniting stakeholders for climate action and sustainable growth*” (Mežsaimniecība nākotnei: ieinteresēto pušu apvienošana klimata politikai un ilgtspējīgai izaugsmei), kur meža objektu apskatē, semināra dalībnieki tika sniegts ieskats Latvijā veiktajiem pētījumiem par vecām mežaudzēm un SEG emisijām tajās (1.2. att.).



1.2.attēls. LVMI "Silava" zinātniskais asistents Valters Samariks un pētniece Laura Ķēniņa sniedz ziņojumu par galvenajām oglekļa krātuvēs vecās mežaudzēs Latvijā.

Tā kā seminārā piedalījās pārstāvji no OECD dalībvalstīm, OECD Sekretariāta, kā vairākām citām starptautiskām meža nozares organizācijām, šis pasākums kalpoja arī kā platforma, kurā LVMI "Silava" tika uzaicināta iesaistīties Eiropas Meža institūta (EFI) seno mežu pētnieku tīklā **EuFoRla**. Dalība šajā tīklā sniegs iespēju ar Latvijas pieredzi piedalīties starptautiskos senu un aizsargājamu mežu pētījumos kopā ar Eiropā atzītiem pētniekiem, kā arī sekot līdzi jaunākajām atziņām par šo tēmu.

Projektā nodrošināta arī starptautiska sadarbība ar meža nozares pārstāvjiem un pētniecības institūcijām, lai apmainītos ar informāciju un veidotu kontaktus tālāku projektu izstrādei, kas varētu arī nodrošināt zinātniski pamatotas informācijas sagatavošanu un nodošanu Eiropas Komisijai. No 27. līdz 29. augustam Latvijas Valsts mežzinātnes institūtā "Silava" viesojās Somijas Meža zinātnieku apvienības (*Finnish Society of Forest Science*) pārstāvji – pētnieki no vadošajām Somijas zinātniskajām institūcijām un universitātēm. Šī pasākuma ietvaros, Somijas zinātnieki tika iepazīstināti ar veco mežaudžu pētījumiem Latvijā. Tāpat ņemta dalība SNS sadarbības tīkla PROFOR projekta seminārā “*Advancing multifunctional forests: Pathways for Northern Europe — across Management, Carbon Removal Certification, and Land-Use Change*” Briselē, 09.12.2025., kurā līdzdalību nodrošināja E.Bādērs un V.Samariks.

1.3. Starptautiskā konference "EuroDendro 2025" (15.–19.09.2025.)

EuroDendro ir vadošā dendrohronoloģijas konference Eiropā, kas apvieno zinātniekus no visas pasaules, lai diskutētu par pētījumiem, kas saistīti ar koku gadskārtām un vides faktoriem, kuri ietekmē koksnes augšanu. **Šī bija jau 21. EuroDendro konference, un pirmo reizi tā notika Latvijā.** Konferenci rīkoja LVMI "Silava" sadarbībā ar starptautiskajiem partneriem, un tā norisinās no 15. līdz 19. septembrim. Šogad konferencē piedalās 80 dalībnieki no 20 valstīm, tostarp no Kanādas un ASV. Tiek prezentēti 42 mutiskie ziņojumi un 24 stenda ziņojumi.

Konferences programmu veido sešas tematiskās sesijas: Dendroarheoloģija, Dendroklimatoloģija, Dendroekoloģija, Dendroģeomorfoloģija, Izotopu pielietojums koksnes pētījumos, un Koksnes anatomija. LVMI "Silava" pētnieki konferencē aktīvi piedalās ar vairākiem ziņojumiem saistībā ar vecu mežaudžu izpēti:

Jansone D., Matisons R., Elferts D., Jansons Ā. Radial Growth Response to Meteorological Factors in Native Pedunculate Oak and Introduced Northern Red Oak;

Kitenberga M., Matisons R., Jaunslaviete I., Elferts D. The effect of wildfire on radial growth of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in Slitere National Park.

Plašāka informācija par konferenci pieejama EuroDendro 2025 mājaslapā: <https://www.eurodendro2025.lv/>

2. Datu ievākšana un analīze

2.1. Oglekļa uzkrājuma raksturojums senā mežā

Lai novērtētu koku biomasas un atmirušās koksnes dinamiku senā mežā, kur cilvēka saimnieciskā darbība nav notikusi jau vairāk kā 100 gadus, pētījumā, kombinētas lauka un tālīzpētes metodes.. Lai novērtētu koku virszemes

biomasas izmaiņas un nodrošinātu precīzāku virszemes biomasu un atmiruma prognozēšanu, tika izmantoti Sentinel 12 satelīt dati, kā arī Landsat-8 attēli. Papildus tika veikti lauka darbi Slīteres rezervātā. Lauka darbos ierīkoti 65 parauglaukumi pēc Ķēniņa (2023) metodikas vecās mežaudzēs. Iegūtie dati ļauj uzlabot modeļa veiktspēju un novērtēt atmirušās koksnes biomasu – īpaši kritalu, ko izmantojot tālīzpētes metodes ir sarežģīti prognozēt ar augstu ticamību meža masīvu un ainavas līmenī.

Atbilstoši pētījuma uzdevumam sagatavota publikācija starptautiskam rakstu žurnālam par virszemes biomasas un oglekļa uzkrājuma novērtējumu Slīteres Nacionālā parka Slīteres Rezervāta zonā:

Ķēniņa L., Bāders E., Elferts D., Jaunslaviete I., Jaunslaviete E., Šņepsts G., Jansons Ā. Long-term biomass dynamics over a century in hemiboreal unmanaged forests based on historical and recent field inventories and Sentinel-1 and -2 data synergy: a case study in Slītere National Park, Latvia. *Annals of Forest Research*, **iesniegts**.

Šī pētījuma periodā ir publicētas iepriekšējo gadu MAF pētījumu ietvaros ievāktie dati un veiktās analīzes par vecajām mežaudzēm:

Samariks V., Jōgiste K., Vodde F., Bāders D., Jansons Ā. (2025) Deadwood carbon stock in overmature coniferous forests on different soil types in the hemiboreal region. *Baltic Forestry* 31(2): id796. <https://doi.org/10.46490/BF796>

Samariks V., Jaunslaviete I., Adamovičs A., Dubasinska S., Jansons Ā. (2024) Ground vegetation biomass and carbon pool in hemiboreal old-growth coniferous stands on organic soils. *Proceedings of 24th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2024*. <https://doi.org/10.5593/sgem2024v3.2/s13.36>

2.2. Dominējošo koku atmiršanas un audzes vertikālās struktūras pārmaiņu dinamiku vecās bērzu mežaudzēs

Uzdevuma ietvaros raksturota audzes dominējošo koku atmiršana un audzes vertikālās struktūras izmaiņas vecās bērzu mežaudzēs, salīdzinot pirmreizējās uzmērīšanas (2018. gads) un pārmērīšanas (2023. gads) datus (piecu gadu cikls). Uzdevuma izpildei izmantoti dati par 15 vecām bērzu mežaudzēm (kopā 97 parauglaukumi).

2.2.1. Pētījuma raksturojums un metodika

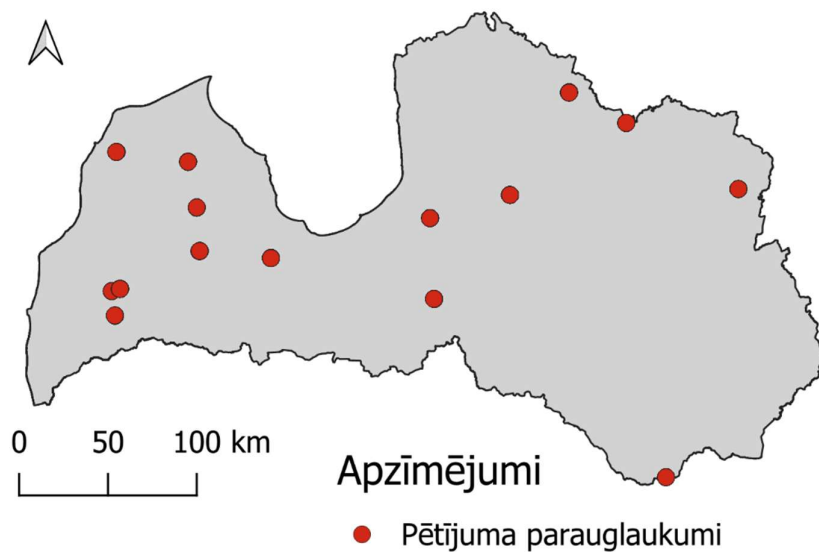
Mežaudžu noturība ir nozīmīgs rādītājs, kas raksturo to spēju pretoties dabiskajiem traucējumiem – vējgāzēm, vējlauzēm u.c. abiotiskajiem faktoriem. Kopumā mežaudzes, ko veido individuāli noturīgi koki (vitāli koki ar vienmērīgu vainagu, proporcionālu un spēcīgu sakņu sistēmu), ir relatīvi noturīga, jo tā ir atkarīga no audzes biezuma, vertikālās struktūras, mistrojuma, kā arī veiktajiem kopšanas pasākumiem un augšanas apstākļiem. Papildus, kokaudzes vertikālā struktūra jeb koku sadalījums pa stāviem ir viens no faktoriem, kas raksturo arī bioloģisko daudzveidību. Tāpat vertikālās struktūras raksturojums ļauj novērtēt savstarpējo konkurenci, audzes noturību, bioģeoķīmiskos procesus un citus saistītos ekoloģiskos procesus audzē (Hao et al. 2007; Janiec et al. 2025). Notiekot būtiskām izmaiņām audzes kokaudzes pirmajā stāvā – nomirst kāds pirmā stāva koks – veidojas atvērumi, kuros būtiski pieaug lakstaugu bagātība, attīstās paaugas koki, tādējādi bagātinot kopējo sugu daudzveidību un mainot gaismas un mitruma pieejamību. Vecās mežaudzēs šādi atvērumi lielākoties notiek pēc dabiskas koku atmiršanas vai kādiem traucējumiem (vētra, ugunsgrēks). Vertikālās struktūras analīze vecās audzēs ir īpaši nozīmīga, lai sekotu līdzi šo mežaudžu attīstības dinamikai, īpaši monitorējot dominējošos audzes kokus (Hao et al. 2007), kas to izmēru un vecuma dēļ ir ne tikai ekoloģiski vērtīgi, bet arī būtiskas oglekļa krātuves (Ķēniņa et al. 2023).

Lai novērtētu vecu bērzu mežaudžu vertikālās struktūras pārmaiņas piecgades ciklā, veikta kokaudžu telpiskā analīze. Analīze veikta QGIS programmatūrā, izmantojot “Join Attributes by Nearest”. Lai to izdarītu visiem kokiem pievienota informācija par tuvākajiem kaimiņkokiem. Datu apstrāde kopumā veikta 615 kokaudzes pirmā stāva bērziem, kuri atrodas 10 m rādiusā no parauglaukuma centra (500 m², R = 12.62 m), un tiem kuri bija dzīvi 2018. gadā (2.1. att.). Atribūtu tabulā, katram analizētajam kokam pievienota informācija par dažādiem kaimiņkoku parametriem: koku suga, koka caurmērs un augstums 2018. un 2023. gadā, koka statuss 2018. gadā (stāvs vai sadalīšanās pakāpe), koka liktenis 2023. gadā, un attālums līdz mērķa kokam, tā izveidojot katram parauglaukumam telpisko un strukturālo raksturojumu (2.2. att.).

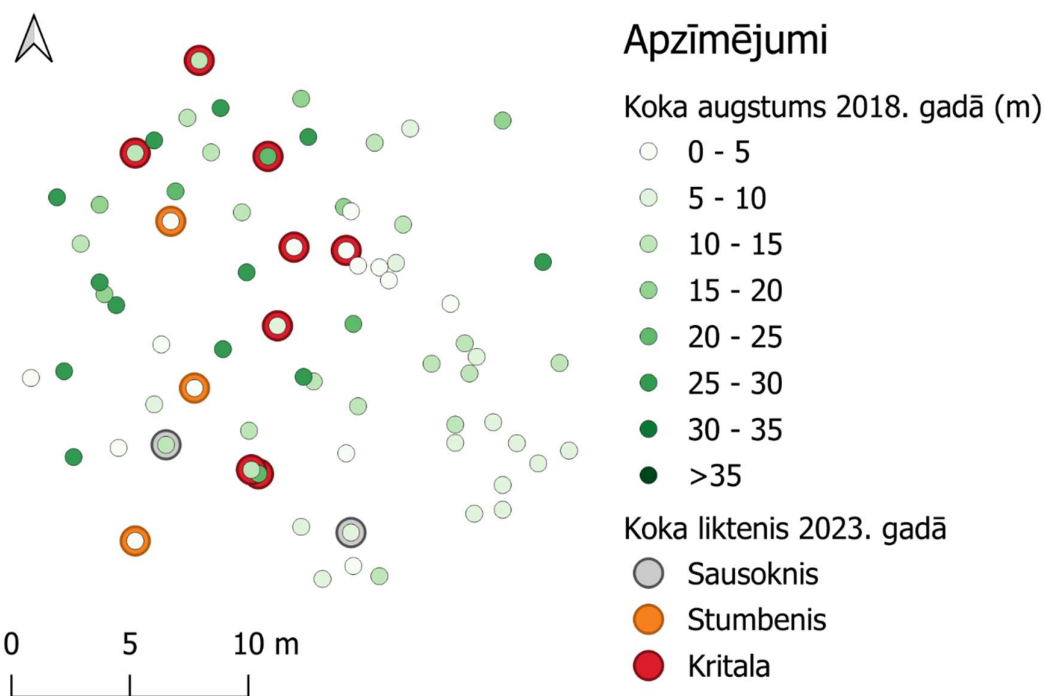
Nākamajā solī veikta analīze pa koku grupām (mērķa koks un 5 tuvākie kaimiņi), aprēķinot 8 parametrus:

- vidējais attālums līdz kaimiņiem;
- dzīvo un mirušo kaimiņu skaits 2018. gadā un 2023. gadā;
- vidējais dzīvo kaimiņu augstums 2018. gadā, m;
- vidējais dzīvo kaimiņu caurmērs, cm;

- mērķkoka statuss 2023. gadā (dzīvs / miris);
- kaimiņos esošo egļu vidējais augstums un diametrs;
- kaimiņos esošo bērzu vidējais augstums un diametrs;
- kaimiņos esošo citu koku sugu vidējais augstums un diametrs.



2.1. attēls. Pētījumā izmantoto veco bērzu mežaudžu parauglaukumu datu atrašanās vietas.



2.2. attēls. Parauglaukumā uzmērīto koku telpiskais piemērs, balsoties uz koku augstumu un likteni.

Lai noskaidrotu vai pirmā stāva bērzu mirstību parauglaukumos ir ietekmējuši tiem apkārt augošie koki, veikta statistiskā analīze, izmantojot vispārināto lineāri jaukto efektu modeli (GLMM) ar binomiālo sadalījumu. Salīdzinātas divas paraugkopas, kur vienā ir koki, kuri 2023. gadā joprojām ir dzīvi un otra, kur koki 2023. gadā ir

gājuši bojā (šiem kokiem noteikts jauns statuss: sausoknis, stumbeņis vai kritāls). Modelī izmantoti vairāki parametri – mērķkoka augstums un caurmērs 2018. gadā un vidējais dzīvo kaimiņu augstums un caurmērs 2018. gadā. Tāpat novērtēts vai pieci tuvākie kaimiņi, sadalīti augstuma klasēs – augsti (virs 32 m), vidēji (no 16.1 līdz 32 m) un zemi koki (līdz 16 m), ietekmē mērķkoka izdzīvošanu un ļauj prognozēt kuri koki ir visvairāk pakļauti atmiršanas riskam.

Tuvāko kaimiņu dimensiju ietekme analizēta gan pēc to augstuma, gan caurmēra, gan pa koku sugām. Kā nejausais parametrs modelī ievietots parauglaukuma ID, kas modelē parauglaukumu līmeņa variāciju (augšne, mikroreljefs, konkurence, audzes vēsture), kā arī nodrošina, ka koku mērījumi vienā parauglaukumā netiek kļūdaini uzskatīti par neatkarīgiem. Modelis tika pielāgots R paketē lme4 (Bates et al. 2015), izmantojot BODYOA (Powell 2009) optimizatoru konverģences nodrošināšanai. Modeļa kvalitāte tika vērtēta, izmantojot Akaike informācijas kritēriju (AIC), atlikumu vērtību analīzi un diagnostiku, Z-statistikas un p-vērtības fiksētajiem efektiem, nejausā efekta dispersiju, lai noteiktu parauglaukumu līmeņa variāciju, izredžu attiecības (odds ratios) un 95% ticamības intervālus, kā arī prognozētās mirstības varbūtības, vizualizējot attiecības ar mērķkoka un kaimiņu parametriem. Parametri, kas ietverti t.s. noslēdzošajos modeļos oglekļa uzkrājuma visprecīzākajai raksturošanai, izvēlēti pēc statistiski nebūtisko (pie 95% ticamības līmeņa) mainīgo parametru un parametru mijiedarbību izslēgšanas no modeļa un salīdzinot modeļus pēc Akaike informācijas kritērija vērtības (AIC).

2.2.2. Dominējošo bērzu atmiršanas un audzes vertikālās struktūras pārmaiņu dinamika

Piecu gadu laikā (2018. - 2023. gadam) no 537 sākotnēji dzīvajiem pirmā stāva bērziem, 43 koki, jeb 8 % bija miruši 2023. gadā. Salīdzinot apkārt augošo koku dimensijas dzīvo un mirušo bērzu grupās ir novērojams, ka tie, koki, kas piecu gadu ciklā atmira, apkārt esošie kaimiņu augstums un caurmērs nav statistiski būtiski lielāki, kā arī to attālums nav statistiski būtiski atšķirīgs (2.1. tabula).

2.1. tabula. Tuvāko kaimiņu raksturojums – koku augstums, koku caurmērs un attālums līdz pieciem tuvākajiem kaimiņiem, izmantojot t-testu.

Parametrs	Dzīvajiem kokiem	Mirušajiem kokiem	p-vērtība
Tuvāko kaimiņu augstums, m	16,44	17,84	0,09
Tuvāko kaimiņu diametrs, cm	18,75	20,11	0,28
Vidējais attālums līdz 5 tuvākajiem kaimiņiem, m	2,61	2,86	0,11

Binomiālā jauktā modeļa rezultāti parādīja, ka parauglaukuma līmeņa ietekme ir būtiska, jo parauglaukuma ietekme uzrādīja ievērojamu variāciju (Var = 1.152; SD = 1.073). Tas nozīmē, ka mirstība būtiski atšķiras starp parauglaukumiem arī pēc koku individuālo īpašību ņemšanas vērā. Bet tā kā koku augstums un caurmērs ir savstarpēji korelējoši, neviens no testētajiem parametriem neuzrādīja statistiski būtisku ietekmi uz mērķkoku atmiršanu. Tāpēc, modelis tika vienkāršots un izveidoti divi atsevišķi modeļi, lai novērtētu koku augstuma un caurmēra ietekmi uz bērzu mirstību vecās mežaudzēs (2.2. tabula).

2.2. tabula. Modeļu informācija par koku augstuma un caurmēra ietekmi uz mērķkoku – bērzu mirstību vecās mežaudzēs.

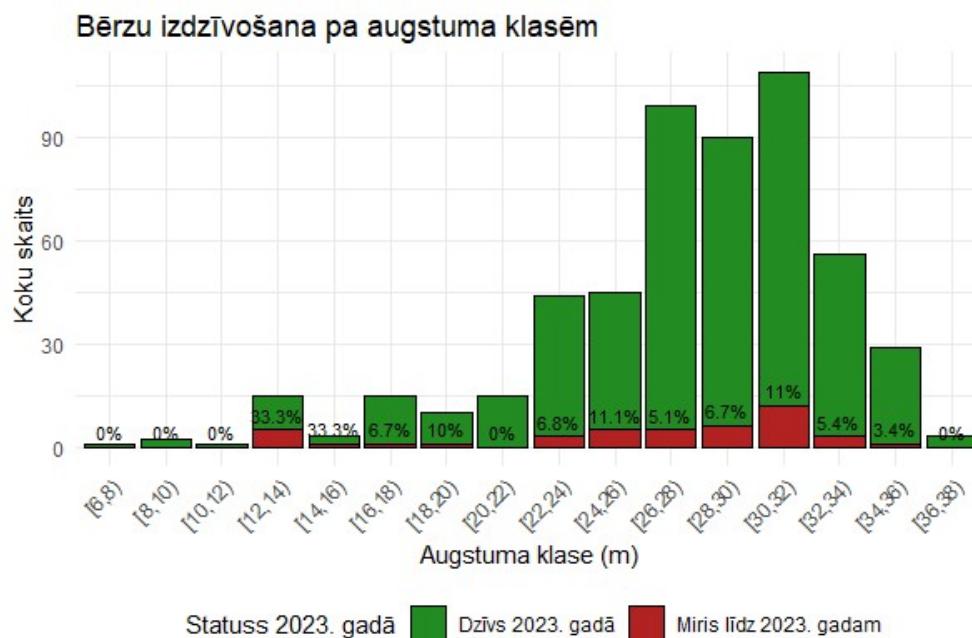
Rādītājs	Vērtības	Standartklūda	Z-vērtība	p-vērtība
<i>Koku augstuma modelis</i>				
Brīvais loceklis (intercept)	-1,499	1,109	-1,352	0,176
Mērķkoka augstums, m	-0,100	0,038	-2,633	0,009
Vidējais attālums līdz 5 tuvākajiem kaimiņiem, m	0,312	0,228	1,369	0,171
Tuvāko kaimiņu augstums, m	0,040	0,043	0,938	0,348
Biežākā kaimiņsuga	-0,016	0,035	-0,462	0,644

<i>Koku caurmēra modelis</i>				
Brīvais loceklis (intercept)	-2,142	0,825	-2,597	0,009
Mērķkoka caurmērs, cm	-0,062	0,020	-3,144	0,002
Vidējais attālums līdz 5 tuvākajiem kaimiņiem, m	0,326	0,232	1,403	0,161
Tuvāko kaimiņu caurmērs, cm	0,026	0,031	0,845	0,398
Biežākā kaimiņsuga	-0,017	0,035	-0,485	0,628

Analizējot atsevišķi divus potenciālos faktoros, kas var ietekmēt koka mirstību, gan koku caurmēru (D_{cm}), gan augstums 2018. gadā (Hapr_18) (2.2. tabula), konstatēta abu šo rādītāju statistiski būtiska ietekme uz bērzu mirstību parauglaukumos līdz 2023. gadam. Mērķkoku caurmēram ir statistiski būtiska ($\beta = -0,054$, $p = 0,002$) ietekme uz šo koku mirstības varbūtību. Modelis parādīja, ka resnākiem kokiem ir mazāka bojāejas varbūtība - katrs caurmēra centimetrs samazina mirstības risku aptuveni par 5% un, apliecinot, ka mazāka diametra kokiem ir tendence biežāk iet bojā, salīdzinot ar lielākiem kokiem.

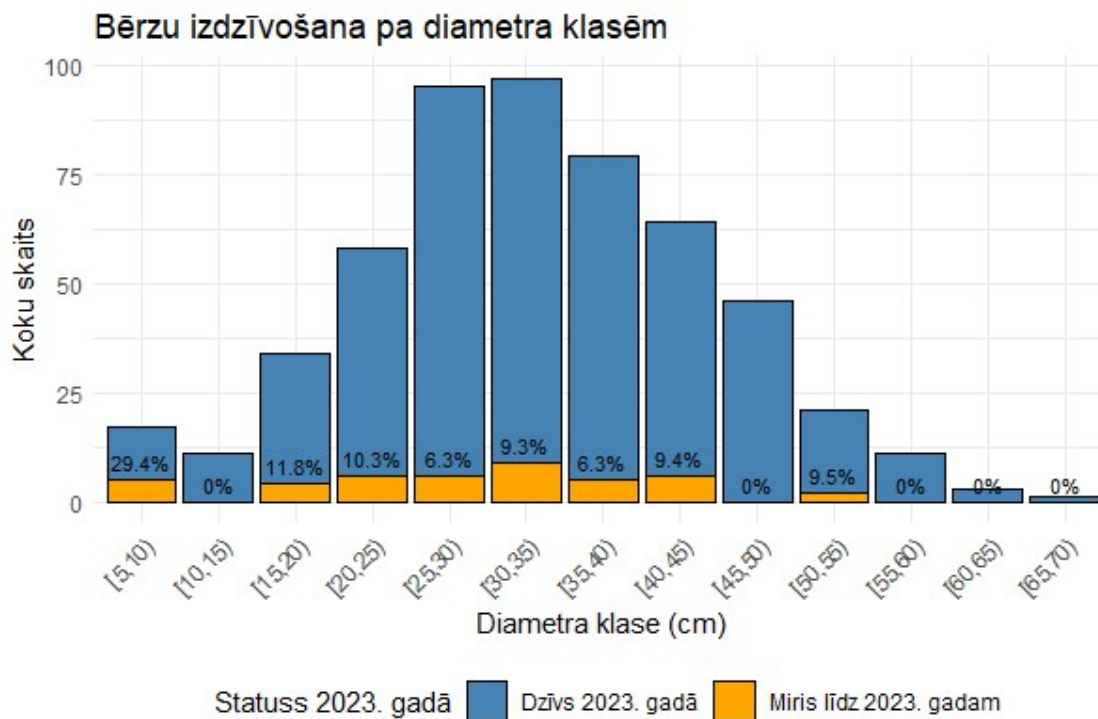
Mērķkoka augstumam bija statistiski būtiska ietekme uz mirstības varbūtību ($\beta = -0,086$, $p = 0,009$) parādot, ka augstāki bērzi biežāk izdzīvojuši analizētajā periodā. Respektīvi - garāki koki 2018. gadā ievērojami retāk gāja bojā nākamo piecu gadu laikā, kas atbilst aptuveni 8% mirstības samazinājumam uz katru papildu metru augstuma. Konstatēts, ka pieaugot mērķkoka augstumam, 2. un 3. stāva koku augstuma ietekme uz tā izdzīvošanu samazinās. 1. stāva koku augstuma ietekme uz mērķkoka izdzīvošanu ir samērā nemainīga. Abos modeļos nejaušais parametrs – parauglaukums (PlotID) bija statistiski nozīmīgs rādītājs ($SD \approx 1.1$), norādot uz būtiskām mirstības atšķirībām starp parauglaukumiem, kuras nevar izskaidrot tikai ar kādu atsevišķu koka parametru. Vidējais attālums līdz 5 tuvākajiem dzīvajiem kaimiņkokiem 2018. gadā statistiski būtiski neietekmēja bērzu bojāejas varbūtību 2023. gadā ($p > 0.05$), lai gan koeficienta pozitīvās vērtības norāda uz vāju tendenci, ka izolētāki kokiem varētu būt lielāka mirstības varbūtība. Kopumā rezultāti liecina, ka gan koka caurmērs, gan koka augstums pozitīvi ietekmē pirmā stāva birzu izdzīvošanu, tomēr mērķkoka individuālais augstums bija galvenais pirmā stāva bērzu izdzīvošanu ietekmējošais faktors šajā periodā (2018. - 2023. gads). Analīze parāda, ka augstu koku izdzīvošanas priekšrocība samazinās, ja tie aug blakus līdzīga augstuma kokiem, kas var norādīt uz savstarpējo konkurenci par barības vielām vai ūdeni, kā arī audzes struktūras ietekmi (Laarmann et al. 2009; Lyu et al. 2025).

Uzmērītajos parauglaukumos novērojama tendence, ka īsākie koki (līdz 16 m augstumam) ir pakļauti lielākam mirstības riskam (līdz 33% mirstība) (2.3. att.). Salīdzinoši liela relatīvi jaunāku koku mirstība (augstuma klasē no 12 līdz 14 m), kas pakāpeniski samazinās pieaugot koku augstumam, norāda uz augstu savstarpējo konkurenci starp kokiem novērojama arī Igaunijā analizētajās bērzu mežaudzēs (Laarmann et al. 2009). Vidēja augstuma bērzu (no 16,1 līdz 32 m) ir mazāka, bet joprojām ir salīdzinošai augsta (līdz 11% mirstība), savukārt dominējošie koki parauglaukumos uzrāda mazāku mirstību.



2.3. attēls. Bērzu izdzīvošana pa koku augstuma klasēm ((zemi koki (līdz 16 m), vidēji (no 16.1 līdz 32 m) un augsti (virs 32 m)) periodā no 2018. līdz 2023. gadam.

Līdzīga tendence novērojama arī skatoties pēc bērzu caurmēra klasēm (2.4. att.). Tievākie koki uzrāda augstāku mirstību (līdz 30%), vidēja diametra koki (līdz 45 cm) uzrāda mirstību, kas sasniedz 10%, savukārt resnākie, jeb dominējošie koki mirst retāk.



2.4. attēls. Bērzu izdzīvošana pa koku caurmēra klasēm ((zemi koki (līdz 16 m), vidēji (no 16.1 līdz 32 m) un augsti (virs 32 m)) periodā no 2018. līdz 2023. gadam.

Rezultāti liecina, ka mazākiem kokiem, caurmērā no 5 līdz 15 cm, mirstība sasniedz 10–29%. Kokiem, kuru caurmērs ir no 20 līdz 35 cm, koku mirstība ir zema (1,8–3,3%), kas sakrīt ar vislielāko koku koncentrāciju šajā diametru intervālā. Vidējās un lielākajās diametru klasēs (40–60 cm) mirstība kopumā saglabājas zema (0–9,5%), bet >60 cm klasēs mirstība netiek konstatēta.

2.2.3. Secinājumi

Kokaudžu telpiskā analīze ir būtisks datu apstrādes rīks vecu mežaudžu vertikālās struktūras pārmaiņu novērtēšanai. Šāda analīze ļauj ne tikai sekot mežaudžu noturībai pret dabiskajiem traucējumiem, bet arī izmantot iegūtās atziņas šādu mežaudžu apsaimniekošanas praksi izstrādei un plānošanai.

Dati parāda, ka gan koku augstums, gan koku caurmērs ir būtiski rādītāji, kas ietekmē pirmā stāva bērzu izdzīvošanu, tāpēc var secināt, ka pirmajā stāvā dominējošiem kokiem ir mazāka mirstības varbūtība, ko visdrīzāk ietekmē zemāka savstarpējā konkurence, salīdzinot ar zemākiem un mazākiem kokiem. Ievērojamā parauglaukumu ietekme norāda uz papildus, analīzē neiekļautu faktoru ietekmi uz koku mirstību, piemēram, vētru vai citu dabisko traucējumu, kā arī augšanas apstākļu ietekmi.

2.3. Meliorācijas ietekme uz SEG emisijām (CO₂, CH₄) vecās bērzu mežaudzēs

Lai atbalstītu ES klimatneitralitātes mērķi, kas 2021. gadā pieņemts ar ES tiesību aktu (Regula (ES) 2021/1119), apņemoties līdz 2030. gadam panākt siltumnīcefekta gāzu emisiju neto samazinājumu vismaz par 55 % salīdzinājumā ar 1990. gadu, Padome un ES Parlaments pieņēma pārskatītu ZIZIMM zemes izmantošanas, zemes izmantošanas maiņas un mežsaimniecības) regulas tekstu (Regula (ES) 2023/8392). Tā paredz nodrošināt lielāku ZIZIMM sektora ieguldījumu, lai tuvotos klimatneitralitātei. Latvijai kā UNFCCC pusei un ES dalībvalstij ir pienākums ziņot gan CO₂ emisijas, gan ne-CO₂ emisijas jeb CH₄ un N₂O. Lai gan ne-CO₂ emisijas sastāda mazāku emisiju apjomu, to radītais siltumnīcefekts ir būtiski lielāks par CO₂, proti, CH₄ un N₂O attiecīgi 28 un 265 CO₂ ekvivalenti (IPCC 2014). Latvijā meža zemes kategorijā ir vairākas galvenās SEG emisiju un piesaistes kategorijas—CO₂ kategorijā “meža zeme, kas paliek meža zeme”, kā arī 3 galvenās emisiju kategorijas (CO₂, metāna (CH₄) un N₂O) sadaļā 4(II), no kurām viena ir “meliorācijā un ūdens līmeņa atgriešana, kā arī cita augsnes apsaimniekošana”.

Šī pētījuma ietvaros novērtēta iztrūkstošo veco mežaudžu datu kopa par augsnes kopējām un heterotrofām emisijām vecās bērzu mežaudzēs un to atšķirības mežaudzēs ar un bez hidrotehniskās meliorācijas. Iegūtie dati par divām sezonām tika izanalizēti un apkopoti, lai iegūtās atziņas nodotu Latvijas lēmumu pieņēmējiem.

2.3.1. Pētījuma raksturojums un metodika

Pētāmais objekts ir vecas bērza (*Betula spp.*) audzes niedrājā (Nd) un šaurlapju kūdrēnī (Ks) ar organiskām augsnēm (2.3. tabula). Divas audzes niedrājā (Nd - mežaudzes ar slapjām kūdras augsnēm), divas audzes šaurlapju kūdrēnī (Ks - mežaudzes nosusinātās kūdras augsnēs), kur katrā no mežaudzēm ierīkoti trīs parauglaukumi. Siltumnīcefekta gāzu (SEG) emisiju mērījumi veikti vienu reizi mēnesī no aprīļa līdz oktobrim no 2023.gada līdz 2024.gadam. Ziemas mēnešos SEG emisijas netika mērītas. Detāls pētījuma metodikas apraksts pieejams Samariks et al. 2024. T-tests tika izmantots, lai novērtētu mainīgo (RtCO₂, RhCO₂, gruntsūdens līmenis) vidējo vērtību atšķirības. Mann–Whitney U tests tika izmantots, lai noteiktu būtiskas atšķirības starp neparametriskajiem mainīgajiem (RtCH₄).

2.3. tabula. Pētāmo objektu taksācijas rādītāju raksturojums

Audze	Meža tips	Vecums	D, cm	H, m	G, m ² ha ⁻¹	N, gab ha ⁻¹	M, m ³ ha ⁻¹
Strenči	Nd	135	25,9	22,4	23,5	447	239,8
Ventspils	Nd	122	20,8	16,5	16,2	477	125,4
Vidēji	Nd	128	23,4 ± 1,8	19,4 ± 1,9	19,9 ± 3,6	462 ± 67	182,6 ± 43,9
Ēvele	Ks	125	33,6	29,3	26,3	297	349,3
Ventspils	Ks	122	28,6	22,0	28,4	443	284,4
Vidēji	Ks	124	31,0 ± 1,8	25,6 ± 2,3	27,3 ± 2,8	370 ± 53	316,9 ± 36,6

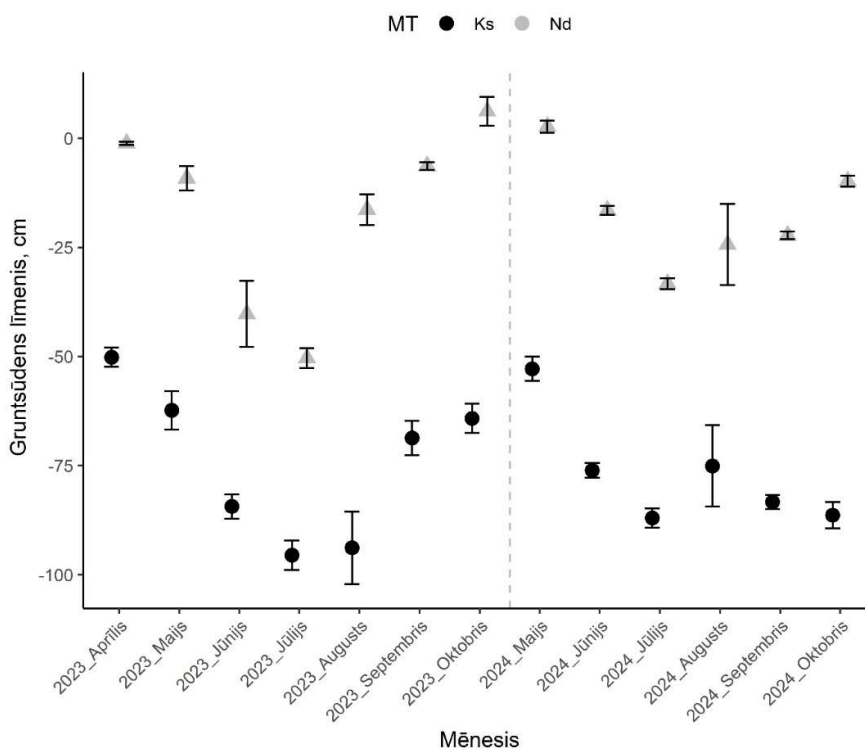
Piezīmes: D – vidējais diametrs krūšaugstumā, cm; G – vidējais audzes šķērslaukums, m²ha⁻¹; N – koku skaits uz hektāru, M – koksnes krāja, m³ha⁻¹; ± 95% ticamības intervāls.

Vērtētajos meža tipos novērojams, ka oglekļa uzkrājums ir būtiski lielāks meliorētās audzēs Ks meža tipā salīdzinājumā ar Nd meža tipu. Par meliorācijas sistēmu darbību norāda arī vidējais gruntsūdens līmenis dažādos meža tipos (2.4. tabula).

2.4. tabula. Pētāmo meža tipu oglekļa (C) uzkrājums ($C \text{ t ha}^{-1}$) galvenajās oglekļa krātuvēs un vides parametri raksturojums niedrājā (Nd) un šaurlapju kūdrenī (Ks)

Meža tips	C virszeme	C pazeme	C koku biomasā kopā	C atmirusī koksne	Vidējais gruntsūdens līmenis, cm	Vidējā augsnes temperatūra, C
Niedrājs (Nd)	$76,1 \pm 2,4$	$21,3 \pm 8,9$	$97,4 \pm 11,3$	$4,4 \pm 1,8$	$-16,4 \pm 6,9$	$13,9 \pm 1,1$
Šaurlapju kūdrenis (Ks)	$110,7 \pm 2,4$	$31,5 \pm 10,5$	$142,2 \pm 12,7$	$7,0 \pm 1,9$	$-73,2 \pm 7,2$	$13,7 \pm 1,2$

Gruntsūdens līmenis neatšķirās starp mērījuma gadiem meža tipa ietvaros ($p > 0,05$; 2.5.att.). Vidējais gruntsūdens līmenis Ks meža tipā ir $73,2 \pm 7,2$ cm, bet niedrājā $-16,4 \pm 6,9$ cm, turklāt atšķirības ir statistiski būtiskas. Statistiski būtiskas atšķirības ($p < 0,05$) starp meža tipu mēneša vidējām gruntsūdens līmeņa vērtībām novērojamas visos gados un mēnešos.



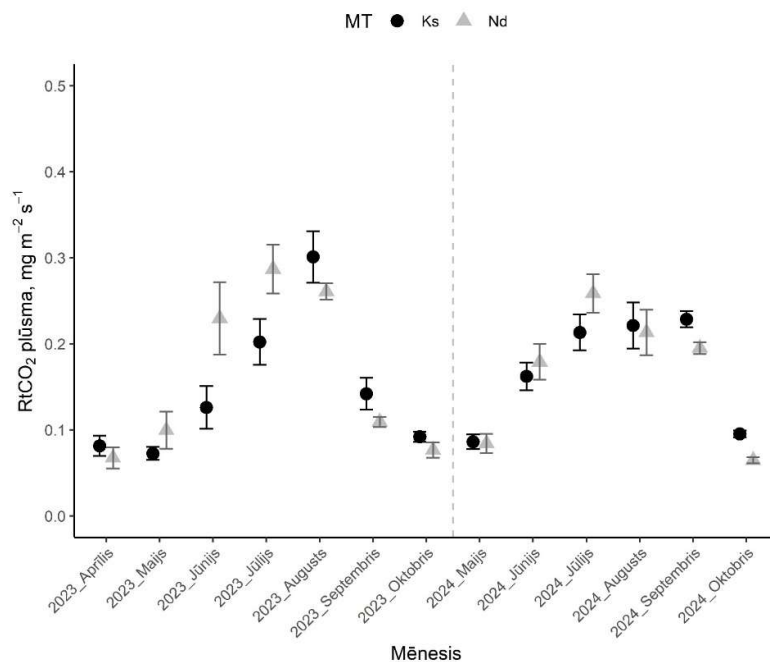
2.5. attēls. Mēneša vidējais gruntsūdens līmenis divos meža tipos (MT) - šaurlapju kūdrenī (Ks) un niedrājā (Nd) no 2023. gada aprīļa līdz 2024. gada oktobrim. Pelēkā vertikālā līnija apzīmē robežpunktu starp 2023. un 2024.gada mērījumu sezonām.

2.3.2. Augsnes kopējās ($RtCO_2$) un heterotrofās ($RhCO_2$) CO_2 emisijas vecās bērzu mežaudzēs ar un bez hidrotehniskās meliorācijas (Nd, Ks meža tipos)

1.1. Augsnes kopējās CO_2 emisijas ($RtCO_2$)

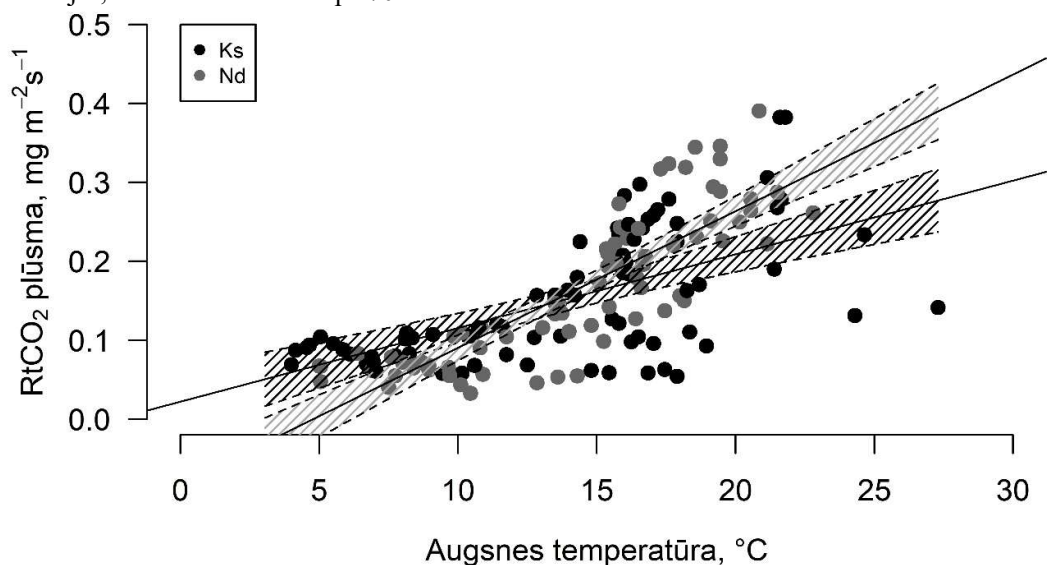
Augsnes kopējās CO_2 emisijas ($RtCO_2$) neatšķirās starp mērījuma gadiem ($p > 0,05$; 2.6. att.). Pirmajā mērījumu gadā (2023. gads) sezonas vidējās $RtCO_2$ emisijas bija $0,15 \pm 0,06$ un $0,17 \pm 0,06$ Ks un Nd meža tipos, attiecīgi. Otrajā mērījumu gadā (2024.gads) sezonas vidējās $RtCO_2$ emisijas bija $0,16 \pm 0,04$ un $0,16 \pm 0,04$ Ks un Nd meža tipos, attiecīgi. Abu sezonu vidējās $RtCO_2$ emisijas bija $0,15 \pm 0,03$ un $0,16 \pm 0,03$ Ks un Nd meža tipos,

attiecīgi. Statistiski būtiskas atšķirības ($p < 0,05$) starp mērījuma mēneša vidējām $RtCO_2$ vērtībām novērotas tikai 2024. gada oktobrī, kur būtiski lielākas emisijas novērotas Ks meža tipā.



2.6. attēls. Mēneša vidējās augsnes kopējās CO_2 ($RtCO_2$) emisijas Ks un Nd meža tipos no 2023. gada aprīļa līdz 2024. gada oktobrim. Pelēkā vertikālā līnija apzīmē robežpunktu starp 2023. un 2024. gada mērījumu sezonām.

$RtCO_2$ emisijām novērojama statistiski būtiska lineāra saikne ar augsnes temperatūru 5 cm dziļumā (2.7.att.), turklāt saiknes ciešums atšķiras starp meža tipi. Ks meža tipā $RtCO_2$ saikne ar augsnes temperatūru izskaidro 36 % no variācijas, savukārt Nd meža tipā 70 %.

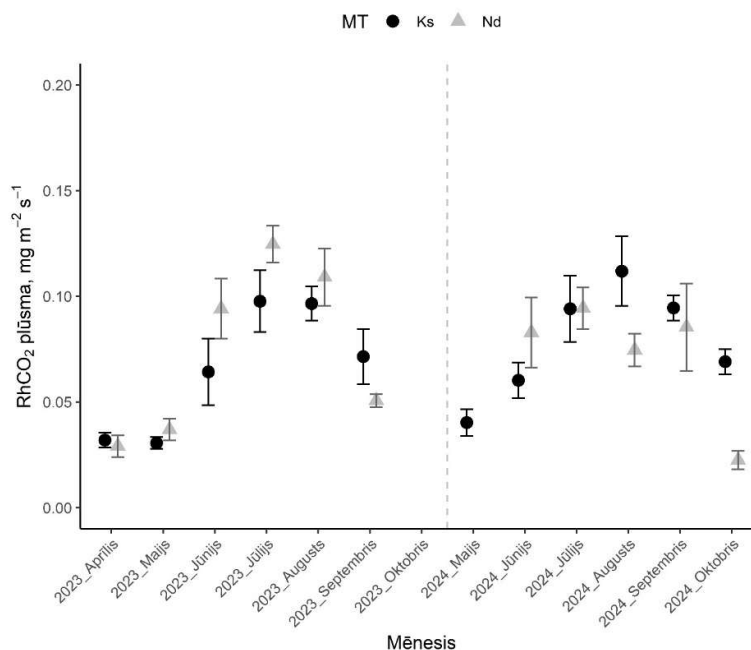


2.7. attēls. Augsnes kopējo CO_2 ($RtCO_2$) emisiju saikne ar augsnes temperatūru 5 cm dziļumā.

1.2. Augsnes heterotrofās CO_2 emisijas $RhCO_2$

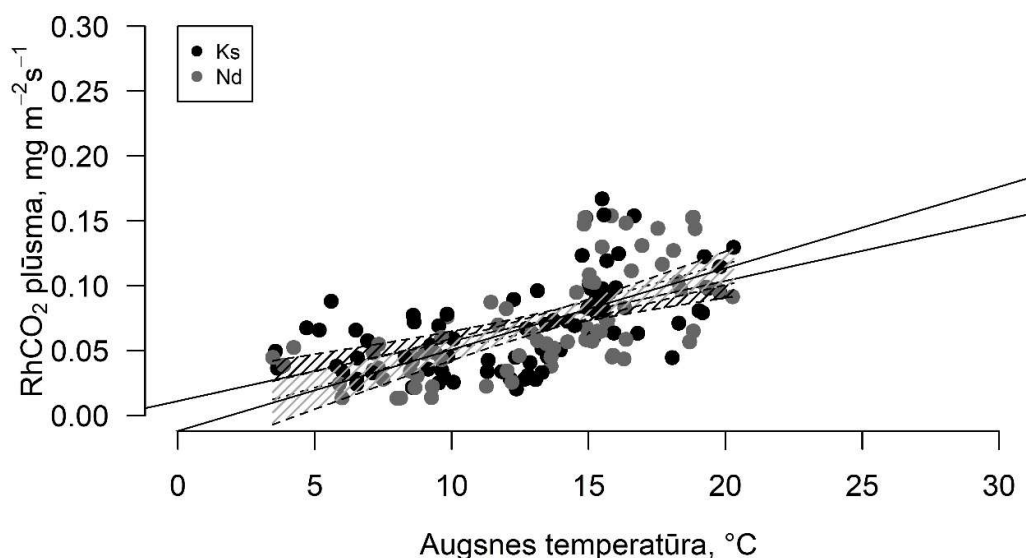
Augsnes heterotrofās $RhCO_2$ emisijas neatšķirās starp mērījuma gadiem ($p > 0,05$; 2.8.att.). Abu sezonu vidējās $RhCO_2$ emisijas bija $0,07 \pm 0,01$ un $0,07 \pm 0,01$ Ks un Nd meža tipos, attiecīgi. Statistiski būtiskas atšķirības

($p < 0,05$) starp mērijuma mēneša vidējām RhCO_2 vērtībām novērotas 2024. gada augustā un oktobrī, kur būtiski lielākas emisijas novērotas Ks meža tipā.



2.8.attēls. Mēneša heterotrofās augsnes kopējās CO_2 (RhCO_2) emisijas šaurlapju kūdrēnī (Ks) un niedrājā (Nd) no 2023. gada aprīļa līdz 2024. gada oktobrim. Pelēkā vertikālā līnija apzīmē robežpunktu starp 2023. un 2024.gada mērijumu sezonām.

RhCO_2 emisijām novērojama statistiski būtiska lineāra saikne ar augsnes temperatūru 5 cm dziļumā (2.9.att.), turklāt saiknes ciešums atšķiras starp meža tipiem. Ks meža tipā RhCO_2 saikne ar augsnes temperatūru izskaidro 45 % no variācijas, savukārt Nd meža tipā 32%.



2.9. attēls. Augsnes kopējo CO_2 (RtCO_2) emisiju saikne ar augsnes temperatūru 5 cm dziļumā.

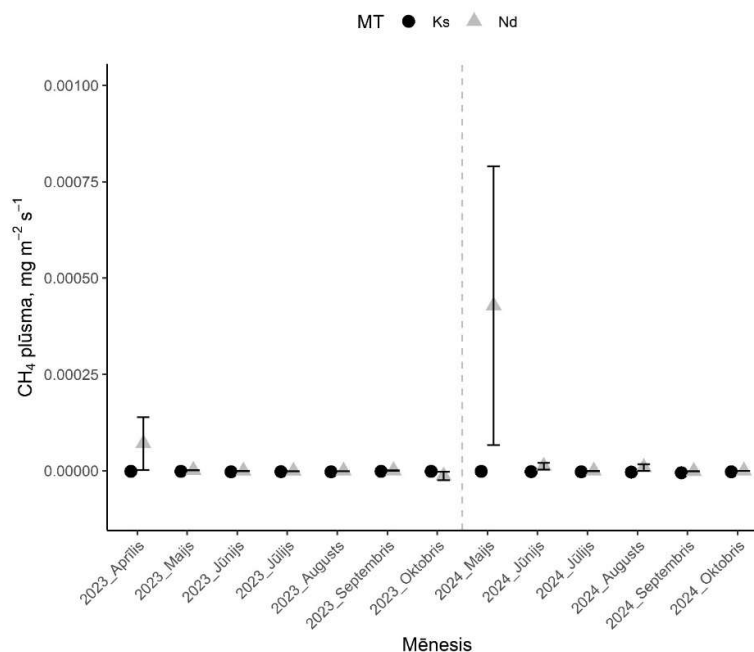
Augsnes temperatūrai, meža tipam un gruntsūdens līmenim novērota cieša saikne un būtiska ietekme uz RtCO_2 , gan RhCO_2 emisijām (2.5. tabula). RhCO_2 sastāda 47% no kopējās augsnes elpošanas (RtCO_2) šaurlapju kūdrēnī, savukārt RhCO_2 sastāda 44% no kopējās augsnes elpošanas (RtCO_2) niedrajā.

2.5 tabula. CO₂ emisiju ietekmējošie faktori

CO ₂ emisijas	Faktors	X ²	p-vērtība
Augsnes kopējās	Augsnes temp. 5cm	21,18	<0.01
RtCO ₂	Meža tips	12,90	<0.01
	Gruntsūdens līmenis	39,43	<0.01
Augsnes heterotrofās	Augsnes temp. 5cm	14,24	<0.01
RhCO ₂	Meža tips	5,47	0.02
	Gruntsūdens līmenis	8,42	<0.01

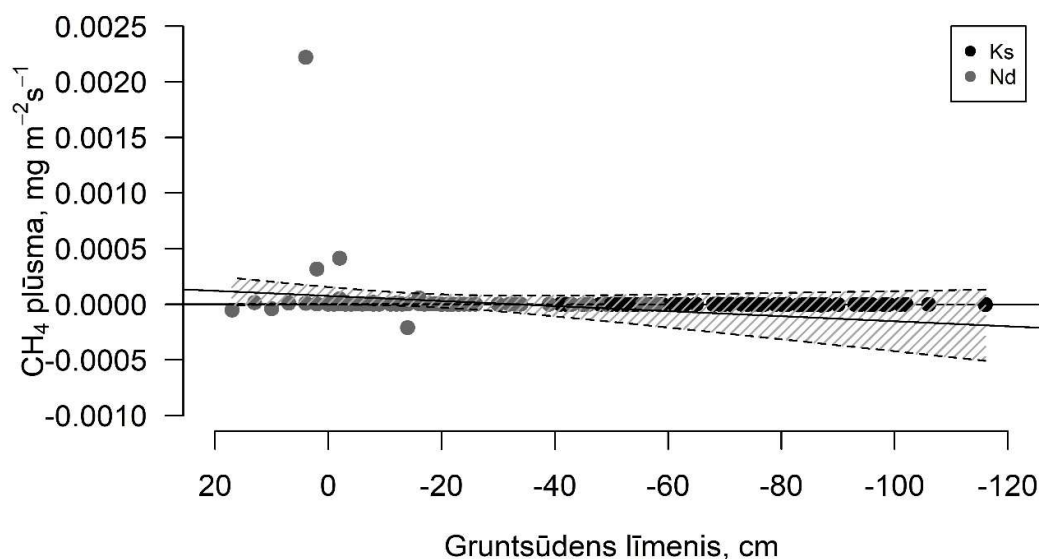
2.3.3. Augsnes CH₄ emisijas vecās bērzu mežaudzēs ar un bez hidrotehniskās meliorācijas (Nd, Ks meža tipos)

Augsnes CH₄ emisijas neatšķīrās starp mērījuma gadiem ($p > 0,05$; 2.10.att.). Abu sezonu vidējās CH₄ emisijas bija $-0,00000255 \pm 0,00004705$ un $0,0000362 \pm 0,0000471$ Ks un Nd meža tipos, attiecīgi, turklāt atšķirības ir statistiski būtiskas ($p < 0,001$). Šaurlapju kūdrenī visos mērījumu mēnešos novērojama CH₄ piesaiste, savukārt niedrājā vairumā mērījumu norāda uz CH₄ emisijām.



2.10. attēls. Mēneša heterotrofās augsnēs kopējās CO₂ (RhCO₂) emisijas šaurlapju kūdrenī (Ks) un niedrājā (Nd) no 2023. gada aprīļa līdz 2024. gada oktobrim. Pelēkā vertikālā līnija apzīmē robežpunktu starp 2023. un 2024.gada mērījumu sezonām.

Augsnes CH₄ emisijām novērojama statistiski būtiska ($p < 0,001$) lineāra saikne ar gruntsūdens līmeni tikai šaurlapju kūdrenī (2.11. att.), turklāt izskaidro 22 % no variācijas. Niedrājā saikne starp CH₄ emisijām un gruntsūdeni nav novērota.



2.11. attēls. Augsnes CH₄ emisiju saikne ar gruntsūdens līmeni.

3.3.4 Secinājumi

1. Meliorētās mežaudzēs ar organiskām augsnēm, salīdzinot ar nemeliorētām, ir ievērojami lielāks vidējais koku diametrs, augstums, krāja, šķērslaukums, un oglekļa uzkrājums.
2. Vidējās CO₂ emisijas neatšķirās starp mērījumu gadiem un meža tipiem, taču būtiskas atšķirības novērojamas tikai atsevišķos mēnešos.
3. Augsnes CO₂ emisijām ir cieša saikne ar augsnes temperatūru un gruntsūdens līmeni.
4. Augsnes heterotrofā elpošana sastāda 44 - 47% no augsnes kopējās elpošanas.
5. Augsnes CH₄ emisijām nav novērojama ikgadējā mainība, turklāt meliorētās mežaudzes ar organiskām augsnēm visas mērījumu sezonas garumā nodrošina CH₄ piesaisti, bet nemeliorētās augsnes ir CH₄ emisiju avots.

3. SEG emisijas datu iegūvi meža masīva līmenī platībās ar ierobežotu ūdens noteci meliorācijas sistēmā

Siltumnīcefekta gāzu (SEG) uzskaitē meža zemēs ir īpaši sarežģīta hidroloģiski modificētās teritorijās, kur meliorācijas sistēmās ir ierobežota ūdens noteci. Šādos apstākļos palielinās augsnes mitruma un skābekļa režīma telpiskā un laika mainība, kas būtiski ietekmē mikrobioloģiskos procesus un siltumnīcefekta gāzu, it īpaši N₂O, emisiju svārstības. Lai nodrošinātu klimata politikas prasībām atbilstošu un mērogojamu informāciju meža masīva līmenī, šajā darbā plānots aprobēt SEG emisiju datu ieguves metodiku, izmantojot gudrās mežsaimniecības “dzīvās laboratorijas” infrastruktūru un datus.

Saskaņā ar IPCC vadlīnijām (IPCC Wetland Supplement) darbības dati N₂O emisiju aprēķināšanai no nosusinātām organiskajām augsnēm aptver zemes platības ar nosusinātām organiskajām augsnēm, kurās nav veikta zemes transformācija uz citu zemes lietošanas veidu. Dati tiek stratificēti pēc galvenajiem zemes izmantošanas veidiem, zemes apsaimniekošanas praksi un traucējumu veidiem (*disturbance regimes*). Kopējā platība jānosaka saskaņā ar IPCC 2006. gada pamatnostādņiem (3. nodaļa 4. sējums). Zemes izmantošanas kategoriju stratifikācija tiek veikta, ņemot vērā attiecīga reģiona klimata zonu, izmantojot noklusējuma vērtības (*default values*) vai valsts izstrādātu nacionālu klasifikāciju, kā arī izmantojot klimata un augsnes kartes. SEG emisiju aprēķināšanā divi galvenie metodikas pamatelementi ir darbības dati un emisiju faktori. SEG emisijas var būt aprakstītas vispārīgāk, ar vienkāršākām metodēm (1. līmeņa metodes) vai ar augstāku detalizāciju (2. līmeņa metodes un 3. līmeņa metodes), kā arī, izmantojot datu modelēšanas instrumentus (3. līmeņa metodes). Datu pieejamība un to detalizācijas pakāpe nosaka to, kuru metodi ir iespējams izmantot. Nozīmīgs grozījums, kas ieviests, lai nodrošinātu pilnīgāku un detalizētāku ZIZIMM pārskatu izstrādi, ietverts V pielikuma 3. daļā Regulā (ES) 2018/1999 par uzraudzības un ziņošanas metodiku ZIZIMM sektorā. Tas iekļauts kā Regulas (ES) 2023/8392 V pielikums. No 2028. gada valsts SEG inventarizācijā, proti, datiem par 2026. gadu, jānodrošina vismaz 2. līmeņa metodes jau visām oglekļa krātuvēm. Savukārt, no 2030. gada valsts SEG inventarizācijā visām oglekļa krātuvēm jānodrošina 3. līmeņa metodes (vienīgi platībās, kas ir mazākas par 1 % no apsaimniekotās zemes, ir akceptējama 2. līmeņa metode).

ZIZIMM sektorā, tostarp mitrāju un meža zemju kategorijā N_2O emisijas saistītas ar organiskajām jeb kūdras augsnēm. Tiek lēsts, ka organisko augšņu būtiskais emisiju apjoms Latvijā apgrūtinās virzību uz zemes sektora klimata mērķi, īpaši laika perioda pēc 2025.gada.

Latvijā zemes sektora SEG emisiju ziņošana tiek pakāpeniski pilnveidota, gan papildinot datu kopas, gan uzlabojot aprēķinu metodiku. N_2O emisiju ziņošanas precīzākai nodrošināšanai ir nepieciešami vairāki uzlabojumi, tostarp, nepieciešams izstrādāt N_2O emisiju faktorus mitrāju kategorijā gan organiskajam augsnēm, gan minerālaugsnēm. Nepieciešama augstāka detalizācija Meža zemes kategorijas (NIR CRF 4.A) emisiju ziņošanā. Par meža ugunsgrēku un meža augsnes apsaimniekošanas radītajām emisijām netiek ziņots vai par to kvantitatīvie dati nav pietiekoši detalizēti. ES dalībvalstīs lielākā daļa inventarizāciju neatspoguļo N_2O , ja vien ugunsgrēki nav lieli un bieži. Daudzas valstis ziņo par meža zemi N_2O kā "NA" (nav aplēsts) vai "IC" (iekļauts citur). Iemesli saistīti ar to, ka meža augsnes N_2O procesi ir sarežģīti un atšķiras atkarībā no koku sugas, klimata un traucējumu vēstures.

3.1. SEG emisiju (N_2O) teorētiskais apraksts par to nozīmi meža ekosistēmā

Slāpekļa oksīds (N_2O) ir ilgmūžīga siltumnīcefekta gāzu un stratosfēras ozona slāni noārdoša viela, kas ir uzkrājusies atmosfērā kopš pirmsindustriālā perioda. N_2O ir gan sastopama dabā, gan rodas cilvēka darbības rezultātā. Pasaulē aptuveni 40 % no visām N_2O emisijām rada cilvēku darbība. Šī gāze galvenokārt atbrīvojas augsnē mikroorganismu darbības rezultātā, piem., kad tiek lietoti slāpekli saturoši mēslošanas līdzekļi. N_2O izdalās lauksaimnieciskās un rūpnieciskās darbībās, kā arī zemes izmantošanas procesā, piem., sadedzinot fosilo kurināmo un cietos atkritumus, kā arī notekūdeņu attīrīšanā (Tian et al. 2020).

Saskaņā ar sesto Klimata pārmaiņu starpvaldību padomes (IPCC AR6, 2023) novērtējuma ziņojumu N_2O relatīvais ieguldījums no 1750. līdz 2022. gadam sastāda 6,4 %. Lielākā daļa antropogēno N_2O emisiju rodas lauksaimniecībā. Papildu tam zemes izmantošana, zemes izmantošana, zemes izmantošanas maiņa un mežsaimniecības (ZIZIMM) sektorā tiek uzskaitīta daļa N_2O emisiju, kas saistītas ar zemes izmantošanu un apsaimniekošanu, taču to īpatsvars parasti ir mazāks (Petrescu et al. 2023). N_2O emisijas rodas arī meža zemēs, turklāt meža zemju devums var būt būtisks hidroloģiski pārveidotās platībās ar ierobežotu ūdens noteci. Tas rada nepieciešamību pēc robustiem, telpiski mērogojamiem mērījumiem un datu integrācijas protokoliem tieši meža masīva mērogā.

N_2O emisijas no meža ekosistēmām ir nozīmīga, lai gan salīdzinoši maz pētīta, globālā siltumnīcefekta gāzu kopējā budžeta sastāvdaļa (piem., Tian et al., 2024; Liao et al., 2024). N_2O plūsmas galvenokārt ir saistītas ar augsnes procesiem. Meža augsnes tipiski ir N_2O emisiju avots, tomēr dažādu mežu tipu variācija emisiju apjomā joprojām nav skaidra (Pihlatie et al. 2005). Ikgadējās emisijas svārstās no gandrīz 0 līdz 20 kg N_2O -N uz hektāru, atkarībā no slāpekļa apjoma atmosfērā, meža tipa un meža apsaimniekošanas veida (Schmidt et al. 1988; Papen, Butterbach-Bahl 1999; Bowden et al. 2000; Beier et al. 2001). N_2O emisiju apjomu primāri nosaka mikrobioloģiskie procesi augsnē (nitrifikācija, denitrifikācija), ko ietekmē dažādi augsnes fizikālie, ķīmiskie un bioloģiskie faktori un to savstarpējā mijiedarbība (Pihlatie et al. 2005; Syakila, Kroeze, 2010). Jāņem vērā, ka noteiktos apstākļos augsne var būt nevis N_2O emisiju, bet N_2O piesaistes avots (Butterbach-Bahl et al. 1998; Goossens et al. 2001). N_2O plūsmas dažādos meža tipos un biomās ir atšķirīgas, vislielākais N_2O emisiju apjoms ir tropu mežos, kam seko mērenās zonas meži un boreālās zonas meži, attiecīgi vidēji $45,4 \pm 97,4$, $37,7 \pm 74,5$ un $11,6 \pm 24,1 \mu g \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$ (Liao et al. 2024). Meža ekosistēmās N_2O emisijas galvenokārt nosaka nokrišņu daudzums (Yu et al. 2022). Augsnes mitrums ir viens no galvenajiem N_2O emisiju virzītājiem, jo tas nosaka skābekļa pieejamību mikroorganismiem un līdzsvaru starp nitrifikāciju un denitrifikāciju. Parasti N_2O plūsmas maksimums novērojams pie vidēji augsta mitruma (~60-80 %), bet ļoti slapjos apstākļos reducēšanās biežāk turpinās līdz N_2 , un N_2O frakcija krītas. Meliorētās meža platībās N_2O emisijas nereti saistās ar seklāku ūdens līmeni, t. sk. gadījumos, kad gruntsūdens atrodas dziļāk par ~20 cm zem virsmas (Abaja et al. 2019). Plašākā skatījumā N_2O cieši seko mitruma svārstībām (Tong et al. 2022).

Veģetācijas sastāvs (koku sugas, zemsedze) ietekmē mikrobu aktivitāti (sakņu un kritalu apjomu) caur sakņu izdalījumiem, smalko sakņu atmiršanu un kritalu noārdīšanos, tādējādi mainot substrātu pieejamību (minerālais N, vieglāk noārdāms C) un ietekmējot arī N_2O plūsmas (Silver et al. 2005). Slāpekļa pieejamība galvenokārt ir saistīta ar nitrifikācijas (aerobs process, ko veic autotrofiskās baktērijas) un denitrifikācijas (anaerobs process, ko veic fakultatīvie anaerobie mikroorganismi) procesiem (Papen, Butterbach-Bahl, 1999; Schindlbacher et al. 2004). Denitrifikācijas gaitā augsnes nitrāti/nitrīti (NO_3^-/NO_2^-) tiek reducēti līdz N_2O un N_2 , tādējādi būtiski samazinot augsnē pieejamo minerālo slāpekli (Pan et al. 2020). Denitrifikācija parasti ir dominējošais N_2O avots, jo $N_2O/(N_2O+N_2)$ frakcija var būt augsta (~1-100 %) un ir cieši saistīta ar augsnes īpašībām, piem., skābekļa pieejamības, NO_3^- koncentrācijas, organiskā oglekļa pieejamības, pH, temperatūras un mitruma. Savukārt nitrifikācijas procesā N_2O parasti veido tikai ~0,1 %–1 % no oksidētā slāpekļa (Butterbach-Bahl et al. 2013).

Mežaudzes vecums un traucējumu vēsture (izcirtumi, vējlauzes, insektu invāzijas u. c.) ietekmē oglekļa un slāpekļa aprites procesus ekosistēmas mērogā, tostarp substrātu pieejamības mikroorganismiem (nobiru un smalko sakņu daudzums (Silver et al. 2005)) un augsnes mitruma režīmu caur atšķirīgu evapotranspirācijas bilanci (īpaši nozīmīgi organiskajās augsnēs), tādējādi pārbīdot nitrifikācijas/denitrifikācijas līdzsvaru (Pihlatie et al. 2005; Tong et al. 2022). Vēl viens nozīmīgs traucējumu veids SEG bilanci ir biomasas sadegšana. Meža ugunsgrēki, kontrolēta dedzināšana un kūlas degšana rada tiešas CO₂, CH₄ un N₂O emisijas, ietekmējot ekosistēmas neto plūsmas vismaz notikuma gadā. Tāpat koku suga un tās specifiskās fizioloģiskās īpašības nosaka stumbra N₂O transportu un emisijas. Piemēram, boreālās zonas mežos, kuros dominē egle, N₂O emisijas būs augstākas nekā mežos, kuros aug priede vai bērzs, jo eglei konstatēts vislielākais transpirācijas ātrums, kas veicina lielāku N₂O transportu caur stumbru (Machacova et al. 2019).

Kopumā augsnes sastāva atšķirības kopā ar veģetāciju izskaidro lielu daļu no novērotās N₂O plūsmu heterogenitātes dažādos mežu tipos. Augsnes sastāvs papildus nosaka gāzu difūziju, ūdens režīmu un redoksa apstākļus, kas tieši ietekmē nitrifikācijas/denitrifikācijas līdzsvaru. Mitros reģionos mālainas augsnes biežāk saistās ar lielākām N₂O plūsmām nekā smilšainas, savukārt sausākos reģionos smilšu īpatsvars var labāk prognozēt plūsmas (Yu et al. 2022).

Pētījumi apliecina, ka mežos N mēslojums palielina koksnes pieaugumu un līdz ar to CO₂ piesaisti, turklāt iespējams arī organiskās augsnes C krātuves pieaugums (īpaši kūdras augsnēs) (Adamczyk et al. 2025; Tong et al. 2022). Vienlaikus slāpekļa ienese, līdz ar lielāku nobiru daudzumu un lielāku C pārnasi caur sakņu sistēmu uz augsnes mikroorganismiem, palielina sēnīšu biomasu un tālāku atmirušās koksnes sadalīšanos, kas stabilizējās augsnē, tādējādi palielinot substrātu nitrifikācijai/ denitrifikācijai, un tāpēc parasti paaugstina N₂O emisijas. Ietekmes lielumu nosaka vietas specifika (augšņu tips, mitrums) un pielietotās prakses parametri (N deva, forma, lietošanas laiks), tādēļ izvērtējams jāveic ekosistēmas SEG balances kontekstā (Ambus, Christensen 1995; Butterbach-Bahl et al. 2013; Rautakoski et al. 2024), kombinējot gan Eddy-kovariances, gan slēgto kameru metodi (Pihlatie et al. 2005).

Meliorācijas ietekme uz N₂O emisijām

Meliorācija (ūdens režīma pazemināšana ar nosusināšanas grāvju tīkliem u.c.) Eiropā 19.-20. gs. tika plaši ieviesta, lai pārmitras zemes pielāgotu lauksaimniecībai, mežsaimniecībai un kūdras ieguvei, piemēram, Centrāleiropā vairāk nekā 90 % kūdrāju ir izmantoti šādiem mērķiem (Joosten 2010). Jāuzsver, ka tieši meliorācijas grāvji ir galvenais hidrotehniskais elements, kas iestata un maina ūdens režīmu ainavā. Grāvji var būt ne tikai tiešs SEG emisiju avots, bet arī netieši ietekmē blakusesošās meža augsnes, tie veido straujus mitruma gradientus krastos un nogāzēs, mainot aerāciju un N substrātu apriti, veicinot koku augšanu, kas tādējādi var palielināt CO₂ piesaisti (Vermaat et al. 2011). Tādēļ grāvju ietekme jāvērtē visā meliorētajā masīvā, ne tikai kā atsevišķu "līniju" avotu (Sundh et al. 2000; Teh et al. 2011; Hyvönen et al. 2013; Peacock et al. 2017). Kopumā CH₄ emisijas no meliorācijas grāvjiem ir konsekventi augstākas, savukārt CO₂ un N₂O emisijas ir ievērojami mazākas, piemēram, Hyvönen et al. (2013) secina, ka boreālās zonas grāvji, ko izmanto *Phalaris arundinacea* audzēšanai, veidoja tikai 1% (N₂O) un 5% (CO₂) no kopējām ekosistēmas emisijām. Tomēr N₂O emisijas no grāvjiem ir telpiski un sezonāli mainīgas atkarībā no ūdens līmeņa, plūsmas un substrātu pieejamības (Reay et al. 2003, Teh et al. 2011, Hyvönen et al. 2013).

Nosusināšana pazemina gruntsūdeņu līmeni, palielina augsnes aerāciju un organiskā oglekļa mineralizāciju, samazinās CH₄ emisijas (oksidācijas slāņa sabiezēšanas dēļ), bet palielinās CO₂ un N₂O emisijas (nitrifikācijas/denitrifikācijas saskarnes veidošanās un NO₃⁻ pieejamības pieaugums) (Alm et al. 1999). Līdz ar gruntsūdens līmeņa pazemināšanos, meliorācija uzlabo sakņu aerāciju un barības vielu (īpaši minerālā slāpekļa) pieejamību, kas var veicināt koku un meža zemsedzes veģetācijas attīstību, tādējādi var palielināt CO₂ piesaisti biomasā (Minkinen et al. 2001). Organiskajām augsnēm raksturīgas lielas oglekļa un slāpekļa krātuves, un to nosusināšana var veicināt aerobo sadalīšanos, attiecīgi oglekļa un slāpekļa uzkrājuma mobilizāciju (Pärn et al. 2018). Tāpēc organiskās augsnes var gan piesaistīt, gan emitēt SEG.

Jauhainen et al. (2019) sniedz sistemātisku pārskatu par meliorācijas ietekmi uz boreālās zonas un mērenās zonas organiskajām augsnēm un ar tām saistītajām SEG (CO₂, N₂O, CH₄) plūsmām. Lai gan vispārīgi tiek pieņemts, ka meliorācijas ietekmē tiek radīts liels SEG emisiju apjoms, kvantitatīvie novērojumi joprojām saistīti ar augstu nenoteiktību. To veicina salīdzinoši neliels (galvenokārt, augsto augsnes izpētes izmaksu dēļ) un telpiski nevienmērīgs parauglūkumu skaits, īsi vai sezonāli asimetriski mērījumu periodi un izteikta sezonālās atšķirības SEG mērījumos, atšķiras pētījumos pielietotās metodes (slēgtās kameras vs. Eddy-kovariance, atšķirīgas ekstrapolācijas un datu aizpildes procedūras), kā arī augšņu heterogenitāte un ūdens līmeņa pārvaldības atšķirības starp vietām.

Organiskajām augsnēm raksturīgas lielas oglekļa un slāpekļa krātuves, un to nosusināšana pastiprina aerobo sadalīšanos, attiecīgi oglekļa un slāpekļa uzkrājuma mobilizāciju (IPCC 2014; Pärn et al. 2018). Ziemeļvalstīs un Baltijas valstīs nosusinātās organiskās meža augsnes ir būtiskas oglekļa krātuves, bet var būt arī nozīmīgs SEG

emisiju avots, bet N_2O reakcija uz meliorāciju ir vietas specifiska un galvenokārt atkarīga no ūdens līmeņa un barības vielu stāvokļa kombinācijām (Tong et al. 2022; Tikkasalo et al. 2025).

N_2O izpēte galvenokārt (ap 90 %) tiek veikta ar slēgto kameru metodi, saglabājot veģetāciju (Jauhiainen et al. 2019). Uz 2018.gadu saskaņā ar Jauhiainen et al. (2019) bija pieejamas 32 publikācijas, kopā aptverot 61 parauglaukumu.

Slēgto kameru metode līdz šim ir visbiežāk izmantotā metode N_2O emisiju mērījumos (Papen, Butterbach-Bahl, 1999; Hutchinson, Livingston 2001; Schulte-Bisping, Brumme 2003). Tās priekšrocības ir relatīva vienkāršība un lēta lietošana, un tā ir īpaši piemērota, ja augsnes emisijas ir saistītas ar augsnes ķīmiskajiem un mikrobioloģiskajiem faktoriem nelielā mērogā (Pihlatie et al. 2005). Bieži N_2O pētījumos paralēli iekļauj arī CH_4 .

Eddy kovariācijas gāzu apmaiņas mērīšanas metode (turpmāk- Eddy kovariācijas metode) ir izmantota daudz retāk, īpaši N_2O mērījumiem. Somijā ar Eddy kovariācijas metodi 2022.gadā iegūti CO_2 , CH_4 un N_2O dati nosusinātā kūdrāju mežā pēc kailcirtes (Tikkasalo et al. 2025), Dānijā iegūti N_2O dati vecās mežaudzēs, augsnes (t.sk. zemsedzes) un ekosistēmas līmenī (Pihlatie et al. 2005). Salīdzinot slēgto kameru un Eddy kovariācijas metodi, Eddy kovariācijas metode tiek uzskatīta par daudzsoļošu alternatīvu ekosistēmas līmeņa N_2O emisiju novērtēšanai meža ekosistēmās. Vienlaicīgi nevar apgalvot, ka Eddy kovariācijas metodei ir tikai priekšrocības. Tāpat līdzšinējos pētījumos netiek ieteikts pilnībā atteikties no slēgto kameru metodes, pārejot uz Eddy kovariācijas metodi. Katrai metodei ir savas priekšrocības un mīnusi. Slēgto kameru metode ir visplašāk starptautiski pielietotā meža un purvu SEG emisiju novērtēšanas metode, tādēļ ērti izmantojama salīdzināmu datu ieguvei un plašāku reģionu datu integrācijai un analīzei. Ar slēgto kameru metodi tiek mērītas SEG emisijas, piemēram, konkrētā biotopā, bet Eddy kovariācijas gāzu apmaiņas mērīšanas metode ļauj mērīt SEG emisijas salīdzinoši lielākās teritorijās meža ekosistēmas robežās. Tiešās SEG emisiju mērīšanas metodes ir dārgas, samērā sarežģītas un laikietilpīgas metodes, taču dod salīdzināmus faktiskos SEG mērījumus (Abaja et al. 2019).

Precīzas informācijas ziņošana par organisko augšu stāvokli ir būtiska, jo organiskās augsnes ir lielākais ZIZIMM sektora SEG emisiju avots. Tādējādi SEG emisijas no augsnēm var kļūt par būtisku šķērslī ZIZIMM sektorā, lai sasniegtu klimata mērķi uz 2030. gadu. Vienlaicīgi aizvien pastāv nenoteiktība SEG mērījumos un attiecīgo SEG samazināšanas pasākumu novērtējumā.

3.2. SEG emisiju (CO_2 , CH_4) datu ieguve meža masīva līmenī platībās ar ierobežotu ūdens noteci meliorācijas sistēmās

Atšķirībā no slēgto kameru metodēm, Eddy kovariācijas metodes nerada augsnes traucējumus, un emisiju plūsmas ir integrētas plašā zonā, nodrošinot ekosistēmas līmeņa mērījumus. Līdzīgi kā automatizētie slēgto kameru mērījumi, Eddy kovariācijas metodes bieži vien darbojas nepārtraukti un tādējādi sniedz informāciju par plūsmu laika mainīgumu (Pihlatie et al. 2005).

Eddy kovariācijas metode ir mikrometeoroloģiskās plūsmas mērīšanas metode jeb tiešā gāzu apmaiņas mērīšanas metode. Lai mērītu gāzu apmaiņu starp zemes virsmu un atmosfēru, iespējams izmantot *LI-COR eddy covariance* risinājumu pieeju, kas apvieno precīzus instrumentus, kuri novietoti uz platformas, gāzu noteikšanas sistēmas (piem., IR sensors), un spēcīgu datu apstrādes programmatisko nodrošinājumu (Abaja et al. 2019). Šī metode sniedz iespēju veikt tiešu, teritoriju integrējošu un nepārtrauktu biosfēras un atmosfēras gāzu apmaiņas monitoringu (Baldocchi 2003; Foken et al. 2012). Metodes pamatā ir pētāmās gāzes koncentrācijas augstfrekvences monitoringa gaisā un vienlaicīga vertikālā vēja ātruma (w) mērīšana, izmantojot 3-D anemometru. Viena no būtiskām priekšrocībām nepārtrauktā gāzveida plūsmas monitoringā ar Eddy kovariāciju metodēm ir iespēja noteikt īstermiņa reakciju sistēmā uz vides apstākļiem, kas labākajā gadījumā veido detalizētu laika aprakstu gan dienas (dienas un nakts plūsmas), gan gada (visu gadu) laika skalā (Jauhiainen et al. 2019).

Pētījumos par gāzu plūsmām dažādās ekosistēmās visā pasaulē (Barba et al. 2018; Wang et al. 2018) konstatēs, ka Eddy kovariācijas metodes monitoringa jutīgums atšķiras atkarībā no konkrētās ekosistēmas. Meži ziemeļu apgabalos, šķiet, veido sarežģītu vidi diennakts un sezonas gāzu plūsmu integrēšanai, kas parasti ir saistīta ar pētījuma platību (*footprint related issues*), zem lapotnes pastāvošo horizontālo advekciju (*below-canopy horizontal advection*), kā arī no korelācijas starp temperatūru un iztvaikošanu.

Latvijā, 2025. gada aprīlī tika uzsākta SEG emisiju (CO_2 , CH_4) datu ieguve meža masīva līmenī Kalsnavas meža novadā, platībās ar ierobežotu ūdens noteci meliorācijas sistēmās. Tā kā 2025. gada laikā NO_2 mērījumi Kalsnavas Meža pētīšanas stacijas Eddy kovariācijas torniņiem vēl nav sākti (notiek iekārtu iepirkums), tad SEG emisijas datu ieguves meža masīva līmenī metodoloģijas aprobācija veikta uz CO_2 mērījumu piemēra, jo datu ieguves, apstrādes un analīzes principi būs identiski.

Eddy kovariācijas gāzu mērījumi tiek veikti ik pēc 1/10 sekundēm (600 mērījumi minūtē). Kovariācijas tornī (stacijā) uzstādītā programmatūra jau veic sākotnējo datu apstrādi un tālākai izmantošanai ir pieejamas mērījumu

vidējās vērtības 30 minūšu intervāliem, attiecīgi par katru diennakti, kurā ir veikti mērījumi, ir pieejamas 48 datu vienības katram no mērītajiem rādītājiem. Mērījumi dati ir pieejami portālā FluxSuite reģistrētiem lietotājiem, kuriem ir tiesības iegūt šo datus.

Dati pieejami .txt vai .csv formātā par laika periodu, kādam veikts datu pieprasījums. Datu failos ir ietverta sekojošā informācija (Pilns pieejamo kolonnu un to atšifrējumu uzskaitījums pieejams - <https://www.licor.com/support/EddyPro/topics/output-files-full-output.html#SupportEddyPro7Software>) :

- 1) Informāciju par datu failu, datumu un laiku periodam, kurā aprēķinātas 30 min vidējās vērtības, derīgajiem ierakstiem;
- 2) Informācija par gāzu plūsmām (piemēram, CO₂, CH₄);
- 3) Gāzu koncentrācijas gaisā;
- 4) Meteoroloģiskā informācija – gaisa temperatūra, spiediens, mitrums, vēja virziens un vēja ātrums.

Iegūtu datu tālāko apstrādi ir iespējams veikt ar programmu **R** (R Core Team, 2025). R ir datu statistiskās apstrādes un vizualizācijas programma, kurā ir pieejamas vairākas specializētas papildu pakotnes tieši Eddy kovariances un laika rindu datu apstrādei un vizualizācijai.

Pakotne **“REddyProc”** (Wutzler, et al., 2025) – specializēta R pakotne Eddy kovariances 30 minūšu datu pēcapstrādei. Pakotne nodrošina funkcijas pamatdarbībām gāzu apmaiņas datu apstrādē:

- 1) Datu kvalitātes pārbaudei un neiederīgo (kļūdaino) vērtību atrašanai un izslēgšanai no turpmākās analīzes;
- 2) Iztrūkstošo vērtību aizstāšanai, balstoties uz novērotajiem vides apstākļiem;
- 3) Kopējo gāzu plūsmu sadalīšanai komponentēs.

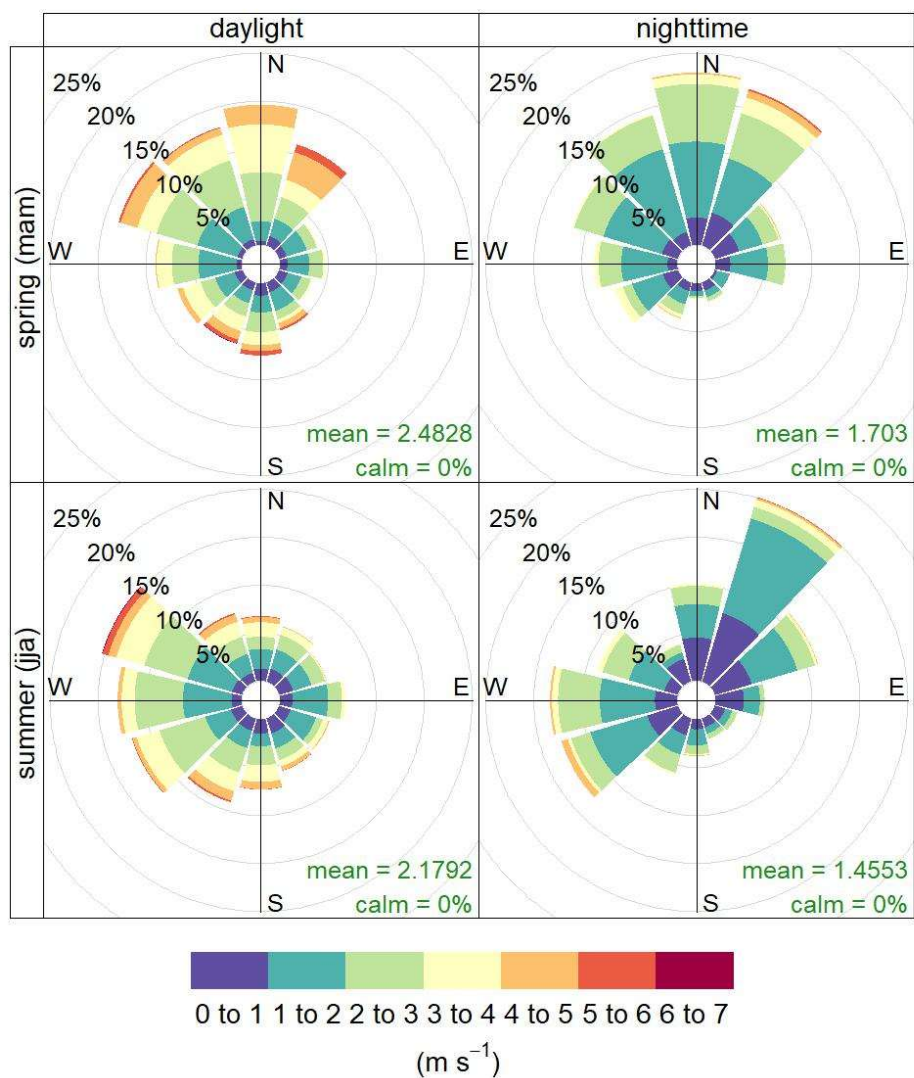
Pakotne **“openeddy”** (Sigut, 2023) nodrošina papildu funkcionalitāti pakotnei “REddyProc”, izstrādājot datu kvalitātes pārbaudes shēmas, datu kopsavilkumu veidošanu un datu vizualizāciju.

Pakotne **“openair”** (Carslaw, Ropkins, 2012) nodrošina funkcijas, lai apstrādātu un vizualizētu laika rindu datus, kādi arī Eddy kovariances veiktu gāzu un meteoeroloģisko parametru mērījumi.

Eddy kovariances datu apstrāde parasti iekļauj sekojošus soļus:

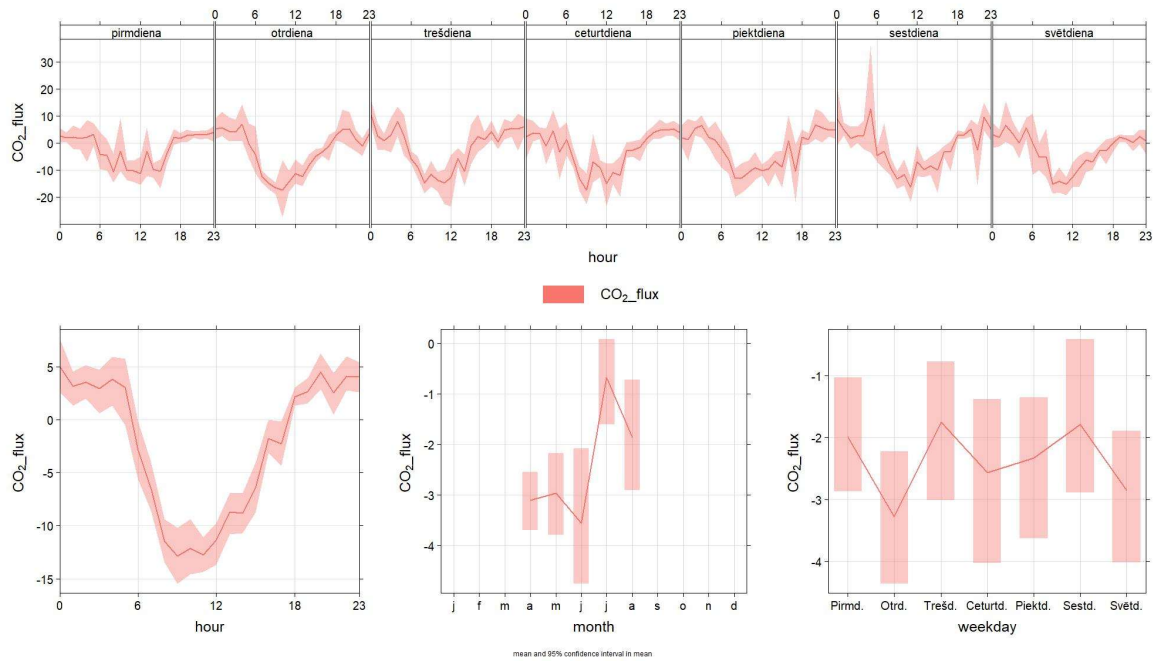
- 1) Datu importēšana programmā R, kolonnu nosaukumu maiņa (lai atbilstu turpmākajām izmantojamām funkcijām), datu kolonnu veida maiņa (piemēram, lai kolonnas, kas satur datumus, arī tiktu uztvertas kā datumu kolonnas).
- 2) Datu apvienošana, lai vienā laika rindā būtu iekļauti dati no vairākiem mēnešiem, vai vairākiem gadiem.
- 3) Laika rindu papildināšana, gadījumos, kad ir iztrūcis kāds mērījums un laika rindā veidojas pārtraukums.
- 4) Neiederīgo novērojumu identificēšana, marķēšana un izslēgšana no turpmākās analīzes.
- 5) Iztrūkstošo datu aizvietošana (ja tādi ir sastopami konkrētajā datu failā).
- 6) Gāzu apmaiņu aprēķini interesējošiem laika periodiem un teritorijām.

Attēlā 3.1. un 3.2. ir dots piemērs apkopotiem vēja virzienu un CO₂ gāzu plūsmas mērījumiem, kas veikti ar programmas R pakotnēm REddyProc un openair.



Frequency of counts by wind direction (%)

3.1. attēls. Vēja ātrumu izplatība Vesetnieku (Kalsnavas MPS) Eddy kovariācijas torņa apkārtnē, atkarībā no diennakts laika un gadalaika.



3.2. attēls. CO₂ gāzu plūsma Vesetnieku (Kalsnavas MPS) Eddy kovariācijas torņa teritorijā atkarībā no nedēļas dienas, diennakts stundas un mēneša.

Secinājumi un rekomendācijas

Lai nodrošinātu pilnīgu informāciju par SEG emisijām mežos ar nosusinātām organiskajām augsnēm, SEG un vides datu vākšanai būtu jāaptver pilns meža aprites cikls, izvēloties monitoringam salīdzināmas platības, kas pārstāv dažādas mežaudzes attīstības posmus un augšanas apstākļus. N_2O plūsmas meža ekosistēmās līmenī salīdzinoši ar citām SEG gāzēm ir vismazāk izpētīta, un datu iegūšana ir nepieciešama vairākos aspektos – ietverot raksturlielumus par grāvjiem, mikroklimatu un citiem faktoriem, jo N_2O emisiju apjomu ietekmē virkne faktoru, kuri vienlaicīgi ne vienmēr konkrēto pētījumu ietvaros tiek ņemti vērā (netiek mērīti). Pētījumos tiek secināts, ka N_2O emisiju apjoma noteikšana ir sarežģīta, jo zemes virsma ir izteikti heterogēna (nav viendabīga), ietverot gan augšņu dažādību, gan veģetācijas dažādību, gan arī dažādos zemes izmantošanas un apsaimniekošanas veidus. Ar Eddy kovarianes gāzu apmaiņas mērīšanas metodi iegūstami dati par SEG emisiju apjomu ekosistēmas līmenī, bet augstāko datu precizitāti iespējams panākt, kabinējot Eddy kovariances metodi, slēgto kameru metodi vietās dažādos augšanas apstākļos ar daudzveidīgu veģetāciju (dēvēta par *surface-type specific flux modelling*) (Tikkasalo et al. 2025).

Meliorētās mežaudzēs ar organiskām augsnēm, salīdzinot ar nemeliorētām, ir ievērojami lielāks vidējais koku diametrs, augstums, krāja, šķērslaukums, un oglekļa uzkrājums. Konstatēts, ka augsnes CO_2 emisijām ir cieša saikne ar augsnes temperatūru un gruntsūdens līmeni, bet nav novērotas atšķirības CO_2 emisijām starp mežaudzēm ar un bez meliorācijas sistēmām. Augsnes CH_4 emisijām nav novērojama ikgadējā mainība, turklāt meliorētas mežaudzes ar organiskām augsnēm visas mērījumu sezonas garumā nodrošina CH_4 piesaisti, bet nemeliorētas augsnes ir CH_4 emisiju avots.

Kokaudžu telpiskā analīze ir būtisks datu apstrādes rīks vecu mežaudžu vertikālās struktūras pārmaiņu novērtēšanai. Dati parāda, ka gan koku augstums, gan koku caurmērs ir būtiski rādītājs, kas ietekmē pirmā stāva bērzu izdzīvošanu, tomēr ievērojamā parauglaukumu ietekme norāda uz papildus, analīzē neiekļautu faktoru ietekmi uz koku mirstību. Šāda analīze ļauj ne tikai sekot mežaudžu noturībai pret vēju un kaitēkļiem, bet izmantot iegūtās atziņas izmantot šādu mežaudžu apsaimniekošanas prakšu izstrādei un plānošanai.

Rekomendācijas:

Turpmākajos gados būtu nepieciešams nodrošināt veco mežaudžu monitoringu – veicot audžu pārmērīšanu ik pēc pieciem gadiem. Tādējādi tiktu veidotas ilglaicīgas datu rindas precīzākai audžu attīstības dinamikas novērtēšanai, kā arī nodrošinātas references vērtības (par atmirušās koksnes dinamiku, audžu strukturālajām izmaiņām, sugu un augšanas apstākļu ietekmi) uz kurām tiekties arī daudzfunkciju (*multifuncional*) mežaudzēs, kas nodrošina dažādus ekosistēmu pakalpojumus. Tāpat būtu jāvērtē klimata pārmaiņu un dabisko traucējumu ietekmi uz veco mežaudžu attīstību meža ainavas līmenī un jāstiprina Latvijas starptautiskā atpazīstamība zinātnes telpā saistībā ar vecu mežaudžu un senu mežu izpēti Latvijā.

Literatūras saraksts

1. Abaja R., Filipovs J., Strazdiņa L., Pakalne M. 2019. Attālajā izpētē balstīta siltumnīcefekta gāzu novērtēšanas metodika purviem. Vides risinājumu institūts, Priekuļu novads, 56 lpp.
2. Adamczyk B., Adamczyk C., Tupek B., Li Q., Martinovic T., Richy E. 2025. Nitrogen fertilisation of boreal forest soil increases soil carbon pool through elevated microbial necromass formation but also modifies tree secondary metabolism. *Soil Biology and Biochemistry* 209: 109917. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2025.109917>
3. Alm J., Saarnio S., Nykänen H., Silvola J., Martikainen P.J. 1999. Winter CO₂, CH₄, and N₂O fluxes on some natural and drained boreal peatlands. *Biogeochemistry* 44: 163-186. <https://doi.org/10.1007/BF00992977>
4. Ambus P. and Christensen S. 1995. Spatial and seasonal nitrous oxide and methane fluxes in Danish forest-grassland and agroecosystems. *Journal of Environmental Quality* 24(5): 993-1001. <https://doi.org/10.2134/jeq1995.00472425002400050031x>
5. Baldocchi D. 2003. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future. *Global Change Biology* 9: 479-492. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2003.00629.x>
6. Barba J., Cueva A., Bahn M., Barron-Gafford G.A., Bond-Lamberty B., Hanson P. J. et al. 2018. Comparing ecosystem and soil respiration: Review and key challenges of tower-based and soil measurements. *Agricultural and Forest Meteorology* 249: 434-443. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.10.028>
7. Bates D., Mächler M., Bolker B. M., Walker S. C. 2015. Fitting Linear Mixed-Effects Models Using lme4. *Journal of Statistical Software*, 67(1): 1-48. <https://doi.org/10.18637/JSS.V067.I01>
8. Beier C., Rasmussen L., Pilegaard K., Ambus P., Mikkelsen T., Jensen N.O. et al. 2001. Fluxes of NO₃, NH₄, NO, NO₂, and N₂O in an old Danish beech forest. *Water, Air and Soil Pollution: Focus* 1: 187-195. <https://doi.org/10.1023/A:1011538729122>
9. Bowden R.D., Rullo G., Stevens G.R., Steudler P.A. 2000. Soil fluxes of carbon dioxide, nitrous oxide, and methane at a productive temperate deciduous forest. *Journal of Environmental Quality*, 29, 268-276. <https://doi.org/10.2134/jeq2000.00472425002900010034x>
10. Butterbach-Bahl K., Baggs E.M., Dannenmann M., Kiese R., Zechmeister-Boltenstern S. 2013. Nitrous oxide emissions from soils. How well do we understand the processes and their controls? *Philosophical Transactions of the Royal Society B. Biological Sciences* 368: 1621. <http://dx.doi.org/10.1098/rstb.2013.0122>
11. Butterbach-Bahl K., Gasche R., Huber C.H., Kreutzer K., Papen H. 1998. Impact of N-input by wet deposition on N-trace gas fluxes and CH₄-oxidation in spruce forest ecosystems of the temperate zone in Europe. *Atmospheric Environment* 32(3): 559-564. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(97\)00234-3](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(97)00234-3)
12. Carslaw D. C. and K. Ropkins. 2012. openair - an R package for air quality data analysis. *Environmental Modelling & Software* 27-28: 52-61.
13. Foken T., Leuning R., Oncley S. R., Mauder M., Aubinet M. Corrections and data quality control. 2012. In: Aubinet, M., Vesala, T., and Papale, D. (eds.), *Eddy covariance: A practical guide to measurement and data analysis*, Springer Atmospheric Sciences, Springer, Dordrecht, Heidelberg, London, New York, pp. 85-131. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-2351-1>
14. Goossens A., De Visscher A., Boeckx P., Van Cleemput O. 2001. Two-year field study on the emission of N₂O from coarse and middle-textured Belgian soils with different land use. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 60: 23-34. <https://doi.org/10.1023/A:1012695731469>
15. Hao Z., Zhang J., Song B., Ye J., Li B. 2007. Vertical structure and spatial associations of dominant tree species in an old-growth temperate forest. *Forest Ecology and Management* 252: 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.06.026>
16. Hyvönen N.P., Huttunen J.T., Shurpali J., Lind S.E., Marushchak M.E., Heitto L. et al. 2013. The role of drainage ditches in greenhouse gas emissions and surface leaching losses from a cutaway peatland cultivated with a perennial bioenergy crop. *Boreal Environment Research* 18: 109-126.
17. Hutchinson G.L. and Livingston G.P. 2001. Vents and seals in nonsteady-state chambers used for measuring gas exchange between soil and the atmosphere. *European Journal of Soil Science* 52(4): 675-682. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2389.2001.00415.x>
18. IPCC 2014: Annex II: Glossary (Mach K.J., Planton S., von Stechow C. (eds.)). In: *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC, Geneva, Switzerland, pp 117-130.

19. IPCC 2023. Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. H. Lee and J. Romero (eds.). Geneva, Switzerland.
20. Janiec P., Tyminińska-Czabańska T., Hawryło P., Woda M., Socha J. 2025. Determining vertical structure of forests in Poland using a semi-automated approach based on ALS data. *Ecological Indicators* 178: 113825. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2025.113825>
21. Jauhiainen J., Alm J., Bjarnadottir B., Callesen I., Christiansen J.R., Clarke et al. 2019. Reviews and syntheses: Greenhouse gas exchange data from drained organic forest soils – a review of current approaches and recommendations for future research. *Biogeosciences* 16: 4687-4703. <https://doi.org/10.5194/bg-16-4687-2019>
22. Joosten H. 2010. The Global Peatland CO2 Picture: Peatland Status and Drainage Related Emissions in All Countries of the World (Wetland International, Ede, The Netherlands). Pieejams: <https://www.wetlands.org/publications/the-global-peatland-co2-picture/>
23. Ķēniņa L. 2023. Oglekļa uzkrājums vecās mežaudzēs hemiboreālajos mežos ar sausām minerālaugsņēm / Carbon stock in old-growth stands on mineral soils in hemiboreal forests. Promocijas darbs. 130 lpp. Pieejams: <https://www.silava.lv/images/Produkti/Promocijas-darbi/2023-Kenina-Laura-Promocijas-darbs.pdf>
24. Ķēniņa L., Elferts D., Jaunslaviete I., Bāders E., Jansons Ā. 2023. Sustaining carbon storage: lessons from hemiboreal old-growth coniferous and deciduous forest stands. *Forest Science* 69(2): 158-166. <https://doi.org/10.1093/forsci/fxac055>
25. Laarmann D., Korjus H., Sims A., Stanturf J.A., Kiviste A., Köster K. 2009. Analysis of forest naturalness and tree mortality patterns in Estonia. *Forest Ecology and Management* 258: S187-S195. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.07.014>
26. Liao J., Zheng W., Liao Q., Lu S. 2024. Global latitudinal patterns in forest ecosystem nitrous oxide emissions are related to hydroclimate. *npj Climate and Atmospheric Science* 7: 187. <https://doi.org/10.1038/s41612-024-00737-8>
27. Lyu L., Büntgen U., Li M.H., Yu K., Palosse A., Zhang Q.B., Cherubini P. 2025. Intensifying neighbouring tree competition suppresses tree growth at the eastern Tibetan tree line. *BES Functional Ecology* 39(5): 1234-1246. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.70040>
28. Machacova K., Vainio E., Urban O., Pihlatie M. 2019. Seasonal dynamics of stem N2O exchange follow the physiological activity of boreal trees. *Nature Communications* 10: 4989. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-12976-y>
29. Mäkiranta P., Riutta T., Penttilä T., Minkkinen K. 2010. Dynamics of net ecosystem CO2 exchange and heterotrophic soil respiration following clear felling in a drained peatland forest. *Agricultural and Forest Meteorology* 150: 1585-1596. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2010.08.010>
30. Pan B., Xia L., Lam S.K., Wang E., Zhang Y., Mosier A. et al. 2022. A global synthesis of soil denitrification: Driving factors and mitigation strategies. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 327: 107850. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107850>
31. Papen H. and Butterbach-Bahl K. 1999. A 3-year continuous record of nitrogen trace gas fluxes from untreated and limed soil of a N saturated spruce and beech forest ecosystem in Germany 1. N2O emissions. *Journal of Geophysical Research Atmospheres* 104(D15): 18487-18503. <https://doi.org/10.1029/1999JD900293>
32. Pärn J., Verhoeven J., Butterbach-Bahl K., Dise N., Ullah S., Aasa A. et al. 2018. Nitrogen-rich organic soils under warm well drained conditions are global nitrous oxide emission hotspots. *Nature Communications* 9: 1135. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-03540-1>
33. Peacock M., Ridley L.M., Evans C.D., Gauci V. 2017. Management effects on greenhouse gas dynamics in fen ditches. *Science of The Total Environment* 578: 601-612. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.11.005>
34. Petrescu A.M.R., Qiu C., McGrath M.J., Peylin P., Peters G.P., Ciais P. et al., 2023. The consolidated European synthesis of CH4 and N2O emissions for the European Union and United Kingdom: 1990–2019. *Earth System Science Data* 15: 1197-1268. <https://doi.org/10.5194/essd-15-1197-2023>
35. Pihlatie M., Rinne J., Ambus P., Pilegaard K., Dorsey J.R., Rannik Ü. et al. 2005. Nitrous oxide emissions from a beech forest floor measured by eddy covariance and soil enclosure techniques. *Biogeosciences* 2: 377-387. <https://doi.org/10.5194/bg-2-377-2005>

36. Powell M. 2009. The BOBYQA algorithm for bound constrained optimization without derivatives. https://www.damtp.cam.ac.uk/user/na/NA_papers/NA2009_06.pdf
37. R Core Team. 2025. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>
38. Rautakoski H., Korkiakoski M., Mäkelä J., Koskinen M., Minkkinen K., Aurela et al. 2024 Exploring temporal and spatial variation of nitrous oxide flux using several years of peatland forest automatic chamber data. *Biogeosciences* 21: 1867-1886. <https://doi.org/10.5194/bg-21-1867-2024>
39. Reay D.S., Smith K.A., Edwards A.C. 2003. Nitrous oxide emission from agricultural drainage waters. *Global Change Biology* 9(2): 195-203. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2003.00584.x>
40. Samariks V., Kēniņa L., Istenais N. et al. 2024. Organic soil greenhouse gas flux rates in hemiboreal old-growth Scots pine forests at different groundwater levels. *European Journal of Forest Research* 143: 1237-1248. <https://doi.org/10.1007/s10342-024-01690-0>
41. Schindlbacher A., Zechmeister-Bolternstern S., Butterbach- Bahl K. 2004. Effects of soil moisture and temperature on NO, NO₂, and N₂O emissions from European forest ecosystems. *Journal of Geophysical Research Atmospheres* 109: D17302. <https://doi.org/10.1029/2004JD004590>
42. Schmidt J., Seiler W., Conrad R. 1988. Emission of nitrous oxide from temperate forest soils into the atmosphere. *Journal of Atmospheric Chemistry* 6: 95-115. <https://doi.org/10.1007/BF00048334>
43. Schulte-Bisping H. and Brumme R. 2003. Nitrous oxide emission inventory of German forest soils. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 108(D4): 4132. <https://doi.org/10.1029/2002JD002292>
44. Sigut L. 2023. openeddy: Post-process eddy covariance data with ease. R package version 0.0.0.9009, commit e749525ef5b381112635191fa1d6e9330e52c6ea, <https://github.com/lsgut/openeddy>
45. Silver W.L., Thompson A.W., McGroddy M., Varner R.K., Dias J.D., Silva H. et al. 2005. Fine root dynamics and trace gas fluxes in two lowland tropical forest soils. *Global Change Biology* 11(2): 290-306. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.00903.x>
46. Syakila A. and Kroeze C. 2011. The global nitrous oxide budget revisited. *Greenhouse Gas Measurement and Management* 1(1): 17-26. <https://doi.org/10.3763/ghgmm.2010.0007>
47. Sundh I., Nilsson M., Mikkilä C., Granberg G., Svensson B.H., 2000. Fluxes of methane and carbon dioxide on peat-mining areas in Sweden. *Ambio* 29(8): 499-503. <https://www.jstor.org/stable/4315082>
48. Teh Y.A., Silver W.L., Sonnentag O., Detto M., Kelly M., Baldocchi D.D. 2011. Large greenhouse gas emissions from a temperate peatland pasture. *Ecosystems* 14: 311-325. <https://doi.org/10.1007/s10021-011-9411-4>
49. Tian H., Xu R., Canadell J.G., Thompson R. L., Winiwarter W., Suntharalingam P. et al. 2020. A comprehensive quantification of global nitrous oxide sources and sinks. *Nature* 586: 248-256. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2780-0>
50. Tikkasalo O.-P., Peltola O., Alekseychik P., Heikkinen J., Launiainen S., Lehtonen A. et al. 2025. Eddy-covariance fluxes of CO₂, CH₄ and N₂O in a drained peatland forest after clear-cutting. *Biogeosciences* 22: 1277-1300. <https://doi.org/10.5194/bg-22-1277-2025>
51. Tong C.H.M., Nilsson M. B., Sikström U., Ring E., Drott A., Eklöf K. et al. 2022. Initial effects of post-harvest ditch cleaning on greenhouse gas fluxes in a hemiboreal peatland forest. *Geoderma* 426: 116055. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.116055>
52. Vermaat J.E., Hellmann F., Dias A.T.C., Hoorens B., Van Logtestijn R.S.P., Aerts R. 2011. Greenhouse gas fluxes from Dutch peatland water bodies: importance of the surrounding landscape. *Wetlands* 31: 493-498. <https://doi.org/10.1007/s13157-011-0170-y>
53. Wang X., Wang C. and Bond-Lamberty B. 2018. Quantifying and reducing the differences in forest CO₂-fluxes estimated by eddy covariance, biometric and chamber methods: A global synthesis. *Agricultural and Forest Meteorology* 247: 93-103. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.07.023>
54. Wutzler T., Reichstein M., Moffat A.M., Migliavacca M. 2025. REdDyProc: Post Processing of (Half) Hourly Eddy-Covariance Measurements. R package version 1.3.4. <https://doi.org/10.32614/CRAN.package.REddyProc>
55. Yu L., Zhang Q., Tian Y., Sun W., Scheer C., Li T., Zhang W. 2022. Global variations and drivers of nitrous oxide emissions from forests and grasslands. *Frontiers in Soil Science* 2: 1094177. <https://doi.org/10.3389/fsoil.2022.1094177>