



KOPSAVILKUMS

Pētījuma ceturtajā etapā 2024. gadā īstenoti darba uzdevumi septiņās aktivitātēs:

- **SEG inventarizācijas un prognožu datu modelēšanas rīku pilnveidošana.** Izstrādāta dominējošo koku sugu izplatības karte visai valsts teritorijai un veikta biomasas un oglekļa uzkrājuma aprēķins sugu griezumā, izmantojot 2022. gadā un 2023. gadā izmantoto un aprobēto metodiku. Pilnveidota metodika un sagatavoti aprēķiniem nepieciešamie darbību dati zemes izmantošanas un zemes izmantošanas maiņas raksturošanai.
- **Trupes ietekmes uz oglekļa uzkrājumu dzīvo koku biomasā modelēšana.** Ievākti paraugi trupes izplatības un sastopamības novērtēšanai egles un priedes audzēs, izmantojot lapu koku audzēs aprobēto metodiku. Veikta trupes ietekmētā laukuma noteikšana, analizējot koku šķērsriezuma ripas. Veiktas koksnes blīvuma un C un N satura analīzes koksnes paraugos un trupes ietekmes uz dzīvo koku biomasu analīze. Pilnveidota metodika koku biomasas aprēķiniem Latvijas nacionālajā SEG inventarizācijas ziņojumā un prognožu ziņojumos, kā arī vērtēta trupes ietekme uz kokmateriālu ar ilgu kalpošanas termiņu iznākumu un SEG emisijām.
- **SEG emisiju samazināšana meža apsaimniekošanā klimata pārmaiņu mazināšanas kontekstā.** Pilnveidota metodika jaunaudžu kopšanas ciršu īstermiņa ietekmes uz SEG emisijām raksturošanai un rekomendāciju sagatavošana šīs darbības īstenošanai nacionālo klimata instrumentu ietvaros; pilnveidota metodika lauksaimniecības zemju apmežošanas ietekmes uz SEG emisijām prognozēšanai, tajā skaitā vērtēti augsnes oglekļa krātuves modelēšanas risinājumi; turpināta metodikas pilnveidošana mērķtiecīgas meža atjaunošanas ar selekcionētu stādmateriālu ietekmes uz SEG emisijām prognozēšanai. Pabeigta gāzu apmaiņas datu un vides parametru iegūšana platībās, kur veikta pakāpeniskā cirte, un kontroles platībās; pabeigta gāzu apmaiņas datu un vides parametru iegūšana iepriekš ierīkotajos izpētes objektos, kur augsnes sagatavošana veikta ar ekskavatoru; un gāzu apmaiņas datu un vides parametru iegūšana izcirtumos slapjajņos un purvainos. Sagatavota publikācija par mežizstrādes īstermiņa ietekmi uz SEG emisijām no augsnes slapjajņos un purvainos; turpināta vienādojumu sagatavošana augsnes sagatavošanas ietekmes uz SEG emisijām novērtēšanai.
- **Meža ieaudzēšanas un kokaugu stādījumu ierīkošanas meliorācijas sistēmu buferjoslās ietekmes uz SEG emisijām un CO₂ piesaisti izpēte.** Pabeigta gāzu apmaiņas un vides parametru mērījumi apmežotā platībā kūdras slāņa biezuma ietekmes raksturošanai, kā arī gāzu apmaiņas un vides parametru mērījumi pārslapinātās un apmežotās pļavās ietekmes uz emisijām no augsnes prognozēšanai; sadarbībā ar Meža pētīšanas staciju ierīkots izpētes objekts meža ieaudzēšanas (koku sugas un stādīšanas biezums) ietekmes uz dažādām oglekļa krātuvēm raksturošanai. Sagatavota publikācija par apmežotu pļavu pārslapināšanas īstermiņa ietekmi uz SEG emisijām no augsnes un uzsākta gāzu apmaiņas mērījumu rezultātu apkopošana un sākotnējo rezultātu analīze. Sadarbībā ar ZS “Andrupēni” ierīkotajā kokaugu stādījumā veikts ieaugšanās un augšanas gaitas novērtējums, kā arī īstenoti koku aizsardzības pasākumi. Sadarbībā ar Meža pētīšanas staciju ierīkots kokaugu stādījums ietekmes uz SEG emisijām raksturošanai, taču pavasara plūdu rezultātā lielākā daļa stādījuma gāja bojā, un 2025. gadā plānota tā atjaunošana. Sagatavots populārzinātnisks raksts par SEG emisiju samazināšanu zemes sektorā, Youtube vietnē publicēts video par klimata pārmaiņu mazināšanas darbībām mežsaimniecībā, kā arī LVMI Silava Youtube vietnē publicēts raidieraksts par kokaugu stādījumiem nemeža zemēs.
- **Meža resursu izmantošanas efektivitātes palielināšana klimata pārmaiņu mazināšanai.** Turpināta kokmateriālu iznākuma sadalījuma prognozēšanas algoritmu

pilnveidošana aprēķinu precizitātes uzlabošanai un aprēķinu vienkāršošanai, apvienojot dažādus kokmateriālu veidus, un priekšlikumu sagatavošana izstrādāto algoritmu iekļaušanai nacionālajā SEG prognožu sistēmā. Pabeigti gāzu apmaiņas mērījumi iepriekš ierīkotajos izpētes objektos platībās ar kūdras augsnēm, lai raksturotu risu ietekmi uz SEG emisijām. Uzsākta gāzu apmaiņas un vides parametru mērījumu rezultātu analīze un sākotnējais vērtējums; kā arī risu uzskaites un raksturošanas metodes pilnveidošana un validācija un priekšlikumu sagatavošana risu ietekmes uz SEG emisijām darbību datu ieguvei ražošanas apstākļos.

- **Meliorācijas sistēmu apsaimniekošanas plānošanas sistēma.** Pabeigti ietekmes uz SEG emisijām no augsnes novērojumi purvaiņos, kur pēc galvenās cirtes veikta augsnes sagatavošana ar ekskavatoru un ierīkotas dziļvagas ūdens novadīšanai; uzsākta iegūto gāzu apmaiņas mērījumu rezultātu analīze, un sagatavotas divas zinātniskas publikācijas par meliorācijas ietekmi uz SEG emisijām no augsnes āreņos un slapjainos. Turpināta evapotranspirācijas un citu darbību datu pielietošanas iespēju izpēte ūdens noteces un netiešo SEG emisiju novērtēšanai.
- **Oglekļa bilance vecās mežaudzēs.** Izmantojot 2024. gadā iegūtos datus, turpināta vienādojumu pilnveidošana oglekļa aprites raksturošanai lapu koku audzēs un uzsākta zinātniskas publikācijas sagatavošana par oglekļa bilanci vecās audzēs.

Pētījums īstenots Latvijas Valsts mežzinātnes institūta “Silava” (LVMI Silava) un AS “Latvijas valsts meži” (LVM) 2021. gada 13. septembra sadarbības līguma ietvaros un saskaņā ar LVMI Silava un LVM līgumu Nr. 5_5.9.1_0081_101_21_87 par pētījumu programmas “Oglekļa aprite meža ekosistēmā” īstenošanu. Empīrisku datu analīzi un starpziņojuma sagatavošanu 2023. gadā nodrošināja LVMI Silava pētnieki Ā. Jansons, D. Lazdiņa, A. Lazdiņš, J. Liepiņš, A. Butlers, D. Purviņa, G. Petaja, J. Ivanovs, R.N. Meļņiks, I. Līcīte, E. Muižnieks, M. Vanags Duka.

SUMMARY

During the fourth stage of the study the following tasks were implemented in seven actions:

- **Improvement of GHG inventory and projecting tools.** A map of the distribution of the dominant tree species for the entire territory of the country has been developed and a calculation of biomass and carbon accumulation has been made by the tree species, using the methodology approved earlier.
- **Modelling of heart rot effects on carbon accumulation in biomass of living trees.** Samples were collected and analysed for the assessment of heart rot distribution and occurrence in spruce and pine forests, using the methodology approved in deciduous tree stands. Determination of the stem area affected by the heart rot was carried out by analysing the cross-section logs of the trees. Analyses of wood density and C and N content in wood samples and the analysis of the impact of the heart rot in the biomass of living trees have been completed. The improvement of the methodology for tree biomass calculations in Latvia's national GHG inventory and forecast reports has been proposed, as well as the improvement of the equations for evaluating the effects of the tree species on GHG emissions of the impact of the tree species on products with a long life span on GHG emissions.
- **Reduction of GHG emissions in forest management in the context of climate change mitigation.** Improved methodology for characterizing the short-term impact of harvesting on GHG emissions from soil and elaboration of recommendations for the implementation of this measure within the framework of national climate instruments; improved methodology for forecasting the impact of afforestation of agricultural lands on GHG emissions, including the evaluation of possibilities to improve the methodology for soil carbon storage modelling; improvement of the methodology for forecasting the impact of artificial forest regeneration with improved planting material on the GHG emissions. Completed acquisition of GHG flux data and environmental parameters in the areas where gradual felling was carried out and in the control areas; completed acquisition of GHG flux data and environmental parameters in areas, where soil preparation was done with an excavator; and acquisition of GHG flux data and environmental parameters in forests with wet soil. A publication was elaborated on the short-term impact of logging on GHG emissions from soil in forests with wet organic soils; preparation of equations for evaluating the impact of soil preparation on GHG emissions has been started.
- **Study of the impact of afforestation and establishment of tree plantations in the buffer zones of drainage systems on GHG emissions and CO₂ removals.** Completed measurements of GHG fluxes and environmental parameters in afforested area to characterize the influence of the thickness of the peat layer; as well as measurements of gas exchange and environmental parameters for predicting the impact of rewetting of afforested meadows on the GHG emissions from the soil; in cooperation with the Forest Research Station a research object was established to characterize the effect of afforestation (tree species and planting density) on various carbon pools. A publication has been prepared on the short-term effects of rewetting of afforested meadows on GHG emissions from soil, and the analysis of collected GHG flux measurements and of the preliminary results have been started. In cooperation with ZS "Andrupēni" the assessment of the establishment and growth of tree plants was carried out, as well as the protective measures were implemented. In cooperation with the Forest Research Station a shelter belt of woody plants was established to characterize the impact on GHG emissions, but as a result of the spring floods most of the plantation died and it is planned to restore it in 2025. A popular scientific article on the potential reduction of GHG emissions in the land sector has been prepared, a

video on climate change mitigation activities in forestry has been published on the YouTube, as well as a broadcast on tree plantations in non-forest lands has been published on the YouTube site of LSFRI Silava.

- **Increasing the efficiency of the use of forest resources for mitigating climate change.** The improvement of timber yield distribution forecasting algorithms has been continued to improve the accuracy and to simplify calculations by combining different types of timber, as well as the preparation of proposals for including the developed algorithms in the national GHG forecasting system. Measurements of GHG flux were completed in previously established research objects in areas with peat soils to characterize the impact of ruts on GHG fluxes, control measurements of the depth and distribution of ruts in the field were carried out in cooperation with the forest work mechanization research program. The analysis and preliminary evaluation of the results of measurements of gas exchange and environmental parameters has been continued.
- **Management planning system of drainage systems.** Continued observations of the impact on GHG emissions from the soil in forests with wet organic soil, where after the main felling the soil was prepared with an excavator and deep furrows were dug for releasing of exceeding water; the analysis of the results of the obtained GHG flux measurements has been started and two scientific papers have been prepared on the effect of drainage on GHG emissions from soil in drained and wet areas with mineral soils.
- **Carbon balance in old forest stands.** Using the data obtained in 2024, the improvement of the equations for characterizing the carbon turnover in deciduous tree stands has been continued and the preparation of a scientific publication on the carbon balance in old stands has been started.

The research is being implemented within the scope of the collaboration agreement from September 13, 2021 between the Latvian State Forest Research Institute “Silava” (LSFRI Silava) and Joint stock company “Latvia’s state forests” (LVM) and according to the agreement between LSFRI Silava and LVM No. 5_5.9.1_0081_101_21_87 on implementation of the research program “Research program on carbon turnover in forest ecosystem”. Empirical data analysis and elaboration of the interim report in 2023 were implemented by the LSFRI Silava researchers Ā. Jansons, D. Lazdiņa, A. Lazdiņš, J. Liepiņš, A. Butlers, D. Purviņa, G. Petaja, J. Ivanovs, R.N. Meļņiks, I. Līcīte, E. Muižnieks, M. Vanags Duka.

Saturs

1. Mežaudžu oglekļa piesaistes un uzkrājuma aprēķina metodika LVM apsaimniekotajiem mežiem	16
2. SEG inventarizācijas un prognožu datu modelēšanas rīku pilnveidošana	17
2.1. Metodikas izstrādāšana koku sugu sastāva telpiskās izplatības novērtēšanai Latvijas teritorijā un oglekļa uzkrājuma dinamikas modelēšanai, izmantojot attālās izpētes datus un mašīnmācības metodes	17
2.1.1. Metodika	17
2.1.2. Rezultāti	18
2.1.3. Secinājumi	20
2.2. Metodikas koku sugu sastāva telpiskās izplatības novērtēšanai integrēšana SEG inventarizācijas un prognožu sistēmā	21
2.2.1. Pagaidu secinājumi	29
3. Trupes ietekmes uz oglekļa uzkrājumu dzīvo koku biomasā modelēšana	30
3.1. Izstrādāt metodi un novērtēt trupes ietekmi uz oglekļa uzkrājumu dzīvajā biomasā LVM apsaimniekotajos mežos	30
3.1.1. Metodika	30
3.1.2. Rezultāti un to analīze	34
Trupējušas koksnes izplatība un to ietekmējošie faktori	34
Trupējušo koku sastopamība priežu audzēs	35
Trupējušo koku sastopamība egļu audzēs	36
Serdes trupes ietekme uz koksnes blīvumu, oglekļa un slāpekļa saturu	38
Serdes trupes ietekme uz stumbra biomasas aprēķiniem	41
Kopsavilkums	43
3.2. Izstrādāt oglekļa uzkrājuma izmaiņu prognozes trupes ietekmē pie dažādiem meža apsaimniekošanas scenārijiem	43
3.3. Novērtēt trupes ierobežošanas darbību ietekmi uz SEG emisijām un CO ₂ piesaisti meža zemēs	49
4. SEG emisiju samazināšana meža apsaimniekošanā klimata pārmaiņu mazināšanas kontekstā	54
4.1. Esošo modeļteritoriju un pētījumu apzināšana un ietekmes uz oglekļa uzkrājumu un SEG emisijām apzināšana	54
4.1.1. Jaunaudžu kopšanas cirtes	54
4.1.2. Metodikas pilnveidošana mērķtiecīgas meža atjaunošanas ar selekcionētu stādmateriālu ietekmes uz SEG emisijām prognozēšanai	57
4.2. Jaunu izpētes objektu ierīkošana klimata pārmaiņu mazināšanas darbību īsterniņā un ilgtermiņa ietekmes novērtēšanai	59
4.2.1. Pakāpenisko ciršu ietekmes uz SEG emisijām	60
4.2.2. Kūdras augsnes sagatavošana ar ekskavatoru ietekme uz augsnes SEG emisijām	63
4.2.3. SEG emisijām no augsnes slapjainos un purvainos	71
4.3. Klimata pārmaiņu mazināšanas darbību kataloga mežsaimniecībai izstrādāšana	76
5. Meža ieaudzēšanas un kokaugu stādījumu ierīkošanas meliorācijas sistēmu buferjoslās ietekmes uz SEG emisijām un CO₂ piesaisti izpēte	78
5.1. Eksperimentālo stādījumu ierīkošana un esošo apmežojumu apzināšana meža ieaudzēšanas un kokaugu stādījumu ietekmes uz SEG emisijām un CO ₂ piesaisti demonstrēšanai minerālaugsnēs un organiskajās augsnēs	78
5.1.1. Kūdras slāņa biezuma ietekme uz SEG emisijām apmežotās teritorijās	78
5.1.2. Pārslapināšanas ietekme uz SEG emisijām no augsnes apmežotos zālajos	85
5.1.3. Priedes, egles, bērza un melnalkšņa stādījumi attāluma starp kokiem ietekmes uz	

oglekļa uzkrājumu novērtēšanai.....	92
5.2. Eksperimentālu kokaugu stādījumu ierīkošanas meliorācijas sistēmu buferjoslās LIZ ar organiskam augsnēm un minerālaugsnēm	99
5.3. Sabiedrības informēšanas materiālu sagatavošana par meža ieaudzēšanas un citu darba uzdevumā iekļauto darbību ietekmi uz SEG emisijām	104
6. Meža resursu izmantošanas efektivitātes palielināšana klimata pārmaiņu mazināšanai ...	106
6.1. Kokmateriālu iznākuma sadalījuma prognozēšanas algoritmu pilnveidošana	106
6.1.1. Metodika	106
6.1.2. Rezultāti	108
6.1.3. Secinājumi.....	109
6.2. Mežizstrādes metožu ietekmes uz SEG emisijām ietekmes novērtēšana modelēšana	109
6.2.1. SEG emisijas no risēm izcirtumos ar organiskajām augsnēm	109
6.2.2. SEG emisijas no risēm izcirtumos ar minerālaugsnēm	112
6.2.3. Metode risu attālinātai raksturošanai	114
Metodika.....	115
Rezultāti.....	116
Secinājumi	117
7. Meliorācijas sistēmu apsaimniekošanas plānošanas sistēma.....	119
7.1. Empīrisku datu ieguve un metodikas izstrādāšana meliorācijas sistēmu ietekmes uz SEG emisijām no augsnes un CO ₂ piesaisti modelēšanai minerālaugsnēs un organiskās augsnēs	119
7.1.1. Dziļvagu ierīkošanas ietekme uz SEG emisijām mežos ar pārmitrām organiskām augsnēm.....	119
7.1.2. SEG emisiju salīdzinājums pārmitrās un meliorētās minerālaugsnēs	122
7.2. Lēmuma pieņemšanas atbalsta rīka izstrādāšana meliorācijas sistēmu uzturēšanai un modernizēšanai	123
7.2.1. Metodika	123
7.2.2. Rezultāti	123
7.2.3. Secinājumi un rekomendācijas.....	126
7.3. Izstrādāt modelēšanas instrumentus Hg, SEG emisiju un biogēno elementu izneses aprēķiniem	126
7.3.1. Metodika	127
7.3.2. Rezultāti	128
Slāpekļis, fosfors un kālijs.....	128
Dzīvsudrabs	129
Secinājumi	130
8. Oglekļa bilance vecās mežaudzēs	131
8.1. Empīrisku datu ieguve un vienādojumu izstrādāšana oglekļa aprites un SEG emisiju raksturošanai bioloģiski vecās un pieaugušās audzēs kūdreņos	131

Attēli

Att. 2.1. Virszemes biomasas karte	18
Att. 2.2. Pazemes biomasas karte	19
Att. 2.3. Stumbru biomasas karte	19
Att. 2.4. Uz pirmā ALS ciklu balstītā virszemes biomasas prognožu modeļa veikspēja meža nogabala līmenī	20
Att. 2.5. Uz otrā ALS ciklu balstītā virszemes biomasas prognožu modeļa veikspēja meža nogabala līmenī	20
Att. 2.6. Meža resursu monitoringa izvietojums valsts teritorijā.....	22

Att. 2.7. MRM parauglaukuma piemēri, ja tie ir sadalīti (A) vai nesadalīti (B)	24
Att. 2.8. Datu apstrādes darba blokshēma	25
Att. 2.9. Kopējais MRM nesadalīto parauglaukumu skaits	26
Att. 2.10. Zemes izmantošanas kategoriju datu klasificēšanas precizitāte	27
Att. 2.11. Zemes klasificēšanas rezultātu kartes salīdzinājums pret ortofoto.....	28
Att. 3.1. Trupes bojāto koku diagnosticēšana: a) koka urbšana ar rezistogrāfu; b) mērījums neuzrāda trupes klātbūtni; c) mērījums uzrāda potenciālu serdes trupī	32
Att. 3.2. Trupes attīstības stadijas stumbra šķēsgriezuma ripās: a) iekrāsojusies koksne, mīkstā trupe un dobums; b) iekrāsojusies koksne un mīkstā trupe; c) iekrāsojusies koksne.....	33
Att. 3.3. Trupējušo koksnes paraugu apstrāde laboratorijā: a) blīvuma noteikšana; b) paraugu žāvēšana; c) paraugu samalšana pulverī, lai noteiktu C un N saturu	33
Att. 3.4. Laboratoriski apstiprinātas sakņu trupes inficētas parastās priedes: a) ar saknēm izgāzies koks, zaļas skujas; b) ar saknēm izgāzies koks, nav zaļu skuju; c) nokaltis, stāvošs koks	35
Att. 3.5. Trupējušo koku īpatsvars egļu audzēs. Laukums starp punktētām līnijām norāda uz 95% ticamības intervālu.....	36
Att. 3.6. Trupējušo koku īpatsvars dažādos meža tipos atkarībā no audzes vecuma	37
Att. 3.7. Celmu diametru salīdzinājums veselām un trupējušām eglēm.....	38
Att. 3.8. Vidējā trupes diametra celma augstumā izmaiņas, palielinoties audzes vecumam.....	38
Att. 3.9. Egles reducētā blīvuma ($t\ m^{-3}$) un oglekļa satura ($mg\ g^{-1}$) izmaiņas atkarībā no koksnes klasifikācijas (netrupējusi koksne, iekrāsojums vai mīkstā trupe)	39
Att. 3.10. Egles slāpekļa satura ($mg\ g^{-1}$) izmaiņas atkarībā no koksnes klasifikācijas (netrupējusi koksne, iekrāsojums vai mīkstā trupe)	40
Att. 3.11. Priedes reducētā blīvuma ($t\ m^{-3}$), oglekļa satura ($mg\ g^{-1}$) un slāpekļa satura ($mg\ g^{-1}$) izmaiņas atkarībā no koksnes klasifikācijas (netrupējusi koksne, iekrāsojums vai mīkstā trupe).....	41
Att. 3.12. Prognozētais atsevišķu stumbru biomasas samazinājums, atkarībā no trupes diametra uz celma virsmas. Laukums starp punktētām līnijām norāda uz 95% ticamības intervālu	41
Att. 3.13. Prognozētais stumbra biomasas samazinājums egļu audzēs atkarībā no audzes vecuma. Laukums starp punktētām līnijām norāda uz 95% ticamības intervālu.....	42
Att. 3.14. Stumbra biomasas zudumu prognoze, atkarībā no iekrāsojuma vai mīkstās trupes diametra	51
Att. 4.1. Oglekļa papilduzkrājums (%) pēc kopšanas.....	55
Att. 4.2. Paredzamais augstuma pieaugums vispiemērotākajiem modeļiem.....	59
Att. 4.3. SEG emisijas no augsnes atkarībā no circes veida.....	62
Att. 4.4. Augsnes SEG emisijas atkarībā no circes vaida un kalendārā mēneša	62
Att. 4.5. Augsnes kopējā elpošana atkarībā no gaisa temperatūras un circes veida.....	63
Att. 4.6. Biogēno elementu uzkrājums atjaunotās platībās.....	64
Att. 4.7. Slāpekļa (A) un izšķīdušā organiskā oglekļa (B) koncentrāciju variācija augsnes ūdenī atjaunotās platībās	65
Att. 4.8. Slāpekļa (A) un izšķīdušā organiskā oglekļa (DOC) (B) koncentrācijas izmaiņas augsnes ūdenī atjaunotās platībās.....	66
Att. 4.9. Slāpekļa (A) un DOC (B) koncentrācijas izmaiņu tendences augsnes ūdenī atjaunotās platībās.....	67
Att. 4.10. Augsnes kopējā elpošana kontroles mērījumu vietās dažādos mēnešos pirms un pēc augsnes sagatavošanas	67
Att. 4.11. Vidējās augsnes kopējā elpošanas radītās SEG emisijas kontroles mērījumu vietās pirms un pēc augsnes sagatavošanas	68
Att. 4.12. Augsnes CH_4 (A) un N_2O (B) emisijas pirms un pēc augsnes sagatavošanas	68
Att. 4.13. Augsnes kontroles mērījumu SEG emisijas (B) un to ikmēneša dinamika (A)	69
Att. 4.14. Augsnes CO_2 (A), CH_4 (B), N_2O (C) un SEG emisijas CO_2 ekvivalentos (D) kontroles,	

bedres un pacilas mērījumu punktos atkarībā no mēneša.....	70
Att. 4.15. Augsnes SEG emisijas CO ₂ ekvivalentos no bedrēm, pacilām un kontroles punktos	71
Att. 4.16. Augsnes CO ₂ emisijas pirms un pēc atjaunošanas cirtes.....	72
Att. 4.17. Augsnes CO ₂ emisijas pirms un pēc atjaunošanas cirtes purvaiņos un slapjainos	73
Att. 4.18. Augsnes CH ₄ emisijas pirms un pēc atjaunošanas cirtes.....	73
Att. 4.19. Augsnes CH ₄ emisijas pirms un pēc atjaunošanas cirtes purvaiņos un slapjainos	74
Att. 4.20. Augsnes N ₂ O emisijas pirms un pēc atjaunošanas cirtes	74
Att. 4.21. Augsnes N ₂ O emisijas pirms un pēc atjaunošanas cirtes purvaiņos un slapjainos.....	75
Att. 4.22. Augsnes SEG emisijas pirms un pēc atjaunošanas cirtes purvaiņos un slapjainos	76
Att. 5.1. CO ₂ apmaiņas variācija dažādās mērījumu vietās (neskarta platība, uz pacilas, bedrē) pirms un pēc apmežošanas atkarībā no sezonas (pavasaris, vasara, rudens, ziema) un kūdras slāņa biezuma parauglaukumā	81
Att. 5.2. CH ₄ apmaiņas variācija dažādās mērījumu vietās (neskarta platība, uz pacilas, bedrē) pirms un pēc apmežošanas atkarībā no sezonas (pavasaris, vasara, rudens, ziema) un kūdras slāņa biezuma parauglaukumā	82
Att. 5.3. N ₂ O apmaiņas variācija dažādās mērījumu vietās (neskarta platība, uz pacilas, bedrē) pirms un pēc apmežošanas atkarībā no sezonas (pavasaris, vasara, rudens, ziema) un kūdras slāņa biezuma parauglaukumā	83
Att. 5.4. Spīrmena korelācijas koeficientu (ρ) matrica, kas atspoguļo sakarības starp SEG apmaiņas intensitāti un dažādiem vides parametriem neskartā platībā	84
Att. 5.5. Sakarības starp CO ₂ apmaiņas intensitāti un augšnes temperatūru 10 cm dziļumā neskartā platībā atkarībā no kūdras slāņa biezuma	84
Att. 5.6. Gruntsūdens līmeņa variācija pārslāpinātās un apmežotās pļavās (Rucava_1, Rucava_2, Smiltene_1) dažādās sezonās (pavasaris, vasara, rudens, ziema).....	86
Att. 5.7. CO ₂ apmaiņas variācija no augšnes neskartā platībā (kontroles punktos) pārslāpinātās un apmežotās pļavās dažādās sezonās (pavasaris, vasara, rudens, ziema).....	88
Att. 5.8. CH ₄ apmaiņas variācija no augšnes neskartā platībā (kontroles punktos) pārslāpinātās un apmežotās pļavās dažādās sezonās (pavasaris, vasara, rudens, ziema).....	89
Att. 5.9. N ₂ O apmaiņas variācija no augšnes neskartā platībā (kontroles punktos) pārslāpinātās un apmežotās pļavās dažādās sezonās (pavasaris, vasara, rudens, ziema).....	90
Att. 5.10. Spīrmena korelācijas koeficientu (ρ) matrica, kas atspoguļo sakarības starp SEG apmaiņas intensitāti un dažādiem vides parametriem neskartā platībā	91
Att. 5.11. Sakarības starp CO ₂ apmaiņas intensitāti un augšnes temperatūru 10 cm dziļumā neskartā platībā dažādos objektos.....	91
Att. 5.12. CH ₄ apmaiņas variācija no augšnes neskartā platībā (kontroles punktos) pārslāpinātās un apmežotās pļavās atkarībā no gruntsūdens līmeņa	92
Att. 5.13. <i>MPS Mežole, Kapusila karjerā ierīkoto stādījuma shēma</i>	93
Att. 5.14. MPS Mežole, Kapusila karjerā stādītās egles un melnalkšņi 2024. gada vasarā	96
Att. 5.15. InBestSoil ierīkotie augšnes monitoringa punkti MPS Mežole, Kapusila karjerā (LVMGEO veģetācijas slānis un biotopi)	98
Att. 5.16. Kalsnavas stādījums ar garajiem un īsajiem spraudņiem 2023. gada vasarā	100
Att. 5.17. Situācija MPS Kalsnava stādījumā 2023. gada veģetācijas sezonā	100
Att. 5.18. Izmēģinājumu objekts pēc apauguma novākšanas, 2024. gada marts.....	101
Att. 5.19. <i>Situācija izmēģinājumu objektā 2024. gada pavasarī (2024. gada 6.marts, applūduši stādījuma daļa)</i>	101
Att. 5.20. <i>Salix alba</i> garie spraudņi un veģetācijas traukos pieaudzēti spraudņstādi	102
Att. 5.21. Situācija MPS Kalsnava izmēģinājumos 2024. gada pavasarī un vasarā.....	103
Att. 5.22. Līdz šim ierīkoto izmēģinājumu stādījumu shēma.....	103
Att. 5.23. LIFE OrgBalt konferencē demonstrētā platība 2017. un 2024. gadā	104
Att. 5.24. Ekrānšāviņš no video stāsta.....	105

Att. 6.1. Augsnes heterotrofās elpošanas mērījumu vidējās vērtības atkarībā no mērījuma mēneša	110
Att. 6.2. Augsnes – atmosfēras CH ₄ emisiju mērījumu vidējās vērtības atkarībā no mērījuma mēneša	111
Att. 6.3. Augsnes – atmosfēras N ₂ O emisiju mērījumu vidējās vērtības atkarībā no mērījuma mēneša	111
Att. 6.4. Gruntsūdens līmeņa ikmēneša izmaiņas	112
Att. 6.5. Risu identificēšanas piemērs izmantojot LGIA datus	115
Att. 6.6. Risu klasifikācijas piemērs izmantojot DEM šķēršprofilus	116
Att. 7.1. Gruntsūdens līmenis pirms un pēc dziļvagu ierīkošanas	120
Att. 7.2. Augsnes SEG emisijas pirms un pēc dziļvagu ierīkošanas atkarībā no mēneša	120
Att. 7.3. Augsnes CO ₂ emisiju tendences pirms un pēc dziļvagu ierīkošanas	121
Att. 7.4. Augsnes SEG emisijas pirms un pēc dziļvagu ierīkošanas izmēģinājumu objektos	121
Att. 7.5. Vidējās augsnas SEG emisijas pirms un pēc dziļvagu ierīkošanas izmēģinājumu objektos	122
Att. 7.6. Sākotnējais gruntsūdens dziļuma (DTW) modelis MPS paraugteritorijās	123
Att. 7.7. Augšdaļā – esošie meliorācijas grāvji dažādos datu avotos abās paraugteritorijās. Fona karte – DEM ēnojums. Lejasdaļā – esošie un modelētie meliorācijas grāvji uz emisijas akumulācijas modeļa fona	124
Att. 7.8. GŪ dziļuma salīdzinājums DTW modelī abās paraugteritorijās, izmantojot modelēto (attēla augšējā daļa) un faktiski izveidoto meliorācijas grāvju (attēla lejasdaļa) izvietojumu	125
Att. 7.9. GŪ dziļuma un tā telpiskā sadalījuma izmaiņu DTW modelī histogramma, izmantojot modelēto un faktisko grāvju izvietojumu, salīdzinājumā ar sākotnējo DTW modeli	126
Att. 7.10. Slāpekļa, fosfora, kālija koncentrācijas un mēneša noteces mainība	129
Att. 7.11. Slāpekļa, fosfora, kālija gada notece pētījuma objektos ar dažādiem zemes izmantošanas veidiem 2022. gadā	129
Att. 8.1. Pētāmo objektu izvietojums	131
Att. 8.2. Vidējais oglekļa (C) uzkrājums šaurlapu kūdrēnī dažādās koka frakcijās un atmirušajā koksne ($\pm 95\%$ ticamības intervāls)	132
Att. 8.3. Vidējais C uzkrājums dažādās atmirušās koksnes frakcijās ($\pm 95\%$ ticamības intervāls) ..	133
Att. 8.4. Ikgadējais C uzkrājums biomasā un atmirušajā koksne atkarībā no audzes vecuma vecās audzēs (pelēkais iekrāsojums apzīmē $\pm 95\%$ ticamības intervālu)	134
Att. 8.5. Kopējais C uzkrājums biomasā un atmirušajā koksne atkarībā no audzes vecuma vecās un jaunākās melnalkšņu audzēs (pelēkais iekrāsojums apzīmē $\pm 95\%$ ticamības intervālu) 135	
Att. 8.6. Ikgadējais C uzkrājums biomasā un atmirušajā koksne atkarībā no audzes vecuma vecās un jaunākās melnalkšņu audzēs (pelēkais iekrāsojums apzīmē $\pm 95\%$ ticamības intervālu) 135	
Att. 8.7. Augsnes paraugu ievākšanas process	137

Tabulas

Tab. 2.1. Mašīnmācīšanās modeļu precizitāte	18
Tab. 2.2. MRM nacionālā zemes izmantošanas kategorijas un to iedalījums pēc IPCC kritērijiem ..	22
Tab. 2.3. <i>True grid</i> parametru vērtības	26
Tab. 2.4. MRM parauglaukumu klasificēšanas kļūdu matrica (pareizi klasificēto parauglaukumu skaits iezīmēts tabulā)	27
Tab. 3.1. Atlasītās audzes trapes ietekmes izvērtēšanai ar rezistogrāfu	31
Tab. 3.2. Trupējušo egļu raksturojums	34
Tab. 3.3. Regresijas vienādojuma 3.2. koeficientu vērtības (Liepiņš et al., 2022)	44
Tab. 3.4. Oglekļa saturs koksne, g kg ⁻¹ (Bārdule et al., 2021)	45

Tab. 3.5. Vienādojumi oglekļa zudumu aprēķiniem no koku stumbra.....	45
Tab. 3.6. Kokmateriālu iznākuma aprēķinu vienādojuma koeficienti.....	46
Tab. 3.7. Relatīvais stumbra biomasas samazinājums trupējušos kokos.....	50
Tab. 3.8. Faktiskais stumbra biomasas samazinājums trupējušos kokos	50
Tab. 3.9. Aprites ilguma izmaiņu ietekme uz SEG emisiju samazinājumu bērza, melnalkšņa un egles audzēs	52
Tab. 3.10. Aprites ilguma izmaiņu ietekme uz SEG emisiju samazinājumu apses audzēs	53
Tab. 3.11. Aprites ilguma izmaiņu ietekme uz SEG emisiju samazinājumu baltalkšņa audzēs	53
Tab. 4.1. Koeficientu vērtības kumulatīvā stumbra tilpuma papildu pieauguma aprēķiniem.....	57
Tab. 4.2. Oglekļa satura koeficienti koku biomasā (virszemes/pazemes) dažādām koku sugām Latvijā, g kg ⁻¹ (Bārdule et al., 2021)	57
Tab. 4.3. Gāzu apmaiņas mērīšanas parauglaukumi cirtes veida ietekmes raksturošanai.....	60
Tab. 4.4. Gāzu apmaiņas mērīšanas parauglaukumi atjaunotās platībās	63
Tab. 4.5. CH ₄ un N ₂ O emisijas kontroles mērījumu vietās	69
Tab. 4.6. Gāzu apmaiņas mērīšanas parauglaukumi izcirtumos slapjainos un purvainos.....	71
Tab. 5.1. Objekta LVMCA_P3 (apmežojums Ķeguma apkārtnē) raksturojums.....	78
Tab. 5.2. Dažādu augsnes slāņu (0-20 cm, 20-50 cm un 50-100 cm) fizikāli ķīmisko īpašību raksturojums pētījuma objektā LVMCA_P3 (apmežojums Ķeguma apkārtnē).....	79
Tab. 5.3. Ekosistēmas SEG apmaiņas mērījumu kopsavilkums pētījuma objektā LVMCA_P3 (apmežojums Ķeguma apkārtnē)	80
Tab. 5.4. Izpētes objekti, kuros novērtēta pārslapināšanas ietekme uz SEG emisijām	85
Tab. 5.5. Ekosistēmas SEG apmaiņas mērījumu kopsavilkums pētījuma objektos pārslapinātās un apmežotās pļavās (Rucava_1, Rucava_2, Smiltene_1)	86
Tab. 5.6. <i>Mistrojumi un koku izvietojums Neldera apļos</i>	93
Tab. 5.7. Pētījumu programma ietvaros ierīkotās buferjoslas un to saglabāšanās, %	94
Tab. 5.8. Pētījuma "Inovatīvs mikroorganismus saturošs organiskais mēslošanas līdzeklis" ietvaros ierīkotie stādījumi	94
Tab. 5.9. Pētījuma "Koksnes šķiedras kūdras substrātu īpašību uzlabošanai un ekoloģiskās pēdas mazināšanai" ietvaros ierīkotie stādījumi.....	95
Tab. 5.10. Pētījuma "Jaunaudžu mehāniskās aizsardzības līdzekļu izstrāde no aitu vilnas" ietvaros ierīkotie stādījumi	95
Tab. 5.11. Neldera apļos stādīto koku augstums cm 2024 . gada nogalē	96
Tab. 5.12. Kapusila karjera augsnes un pieguļošas mežaudzes kopējais C un N un augsnes blīvums.....	98
Tab. 6.1. Apaļo kokmateriālu sortimentu apvienotās grupas	106
Tab. 6.2. Apaļo kokmateriālu sortimentu grupu prognožu precizitāte	108
Tab. 6.3. Izpētes objekti.....	109
Tab. 6.4. Augsnes – atmosfēras SEG apmaiņas un vides parametru mērījumu rezultāti	110
Tab. 6.5. Izmēģinājumu objekti.....	112
Tab. 6.6. Vides mainīgo lielumu mērījumu rezultātu sagrupēta statistika	113
Tab. 6.7. SEG mērījumu rezultātu rezultātu kopsavilkums.....	114
Tab. 6.8 Risu parametri atlasītajās purvainu un kūdreņu cirmās dažādos datu avotos	117
Tab. 7.1. Gāzu apmaiņas mērīšanas parauglaukumi atjaunotās platībās	119
Tab. 8.1 Pētāmo objektu raksturojums	131
Tab. 8.2 Augsnes paraugu ievākšanai atlasīto veco melnalkšņu audžu raksturojums šaurlapu kūdrēnī un dumbrajā.....	136

SIMBOLI UN SAĪSINĀJUMI

AGB - kopējā virszemes biomasa
AIC - Akaike informācijas kritērijs
ALS - aerolāzerskenēšana
BB - zaru biomasa
BGB - kopējā sakņu un celma biomasa
C - ogleklis
CH₄ - metāns
CHM - vainaga augstuma modelis
CO₂ - oglekļa dioksīds
DBH - koku caurmērs 1,3 m augstumā
DEM - digitālais virsmas modelis
DOC - izšķīdušais organiskais ogleklis
EK - Eiropas Komisija
ekv. - ekvivalenti
ES - Eiropas Savienība
ES - Eiropas Savienība
Gg - gigagrami
GNSS - Globālās navigācijas satelītu sistēmas
IPCC - Starpvalstu klimata pārmaiņu padome
LiDAR - Atrašana un attāluma noteikšana ar gaismu
LVM - AS "Latvijas valsts meži"
MAPE - vidējās vērtības vidējā kvadrātiskā kļūda
MARL - meža apsaimniekošanas references līmenis
MPS - Meža pētīšanas stacija
MRM - Meža resursu monitorings
N₂O - dislāpekļa oksīds
NDVI - normalizēts atšķirīgās veģetācijas indekss
PPK - pēcapstrādes korekcija
r - korelācijas koeficients
R² - determinācijas koeficients
RMSE - vidējās vērtības vidējā kvadrātiskā kļūda
RTK - reālā laika korekcija
SB - stumbra biomasa
SEG - siltumnīcefekta gāzes
UNFCCC - Apvienoto nāciju konvencija par klimata pārmaiņām
ZIZIMM - zemes izmantošana, zemes izmantošanas maiņa un mežsaimniecība
WEM – *with existing measures* (SEG emisiju prognoze ar esošajām darbībām)
HWP – koksnes produkti
FRL – *forest reference level* (meža references līmenis)

IEVADS

Pētījuma ceturtajā etapā turpināta programmas “Oglekļa aprite meža ekosistēmā” uzdevumu īstenošana. Programma sastāv no astoņiem savstarpēji saistītiem pētījumiem, kas vērsti uz siltumnīcefekta gāzu (SEG) inventarizācijas un prognožu sistēmas zemes izmantošanas, zemes izmantošanas maiņas un mežsaimniecības (ZIZIMM) sektorā pilnveidošanu, izstrādājot un integrējot LVMI Silava sadarbībā ar Zemkopības ministriju un citām institūcijām gatavojamajos ziņojumos oglekļa uzkrājuma izmaiņu prognozes un N_2O un CH_4 emisiju no augsnes aprēķinus.

Pētījuma “Mežaudžu oglekļa piesaistes un uzkrājuma aprēķina metodika AS “Latvijas valsts meži” apsaimniekotajiem mežiem” uzdevums ir zinātniskās literatūras analīze par biomasas aprēķina metodēm un oglekļa satura izmaiņām dzīvo koku biomasā, kā arī nacionālā meža resursu monitoringa (MRM) parauglaukumu datu apstrāde un dzīvo koku biomasas aprēķini, balstoties uz Latvijai piemērotiem individuālu koku biomasas vienādojumiem izplatītākajām koku sugām. Darba uzdevuma īstenošana pabeigta pētījuma trešajā etapā.

Pētījuma “SEG inventarizācijas un prognožu datu modelēšanas rīku pilnveidošana” mērķis ir būtiski samazināt SEG inventarizācijas datu nenoteiktību un palielināt aprēķinu rezultātu un darbību datu precizitāti, modelējot mežizstrādes, atmežošanas un citu zemes izmantošanas veidu maiņas ietekmi uz SEG emisijām, kā arī klimata izmaiņu mazināšanas darbību ietekmes novērtēšanas un prognozēšanas precizitātes palielināšana. Pētījuma uzdevums ir izmantot dažādus datu avotus, tajā skaitā Copernicus, MRM, augstas izšķirtspējas LiDAR dati un valsts uzturētās LPIS (*Land parcel information system*) datu bāzes un mašīnmācības metodes, lai uzlabotu SEG emisiju aprēķinu metodes.

Pētījuma “Trupes ietekmes uz oglekļa uzkrājumu dzīvo koku biomasā modelēšana” mērķis ir izstrādāt metodi stumbra trupes ietekmes uz dzīvu koku biomasas raksturošanai, kā arī trupes ietekme uz kokaudžu oglekļa uzkrājumu vienādojumos. Pētījuma sagaidāmais rezultāts ir vienādojumi Latvijas SEG inventarizācijas sistēmas un prognožu modeļu pilnveidošanai, raksturojot oglekļa uzkrājumu visās oglekļa krātuvēs un CO_2 emisijas, kas veidojas dzīvu koku trupēšanas rezultātā.

Pētījuma “SEG emisiju samazināšana meža apsaimniekošanā klimata pārmaiņu mazināšanas kontekstā” mērķis ir pamatojuma izstrādāšana klimata pārmaiņu mazināšanas darbību īstenošanai meža apsaimniekošanā nacionālo neitralitātes mērķu sasniegšanai. Pētījuma sagaidāmais rezultāts ir pētījuma ietvaros identificēto klimata pārmaiņu mazināšanas darbību SEG emisiju samazināšanas un CO_2 piesaistes palielināšanas potenciāla un sociāli ekonomiskais novērtējums, kas apkopots klimata pārmaiņu mazināšanas darbību katalogā meža apsaimniekošanai.

Pētījuma “Meža ieaudzēšanas un kokaugu stādījumu ierīkošanas meliorācijas sistēmu buferjoslās ietekmes uz SEG emisijām un CO_2 piesaisti izpēte” mērķis ir izstrādāt rekomendācijas dažādu meža ieaudzēšanas un kokaugu stādījumu ierīkošanas metožu pielietošanai klimatneitralitātes mērķu sasniegšanai un metodes meža ieaudzēšanas un ilggadīgo stādījumu ietekmes uz SEG emisijām un CO_2 piesaisti raksturošanai, balstoties uz līdz šim īstenoto pētījumu rezultātiem.

Pētījuma “Meža resursu izmantošanas efektivitātes palielināšana klimata pārmaiņu mazināšanai” uzdevums ir mašīnmācības metodes izstrādāšana kokmateriālu iznākuma prognozēšanai. Pētījumā vērtējamas arī saudzīgas mežizstrādes metodes, kas ļauj mazināt koksnes bojājumus un palielināt vērtīgo kokmateriālu veidu iznākumu, lai nodrošinātu lielāku saražoto

koksnes produktu iznākumu. Pētījumā vērtēta arī kompaktklases tehnikas un citu risinājumu pielietošana atstājamo koku bojājumu un tehnikas radīto SEG emisiju samazināšanai kopšanas cirtēs. Viens no galvenajiem sagaidāmajiem pētījuma rezultātiem ir uzlabota metode koksnes produktu iespējamās ietekmes uz SEG emisijām analīzei.

Pētījuma “Meliorācijas sistēmu apsaimniekošanas plānošanas sistēma” mērķis ir izstrādāt SEG emisiju modelēšanas instrumentus meliorācijas sistēmu ietekmes uz SEG emisijām un CO₂ piesaisti prognozēšanai un rekomendācijas lēmuma pieņemšanas atbalstam, plānojot ar mitruma režīma regulēšanu saistītu klimata pārmaiņu mazināšanas darbību īstenošanu.

Pētījuma “Oglekļa balance vecās mežaudzēs” mērķis ir raksturot oglekļa uzkrājumu bioloģiski vecās, saimnieciskās darbības neietekmētās bērza, apses un skujkoku mežaudzēs, iegūstot datus, kas integrējami kopējā mežaudžu oglekļa piesaistes un uzkrājuma aprēķina metodikā LVM apsaimniekotajiem mežiem. Pētījuma sagaidāmais rezultāts ir CO₂ piesaistes dinamika laikā un atšķirības audzēs ar dažādām augsnēm, detalizētākas rekomendācijas mežsaimniecībai.

Pētījumu programmas īstenošanas pirmajā etapā 2021. gadā izstrādāta pētījuma metodika lielākajai daļai no pētījumiem, kā arī uzsākta izmēģinājumu objektu atlase un ierīkošana. Uzsākot pētījumu, apkopota informācija, kas pieejama par klimata pārmaiņu mazināšanas darbībām, kas īstenojamās meža zemēs. Saskaņā ar sākotnējiem rezultātiem nozīmīgākās darbības, kas palīdz samazināt SEG emisijas un palielināt CO₂ piesaisti, ir organisko augšņu apmežošana un meža augšanas apstākļu uzlabošana, ienesot augsnē biogēnos elementus (turpmāk meža mēslošana).

Pētījumu programmas otrajā etapā 2022. gadā lielākajā daļā no pētījumiem precizētas izpētes metodes, uzsākta izmēģinājumu objektu atlase un ierīkošana, kā arī empīrisku datu ieguve un analīze. Pētījuma ietvaros izstrādāti un aprobēti vienkāršoti vienādojumi biomasas un oglekļa uzkrājuma aprēķiniem valsts mežos. Koku biomasas prognozēšanai, izmantojot LiDAR un citus datus, aprobēts *xgbTree* algoritms virszemes, pazemes un stumbra biomasas prognozēšanai. Izstrādāto metodi var integrēt SEG inventarizācijas sistēmā kā datu verifikācijas instrumentu un oglekļa uzkrājuma raksturošanai zemes īpašumu līmenī. Pētījumā aprobēta iepriekšējā etapā izstrādātā metodika koku skaita un augstuma prognozēšanai, izmantojot LiDAR datus, un metodika zemes izmantošanas monitoringam, izmantojot no *Sentinel2* datus. 2024. gadā sasniegts plānotais pētījuma rezultāts serdes trupes ietekmes uz oglekļa uzkrājumu biomasā raksturošanai lapu koku audzēs, un izstrādāti vienādojumi trupes izplatības un stumbra biomasas samazinājuma sakarības raksturošanai. Trupes ierobežošanas darbību ietekmi lokālā līmenī pagaidām nevar novērtēt, jo darbību ietekme atkarīga no daudziem ilgstošā laikā mežaudzi ietekmējošiem faktoriem. Ņemot vērā lielo serdes trupes ietekmi uz oglekļa uzkrājumu koku biomasā, it īpaši apšu audzēs, kā arī būtisko ietekmi uz oglekļa uzkrājumu koksnes produktos, ir būtiski turpināt pētījumus par serdes trupes ierobežošanu arī klimata pārmaiņu mazināšanas mērķu kontekstā. Pētījuma ietvaros 2022. gadā izstrādāti vienādojumi kopšanas ciršu ietekmes uz CO₂ piesaisti kokaugu biomasā aprēķinam. Pētījumā novērtēta meža ieaudzēšanas īstermiņa (12-15 gadi) ietekme uz oglekļa uzkrājumu koku biomasā un augsni, nodrošinot skaitlisku novērtējumu šim klimata pārmaiņu mazināšanas darbībai. Ierīkoti jauni izmēģinājumu objekti un uzsākts gāzu apmaiņas monitorings SEG emisiju raksturošanai āreņos un slapjainos, dziļvagu ierīkošanas efekta novērtējums, atjaunojot izcirtumus purvainos, un SEG emisijas no risēm izcirtumos ar kūdras augsni. Uzsākta izmēģinājumu objekta ierīkošana oglekļa aprites raksturošanai apmežotās platībās, tajā skaitā kūdras augsnēs, un kokaugu stādījumos minerālaugsnēs. Meža zemēm adaptēts modelis meliorācijas grāvju tehniskā stāvokļa raksturošanai un turpināts izšķīdušā organiskā oglekļa emisiju faktoru izstrādāšanas darbs. Turpināta datu ievākšana oglekļa uzkrājuma raksturošanai vecās audzēs ar kūdras augsni, tajā skaitā secināts, ka hidrotehniski meliorētās platībās bērza audzēs oglekļa uzkrājums ir par 28%

lielāks nekā nemeliorētās platībās, kā arī bioloģiski vecās bērza audzēs oglekļa uzkrājums ir mazāks nekā jaunās audzēs.

Pētījumu programmas trešajā etapā 2023. gadā veikti darba uzdevumi septiņās aktivitātēs. Nozīmīgākie rezultāti ietver metodiku izstrādi mežaudžu oglekļa piesaistes un uzkrājuma aprēķinam, kā arī datu analīzi par oglekļa emisijām dažādos meža apsaimniekošanas scenārijos. Pētījums sniedza detalizētu informāciju par oglekļa apriti, identificējot būtiskākos emisiju avotus un piesaistes veicināšanas iespējas. Papildus, turpināti eksperimentāli pētījumi par dažādu mežsaimniecības praksi ietekmi uz oglekļa bilanci. Apkopotie dati veido pamatu turpmākai modelēšanai un praktisko ieteikumu izstrādei oglekļa piesaistes efektivitātes palielināšanai. Pētījumā “Mežaudžu oglekļa piesaistes un uzkrājuma aprēķina metodikas izstrāde” izstrādāta uzlabota metodika, kas pielāgota Latvijas meža tipoloģijai un apsaimniekošanas īpatnībām un veikta tās pārbaude ar esošajiem mežsaimniecības datiem. Pētījumā “Oglekļa emisijas modelēšana dažādos apsaimniekošanas scenārijos” izveidoti scenāriji, analizējot intensīvu mežizstrādi, dabas aizsardzību un līdzsvarotu apsaimniekošanu, noteikts oglekļa emisiju un piesaistes līdzsvars katrā scenārijā un veikta oglekļa bilances un SEG emisiju analīze dažādiem mežsaimniecības paņēmieniem. 2023. gadā iegūtie dati apstiprināja hipotēzi, ka jaunaudžu kopšanas cirtes var būtiski palielināt CO₂ piesaisti. Pētījuma rezultāti publicēti 2024. gadā (Bickovskis et al., 2024). Pētījumā izstrādāta metodika koku sugu dešifrēšanai un veikta datu analīze pilotteritorijai. Papildināta metodika zemes izmantošanas maiņas aprēķinu nenoteiktības mazināšanai. Vērtējot trupes ietekmi uz SEG emisijām, 2023. gadā veikta parauglaukumu atlase un uzsākta darbību datu ieguve zemes izmantošanas veidu prognožu modeļa apmācīšanai. Uzsākta paraugu ievākšana un paraugu analīzes laboratorijā. Uzsākta vienādojumu izstrādāšana oglekļa uzkrājumu izmaiņu raksturošanai, balstoties uz pētījumā iegūtiem datiem. Šajā pētījuma etapā secināts, ka varam raksturot trupes ierobežošanas darbību ietekmi kā mērķi un darbības prognozētās ietekmes nenoteiktība atbilst oglekļa zudumu novērtējuma nenoteiktībai. 2023. gadā pabeigta parauglaukumu ierīkošana jaunaudžu kopšanas izmēģinājumu platībās un kokaugu stādījumos, iegūti lāzerskenēšanas dati 2022. un 2023. gadā apsekotajos izpētes objektos. Ierīkoti izmēģinājumu objekti augsnes sagatavošanas ietekmes raksturošanai, uzsākta gāzu apmaiņas un vides datu ieguve. Uzsākta klimata pārmaiņu mazināšanas darbību kataloga izveide, ietverot tur darbības ar zinātniski pamatojamu ietekmi. Meža ieaudzēšanas un kokaugu stādījumu ierīkošanas meliorācijas sistēmu buferjoslās ietekmes uz SEG emisijām un CO₂ piesaisti izpētes ietvaros uzsākta gāzu apmaiņas mērīšana pēc augsnes sagatavošanas un stādīšanas. Mērījumi veikti neskartā platībā, uz pacilas vai bedrē. Tāda pati pieeja izmantota platībā, kas appludināta un apmežota ar melnalksni. Gāzu apmaiņas mērījumi kokaugu stādījumos turpināti izmēģinājumu platībā ZS “Andrupēni”. Meža resursu izmantošanas efektivitātes palielināšanas pētījumu ietvaros izstrādāta metodika kokmateriālu sadalījuma prognozēšanai. Ierīkoti izmēģinājumu objekti un uzsākta gāzu apmaiņas mērīšana risēs un blakus tām, lai no skaidrotu risu ietekmi uz SEG emisijām no organiskām augsnēm. 2023. gadā pilnveidota metodika risu identificēšanai, izmantojot lāzerskenēšanas datus, kā arī uzsākta gāzu apmaiņas mērīšana platībās, kur ierīkotas dziļvagas. Turpināta gāzu apmaiņas mērīšana āreņos un slapjainos priedes un bērza audzēs. Turpināta metodikas pilnveidošana meliorācijas sistēmu optimizēšanai, ierīkojot dziļvagas ūdens novadīšanai no reljefa pazeminājumiem. Oglekļa aprites aprēķiniem adaptēts evapotranspirācijas modelis un uzsākta netiešo oglekļa zudumu novērtēšana. Vērtējot oglekļa bilanci vecās mežaudzēs, ierīkoti izmēģinājumu objekti un uzsākta datu ieguve bioloģiski vecās audzēs.

1. MEŽAUDŽU OGLEKĻA PIESAISTES UN UZKRĀJUMA APRĒĶINA METODIKA LVM APSAIMNIEKOTAJIEM MEŽIEM

Darba uzdevuma īstenošana pabeigta iepriekšējā etapā. Pētījuma ietvaros 2022. gadā izstrādāta kokaudžu līmeņa biomasas aprēķina metodika un sagatavota publikācija (Liepiņš et al., 2022) kokaudzes biomasas raksturošanai, izmantojot kopējās krājas un valdošās sugas krājas relatīvā īpatsvara rādītājus.

Pētījuma mērķis 2023. gadā bija integrēt SEG inventarizācijas un prognožu sistēmā iepriekš izstrādātos vienādojumus, kas raksturo oglekļa uzkrājumu audzes līmenī. Veikti kamerālie darbi, aprēķinot oglekļa uzkrājumu dažādos prognožu scenārijos, un precizēti pasākumi klimata neitralitātes sasniegšanai. No prognožu aprēķina izslēgti tādi pasākumi kā koksnes ķīmiskās pārstrādes rūpnīcas izbūve un neproduktīvo mežaudžu nomaiņa, kuru ietekmi bija grūti prognozēt. Netika vērtēta arī mitrāju atjaunošanas ietekme, jo to iespējamā iedarbība uz SEG emisijām var būt savstarpēji kompensējoša vai pat negatīva (Buzacott et al., 2024).

Klimata pārmaiņu mazināšanas efektu aprēķinu metodika papildināta ar augsnes SEG emisiju faktoriem un aizstāšanas efekta vērtējumu. Izstrādātie biomasas vienādojumi integrēti prognožu sistēmā, izmantojot AGM rīku, kas tagad spēj analizēt arī tādus scenārijus, kas ietver lauksaimniecības zemju apmežošanu un hidroloģiskā režīma uzlabošanu pārmitrās augsnēs. Pētījumā izvērtētas arī citas darbības, piemēram, kokaugu joslu stādījumi un koksnes pelnu izmantošana meža mēslošanai.

Pētījumā konstatēts, ka SEG emisiju samazinājums, īstenojot Nacionālajā klimata un enerģētikas plānā iekļautos pasākumus, kļūst nozīmīgs pēc 2025. gada, taču pēc 2040. gada CO₂ piesaiste samazinās kokaugu joslu stādījumu izstrādes rezultātā. Ilgtermiņā CO₂ piesaisti negatīvi ietekmē arī mežaudžu novecošanās un ierobežojumi saimnieciskai darbībai. Lai saglabātu pozitīvu piesaistes bilanci, būs nepieciešamas papildu darbības mežsaimniecībā un agromežsaimniecībā arī pēc 2050. gada.

Salīdzinot vienādojumus individuālu koku un mežaudzēs raksturošanai, konstatēts, ka prognožu atšķirības nepārsniedz 5%. Ikgadējais oglekļa uzkrājuma pieaugums alternatīvajos scenārijos 2025.–2050. gadā pieaug par 1,8%, galvenokārt lielākas piesaistes dēļ dzīvajā kokaugu biomasā.

2. SEG INVENTARIZĀCIJAS UN PROGNOZU DATU MODELĒŠANAS RĪKU PILNVEIDOŠANA

2.1. Metodikas izstrādāšana koku sugu sastāva telpiskās izplatības novērtēšanai Latvijas teritorijā un oglekļa uzkrājuma dinamikas modelēšanai, izmantojot attālās izpētes datus un mašīnmācības metodes

Šī pētījuma mērķis ir mežaudžu augstuma, oglekļa daudzuma un sugu sastāva dinamikas modelēšana Latvijas teritorijai balstoties uz attālās izpētes uz meža statistiskās inventarizācijas (MRM) datiem. Šajā pētījuma etapā izstrādātas mežaudžu biomasas apjoma kartes Latvijas teritorijai, balstoties uz pirmā cikla ALS (aerolāzerskenēšana) datiem, kā arī uz otrā cikla ALS datiem teritorijām, kur šie dati ir pieejami. Iepriekšējos pētījuma etapos izstrādāti mašīnmācīšanās modeļi biomasas (virszemes, pazemes, stumbra, zaru un celma – sakņu) novērtēšanai kā arī dominējošo koku sugu telpiskās izplatības karte, balstoties uz Sentinel-2 satelītainām. Iepriekš iegūtos rezultātus tagad izmantojam *wall to wall* mežaudžu biomasas karšu izveidei un oglekļa satura novērtēšanai.

2.1.1. Metodika

Pētījumam nepieciešamie ALS dati iegūti no LĢIA un to apstrāde veikta izmantojot FUSION/LDV programmatūru (McGaughey, 2020). ALS punktu mākoņiem nofiltrēti zemes virsmu raksturojošie punkti, no kuriem izveidots zemes virsmas modelis *.dtm formātā ar horizontālo izšķirtspēju 1m. Tālāk veikta ALS punktu vertikālā izvietojuma statistiskā analīze ar šūnu izmēru 20 · 20 m, jeb 400 m². Tādējādi iegūta informācija par vidējo ALS atstarojumu augstumu virs zemes virsmas, kā arī dažādu atstarojumu augstuma percentīļu dati. Iegūtie un tālāk izmantotie statistiskie rādītāji ir:

- vidējais atstarojumu augstums;
- atstarojumu kvadrātiskais vidējais augstums;
- dažādas atstarojumu augstumu percentiles (50, 60, 70, 75, 80, 90, 95, 99).

Katram statistiskajam rādītājam izveidots rastra slānis ar 20 m horizontālo izšķirtspēju visai Latvijas teritorijai. Tālāk QGIS (QGIS Development Team, 2024) vidē, balstoties uz Meža resursu monitoringa (MRM) lauka datiem, ALS atstarojuma telpiskā izvietojuma datiem un citiem kartogrāfiskajiem materiāliem izveidots *.csv fails, kurā visiem veselajiem (nedalītajiem) mežaudzes raksturojošajiem MRM datu poligoniem pievienota informācija par ALS punktu vertikālā izvietojuma statistiku, koku sugu, telpiskajām koordinātām, mitro vietu kartēm u.c. attālās izpētes datiem. Kopā tālākai analīzei izmantoti 4644 MRM parauglaukumi.

Tālāka datu apstrāde veikta R (R Studio team, 2022) vidē, kur iepriekš izveidotā datu kopa sadalīta attiecībā 4:1, kur 80% no ierakstiem izmantoti mašīnmācīšanās algoritma apmācīšanai un 20% validācijai. Mašīnmācīšanās uzdevuma veikšanai izvēlēts *xgbTree* algoritms, jo tas nodrošina iespēju analizēt sarežģītas ar vidi saistītas likumsakarības, spēj labi ģeneralizēt apstrādājot jaunus datus, ir efektīvs datora resursu izmantošanā, tā parametrus var viegli pielāgot un ir nodrošināta šķērsvalidācija. Kopā izveidoti 5 mašīnmācīšanās modeļi, kas katrs prognozē savu biomasas apjoma veidu:

- kopējā virszemes biomasas;
- apakšzemes biomasas;
- stumbra biomasas.

Izstrādātie kartogrāfiskie materiāli par virszemes biomasu kopā ar datu kopām no Meža Pētīšanas Stacijas (MPS) par virsmu datiem ar veiktu vienlaidus dastošanu. Tādējādi novērtēta izstrādāto karšu iespējamā izmantošana meža nogabala līmeņa biomasas novērtēšanai.

2.1.2. Rezultāti

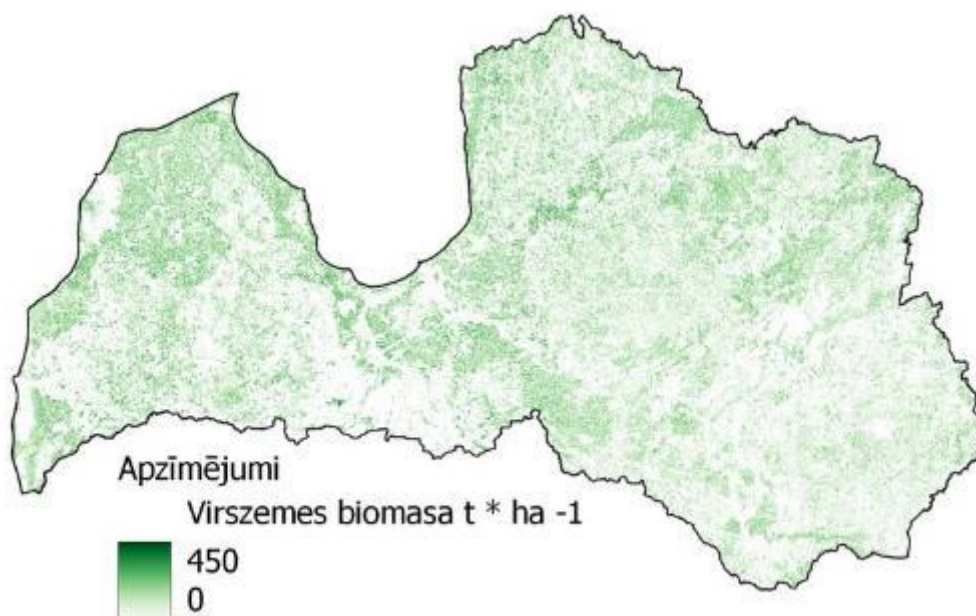
Visi izveidotie mašīnmācīšanās modeļi, kuri balstīti uz 1. ALS cikla datiem uzrāda augstu biomasas prognozēšanas precizitāti. To veikspēja atainota Tab. 2.1.

Tab. 2.1. Mašīnmācīšanās modeļu precizitāte

Modelis	RMSE ($t \cdot ha^{-1}$)	R^2	MAE ($t \cdot ha^{-1}$)
Virszemes biomasas	39,04	0,82	25,22
Pazemes biomasas	9,92	0,81	6,43
Stumbra biomasas	30,80	0,82	19,27

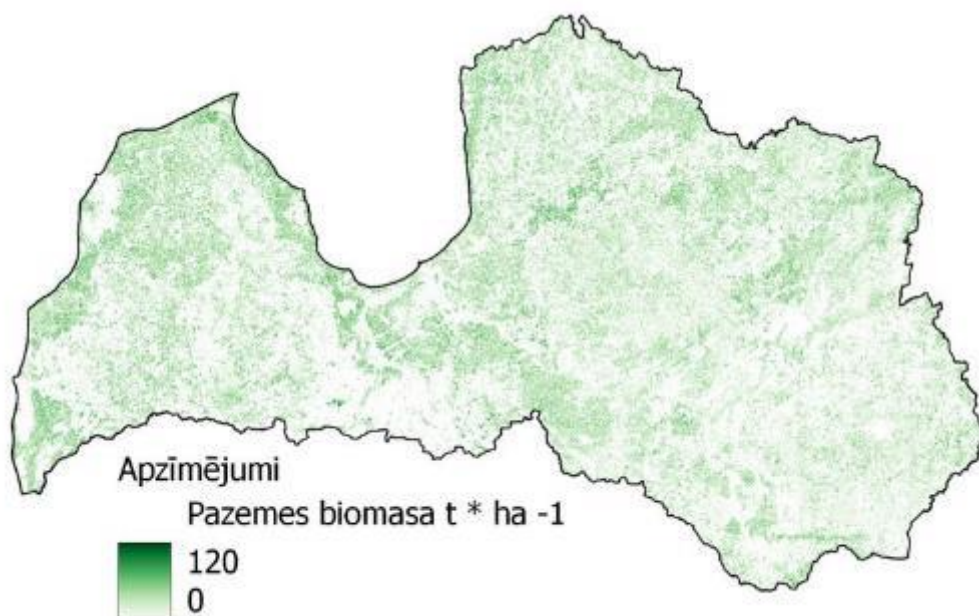
Uz otrā ALS cikla izstrādātie modeļi šobrīd uzrāda zemāku precizitāti, jo uz datu apstrādes brīdī pieejama tikai neliela daļa no skanētajiem datiem (apmēram 5000 km² liela teritorija Ziemeļkurzemē), un noskenēts tikai 531 MSI parauglaukums. Precīziem mašīnmācīšanās modeļiem nepieciešami vismaz daži tūkstoši noskanēti parauglaukumi. Esošā virszemes biomasas prognožu modeļa precizitāte sasniedz $RMSE = 58,26 t \cdot ha^{-1}$, $R^2 = 0,6$ un $MAE = 42,46 t \cdot ha^{-1}$, kas ir ievērojami mazāka nekā uz pirmā ALS cikla balstītajiem prognožu modeļiem.

Apmācītie mašīnmācīšanās modeļi tālāk pielietoti biomasas apjoma prognozēšanai mežaudzēs visā Latvijas teritorijā. Balstoties uz ALS datiem un dažādiem kartogrāfiskajiem materiāliem, katram no mežaudžu biomasas veidiem izstrādātas rastra kartes. Virszemes biomasas karte atainota Att. 2.1. Rezultāti liecina, ka kopējais virszemes biomasas apjoms ALS datu iegūšanas brīdī balstoties uz mašīnmācīšanās modeļa prognozēm bijis 380,5 milj. tonnas.



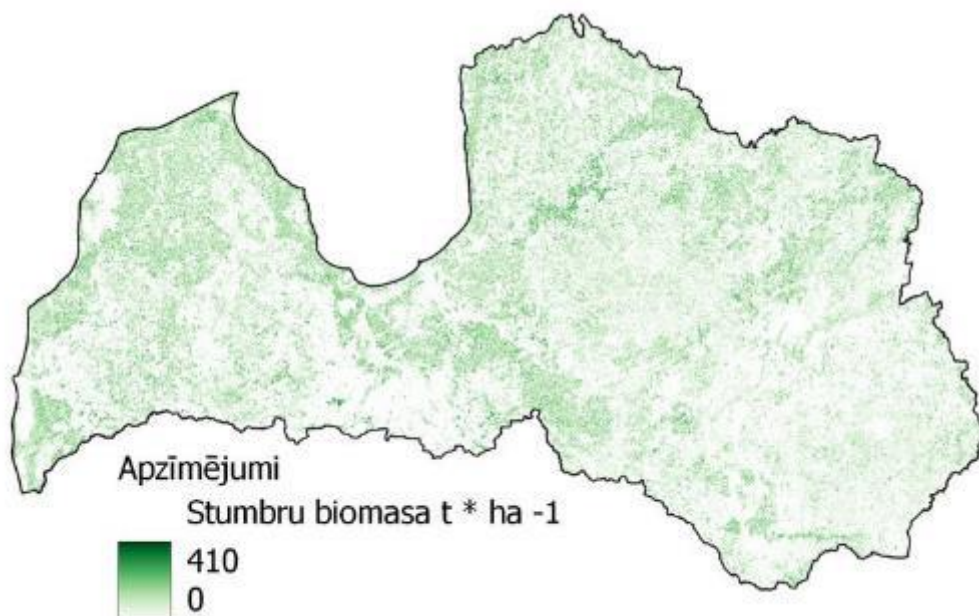
Att. 2.1. Virszemes biomasas karte

Pazemes biomasas apjoms atainots Att. 2.2. Tās kopējais apjoms uz ALS datu iegūšanas brīdi bijis 94,6 milj. tonnas.



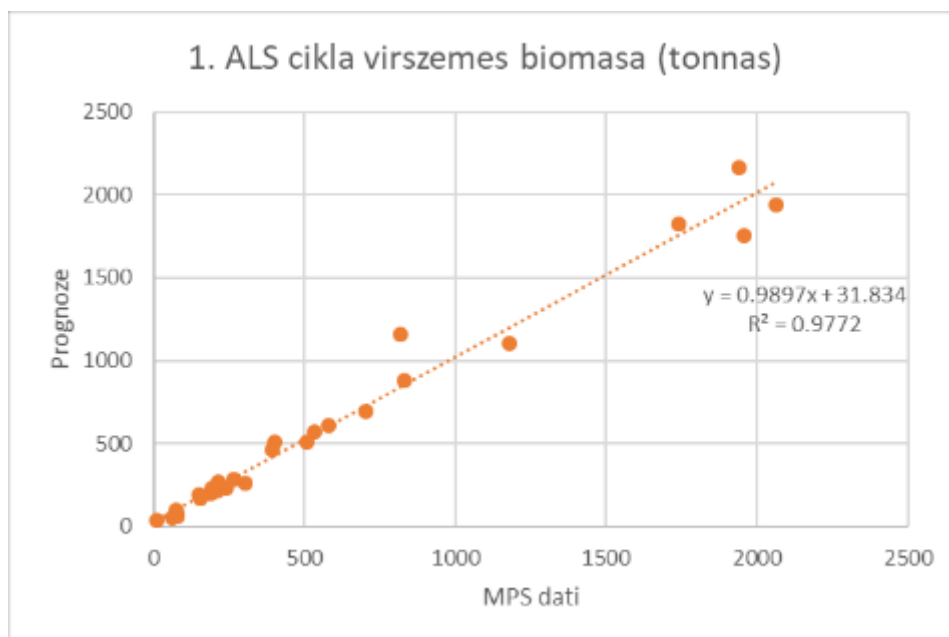
Att. 2.2. Pazemes biomasas karte

Stumbru biomasas apjoms kartogrāfiski atainots Att. 2.3. Tās kopējais apjoms uz ALS datu iegūšanas brīdi bijis 284,7 milj. tonnas.



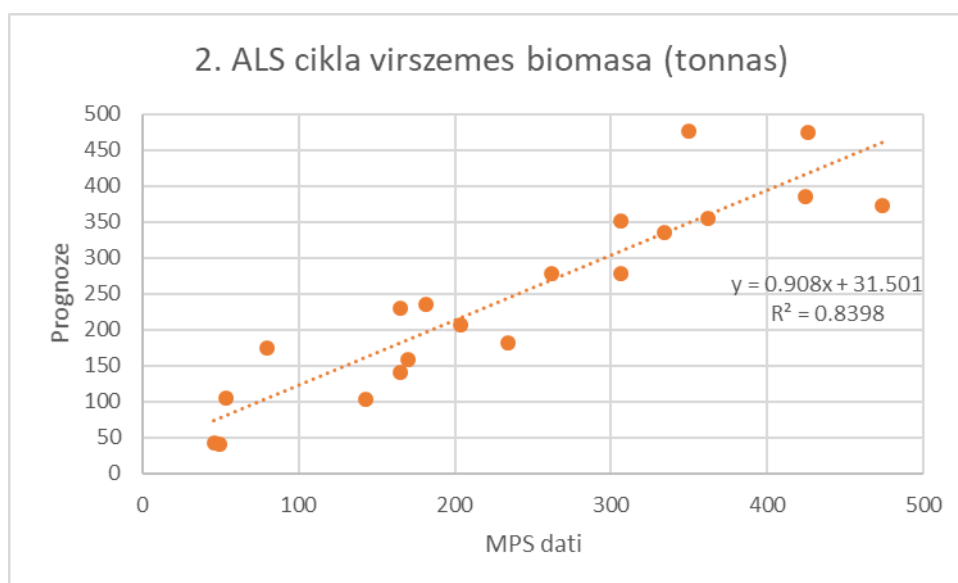
Att. 2.3. Stumbru biomasas karte

Veicot kartogrāfisko materiālu salīdzināšanu ar reāliem cirsmu datiem no pirmā ALS uzmērīšanas kampaņas laika (Att. 2.4), kur veikta vienlaidus nogabalu dastošana, redzama liela sakritība starp prognozēto virszemes biomasas apjomu un lauka darbos iegūto informāciju ($R^2 = 0,98$; $n = 30$).



Att. 2.4. Uz pirmā ALS ciklu balstītā virszemes biomasas prognožu modeļa veikspēja meža nogabala līmenī

Arī uz otrā ALS cikla balstītais mašīnmācīšanās modelis virszemes biomasu prognozē ar salīdzinoši lielu precizitāti ($R^2 = 0,84$; $n = 20$, Att. 2.5), tomēr ir sagaidāms, ka tuvākajos gados tā veikspēju izdosies uzlabot līdz ar papildus ALS datu apstrādi plašākai Latvijas teritorijai.



Att. 2.5. Uz otrā ALS ciklu balstītā virszemes biomasas prognožu modeļa veikspēja meža nogabala līmenī

2.1.3. Secinājumi

Šajā pētījuma etapā izstrādāti vairāki mežaudzes raksturojošie biomasas (virszemes, pazemes un stumbru) modeļi, kas balstās uz dažādām attālās izpētes datu kopām, kā aerolāzerskenēšanas dati, *Sentinel-2* multispektrālās mozaīkas un citiem kartogrāfiskajiem materiāliem. Modeļa apmācīšanā iekļauta arī informācija par koku sugu telpisko izvietojumu un augsnes mitruma dati.

Uz 1. ALS cikla izveidotie biomasas modeļi uzrāda augstu prognozēšanas precizitāti:

- virszemes biomasai ($RMSE = 39,04 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$, $R^2 = 0,82$ un $MAE = 25,22 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$);
- pazemes biomasai ($RMSE = 9,92 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$, $R^2 = 0,81$ un $MAE = 6,43 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$);
- stumbru biomasai ($RMSE = 30,80 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$, $R^2 = 0,82$ un $MAE = 19,27 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$).

Uz otrā ALS cikla izveidotais virszemes biomasas prognožu modelis ir ar zemāku precizitāti, sakarā ar to, ka ir pieejama tikai neliela daļa noskanētās Latvijas teritorijas (<10%). Prognožu modeļa precizitāte sasniedz ($RMSE = 58,26 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$, $R^2 = 0,6$ un $MAE = 42,46 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$).

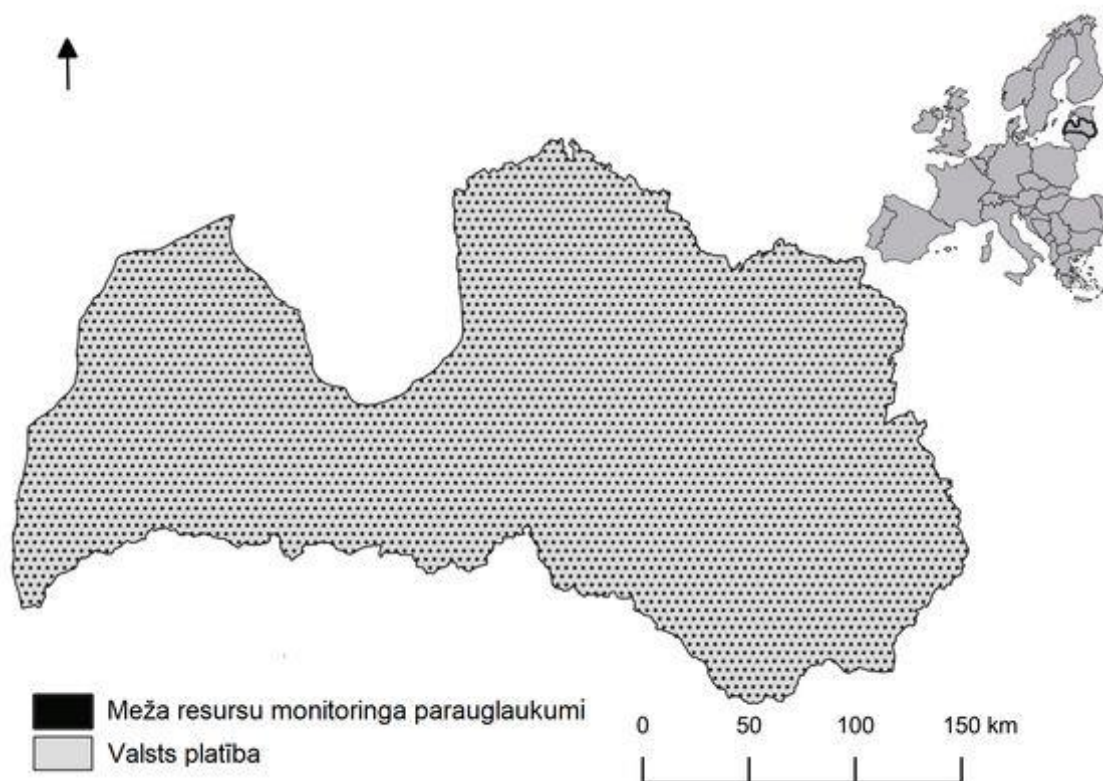
Izveidotās virszemes biomasas kartes analizējot meža nogabalu līmenī var secināt, ka sakritība ar vienlaidus dastojuma datiem ir liela. Pirmajam ALS ciklam determinācijas koeficients sasniedz 0,98, savukārt otrajam ALS ciklam tas ir 0,84, tomēr ir sagaidāms, ka tas uzlabosies, prognožu modeli izstrādājot uz plašāku Latvijas teritoriju, kad tai būs pieejami ALS dati.

2.2. Metodikas koku sugu sastāva telpiskās izplatības novērtēšanai integrēšana SEG inventarizācijas un prognožu sistēmā

2023. gadā turpināta metodikas izstrādāšana zemes izmantošanas maiņas darbību datu uzlabošanai SEG inventarizācijā, tajā skaitā zemes izmantošanas maiņas un saimnieciskās darbības ietekmes interpolācijas metodes izstrādāšana un priekšlikumu sagatavošana tās ieviešanai SEG inventarizācijas sistēmā. Turpinot 2022. gadā izstrādātās koncepcijas pilnveidošanu, kā ieejas dati mašīnmācības algoritmu apmācīšanai izmantotas Meža resursu monitoringa (MRM) parauglaukumu precizētās koordinātas, kas nodrošina parauglaukuma centra identifikāciju ar centimetru precizitāti. Ņemot vērā to, ka MRM parauglaukumus var sadalīt mazākās vienībās jeb sektoros, algoritmu apmācībai atlasīti tikai tie parauglaukumi, kur šāda sadalīšana nav notikusi un parauglaukums reprezentē vienu zemes izmantošanas veidu. Šī atlase nodrošina to, ka nav pieļautas neprecizitātes zemes izmantošanas veida raksturošanā, izmantojot pazīmes no robežojošām teritorijām. Salīdzinot ar 2023. gada starpziņojumu, etapa pārskatā ir papildināta pētījuma metodika uz sagatavots pārskats par sākotnējiem rezultātiem, kā arī priekšlikumi prognožu precizitātes pilnveidošanai apbūves teritorijām, citām zemēm un aramzemēs sētiem zālājiem.

Meža resursu monitorings (MRM) ir daļa no Latvijas mežu monitoringa programmas, kas gatavo statistisko informāciju par meža resursu pašreizējo stāvokli, kā arī to izmaiņām. Monitorings Latvijā uzsākts 2004. gadā, un to īsteno LVMI Silava. MRM sagatavotā informācija palīdz valsts un reģionālu līmeņu jautājumu risināšanā meža resursu pārvaldībā, kā arī sniedz iespēju veikt precīzu šo resursu ziņošanu starptautiskā mērogā. Visas Eiropas valstis izmanto MRM datu SEG inventarizācijā, nodrošinot neatkarīgu zemes izmantošanas un saimnieciskās darbības ietekmi uz SEG emisijām.

MRM parauglaukumi ir izkaisīti visā Latvijas teritorijā, to kopējais skaits ir 16156 gab. (Att. 2.6). Katrs parauglaukums reprezentē 400 ha lielu valsts teritorijas daļu. Katru parauglaukumu uzmēra vienu reizi 5 gadu periodā jeb ciklā, fiksējot informāciju par zemes izmantošanu un kokaudzes taksācijas rādītājiem, ja norādītajā parauglaukumā aug koki. Pateicoties MRM periodiskai apsekošanai, var iegūt precīzu informāciju par zemes izmantošanas maiņu.



Att. 2.6. Meža resursu monitoringa izvietojums valsts teritorijā

Katram parauglaukumam piešķirta Starpvalstu klimata pārmaiņu padomes (IPCC) vadlīnijās noteiktā zemes izmantošanas kategorija; attiecīgi, MRM izdalītās 58 zemes izmantošanas kategorijas sagrupētas 6 kategorijās (Tab. 2.2). IPCC iedalījums sniedz iespēju piesaistīt lielāku zemes kategoriju vērtību kopskaitu kādai zemes kategorijai, tādā veidā palielinot precizitāti, ar kādu noteikta zemes kategorija, izmantojot mašīnmācības metodi.

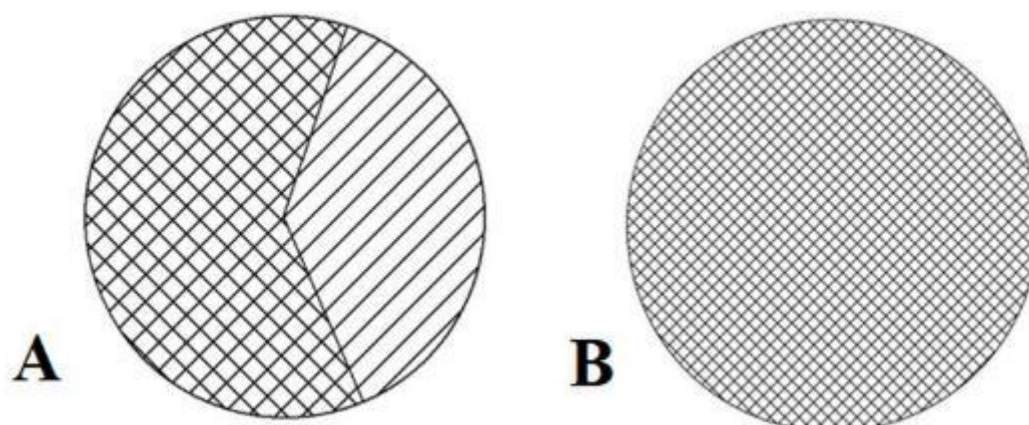
Tab. 2.2. MRM nacionālā zemes izmantošanas kategorijas un to iedalījums pēc IPCC kritērijiem

MRM ID	MRM zemes izmantošanas kategorija	IPCC zemes izmantošanas kategorija
10	Mežs	Mežs
11	Degums	Mežs
12	Iznīkusi audze	Mežs
13	Vējgāze	Mežs
14	Izcirtums	Mežs
141	Izcirtums	Mežs
21	Sūnu purvs	Mitrājs (neapsaimniekots)
22	Zāļu purvs	Mitrājs (neapsaimniekots)
23	Pārejas purvs	Mitrājs (neapsaimniekots)
31	Lauce	Zālājs
32	Meža dz. baroš. lauce	Aramzeme
33	viršājs	Zālājs

MRM ID	MRM zemes izmantošanas kategorija	IPCC zemes izmantošanas kategorija
34	smiltājs	Citas zemes
35	Krūmājs	Zālājs
36	Augļu dārzs	Aramzeme
37	Plantācijas	Aramzeme
40	Pārplūstošs klajums	Mitrājs (neapsaimniekots)
41	Bebru appludinājums	Mitrājs (apsaimniekots)
51	Meža ceļš	Apbūve
52	Meža stiga	Apbūve
53	Meža grāvis	Apbūve
60	Aramzeme	Aramzeme
61	Zālājs	Zālājs
62	Mežs LS zemē	Mežs
63	Upe	Mitrājs (neapsaimniekots)
64	Aizaugusi LS zeme	Zālājs
65	Ezers, dīķis	Mitrājs (neapsaimniekots)
66	LS grāvis	Apbūve
67	Autoceļš ar joslu	Apbūve
68	Dzelzceļš ar joslu	Apbūve
69	Karjers aizaudzis	Mitrājs (apsaimniekots)
6901	Aizaudzis karjers ir mežs	Mežs
6902	Aizaudzis karjers nav mežs	Zālājs
691	Aizaudzis izstrādes purvs	Mitrājs (apsaimniekots)
6911	Aizaudzis izstrādes purvs ir mežs	Mežs
6912	Aizaudzis izstrādes purvs nav mežs	Mitrājs (apsaimniekots)
70	Karjers svaigs	Mitrājs (apsaimniekots)
71	Upes paliene	Zālājs
72	pagalms (piem. zemes)	Aramzeme
73	pilsētas (miestiņi)	Apbūve
74	Industriālās trases (elektro, gāzes u.c.)	Apbūve
75	Apbūve ar veģetāciju	Apbūve
78	Parks	Apbūve
511	Meža ceļš ar joslu	Apbūve
521	Kvartālstiga	Apbūve
522	Mineralizēta josla	Apbūve

MRM ID	MRM zemes izmantošanas kategorija	IPCC zemes izmantošanas kategorija
523	Kokmateriālu krautuves vieta	Apbūve
531	Kanāls	Apbūve
532	Grāvju trase	Apbūve
541	Sēklu plantācija	Apbūve
542	Rekultivēta zeme	Zālājs
544	Atpūtas vieta	Apbūve
545	Citas spec.nozīmes zemes	Mitrājs (apsaimniekots)
547	Ceļu un dzelzceļu nodalījumu joslas	Apbūve
548	Kokmateriālu krautuves vieta	Mežs
691	Karjers aizaudzis (ārpus meža)	Mitrājs (apsaimniekots)
701	Karjers svaigs (ārpus meža)	Mitrājs (apsaimniekots)
776	Kapsētas	Apbūve

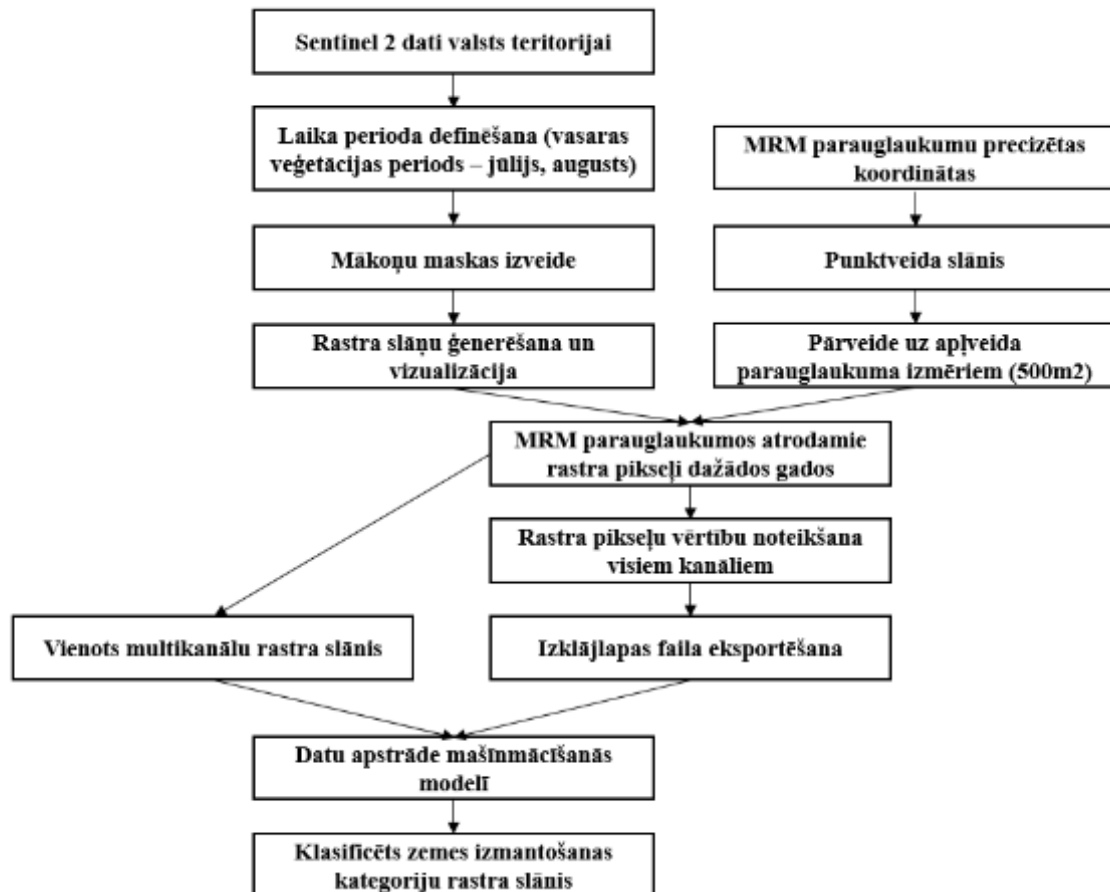
Pētījumā izmantotas MRM parauglaukumu precizētās (ar centimetru precizitāti) koordinātas. MRM parauglaukumus var sadalīt mazākās vienībās jeb sektoros, ja vienā parauglaukumā pārstāvēti dažādi zemes izmantošanas veidi. Pētījumam atlasīti tikai tie parauglaukumi, kur šāda sadalīšana nav notikusi un tie ir pilnīgi (Att. 2.7). Šī atlase nodrošina to, ka netiek pieļauta potenciāla neprecizitāšu veidošanās prognožu modelī scenārijos, kad sektoros iedalītās zemes kategorijas mašīnmācīšanās datu apstrādes daļā var tikt nepareizi klasificētas to mazā izmēra dēļ.



Att. 2.7. MRM parauglaukuma piemēri, ja tie ir sadalīti (A) vai nesadalīti (B)

Pauglaukuma dati pieejami precizētu centra koordināšu formātā, kuri koriģēti ar atkārtotiem augstas precizitātes lauka mērījumiem, lai pēc iespējas samazinātu ģeotelpisko nobīdi, kura var būt radusies parauglaukumu izveidošanas laikā 2004. gadā. Potenciālā ģeotelpiskā punkta nobīde saistīta ar sarežģītu precīzu koordinātu noteikšanas apstākļiem, it īpaši meža zemju teritorijās, kur blīvā veģetācija rada sakaru traucējumus augstas precizitātes mērierīcēm. Precizētās

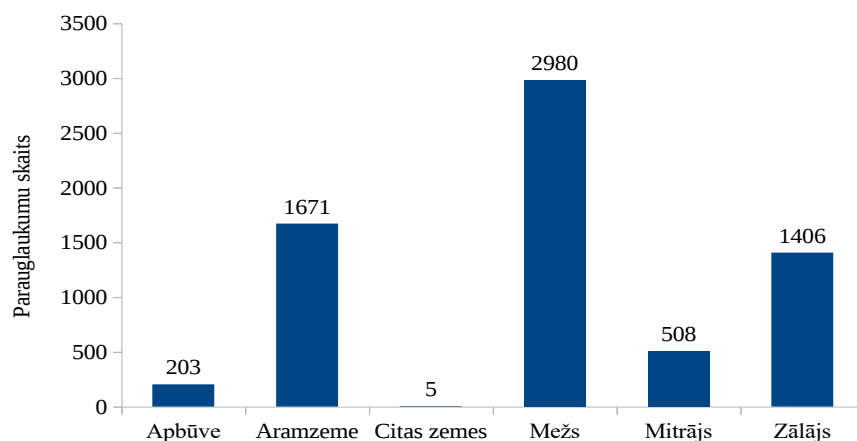
koordinātas izmanto, lai izveidotu punktveida telpisko slāni, kurš turpmākajās darbībās tiek palielināts (*buffer*) uz aplveida formu $r = 12,61 \text{ m}$, kas reprezentē pilnu meža resursu monitoringa parauglaukuma izmēru. Katra parauglaukuma izmērs dabā ir 500 m^2 . Precizētās koordinātas sniedz iespēju pēc iespējas detālāk piesaistīt reālos satelītainu datus attiecīgajiem MRM parauglaukumiem, lai veiktu analīzi ar *Sentinel2* rastra attēliem un noteiktu pikseļu vērtības dažādos rastra kanālos. Detalizēts datu apstrādes process attēlots Att. 2.8.



Att. 2.8. Datu apstrādes darba blokhēma

Multispektrālie satelītdati apstrādāti un iegūti, izmantojot *Google Colaboratory* vidi, kurā pieejams *s2cloudless* algoritms (Zupanc, 2017), no kura var iegūt jau apstrādātas, laika posma definētas multispektrālo satelītainu mozaīkas, izšķirtspējā 10×10 metri, kurām pievienota mākoņu maska, lai atbrīvotos no satelītainām, kurām ir mākoņu pārklājums un to ēnu traucējums. Kā ieejas periods izmantots laika posms starp jūliju un augustu. Šis laika periods izvēlēts, lai nodrošinātu, ka izmantotās satelītainas ir veģetācijas perioda aktīvākajā posmā, kas atvieglo dažādu zemes kategoriju klasifikāciju un samazina potenciālu kļūdu risku.

Multispektrālās satelītainu tālāka apstrāde veikta QGIS vidē, kur no visām iegūtajām satelītainām izveidots virtuālais rastrs, kurš izmantots, lai veiktu *Zonal statistics* procesu. Kā *Zonal statistics* robežslānis izmantoti MRM parauglaukumu vektordati par attiecīgo laika periodu, lai nosegtu visus apsekotos nesadalītos parauglaukumus attiecīgajā gadā. Zonālās statistikas analīze veikta kopumā 12 gaismas spektra kanāliem, iegūstot vienu vidējo rastra šūnas vērtību katram parauglaukumam, kas iegūta no visām MRM parauglaukumā atrodamajām rastra šūnām. Kopumā klasificēti un analizēti izmantoti 2980 meža, 1671 aramzemju, 1406 zālāju, 508 mitrāju, 203 apbūvju un 5 citu zemju nesadalītie parauglaukumi, kuros nav norisinājusies sektoru sadalīšanās, un tie ir izmantojami tālākajām aprēķinu darbībām (Att. 2.9).



Att. 2.9. Kopējais MRM nesadalīto parauglukumumu skaits

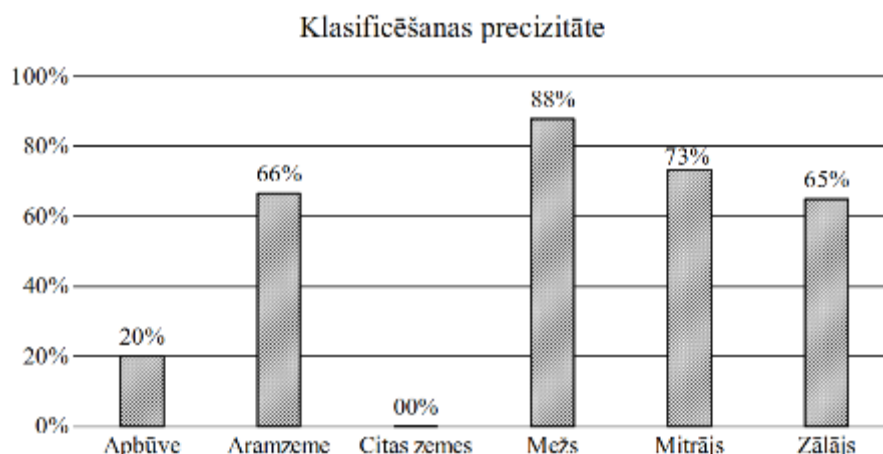
No rastra slāņiem *R studio* programmā (R Core Team, 2022) visas pa karšu lapām atdalītās rastru mozaīkas savieno vienā multikanālu rastrā, ko izmanto zemes izmantošanas klasificēšanai. Multikanālu rastru un zonālā statistikas dati tālāk izmantoti mašīnmācīšanās algoritma apmācīšanai R vidē. Dati pēc nejaušības principa sadalīti proporcijās 80% un 20%, tajā skaitā 80% no datiem izmantojām, lai veiktu algoritma apmācības procesu, bet 20% izmantojām iegūto rezultātu validācijai. Lai samazinātu parauglukumumu skaita atšķirības un nodrošinātu identiska skaita parauglukumumu pārstāvniecību, veikts *upsampling* process. Lai atlasītu pēc iespējas precīzākus mašīnmācības parametrus, nepieciešams izmantot *xgbTree* modeli, kurš pieejams *Caret* bibliotēkā (Kuhn, 2008). Lai uzlabotu modelī izmantoto datu precizitāti, iepriekš veikta pieckārtēja datu šķērsvalidācija, izmantojot iepriekš noteiktus parametrus (Tab. 2.3).

Tab. 2.3. True grid parametru vērtības

Nr.	Parametrs	Vērtības
1.	<i>Nrounds</i>	5, 10, 25, 50, 75, 100, 150, 200, 300, 400, 500, 750, 1000
2.	<i>Maks_depth</i>	2, 3, 4, 5, 8, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50
3.	<i>Eta</i>	0,3
4.	<i>Gamma</i>	0
5.	<i>Colsample_bytree</i>	1
6.	<i>Min_child_weight</i>	1
7.	<i>subsample</i>	0,5

Pēc datu apstrādes *R studio* programmā izveido arī viena kanāla rastra failu, lai vizuāli reprezentētu modeļa klasificētās zemes izmantošanas kategorijas, kuras iegūtas no modeļa apmācības procesā iegūtajiem datiem.

Kopumā zemes kategoriju klasificēšanas mašīnmācības modelī izmantoti 6773 MRM apļveida nesadalītie parauglukumumi (Att. 2.9). Kopējā datu kvalitāte vērtējama kā apmierinoša, lai arī novērojamas izteiktas atsevišķu zemes kategoriju prognozēšanas neprecizitātes. Kopējā precizitāte novērtēta ar 74,4% un Kappa indekss sasniedz 0,63. Redzama izteikta likumsakarība starp klasificēšanas precizitāti un atsevišķu zemes izmantošanas kategoriju parauglukumumu skaitu ieejas datos. Zemes kategorijām, kurām ieejas datos parauglukumumu pārstāvniecība ir zema, ir arī zemāka datu precizitāte (Att. 2.10 un 2.9).



Att. 2.10. Zemes izmantošanas kategoriju datu klasificēšanas precizitāte

Viszemākā datu klasificēšanas precizitāte novērojama citu zemju kategorijai, kur prognozes precizitāte ir 0%. Tas skaidrojams ar to, ka citu zemju kategorijas parauglaukumi pārsvarā atrodas Latvijas teritorijas piejūras smilšu kāpu zonā, kur to kopējais skaits ir ļoti mazs, bet pilnīgi apaļu šīs zemes kategorijas parauglaukumu skaits kopumā ir vēl mazāks (Att. 2.10). To specifiskās lokācijas dēļ daļa no parauglaukuma var atrasties ūdenī vai piejūras mežos, kas attiecīgo parauglaukumu saskalda vairākās daļās jeb sektoros un to izmantošana mašīnmācības modelim nav piemērota.

Tāpat, zema klasificēšanas precizitāte novērota apbūves teritorijām, kur kopējā precizitāte vērtējama ar 20%. Arī šī zemes kategorija ir maz pārstāvēta (kopā 203 parauglaukumi). Šīs zemes izmantošanas kategorija ir īpatnēja arī ar to, ka pikseļu vērtību variācijas var būt ļoti dažādas. To ietekmē plašu apbūves veidu apvienošana vienā kategorijā (ceļi, meža ceļi, ēkas, pagalmi, kapsētas u.c.), kur rastra vērtību atšķirība katrai apakškategorijai var būtiski atšķirties.

Visplašāk pārstāvētā zemes kategorija ar 2980 parauglaukumiem ir meža zemes, un šīs zemes izmantošanas kategorijas klasificēšanas rezultāti, likumsakarīgi, uzrādījuši visaugstāko precizitāti, sasniedzot 88%. Tāpat klasificēšanas kļūdu matricā redzams, ka šīs zemes izmantošanas kategorijas validācijai izvēlētie parauglaukumi uzrāda ļoti zemu nepareizi klasificēto zemes kategoriju skaitu (Tab. 2.4). Lielākās neprecizitātes kļūdas meža zemēs novērojamas tieši attiecībā pret zālāju platībām, kur nepareizi klasificēti 36 parauglaukumi. Viens no iemesliem šādai situācijai ir MRM 64. zemes izmantošanas kategorija – aizaugusi lauksaimniecības zeme. Šajā kategorijā iekļautos MRM parauglaukumos ir kokaugu veģetācija, bet tā vēl nav klasificējama kā mežs, radot modeli strīdus situācijas, kas var izraisīt nepareizu zemes izmantošanas kategoriju klasifikāciju.

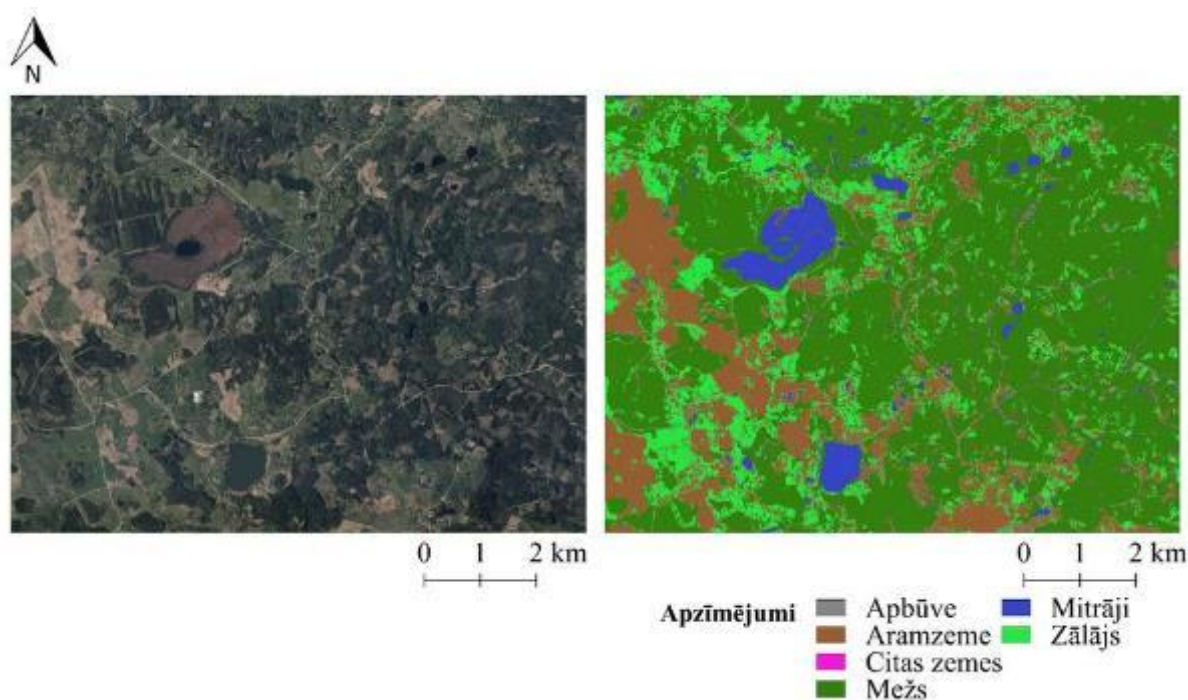
Klasificēšanas kļūdu matricā novērojama vēl viena tendence – zālāju un aramzemju platību nepareiza klasificēšana. Zālajos 67 parauglaukumi klasificēti kā aramzemes, bet aramzemēs 80 parauglaukumi nepareizi klasificēti kā zālāji. Lai arī izmantoti aktīvās veģetācijas perioda rastra attēli, tāpat aramzemju un zālāju klasificēšana, modelis nevar precīzi nodalīt aramzemēs sētos zālājus, ilggadīgos zālājus un ganības, jo visās šajās teritorijās var notikt saimnieciskā darbība (pļaušana, noganīšana), kas padara tās vizuāli līdzīgas). Šāda līdzība rada nenoteiktību mašīnmācības modeļa apmācības rezultātā.

Tab. 2.4. MRM parauglaukumu klasificēšanas kļūdu matrica (pareizi klasificēto parauglaukumu skaits iezīmēts tabulā)

Zemes kategorija	Apbūve	Aramzeme	Citas zemes	Mežs	Mitrājs	Zālājs

Zemes kategorija	Apbūve	Aramzeme	Citas zemes	Mežs	Mitrājs	Zālājs
Apbūve	8	7	0	0	0	4
Aramzeme	14	220	1	17	11	67
Citas zemes	0	1	0	0	1	0
Mežs	7	18	0	523	9	20
Mitrājs	1	5	0	19	74	7
Zālājs	10	80	0	36	6	182

Izmantojot *Sentinel2* datus un mašīnmācīšanās procesā radīto zemes izmantošanas klasificēšanas modeli, visai Latvijas teritorijai izveidota zemes izmantošanas klasifikācijas karte, kuras horizontālā izšķirtspēja ir 10 m (Att. 2.11).



Att. 2.11. Zemes klasificēšanas rezultātu kartes salīdzinājums pret ortofoto

Izveidotais mašīnmācības modelis, izmantojot kā ieejas datus MRM parauglaukumus un *Sentinel2* rastra attēlu spektrālo slāņu informāciju, spēja klasificēt zemes izmantošanas veidu ar 75% precizitāti (Kappa indekss 0.64). Datu kvalitāte vērtējama kā apmierinoša, it īpaši tādām zemes izmantošanas kategorijām kā mežs, aramzeme un zālājs, bet tā ir jāuzlabo, lai raksturotu zemes izmantošanas veida maiņu. Lai palielinātu klasificēšanas precizitāti, ir jāizmanto papildus datu kopas, it īpaši tādām zemes izmantošanas kategorijām, kas MRM datos ir maz pārstāvētas vai raksturojas ar lielu dažādību, t.i., citas zemes un apbūve. Arī meža zemē, aramzemē un zālajos var uzlabot klasificēšanas precizitāti, samazinot kļūdas iespējas citu zemes izmantošanas kategoriju noteikšanā.

2.2.1. Pagaidu secinājumi

Pētījuma nākamajā etapā prognožu veikšanai plānots palielināt attālās izpētes datu klāstu. Tā vietā, lai izmantotu *Sentinel-2* datus tikai par vasaras mēnešiem, iekļausim ainas arī no pavasara un rudens periodiem, tādējādi iekļaujot sezonālātes aspektu dažādām zemes lietojuma veidu klasēm. Šim aspektam savā starpā būtu jāpalīdz precīzāk nošķirt meža un nemeža zemes, kā arī aramzemes un zālājus.

Tāpat pievērsīsim uzmanību reljefu un augsni raksturojošajiem datiem kā normalizētais virsmas augstums, mitro vietu kartes u.c. datu kopas. Lai gan zemes lietojuma veidu telpiskais izvietojums lielā mērā ir atkarīgs no antropogēniem apstākļiem, cilvēku darbības pārsvarā ir sekas dažādiem vides apstākļiem un Zemes virsmas topogrāfija un augsnes mitruma stāvoklis saistībā ar zemes izmantošanu ieņem būtisku lomu lēmumu pieņemšanā.

Pievērsīsim uzmanību arī dažādiem mašīnmācīšanās modeļiem un to parametriem. Šajā pētījuma etapā izmantojām *Extreme Gradient Boosting Tree (xgbTree)* algoritmu, kurš iepriekš sevi pierādījis kā robustu un precīzu klasifikācijas algoritmu, tomēr ir arī citi algoritmi, kuri konkrētās situācijās spēj uzrādīt augstvērtīgākus klasifikācijas rezultātus.

Pētījuma beigās izveidosim publiski pieejamu karti ar aktuālām zemes lietojuma veida prognozēm, kuru publicēsim LVMI Silava WMS serverī. Tāpat izstrādāsim darba plūsmu, lai izstrādāto karti katru gadu ērti varētu atjaunot un iegūt pēc iespējas nesenus un precīzus rezultātus par zemes lietojuma veidiem Latvijā.

3. TRUPES IETEKMES UZ OGLEKĻA UZKRĀJUMU DZĪVO KOKU BIOMASĀ MODELĒŠANA

3.1. Izstrādāt metodi un novērtēt trupes ietekmi uz oglekļa uzkrājumu dzīvajā biomasā LVM apsaimniekotajos mežos

Sakņu piepes sugu *Heterobasidion* spp. izraisītā sakņu trupe ir ekonomiski visnozīmīgākā skujkoku slimība ziemeļu boreālajos un hemiboreālajos reģionos, kura bojā gan koku virszemes, gan celma un sakņu daļu egļu un priežu audzēs. Somijā veiktos pētījumos noskaidrots, ka trupējušās eglēs 80 % gadījumu primārais trupes izraisītājs bija sakņu piepe *H. annosum* s.s. un *H. parviporum*, 10% gadījumu celmene *Armillaria* spp., un pārējos gadījumos tās ir citas sēnes. Tā kā infekcija izplatās lēni, to ir ļoti grūti pamanīt agrīnajās stadijās, un bieži vien slimība tiek pamanīta tikai tad, kad koks jau ir smagi bojāts (Allikmäe et al., 2017). Slimības simptomi skujkokiem nav ļoti atšķirīgi no citiem trupi izraisīto sēņu bojājumiem. Trupe attīstās dzīvos kokos bez ārējiem simptomiem līdz brīdim, kad vismaz puse no koka sakņu sistēmas vai sakņu kakla ir inficēta. Sakņu trupe pazemina koksnes kvalitāti, samazina koku dzīvotspēju un mehānisko stabilitāti, kā arī samazina pieauguma veidošanos un paātrina koku bojāeju. Trupi izraisīto sēņu sadala koksni esošo celulozi un lignīnu, izraisot kokos uzkrātā oglekļa (C) emitēšanu atpakaļ atmosfērā. Šīm sēnēm ir būtiska nozīme meža ekosistēmas C un slāpekļa (N) aprites ciklā. Tās darbojas kā galvenie organismi, kas efektīvi sadala koksni, pārveidojot to par oglekļa dioksīdu (CO₂) un ūdeni.

Eiropas Savienības valstīs ikgadējie ekonomiskie zaudējumi, ko izraisa sakņu trupe, jau pirms vairāk nekā 20 gadiem tika novērtēti kā aptuveni 800 miljoni eiro (Hodges, 1999), un mūsdienās zaudējumi noteikti ir vēl lielāki. Norvēģijā secināts, ka trupējušo koka vērtība vidēji samazinās par aptuveni 7% (Noordermeer et al., 2023). Attiecībā uz sakņu trupi priežu audzēs Baltijas valstīs mežsaimnieciskie zaudējumi pagaidām nav novērtēti, bet egļu audzēs zaudējumi vidēji pārsniedz 1000 EUR ha⁻¹. Papildus koksnes kvalitātes samazinājumam, sakņu un stumbra trupe negatīvi ietekmē koku augšanu un C piesaisti, jo enerģijas resursi tiek novirzīti koka aizsardzībai, nevis pieauguma veidošanai. Jāatzīmē, ka inficētie koki, visticamāk, ir jutīgāki arī pret citiem kaitēkļiem un slimībām, piemēram, egļu astoņzobu mizgraužu uzbrukumiem, kā arī stumbra lūzumiem vēja vai sniega dēļ (Räty et al., 2023). Pretēji ekonomiskajiem aprēķiniem, pasaulē līdz šim nav veikti sistemātiski pētījumi, lai novērtētu sakņu trupes izraisīto zaudējumu apjomus C piesaistes vienībās. Skujkoku meži ir nozīmīga C krātuve, un pēc vadošo zinātnieku domām, tiem ir būtiska loma globālās sasilšanas tempa mazināšanā, ko izraisa CO₂ koncentrācijas palielināšanās atmosfērā. Ir nepieciešamas precīzas metodes, lai novērtētu skujkoku mežu oglekļa uzkrājumu, lai atbalstītu zinātnē balstītus politiskos lēmumus, kas vērsti uz cilvēka radīto CO₂ emisiju piesaisti kokaugu biomasā.

Galvenās 2024. gadā plānotās pētījuma darbības, lai izstrādātu metodi un novērtētu trupes ietekmi uz C uzkrājumu dzīvajā biomasā LVM apsaimniekotajos mežos, ir trupes izplatības un sastopamības analīze egļu un priežu audzēs. Trupējušās koksnes paraugu ievākšana augošos kokos vai no celmu virsmas blīvuma, C un N satura izmaiņu raksturošanai. Datu apstrāde un stumbra trupes ietekme uz dzīvu koku biomasu egļu un priežu audzēs analīze.

3.1.1. Metodika

Trupes ietekmes analīzei atlasītas un uzmērītas 8 priežu un 17 egļu mežaudzes, katrā ierīkojot 500 m² parauglaukumu un uzmērot visus valdošās koku sugas kokus (Tab. 3.1). Trupes sastopamība parauglaukumos noteikta, urbjot kokus celma daļā ar mehāniskās pretestības

mērīšanas ierīci – rezistogrāfu (Att. 3.1). Rezistogrāfs ir dažus milimetrus tievs un diezgan garš urbis, ar kuru urbji kokā un mēra koksnes pretestību pret urbšanu. Pretestības izmaiņas – cik viegli vai grūti veikt urbumu – var norādīt uz izmaiņām koksnes kvalitātē. Šādā veidā iespējams diagnosticēt trupes skartus egles un priedes kokus, tos nenožāgējot. Ar šo metodi, analizējot kokus Igaunijā, secināts, ka vidēji 8% egļu un 1,6% priežu bija labi attīstījusies serdes trupe (Allikmäe et al., 2017). Latvijā iepriekš iegūtie dati gan apliecina, ka egļu audzēs trupējušo koku īpatsvars ir ievērojami lielāks, sastādot apmēram 20-25% (Arhipova et al., 2011b). Rezistogrāfs ne vienmēr nodrošina precīzu trupes klātbūtnes un bojājumu apmēra noteikšanu augošos kokos. Tāpēc šajā pētījumā trupes izplatības analīze veikta, izmantojot svaigu izcirtumu apsekošanas rezultātus, kā arī senākos pētījumos iegūtos datus, lai iegūtu ticamākus un visaptverošus rezultātus.

Tab. 3.1. Atlasītās audzes trupes ietekmes izvērtēšanai ar rezistogrāfu

Suga	Vieta	Kvartāls	Nogabals	Audzēs formula	Vecums	MT	Platums	Garums
Priede	Jelgava	18	13	9P1A 109	109	As	56.723897	23.720231
Priede	Jelgava	22	14	9P 159 1E 139	159	Dm	56.731221	23.760105
Priede	Jelgava	32	6	8P2E 124	124	As	56.7242	23.748662
Priede	Jelgava	38	7	8P2E 169	169	Dm	56.717477	23.71028
Priede	Jelgava	40	18	8P2E 94	94	As	56.713817	23.724504
Priede	Jelgava	42	1	10P 102	102	Ln	56.718166	23.746153
Priede	Kalsnava	103	9	9P 160 1B 120	160	Mr	56.706484	25.853381
Priede	Šķēde	20	4	8P2E 123	123	Vr	57.248114	22.679186
Egle	Kalsnava	109	33	7E3B 100	100	As	56.698736	25.855287
Egle	Kalsnava	109	39	7E2B1P 70	70	Ks	56.69571	25.856396
Egle	Kalsnava	112	15	7E2B1P 70	70	Ks	56.699218	25.840366
Egle	Kalsnava	126	23	7E2P1B 81	81	Nd	56.690016	25.81348
Egle	Kalsnava	136	15	7E2B1P 70	70	As	56.690284	25.897998
Egle	Kalsnava	139	2	7E2P1B 75	75	Dm	56.692879	25.903468
Egle	Kalsnava	192	7	10 E 76	76	As	56.675985	25.937255
Egle	Kalsnava	222	3	7E2P1B95	95	Dm	56.666048	25.93601
Egle	Kalsnava	255	8	7E2B1P 86	86	Dm	56.660094	25.993858
Egle	Kalsnava	258	3	10 E 96	96	Dm	56.661739	26.016153
Egle	Kalsnava	282	5	7E3P 140	140	As	56.651228	26.024271
Egle	Šķēde	2	8	7E3P 148	148	Vr	57.27767	22.74297
Egle	Šķēde	31	3	10 E 125	125	Vr	57.23212	22.66830
Egle	Šķēde	39	4	7E2Oz1B 128	128	Vr	57.216229	22.643778
Egle	Šķēde	39	25	7E1B1A1M 119	119	Db	57.21191	22.65188

Suga	Vieta	Kvartāls	Nogabals	Audzēs formula	Vecums	MT	Platums	Garums
Egle	Šķēde	40	32	10 E 129	129	Db	57.21071	22.65453
Egle	Šķēde	41	7	7E2P1B 71	71	Vr	57.198116	22.622247



(a)



(b)



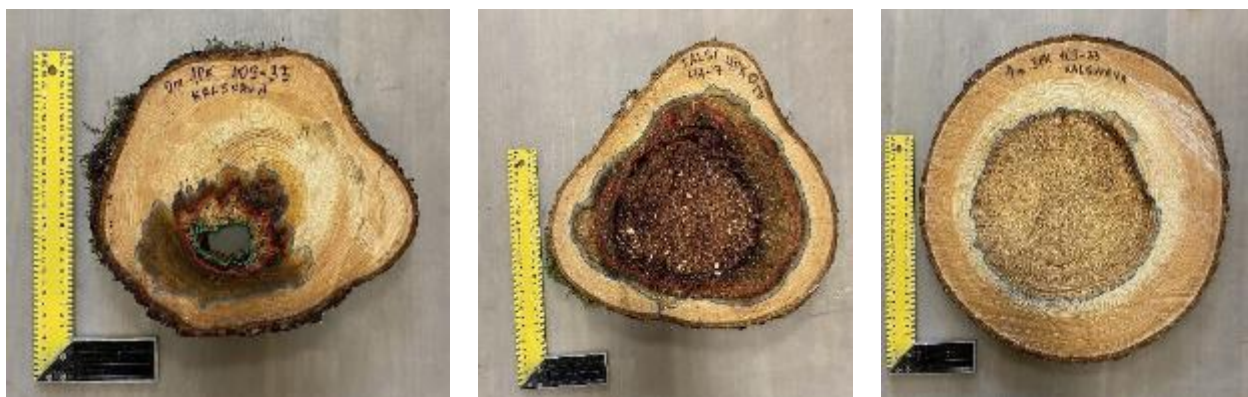
(c)

Att. 3.1. Trupes bojāto koku diagnosticēšana: a) koka urbšana ar rezistogrāfu; b) mērījums neuzrāda trupes klātbūtni; c) mērījums uzrāda potenciālu serdes trupi

Analizētajās egļu audzēs serdes trupe, izmantojot rezistogrāfu, konstatēta vidēji 7,4% koku, kas atbilst Igaunijā veiktā pētījuma rezultātiem (Allikmäe et al., 2017). Pētījuma turpinājumā trupes bojātie koki nozāģēti un sagatavoti stumbra analīzēm, lai novērtētu trupes ietekmi uz reducēto blīvumu, C un N saturu. Savukārt, priedes dominējošās audzēs rezistogrāfa urbumu analīze neuzrādīja nevienu trupējušu koku. Līdz ar to pētījuma turpinājumā nebija iespējams analizēt trupes izplatību augošu priežu stumbros, un pieņemts lēmums analizēt trupes ietekmētas stumbra šķēsgriezuma ripas svaigi zāģētās cirsmās. Trupējušie egles paraugkoki, sekojot iepriekš izstrādātajai metodikai, sadalīti 1m garās sekcijās. Ja stumbra šķēsgriezuma vietā konstatēta trupes klātbūtne, tad no šīs vietas paņemta ripa turpmākajām analīzēm un trupes aizņemtā laukuma mērījumiem. Pēc iepriekš izstrādātās shēmas no šķēsgriezuma ripām iegūti trupējušas koksnes paraugi. Laboratorijā noteikts koksnes paraugu blīvums, C un N saturs atkarībā no trupes sadalīšanās pakāpes (Att. 3.2):

1. iekrāsojums – raksturīgas nelielas koksnes mehānisko īpašību izmaiņas;
2. mīkstā trupe – sadalījusies koksne, kurā jau ir redzama koksnes noārdīšanās.

Visām sagatavotajām stumbra šķēsgriezuma ripām datorprogrammā *Image J* precīzi aprēķināts trupes vai dobuma ietekmētais laukums atbilstoši koksnes sadalīšanās pakāpei. Paraleli šķēsgriezuma ripu iegūšanai, ar 10 cm intervālu noteikts trupes izplatības augstums stumbrā. Latvijā egļu un priežu audzēs ir veikti pētījumi par trupes izplatību un ietekmi uz kokmateriālu iznākumu, taču trūkst empīriski dati par koksnes blīvuma un C satura izmaiņām, kā arī nav izstrādāta metode trupes radīto C zudumu modelēšanai.



(a)

(b)

(c)

Att. 3.2. Trupes attīstības stadijas stumbra šķēsgriezuma ripās: a) iekrāsojusies koksne, mīkstā trupe un dobums; b) iekrāsojusies koksne un mīkstā trupe; c) iekrāsojusies koksne

Trupējušas koksnes paraugu blīvums noteikts, izmantojot svarus *Precisa XB 220A*, kuri aprīkoti ar *Precisa* blīvuma noteikšanas komplektu (Att. 3.3, a). Blīvuma paraugu platums virzienā no ripas centra uz mizu ir 2 cm. Parauga biezums bija vienāds ar ripas biezumu, bet tā garums nepārsniedza 3 cm. Pirms blīvuma mērījumu veikšanas, visi koksnes paraugi uz 24 stundām iemērkti ūdenī, lai novērstu ūdens uzsūkšanu mērījumu laikā. Katrs paraugs nosusināts ar mīkstu papīru un nosvērts gaisā kā arī nosvērts iegremdēts ūdenī. Piesūcināta parauga blīvumu aprēķināja, izmantojot Arhimēda principu, pamatojoties uz parauga masu gaisā un ūdenī. Aprakstītā metode ir īpaši piemērota neregulāras formas objektiem un plaši izmantota koksnes paraugu blīvuma noteikšanai. Lai aprēķinātu reducēto blīvumu, paraugi žāvēti 103-105°C, līdz sasniegta nemainīga to masa, kas prasīja apmēram 4-5 dienas (Att. 3.3, b). Katrai koku sugai un trupējušas koksnes pakāpei vairāk kā 100 nejauši izvēlēti paraugi tika sasmalcināti un samalti viendabīgā pulverī (Att. 3.3, c). Koksnes pulveris analizēts, izmantojot Vario EL cube elementanalizatoru (Elementar Analysensysteme GmbH, Elementar-Straße 1, D-63505 Langenselbold), nosakot C un N koncentrāciju paraugos.



(a)



(b)



(c)

Att. 3.3. Trupējušo koksnes paraugu apstrāde laboratorijā: a) blīvuma noteikšana; b) paraugu žāvēšana; c) paraugu samalšana pulverī, lai noteiktu C un N saturu

3.1.2. Rezultāti un to analīze

Trupējušas koksnes izplatība un to ietekmējošie faktori

Pētījumā padziļināti analizēti 60 trupējuši egles paraugkoki, kuri nozāģēti 73-100 gadus vecās audzēs (Tab. 3.2). Precīzu vecumu kokiem noteikt nebija iespējams, jo tajos jau bija sākusi attīstīties stumbra trupe. Eglēm sakņu trupe vispirms izplatās saknēs, pēc tam pāriet uz stumbru un pētījumā analizētajiem paraugkokiem vidēji sasniedza 4,1 m augstumu. Mīkstā trupes kolonnas vidējais augstums bija daudz mazāks, vidēji tikai 1,1 m, bet dobuma 0,1 m. Iepriekš Latvijā veiktajos pētījumos noskaidrots, ka trupes kolonnas augstums eglei 85 gadu vecumā ir nedaudz lielāks, vidēji $6,6 \pm 2,6$ m, un stipri bojātos kokos trupe var pat sasniegt 12 m augstumu (Arhipova et al., 2011a).

Trupes diametrs celma augstumā bija robežās no 10,8 cm līdz 31,5 cm, ar vidējo vērtību 23,6 cm. Tas norāda, ka trupes aizņemtais laukums var būtiski atšķirties starp dažādiem kokiem. Visiem nozāģētajiem egles paraugkokiem konstatēta mīkstās trupes klātbūtne, taču dobumi konstatēti tikai 36% analizēto koku. Koksnes iekrāsojums egļu stumbros, iespējams, ir sastopams daudz biežāk, taču pētījuma metodoloģija, kas izmantoja rezistogrāfu trupējušo koku identificēšanai, neļāva šādus kokus noteikt. Pētījumā noskaidrots, lai gan mīkstā trupe bieži sastopama koku stumbros, tās ietekme uz kopējo stumbra tilpumu bija salīdzinoši neliela, vidēji 3,2%. Dobumu ietekme bija vēl mazāka, jo to aizņemtā platība veidoja vien 0,4% no stumbra tilpuma. Mīkstās trupes un dobuma augstuma mērījumi apstiprina to, ka trupes sastopamības datu ievākšana noteikti ir jāveic celma daļā, jo daudziem kokiem trupes kolonnas augstums nesniedzas līdz 1,3 m augstumam.

Tab. 3.2. Trupējušo egļu raksturojums

Vērtība	Vidēji	Min.-maks.
Vecums, gadi	80,4	73-100
Koka augstums, m	24,6	16,1-32,1
Koka krūšaugstuma caurmērs, cm	28,4	18,6-43,5
Stumbra tilpums, m ³	0,9	0,3-1,9
Iekrāsojuma kolonnas augstums, m	4,1	0,6-9,1
Mīkstās trupes kolonnas augstums, m	1,1	0,2-2,3
Dobuma kolonnas augstums, m	0,1	0,0-0,2
Iekrāsojuma diametrs uz celma, cm	23,6	10,8-31,5
Mīkstās trupes diametrs uz celma, cm	15,3	5,0-27,0
Dobuma diametrs uz celma, cm	11,2	4,5-20,5
Trupes kopējais īpatsvars no stumbra tilpuma, %	11,3	1,3-26,5
Mīkstās trupes īpatsvars no stumbra tilpuma, %	3,2	0,2-7,6
Dobuma īpatsvars no stumbra tilpuma, %	0,4	0,0-2,4

Pētījumā apstiprinājās sakņu trupes slēptais raksturs, īpaši parastās priedes audzēs. Lai gan koki vizuāli izskatās vitāli, neskatoties uz infekciju, galarezultātā tas noved pie slimības smaguma

pakāpes nepietiekama novērtējuma. Iepriekš LVMI Silava iegūtie dati liecināja, ka sakņu trupe visbiežāk sastopama pieaugušās priežu audzēs auglīgās minerālaugsnēs, un infekcijas risks īpaši palielinās vecākās audzēs. Tāpēc sākotnēji sakņu trupes identificēšanai ar rezistogrāfu atlasītas priežu audzes vecumā no 94 līdz 169 gadiem ar lielāku iespējamību atrast trupējušus kokus. Tāpat ir noskaidrots, ka mehāniski radītie bojājumi priedes stumbram neveicina sakņu piepes izplatību.

Visdrošākā sakņu trupes identifikācijas metode ir priedes sakņu sistēmas atrakšana un paraugu iegūšana, to analīze ar mikroskopu, lai noteiktu *Heterobasidion* spp. klātbūtni. Taču tā ir ļoti dārga un darbietilpīga metode. Lai iegūtu ar sakņu trupi inficētu priedes koksnes paraugus, pētījumā atlasītajās priežu audzēs meklētas sakņu trupes “ligzdas” ar kaltsiem un ar saknēm izgāzušies kokiem. No kokiem ar acīmredzamu sakņu trupes klātbūtni, celma daļā iegūtas šķēsgriezuma ripas, kurām izlases kārtā laboratorijā noteikta sakņu trupes klātbūtne. Laboratoriski celma daļā sakņu trupe apstiprinājās gan ar saknēm svaigi izgāzušos kokos, gan nokaltušajos kokos (Att. 3.4), taču iegūtajos celma paraugos no kontroles kokiem blakus sakņu trupes ligzdām *Heterobasidion* klātbūtne neapstiprinājās. Zīmīgi, ka uz visiem svaigi ar saknēm izgāztajiem kokiem uz celma ripām bija manāms tikai neliels koksnes iekrāsojums, kas vairāk izskatījās pēc sasveķojuma, lai gan tie bija ļoti smagi bojāti koki ar stipri bojātām koku saknēm. Tas izskaidro kāpēc pētījuma sākumposmā ar rezistogrāfu neizdevās atrast trupējušās priedes, jo koksne vēl nebija notikušas būtiskas izmaiņas. Koksne bija sākusi sadalīties tikai nokaltušo koku stumbros bet process bija sācies no aplievas, nevis serdes centrālās daļas. Līdz ar to var pieņemt, ka tie visticamāk ir saules un nokrišņu darbības rezultātā radušies koksnes bojājumi.



(a)



(b)



(c)

Att. 3.4. Laboratoriski apstiprinātas sakņu trupes inficētas parastās priedes: a) ar saknēm izgāzies koks, zaļas skujas; b) ar saknēm izgāzies koks, nav zaļu skuju; c) nokaltis, stāvošs koks

Trupējušo koku sastopamība priežu audzēs

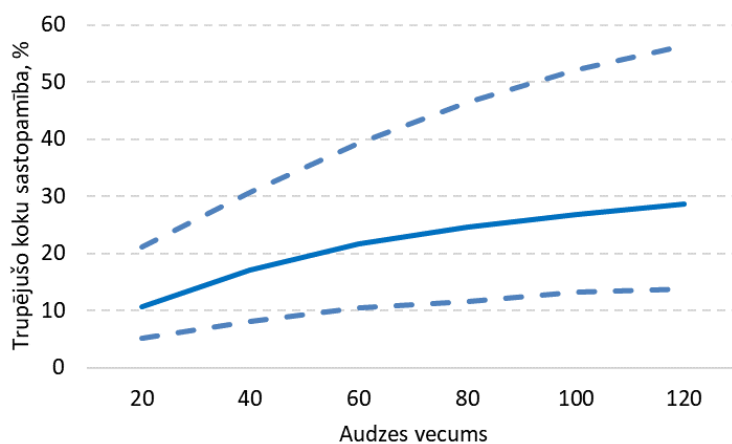
Balstoties uz literatūrā pieejamajiem datiem, trupējušu koku īpatsvars priežu audzēs parasti nepārsniedz 5-10%. Tas izskaidro, kāpēc pētījuma ietvaros, izmantojot rezistogrāfu, nebija iespējams konstatēt trupējušus kokus. Igaunijā veiktā pētījumā (Allikmäe et al., 2017) serdes trupe, izmantojot rezistogrāfu, tika konstatēta vidēji tikai 1,6% priežu audzēs analizēto koku. Šis rezultāts norāda uz metodes ierobežojumiem trupes izplatības izpētē, jo nelielās koksnes blīvuma izmaiņas apgrūtinā tās identificēšanu, īpaši gadījumos, kad trupe ir sākuma stadijā un vēl nav izteikti attīstījusies. Tomēr jāņem vērā, ka patiesais trupējušo koku īpatsvars priežu audzēs ir ievērojami lielāks, nekā sākotnēji novērtēts. Tas skaidrojams ar to, ka trupe ne vienmēr ir vizuāli pamanāma,

un tās klātbūtni kokā bieži iespējams konstatēt tikai, veicot laboratorisko analīzi, piemēram, pārbaudot sakņu vai koksnes paraugus. Vizuāli novērojamās pazīmes un simptomi, kas varētu norādīt uz *Heterobasidion* spp. klātbūtni, nav pietiekami uzticami indikatori šīs slimības noteikšanai priežu audzēs. Infekcijas izplatība un smaguma pakāpe tiek būtiski novērtēta par zemu, jo sakņu trupe visbiežāk attīstās bez acīmredzamiem ārējiem simptomiem, izmaiņām koksnes struktūrā un visbiežāk koku saknēs.

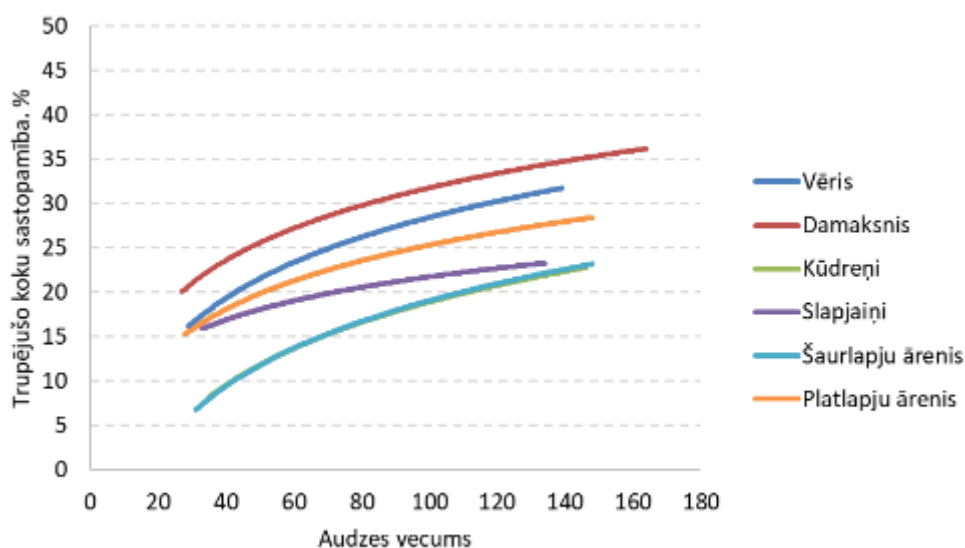
Trupējušo koku sastopamība egļu audzēs

Trupes ietekmēto koku sastopamības dati analizēti, apkopojot informāciju no 318 atsevišķiem meža nogabaliem. Latvijā 20-120 gadus vecās egļu audzēs trupējušo koku īpatsvars vidēji ir robežās no 10-30%, tomēr atsevišķās ciršanas vecumu sasniegušās audzēs, šis rādītājs var pat pārsniegt 50% (Att. 3.5). Iegūtie dati apliecina, ka pieaugušās egļu audzēs vismaz katram desmitajam kokam konstatēts lielāks vai mazāks serdes trupeī raksturīgs koksnes iekrāsojums, bet vidēji tie ir 20-30% trupējušie koki katrā audzē. Iekrāsojuma klātbūtne norāda uz trupes sākuma stadiju, kas ar laiku var ievērojami pasliktināt koksnes kvalitāti un vērtību. Iepriekš Lietuvā veikto pētījumu analīze liecina, ka 81-20 gadus vecās egļu audzēs vidēji 18-58% koku ir inficēti ar *Heterobasidion annosum* izraisīto stumbra un sakņu trupi (Žemaitis & Stakenas, 2016), kas saskan ar mūsu novērojumiem.

Inficēto koku īpatsvars ievērojami variē atkarībā no meža tipa, kas uzsver dažādu vides un augšanas apstākļu nozīmīgo lomu šīs slimības izplatībā un attīstībā (Att. 3.6). Visās analizētajās meža tipu grupās trupējušo koku īpatsvars pieaug, palielinoties audzes vecumam. Apsekojot svaigos egļu izcirtumus un audzes kurās veiktas kopšanas cirtes secināts, ka lielāks trupējušo celmu īpatsvars konstatēts auglīgajos meža tipos, piemēram, vērī un damaksnī, savukārt zemāks – vidēja vecuma audzēs kūdreņu meža tipos, kā arī šaurlapju ārenī. Kūdreņu un slapjainu meža tipu grupas šajā gadījumā tika apvienotas nepietiekama novērojumu skaita dēļ, kas neļauj veikt katra meža tipa atsevišķu analīzi. Auglīgos meža tipos, kur koku augšana ir straujāka, trupes izplatība bieži ir intensīvāka, jo mitruma un barības vielu bagātība var radīt labvēlīgus apstākļus patogēnu attīstībai. Pētījumos Zviedrijā analizēta dažādu faktoru ietekme uz serdes trupes sastopamību, un secināts, ka augšanas apstākļi ir otrs nozīmīgākais faktors pēc audzes vecuma, kas ietekmē trupes izplatību (Thor et al., 2005). Pētījumā analizēti arī tādi faktori kā temperatūras summa, augstums virs jūras līmeņa, krūšaugsstuma diametrs, augsnes mitrums un tekstūra, egļu īpatsvars, kā arī ģeogrāfiskais novietojums, uzsverot arī šo faktoru nozīmīgumu serdes trupes sastopamības prognozēšanā.

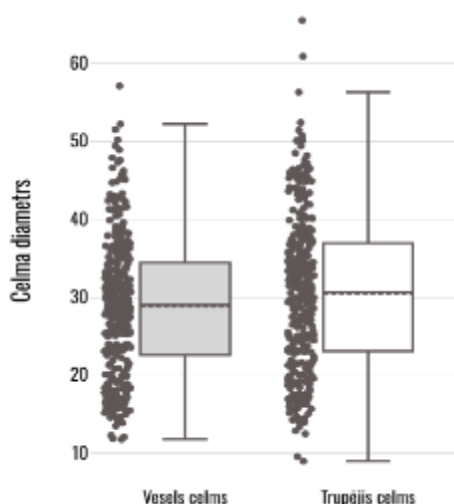


Att. 3.5. Trupējušo koku īpatsvars egļu audzēs. Laukums starp punktētām līnijām norāda uz 95% ticamības intervālu



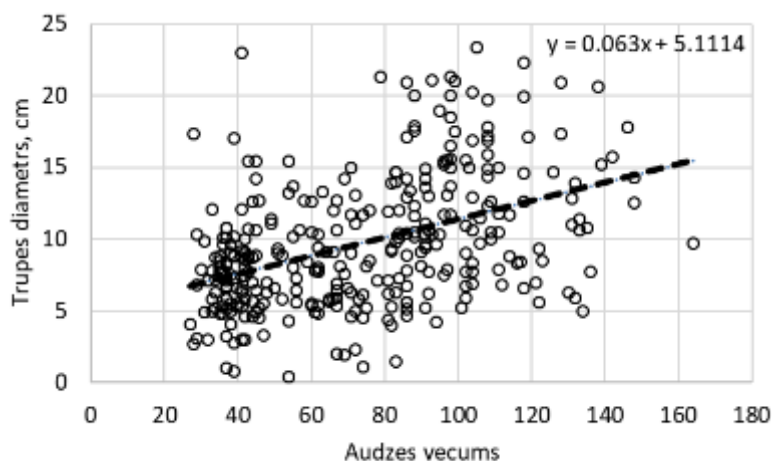
Att. 3.6. Trupējušo koku īpatsvars dažādos meža tipos atkarībā no audzes vecuma

Veicot svaigu egļu izcirtumu apsekošanu, tika uzmērīti trupējuši un veseli egles celmi. Rezultāti liecina, ka lielāka diametra celmiem trapes aizņemtais laukums ir nedaudz lielāks. Celmiem bez trapes pazīmēm vidējais diametrs bija 28,7 cm, savukārt celmos ar konstatētu mīksto trupi vai iekrāsojumu vidējais diametrs sasniedza 30,6 cm, kas norāda uz iespējamu saistību starp koka izmēru un trapes izplatības intensitāti (Att. 3.7). Iepriekšminēto apstiprina Norvēģijā veiktie pētījumi, kuros izmantoti harvesteru dati, novērojot, ka trapes ietekmētās egles parasti ir lielākas un garākas nekā vidēja lieluma koki tajā pašā mežaudzē (Noordermeer et al., 2023; Rätty et al., 2023). Tomēr koki ar stipri izteiktu trupi bieži bija mazāka diametra un zemāka augstuma, salīdzinot ar kokiem, kuros trupe bija sākuma stadijā (Rätty et al., 2023). Šāda tendence ir loģiska, jo progresējot trapei, samazinās ūdeni vadošās aplievas proporcija stumbrā, kas kavē koka augšanu, uzsverot trapes attīstības stadiju dažādo ietekmi uz koku augšanas rādītājiem. Mūsu dati apliecina, ka kokiem ar krūšaugsstuma diametru mazāku par 9 cm stumbra trupe praktiski netiek novērota vai ir sastopama ļoti reti. Tas var būt saistīts ar jauno koku aktīvajiem aizsardzības mehānismiem, kā arī faktu, ka trupi izraisošo sēņu izplatība dzīvajās saknēs notiek lēni. Tādējādi var pieņemt, ka arī daudzi mazāka izmēra koki ir inficēti, lai gan trapes attīstība lielākoties vēl notiek sakņu sistēmā un uz koka nozāģēšanas brīdi vēl nebija redzama uz celma virsmas.



Att. 3.7. Celmu diametru salīdzinājums veselām un trupējušām eglēm

Palielinoties audzes vecumam, pieaug ne tikai trupējušo koku īpatsvars, bet palielinās arī trupes diametrs jeb tās ietekmētais laukums uz celma virsmas (Att. 3.8). Vecākos kokos, sakņu trupi izraisītie patogēni ir bijuši klātesoši ilgāku laiku un šī ilgstošā iedarbība ļauj infekcijai izplatīties un aptvert lielāku koksnes apjomu. Turklāt koku aizsardzības mehānismi, piemēram, fenolu un sveķu veidošanās, pieaugot koku vecumam mēdz vājināties. Tā rezultātā vecāki koki kļūst jutīgāki pret infekciju un to progresēšanu. Vienlaikus stumbra pieaugums diametrā palielina infekcijai pieejamo koksnes daudzumu, kas veicina trupes izplatību ne tikai garenvirzienā, bet arī šķērsgrīzumā. Vecākiem kokiem biežāk sastopami mehāniski bojājumi, piemēram, mizas traumas vai sakņu sistēmas bojājumi, kas kalpo par ieejas punktiem patogēniem. Šādi bojājumi, īpaši kombinācijā ar nelabvēlīgiem vides apstākļiem, piemēram, sausumu, vēja radītiem postījumiem vai kukaiņu invāziju, var ievērojami vājināt koku fizioloģisko noturību. Vājāka koka noturība pret nelabvēlīgiem vides faktoriem ne tikai sekmē trupes progresēšanu, bet arī palielina risku, ka koki nespēs atjaunoties pēc stresa faktoru iedarbības, kas galu galā var novest pie to pilnīgas nokalšanas.



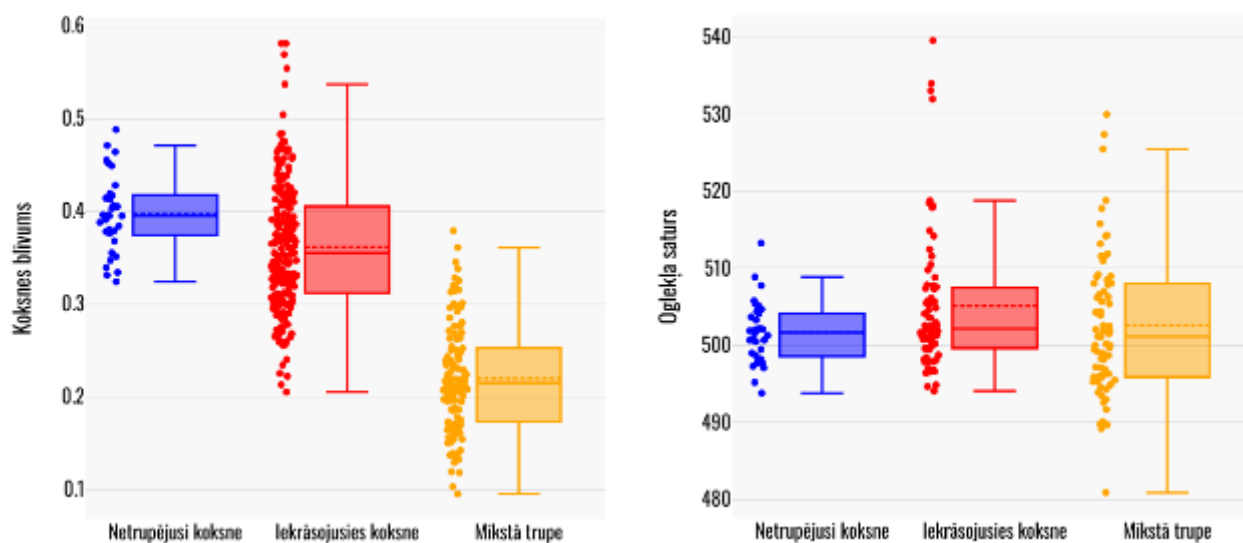
Att. 3.8. Vidējā trupes diametra celma augstumā izmaiņas, palielinoties audzes vecumam

Serdes trupes ietekme uz koksnes blīvumu, oglekļa un slāpekļa saturu

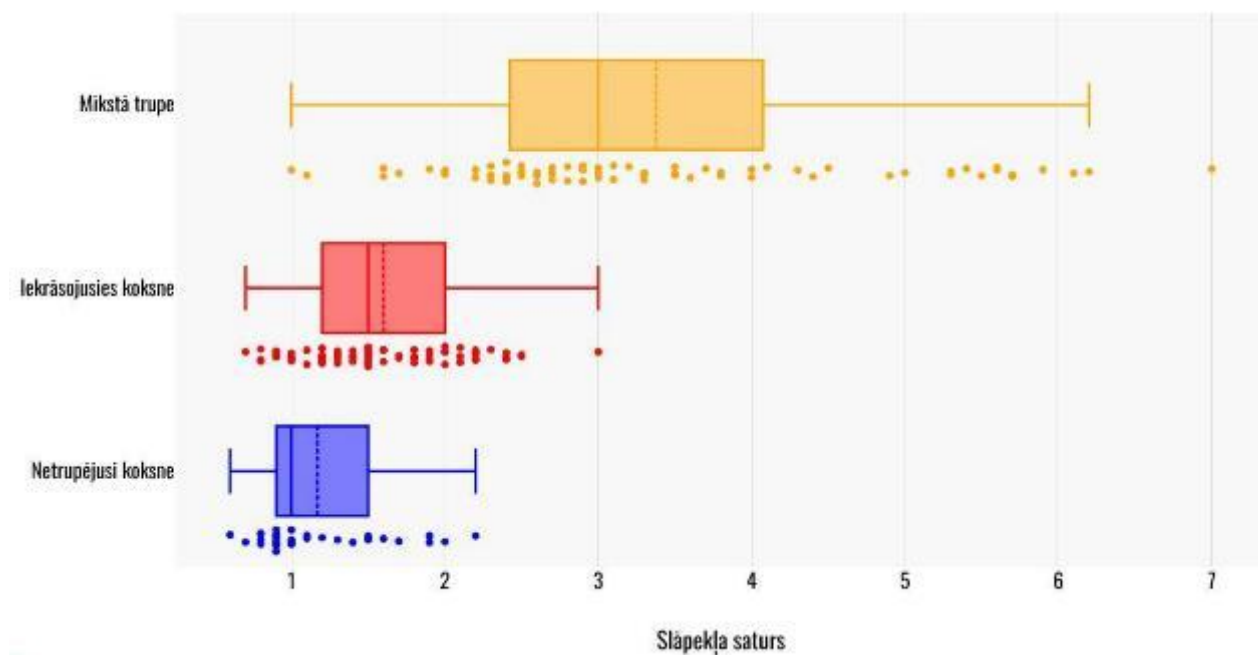
Reducētais blīvums ir nozīmīgs koksnes parametrs, lai aprēķinātu biomasu koku stumbros un atspoguļotu biomasas izmaiņas dažādās koka frakcijās. Statistiskie testi (Att. 3.9 un Att. 3.10) apstiprināja, ka trupes sadalīšanās pakāpe ir būtiska ($p < 0,05$) ietekme uz egles koksnes blīvumu

un N saturu. Savukārt pētījuma rezultāti attiecībā uz C saturu nebija tik vienojoši un noskaidrots, ka C saturs kontroles (netrupējusi koksne) un trupes bojātos koksnēs paraugos būtiski nemainās un ir robežās no 501,7-505,1 mg g⁻¹. Pētījumā secināts, ka netrupējušās koksnēs vidējais reducētais blīvums ir lielāks 0,395 t m⁻³, salīdzinot ar iekrāsojušos koksnē, kur vidējais blīvums ir 0,355 t m⁻³, un mīkstās trupes bojātu koksnē, kur sākotnējais koksnēs blīvums samazinājies gandrīz uz pusi, sasniedzot tikai 0,215 t m⁻³. Šie rezultāti atbilst citu pētījumu datiem, kuri norāda, ka iekrāsojušās koksnē, īpaši ja tā iekrāsojušās trupi izraisošo mikroorganismu darbības dēļ, bieži vien ir mazāk izturīga salīdzinājumā ar ne bojātu egles koksnē. Pētījumi rāda, ka pastāv lineāra saistība starp lignīna struktūras izmaiņām un krāsas izmaiņām koksnē (Kúdela et al., 2024). Lignīns ir aromātisks polimērs, kas raksturo koksnēs cietību un izturību pret mikrobiālo sadalīšanu. Līdz ar to krāsas izmaiņas koksnē, kas saistītas ar lignīna degradāciju, var norādīt uz iespējamu koksnēs kvalitātes un mehānisko īpašību pasliktināšanos.

Vairāki pētījumi liecina, ka N saturs koksnē palielinās, kad koksne sāk sabrukt (Köster et al., 2015; Romashkin et al., 2021). Tomēr vēl nav pilnībā noskaidrots, kā N pieaugums koksnē ietekmē tās sabrukšanas ātrumu. Salīdzinot ar ne bojātu egles koksnē, kur N saturs ir vidēji 1,17 mg g⁻¹, mīkstās trupes paraugos N saturs ir pieaudzis apmēram trīs reizes, sasniedzot 3,38 mg g⁻¹. Pastāv uzskats, ka daži mikroorganismi spēj piesaistīt atmosfērā esošo slāpekli (N₂) vai izmantot N savienojumus no apkārtējās vides. Šie procesi galarezultātā palielina N saturu koksnē, kas, savukārt, var kalpot kā noderīgs rādītājs koksnēs sadalīšanās pakāpes identificēšanai un bioloģiskās aktivitātes monitorēšanai.

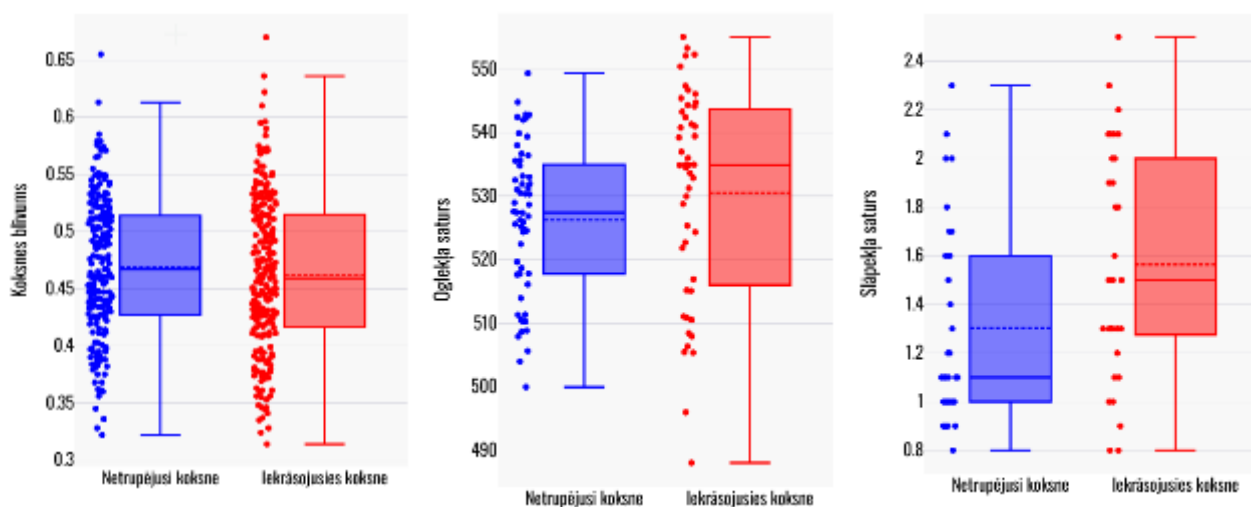


Att. 3.9. Egles reducētā blīvuma (t m⁻³) un oglekļa satura (mg g⁻¹) izmaiņas atkarībā no koksnēs klasifikācijas (netrupējusi koksne, iekrāsojums vai mīkstā trupe)



Att. 3.10. Egles slāpekļa satura (mg g^{-1}) izmaiņas atkarībā no koksnes klasifikācijas (netrupējusi koksne, iekrāsojums vai mikstā trupe)

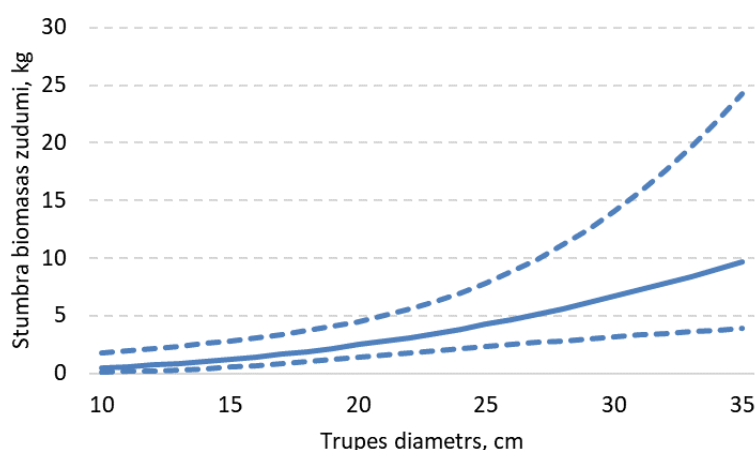
Priedes koksne ir augstāks sveķu saturs, kas sniedz dabisku aizsardzību pret sēnēm un kaitēkļiem, padarot tās koksni izturīgāku pret trupi, salīdzinot ar egles koksni. Sveķi darbojas kā barjera, kavējot mikroorganismu iekļūšanu un izplatīšanos. Ar rezistogrāfu urbējot priedes stumbru, pat zem sēnes augļķermeņa, nebija iespējams diagnosticēt izmaiņas koksnes kvalitātē. Tāpat kā eglei, arī priedei nozīmīgākais trapes izraisītājs ir *Heterobasidion* spp. sēnes. Slimība galvenokārt izplatās koka sakņu sistēmā, un, inficējot stumbru, bieži izraisa pastiprinātu sveķu izdalīšanos, kas liecina par patogēna klātbūtni un koka aizsargreakciju. Šī reakcija ir koka aizsardzības mehānisms, mēģinot ierobežot sēnītes micēlija izplatīšanos un novērst trapes veidošanos. Ar sveķiem piesūcinātie plankumi stumbra lejasdaļā un trapes izraisītā koksnes iekrāsošanās būtiski pazemina zāģbaļķu kvalitāti, tomēr neatstāj lielu ietekmi uz dzīvo koku virszemes biomasu. Pētījumā, analizējot ar sakņu trupi inficētu priežu celmu ripas, secināts, ka koksnes iekrāsojumam nav bijusi statistiski nozīmīga ietekme uz reducēto blīvumu, kā arī C un N saturu (Att. 3.11). Kopumā, lai gan priedei iekrāsojušās koksnes blīvums ir vidēji par 4% zemāks salīdzinot ar ne bojātu koksni, rezultāti norāda, ka blīvuma izmaiņas starp šiem diviem paraugu veidiem ir nelielas. Turpretī C un N saturs iekrāsojušās koksnes paraugos var būt nedaudz augstāks, taču šo parametru lielā datu izkliede norāda uz ievērojamu mainīgumu. Šī izkliede, visticamāk, izskaidrojama ar pastiprināto sveķu izdalīšanos celma augstumā.



Att. 3.11. Priedes reducētā blīvuma (t m^{-3}), oglekļa satura (mg g^{-1}) un slāpekļa satura (mg g^{-1}) izmaiņas atkarībā no koksnes klasifikācijas (netrupējusi koksne, iekrāsojums vai mīkstā trupe)

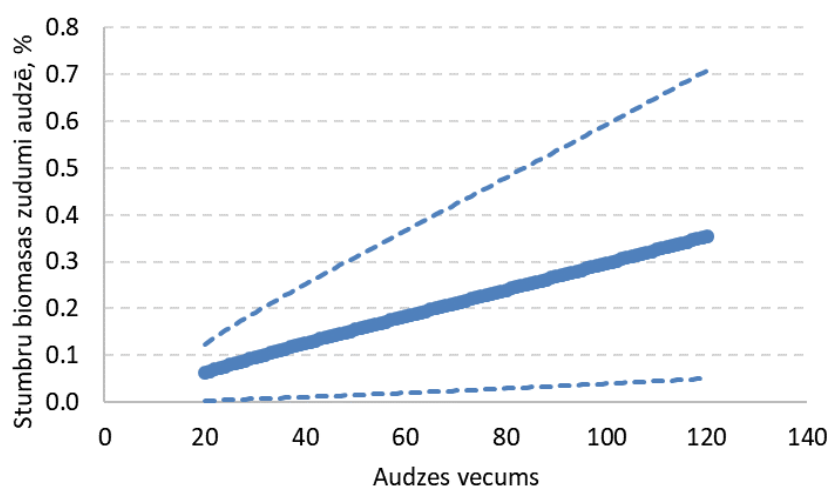
Serdes trapes ietekme uz stumbra biomasas aprēķiniem

Serdes trapes klātbūtne augošos kokos rada papildu nenoteiktību, kas ietekmē gan virszemes, gan celma un sakņu biomasas aprēķinus. Neskatoties uz šīs problēmas nozīmīgumu, tikai neliels skaits pētījumu pasaulē ir centušies novērtēt trapes ietekmi uz kopējo biomasu vai ar to saistītajiem oglekļa zudumiem. Analizējot nozāģēto paraugkošu datus, pētījumā izstrādāti modeļi stumbra biomasas samazinājuma prognozēšanai, pamatojoties uz serdes trapes diametru celma augstumā (Att. 3.12). Šie vienādojumi izmantoti gan kailcirtēs, gan kopšanas cirtēs, kur tika izmērīts serdes trapes kopējais diametrs, ietverot arī iekrāsojumu, mīksto trupi vai dobumu. Balstoties uz šiem aprēķiniem, audzes līmenī novērtēts biomasas samazinājums un tā ietekme uz oglekļa uzkrājumu meža ekosistēmā.



Att. 3.12. Prognozētais atsevišķu stumbru biomasas samazinājums, atkarībā no trapes diametra uz celma virsmas. Laukums starp punktētām līnijām norāda uz 95% ticamības intervālu

Serdes trapes ietekmes rezultātā analizētajiem egļu paraugkokiem stumbra biomasas zudumi svārstījās no 0,5 līdz 16,2 kg, kas atbilst 0,3-7% no atsevišķu koku kopējās stumbra biomasas. Vidēji trupējušajām eglēm biomasas bija samazinājusies par 5,5 kg, kas atbilst 2,4% no kopējās stumbra masas. Serdes trapes ietekme uz audzes biomasu netiek iekļauta nevienas valsts SEG inventarizācijas ziņojumos un pārskatos, jo šādu datu iegūšana ir laikietilpīga un resursu ietilpīga. Turklāt zinātnieki joprojām diskutē par dažādu trapes ietekmes izvērtēšanas metožu precizitāti un piemērotību šim mērķim. Pētījuma rezultāti liecina, ka serdes trapes ietekmē radītais stumbra biomasas samazinājums audzes līmenī nerada būtisku ietekmi uz kopējo audzes biomasu (Att. 3.13). Pat ciršanas vecumu sasniegušās egļu audzēs stumbru biomasas samazinājums trapes ietekmē nepārsniedz 0,7% no kopējās stumbru biomasas, bet vidēji tas ir 0,1-0,3 % robežās. Priežu audzēs šie rādītāji ir vēl zemāki, jo priedes koksne ir dabiski izturīgāka pret trapes veidošanos augstā sveķu satura dēļ.



Att. 3.13. Prognozētais stumbra biomasas samazinājums egļu audzēs atkarībā no audzes vecuma. Laukums starp punktētām līnijām norāda uz 95% ticamības intervālu

Serdes trapes ietekme uz skujkoku audžu biomasu ir nebūtiska vairāku iemeslu dēļ. Trupe visbiežāk ietekmē tikai stumbra centrālo daļu (serdi) un saknes, kas veido nelielu daļu no kopējā koksnes tilpuma un biomasas. Lielākā biomasas daļa ir koncentrēta stumbra ārējos slāņos – aplievā, kas ir aktīvā koksnes daļa, kur notiek ūdens un barības vielu transports. Tā kā aplieva un ārējie koksnes slāņi trapes agrīnajos posmos netiek tieši ietekmēti, kopējais biomasas samazinājums ir nenozīmīgs.

Serdi galvenokārt veido nedzīva koksne ar neredzamu blīvumu, kas nodrošina mehānisku atbalstu kokam, bet neietekmē tā aktīvos fizioloģiskos procesus. Līdz ar to trapes klātbūtne serdē būtiski neietekmē koka augšanu un fizioloģiskos procesus. Turklāt, pat ja trupe attīstās sakņu sistēmā, tās izraisītie biomasas zudumi bieži vien ir mazi salīdzinājumā ar dabiskajām izmaiņām audzē, kas rodas koku retināšanas, dabisko traucējumu (piemēram, vētru vai sniega bojājumu) vai koku mirstības dēļ egļu astoņzobu mizgraužu invāzijas laikā. Kopumā serdes trupe skujkokiem būtiskāk ietekmē koksnes kvalitāti, piemēram, samazina vērtīgo zāģbaļķu iznākumu un to vērtību tirgū, bet tās ietekme uz kopējo audzes biomasu un oglekļa uzkrājumu ir neliela. Šī iemesla dēļ serdes trapes ietekme reti tiek iekļauta oglekļa uzkrājuma novērtējumos vai SEG inventarizācijas ziņojumos.

Koka stumbrs pieaugušās skujkoku audzēs ir lielākā biomasas komponente, tomēr trupe ietekmē arī citas koka daļas, tostarp celmu un saknes, kas veido būtisku pazemes biomasas daļu. Trapes ietekme uz koka dzīvotspēju ir cieši saistīta ar tās lokalizāciju, un šī ietekme īpaši izteikta

parastajai priedei. Visnozīmīgākā ir sakņu trupe, jo tā var būtiski traucēt ūdens un barības vielu transportu no saknēm uz stumbru un vainagu. Šādas ietekmes rezultātā koks cieš no augšanas pieauguma samazināšanās, un bojātās saknes pakāpeniski atmirst, kas galu galā var novest pie koka bojāejas. Sakņu trapes ietekme uz koka dzīvotspēju ir atkarīga ne tikai no infekcijas apmēra, bet arī no konkrētās koku sugas fizioloģiskajām īpašībām un tās spējas pretoties infekcijai. Tāpat kā serdes trupe, arī sakņu trupe var attīstīties koksē bez acīmredzamiem ārējiem simptomiem. Parasti infekcijas pazīmes kļūst redzamas tikai tad, kad vismaz puse no koka sakņu sistēmas vai celma ir inficēta.

Trapes ietekmi uz sakņu biomasas zudumiem ir grūti novērtēt, jo bojājumi atrodas zem zemes un nav vizuāli identificējami. Turklāt globālajā zinātniskajā literatūrā par šo tēmu ir pieejams ierobežots datu apjoms. Lai novērtētu kopējos sakņu biomasas zudumus, ko izraisījusi celma un sakņu trupe, būtu jāņem vērā ne tikai tās saknes, kuras trapes dēļ ir pilnībā atmirusas, bet arī izmaiņas koksnes struktūrā celma un lielāko sakņu koksē. Tā kā precīzi novērtējumi par trapes ietekmi uz pazemes biomasu šobrīd nav pieejami, ieteicams pieņemt, ka biomasas zudumu īpatsvars pazemes daļās ir līdzīgs stumbra biomasas samazinājumam trapes ietekmē. Šāds pieņēmums ļauj izmantot jau esošos datus, lai raksturotu celma un sakņu trapes ietekmi uz kopējo biomasu mežaudzē.

Kopsavilkums

Pētījumā analizēta stumbra trapes ietekme uz dzīvu koku biomasu skujkoku audzēs, koncentrējoties uz koksnes blīvumu, kā arī oglekļa (C) un slāpekļa (N) saturu. Trapes kolonnas mērījumi veikti tikai egles paraugkokiem, jo priedēm serdes trupi ar rezistogrāfu noteikt nebija iespējams, ievērojot iepriekšējos gados izstrādāto metodiku. Priedēm pētījumā analizētas tikai celma ripas. Noskaidrots, ka eglei trapes ietekmētais koksnes īpatsvars vidēji aizņem 11,3% no kopējā stumbra tilpuma. Pētījumā secināts, ka koksnes iekrāsošanās un mīkstā trupe būtiski samazina egles koksnes blīvumu un palielina N saturu, savukārt koksnes C saturs statistiski būtiski neatšķiras no netrupējušas koksnes. Priedes koksnes paraugos lielā datu izkliede starp dažādām celmu ripām nenodrošināja pietiekamu pamatu apgalvojumam, ka vidējās blīvuma, C un N satura vērtības iekrāsotā un netrupējušā koksē būtiski atšķiras. Tas liecina, ka stumbra trapes ietekme uz priedes virszemes biomasu ir maza. Kopumā serdes trupe skujkoku audzēs būtiskāk ietekmē koksnes kvalitāti, samazinot vērtīgo zāgbaļķu ieguves apjomu un to tirgus vērtību, savukārt tās ietekme uz kopējo audzes biomasu un oglekļa uzkrājumu ir nenožīmīga, vidējo samazinot skujkoku audžu biomasu par 0,2-0,3%.

3.2. Izstrādāt oglekļa uzkrājuma izmaiņu prognozes trapes ietekmē pie dažādiem meža apsaimniekošanas scenārijiem

Darba nolūks ir SEG inventarizācijas un prognožu modelēšanas instrumentu sagatavošana trapes ietekmes uz oglekļa apriti vienādojumu ieviešanai Latvijas nacionālajā SEG inventarizācijā.

Pētījuma ietvaros uzsāktie kamerālie darbi ir Latvijas nacionālajā SEG inventarizācijas ziņojumā un prognožu ziņojumos izmantojamo biomasas vienādojumu pilnveidošana, iekļaujot tajos oglekļa zudumu trapes ietekmē novērtējumu; priekšlikumu sagatavošana izstrādāto vienādojumu iekļaušanai Latvijas nacionālajā SEG inventarizācijas ziņojumā un prognožu aprēķinos. Sagaidāmais nodevums ir pilnveidota metodika koku biomasas aprēķiniem Latvijas nacionālajā SEG inventarizācijas ziņojumā un prognožu ziņojumos. Darba uzdevuma īstenošanai 2024. gada pēdējā ceturksnī apvienoti 2023. un 2024. gada pētījuma rezultātus par trapes ietekmi uz kokaugu biomasu, vēsturisko datu pārrēķinam, izmantojot proporcijas metodi, t.i., pieņemts, ka vēsturiski oglekļa zudumi no biomasas, tajā skaitā dabiskā atmiruma, procentuāli tādi paši, kā tie ir vidēji ceturtajā Meža resursu monitoringa ciklā, kas izmantots oglekļa zudumu novērtēšanai un vēsturisko datu pārrēķiniem.

Oglekļa zudumu biomasā aprēķiniem izmantoti pētījuma ietvaros izstrādātie vienādojumi stumbra, virszemes un pazemes biomasas aprēķiniem mežaudzē, atkarībā no valdošās sugas un tās krājas īpatsvara (Liepiņš et al., 2022). Aprēķinu vienādojuma 3.2. koeficienti dažādām biomasas frakcijām doti Tab. 3.3. Oglekļa uzkrājuma aprēķiniem izmantotas pētījuma ietvaros izstrādātās oglekļa satura vērtības (Tab. 3.4) dažādām koku sugām (Bārdule et al., 2021), pieņemot, ka trupe ietekmē oglekļa zudumus no stumbra un pazemes biomasas, bet neietekmē vainaga biomasu. Oglekļa zudumu aprēķiniem, atkarībā no mežaudzes vecuma, izmantoti dažādām sugām specifiski polinomu vienādojumi (Tab. 3.5). Priedei izmantots egles vienādojums, bet pārējām sugām – apses vienādojums oglekļa zudumu aprēķiniem.

$$B_{sc} = a * M_s^{b_1} * Cl_s^{b_2} \quad (3.1)$$

kur:

B_{sc} – audzessbiomasafrakcijaic, t;

M_s – audzeskrāja, $m^3 ha^{-1}$;

Cl_s – dominējošās sugas koeficienta vērtība audzessastāva formulā;

a, b_1 un b_2 – regresijas koeficienti.

Tab. 3.3. Regresijas vienādojuma 3.2. koeficientu vērtības (Liepiņš et al., 2022)

Dominējošā suga	Biomasas frakcija ¹	Koeficientu vērtības		
		a	b ₁	b ₂
Priede	AGB	1,187	0,882	−0,048
	BGB	0,392	0,870	−0,161
	SB	0,344	1,025	0,030
Egle	AGB	1,364	0,841	0,019
	BGB	0,477	0,786	0,062
	SB	0,356	1,048	−0,078
Bērzs	AGB	0,677	0,956	0,049
	BGB	0,314	0,873	0,009
	SB	0,339	1,010	0,141
Apse	AGB	0,710	0,971	−0,104
	BGB	0,475	0,848	−0,261
	SB	0,512	0,971	−0,050
Baltalksnis	AGB	0,693	0,986	−0,131
	BGB	0,641	0,798	−0,262
	SB	0,355	1,035	−0,025
Melnalksnis	AGB	0,748	0,972	−0,111
	BGB	0,811	0,746	−0,194
	SB	0,323	1,054	−0,007

¹ AGB – kopējā virszemes biomasā, BGB – kopējā sakņu un celma biomasā, SB – stumbra biomasā.

Tab. 3.4. Oglekļa saturs koksne, g kg⁻¹ (Bārdule et al., 2021)

Koka daļa	Egle	Priede	Bērzs	Apse
Virszemes biomasa	524,4	530,4	520,6	510,2
Pazemes biomasa	529,9	531,5	527,9	507,4

Tab. 3.5. Vienādojumi oglekļa zudumu aprēķiniem no koku stumbra

Koku suga	Vienādojums
Apse	$\Delta C = -0,00008 * A^2 + 0,0565 * A + 2,9644$ <i>kur</i> ΔC – oglekļa zudumi; A – audzes vecums gados.
Bērzs	$\Delta C = 0,00009 * A^2 + 0,003 * A + 0,0066$
Baltalksnis	$\Delta C = 0,0007 * A^2 - 0,0194 * A + 0,1273$
Melnalksnis	$\Delta C = 0,000001 * A^3 - 0,000075 * A^2 + 0,002924 * A - 0,037954$
Egle	$\Delta C = -0,000001 * A^2 + 0,003 * A + 0,0056$

Oglekļa zudumi koksnes produktos aprēķināti, izmantojot Noordermeer et al. (2023) publicētos datus par zāģbaļķu iznākuma procentuālo samazinājumu, atkarībā no zāģējamo koku caurmēra. Aprēķinos pieņemts, ka vidējā zāģbaļķa garuma procentuālais samazinājums vienāds ar zāģbaļķu tilpuma samazinājumu, pārveidojot vidējos dažādām caurmēra pakāpēm raksturīgos rādītājus logaritmiskā regresijas vienādojumā (3.3.). Vienādojuma determinācijas koeficients $R^2 = 0,71$; tomēr jāņem vērā, ka tas attiecas uz vidējo kokmateriālu garumu nevis tilpumu.

$$\Delta V = 0,05770 * \ln(D) - 0,06996 \quad (3.2)$$

kur

ΔV – relatīvais zāģbaļķu tilpuma samazinājums;

D – vidējā nozāģētā koka caurmērs, cm.

Norvēģijā veiktais pētījums raksturo skuju koku audzes, taču līdzīgi pētījumi par lapu koku audzēm nav veikti, tāpēc zāģbaļķu tilpuma zudumu vienādojums attiecināts uz visām koku sugām. Nozāģējamo koku diametra aprēķiniem izmantoti Meža resursu monitoringa trešā cikla dati. Apsei, bērzam, eglei un priedei pieņemts, ka zāģbaļķu tilpuma samazinājums pieskaitās papīrmalkas sortimentam, bet pārējām koku sugām – malkai. Kokmateriālu iznākuma aprēķiniem izmantots vienādojums 3.4., vienādojuma koeficienti – Tab. 3.6. Aprēķinu vienādojums izveidots atbilstoši Ozoliņa (1981) izstrādātajiem algoritmiem. Visi aprēķinu atlikumi pieskaitīti malkai.

$$V = Intercept + D * Coeff_D + H * Coeff_H + D * Coeff_{D^2} + D * D * Coeff_{D*H} + H * \quad (3.3)$$

kur

V – sortimentu krājas īpatsvars;

D – vidējā nozāģētā koka caurmērs, cm;

H – vidējā nozāģētā koka augstums, m;

$Coeff_D Coeff_H Coeff_{D^2} Coeff_{D*H} Coeff_{h^2}$ – koeficienti.

Tab. 3.6. Kokmateriālu iznākuma aprēķinu vienādojuma koeficienti

Cirtes veids	Valdošā suga	Sortiments	R ²	Intercept	Coeff_D	Coeff_H	Coeff_D ²	Coeff_D*H	Coeff_H ²
Atjaunošanas cirte	Priede	Zāgbaļķi	0,88256	-0,29522	0,04822	0,00946	-0,00055	0,00000	-0,00015
Atjaunošanas cirte	Priede	Papīrmalka	0,89803	0,74194	-0,02912	-0,00606	0,00030	0,00005	0,00006
Atjaunošanas cirte	Priede	Malka	0,68955	0,35448	-0,01542	-0,00216	0,00018	-0,00001	0,00003
Atjaunošanas cirte	Egle	Zāgbaļķi	0,76649	-0,17147	0,03649	0,00983	-0,00046	-0,00004	-0,00015
Atjaunošanas cirte	Egle	Papīrmalka	0,66609	0,67369	-0,02040	-0,00469	0,00025	0,00004	0,00006
Atjaunošanas cirte	Egle	Malka	0,66815	0,33146	-0,01335	-0,00357	0,00015	0,00002	0,00004
Atjaunošanas cirte	Bērzs	Zāgbaļķi	0,95652	-0,35550	0,04678	0,00452	-0,00060	-0,00002	-0,00007
Atjaunošanas cirte	Bērzs	Papīrmalka	0,88852	0,74911	-0,02917	0,00123	0,00033	0,00004	-0,00006
Atjaunošanas cirte	Bērzs	Malka	0,61640	0,41874	-0,01505	-0,00410	0,00021	0,00000	0,00007
Atjaunošanas cirte	Melnalksnis	Zāgbaļķi	0,97855	-0,24173	0,03334	0,00148	-0,00044	0,00008	-0,00012
Atjaunošanas cirte	Melnalksnis	Papīrmalka	0,69755	0,55416	-0,01153	-0,00048	0,00006	0,00004	0,00003
Atjaunošanas cirte	Melnalksnis	Malka	0,65469	0,49572	-0,02101	-0,00077	0,00034	-0,00007	0,00004
Atjaunošanas cirte	Apse	Zāgbaļķi	0,98810	-0,10939	0,01399	-0,00018	-0,00014	0,00003	-0,00002
Atjaunošanas cirte	Apse	Papīrmalka	0,44827	0,55644	-0,00033	0,00415	-0,00003	0,00000	-0,00007
Atjaunošanas cirte	Apse	Malka	0,69584	0,38259	-0,01198	-0,00264	0,00014	-0,00003	0,00006
Atjaunošanas cirte	Baltalksnis	Zāgbaļķi	0,98500	-0,18216	0,02153	0,00297	-0,00036	0,00000	-0,00007
Atjaunošanas cirte	Baltalksnis	Papīrmalka	0,57129	0,62893	-0,00646	0,00003	-0,00003	0,00007	0,00000
Atjaunošanas cirte	Baltalksnis	Malka	0,28533	0,38417	-0,01256	0,00016	0,00034	-0,00006	0,00000
Atjaunošanas cirte	Ozols	Zāgbaļķi	0,95080	-0,16891	0,02091	0,00344	-0,00021	-0,00003	-0,00003

Oglekļa aprīte meža ekosistēmā

Cirtes veids	Valdošā suga	Sortiments	R ²	Intercept	Coeff_D	Coeff_H	Coeff_D ²	Coeff_D*H	Coeff_H ²
Atjaunošanas cirte	Ozols	Papīrmalka	1,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
Atjaunošanas cirte	Ozols	Malka	0,95529	0,91781	-0,01802	-0,00091	0,00017	0,00002	-0,00002
Atjaunošanas cirte	Osis	Zāģbaļķi	0,95653	-0,16691	0,02226	0,00283	-0,00024	0,00000	-0,00005
Atjaunošanas cirte	Osis	Papīrmalka	1,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
Atjaunošanas cirte	Osis	Malka	0,95178	0,93827	-0,01883	-0,00007	0,00018	0,00000	-0,00001
Atjaunošanas cirte	Citas sugas	Zāģbaļķi	0,98500	-0,18216	0,02153	0,00297	-0,00036	0,00000	-0,00007
Atjaunošanas cirte	Citas sugas	Papīrmalka	0,57129	0,62893	-0,00646	0,00003	-0,00003	0,00007	0,00000
Atjaunošanas cirte	Citas sugas	Malka	0,28533	0,38417	-0,01256	0,00016	0,00034	-0,00006	0,00000
Starpcirte	Priede	Zāģbaļķi	0,60318	-0,05111	0,02843	0,00670	-0,00035	-0,00002	-0,00011
Starpcirte	Priede	Papīrmalka	0,38572	0,52129	-0,01131	-0,00359	0,00013	0,00006	0,00002
Starpcirte	Priede	Malka	0,61107	0,33103	-0,01343	-0,00187	0,00016	-0,00001	0,00003
Starpcirte	Egle	Zāģbaļķi	0,52320	0,25302	0,00340	0,00502	-0,00012	-0,00003	-0,00010
Starpcirte	Egle	Papīrmalka	0,64773	0,33230	0,00486	-0,00125	-0,00002	0,00003	0,00003
Starpcirte	Egle	Malka	0,22533	0,24836	-0,00553	-0,00220	0,00007	0,00002	0,00002
Starpcirte	Bērzs	Zāģbaļķi	0,51434	-0,01986	0,00931	0,00073	-0,00015	0,00000	-0,00001
Starpcirte	Bērzs	Papīrmalka	0,54651	0,42573	0,00769	0,00494	-0,00011	0,00003	-0,00011
Starpcirte	Bērzs	Malka	0,55989	0,40648	-0,01444	-0,00402	0,00020	0,00000	0,00007
Starpcirte	Melnalksnis	Zāģbaļķi	0,79366	-0,19975	0,03000	0,00134	-0,00055	0,00007	-0,00009
Starpcirte	Melnalksnis	Papīrmalka	0,86287	0,50462	-0,02092	-0,00091	0,00021	0,00000	0,00007
Starpcirte	Melnalksnis	Malka	0,81513	0,50329	-0,00827	-0,00020	0,00031	-0,00002	-0,00002
Starpcirte	Apse	Zāģbaļķi	0,42439	0,02862	0,00620	0,00019	-0,00012	0,00003	-0,00004

Ogleklā aprite meža ekosistēmā

Cirtes veids	Valdošā suga	Sortiments	R ²	Intercept	Coeff_D	Coeff_H	Coeff_D ²	Coeff_D*H	Coeff_H ²
Starpcirte	Apse	Papīrmalka	0,34932	0,52828	-0,00545	0,00398	0,00007	-0,00002	-0,00004
Starpcirte	Apse	Malka	0,30339	0,27275	0,00092	-0,00283	0,00002	0,00000	0,00004
Starpcirte	Baltalksnis	Zāģbaļķi	0,98500	-0,09108	0,01077	0,00148	-0,00018	0,00000	-0,00004
Starpcirte	Baltalksnis	Papīrmalka	0,77476	0,73823	-0,01938	-0,00175	0,00018	0,00007	0,00005
Starpcirte	Baltalksnis	Malka	0,65511	0,18380	0,01112	0,00342	-0,00005	-0,00007	-0,00008
Starpcirte	Ozols	Zāģbaļķi	0,89587	-0,01378	0,00225	0,00036	-0,00002	0,00000	0,00000
Starpcirte	Ozols	Papīrmalka	1,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
Starpcirte	Ozols	Malka	0,87835	0,76268	0,00064	0,00217	-0,00002	-0,00001	-0,00004
Starpcirte	Osis	Zāģbaļķi	0,90415	-0,01303	0,00239	0,00027	-0,00003	0,00000	-0,00001
Starpcirte	Osis	Papīrmalka	1,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
Starpcirte	Osis	Malka	0,79601	0,78440	0,00104	0,00249	-0,00003	0,00000	-0,00006
Starpcirte	Citas sugas	Zāģbaļķi	0,98500	-0,09108	0,01077	0,00148	-0,00018	0,00000	-0,00004
Starpcirte	Citas sugas	Papīrmalka	0,77476	0,73823	-0,01938	-0,00175	0,00018	0,00007	0,00005
Starpcirte	Citas sugas	Malka	0,65511	0,18380	0,01112	0,00342	-0,00005	-0,00007	-0,00008

Saskaņā ar aprēķinu rezultātiem trupe samazina oglekļa uzkrājumu augošo koku biomasā ceturtajā Meža resursu monitoringa ciklā par aptuveni 1%, (3 milj. tonnas C), bet oglekļa uzkrājums nedzīvajā biomasā – par aptuveni 0,3 milj. tonnām C. Trupes ietekme uz dzīvās un nedzīvās biomasas oglekļa krātuvēm ir neliela, tomēr šobrīd SEG inventarizācijas ziņojumā CO₂ piesaiste šajās oglekļa krātuvēs ir pārspīlēta, it īpaši bioloģiski vecās audzēs.

SEG emisiju pieaugums trupes ietekmē koksnes produktu kategorijā ir būtiski lielāks nekā koku dzīvās un nedzīvās biomasas kategorijās (vidēji par 17%), tomēr šis piesaistes samazinājums SEG inventarizācijā jau inventarizācijā jau ir ietverts, un var palīdzēt tikai dažādu nākotnes scenāriju modelēšanā, īstenojot klimata pārmaiņu mazināšanas pasākumus, kas samazina trupes izplatību, piemēram mežizstrādes vecuma samazināšana apses un egles audzēs.

Kopējais SEG emisiju samazinājums trupes ietekmē, piemēram, platībā, kas apmežota ar egli, ir vidēji 0,55 tonnas CO₂ ekv. gadā vai 110 tonnas CO₂ ekv. 200 gadu periodā. Apses audzē, neskatoties uz salīdzinoši lielu ietekmi uz dzīvo biomasu, ietekme ir salīdzinoši neliela – 0,2 tonnas CO₂ ekv. gadā.

Pētījuma ietvaros izstrādātie vienādojumi iekļauti aprēķinos, bet par izstrādāto vienādojumu un aprēķinu rezultātu iekļaušanu SEG inventarizācijas ziņojumā lems inventarizācijas uzraudzības komiteja 2025. gada laikā, kompleksi vērtējot to iespējamo ietekmi uz klimata neitralitātes saistību izpildi.

3.3. Novērtēt trupes ierobežošanas darbību ietekmi uz SEG emisijām un CO₂ piesaisti meža zemēs

Darba nolūks 2024. gadā ir prognozējamās ietekmes uz SEG emisijām sākotnējais novērtējums pētījumā identificētajiem trupes ierobežošanas darbībām.

Pētījumā secināts, ka trupes ietekme uz oglekļa uzkrājumu dzīvajā un nedzīvajā koku biomasā ir salīdzinoši neliela, izņemot apses audzes, taču, pieaugot mežaudžu vecumam, trupes ietekme palielinās, tomēr galvenokārt apses audzēs, kurās ar esošajām zināšanām mēs varam novērtēt tikai sugu nomainas ietekmi uz SEG emisijām.

Trupes ietekme uz oglekļa uzkrājumu koksnes produktos ir būtiski lielāka nekā uz oglekļa uzkrājumu biomasā. Pētījuma ietvaros pilnveidotie vienādojumi trupes ietekmes uz kokmateriālu ar ilgu kalpošanas termiņu iznākuma un ietekmes uz SEG emisijām novērtēšanai aprakstīti iepriekšējā nodaļā. Skuju koku audzēs trupe samazina CO₂ piesaisti koksnes produktos vidēji par 17%, lapu koku audzēs – 9,0-23,6%, taču aprēķins lapu koku audzēs ir aptuvens, jo balstās uz egles audzēs iegūtiem datiem. Turpmākajos pētījumos šim jautājumam jāpievērš pastiprināta uzmanība. Vērtējot trupes ietekmi uz koksnes produktu iznākumu, jāņem vērā, ka īstermiņā zāģbaļķu iznākuma samazināšanās negatīvo ietekmi kompensē koksnes biokurināmā radītais aizstāšanas efekts, kas jāiekļauj aprēķinā, vērtējot kopējo trupes ietekmi. Tāpat, vērtējot koksnes biokurināmā radīto aizstāšanas efektu, jāņem vērā biomasas, attiecīgi, arī siltumspējas zuduma ietekme, piemēram, apses audzēs trupes ietekmē koksnes biokurināmā radītais aizstāšanas efekts samazinās par 6%, bet egles audzēs – par 15%. Atšķirība saistīta ar to, ka egles audzēs biokurināmā frakcijā nonāk būtiski mazāks sagatavoto kokmateriālu īpatsvars nekā apses audzēs. Savukārt, bērza audzēs biokurināmā radītais aizstāšanas efekts pieaug par 3%, jo zāģbaļķu iznākuma īpatsvara samazinājums ir lielāks nekā biomasas zudumi trupes ietekmē.

Otra darbība, ko vērtējam pētījumā, ir koku sugu nomainas ietekme uz oglekļa uzkrājumu, atkarībā no bojājumu novērtējuma rezultātiem pēc mežizstrādes. Iepriekš iegūtie dati izmantoti, lai izstrādātu vienādojumus iespējamo biomasas zudumu raksturošanai atkarībā no izmaiņām, kas identificējamās nozāģēto koku celmos. Pētījumā izstrādāti vienādojumi relatīvā (%) un faktiskā (kg) stumbra biomasas samazinājuma raksturošanai, atkarībā no trupes izplatības uz celma. Vienādojumi izstrādāti eglei, bērzam, melnalksnim, baltalksnim un apsei (Tab. 3.7 un Tab. 3.8). Vērtējamais faktors – iekrāsojuma vai mīkstās trupes diametrs.

Tab. 3.7. Relatīvais stumbra biomasas samazinājums trupējušos kokos

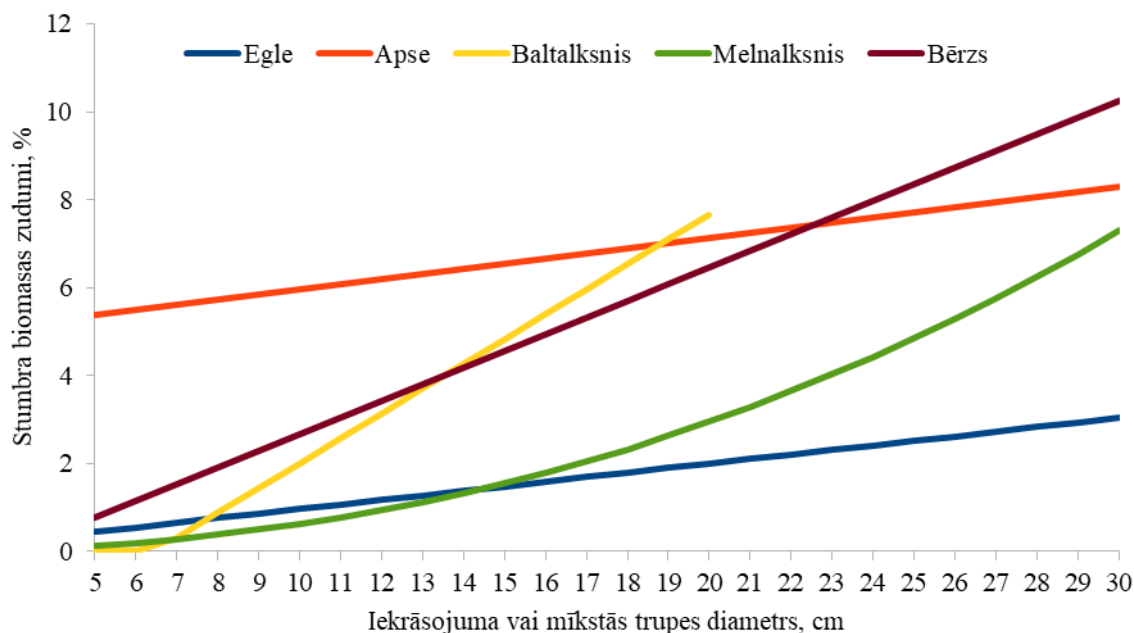
Koku suga	Vienādojums	Nr.	Trupes veids
Egle	$\Delta V = 0,1035D_T - 0,0723$ <i>kur</i> ΔV – stumbra biomasas samazinājums, %; D_T – trupes diametrs un celma cirsma, cm.	(3.4)	Iekrāsojuma diametrs
Apse	$\Delta V = 0,1177D_T + 4,7771$	(3.5)	Iekrāsojuma diametrs
Baltalksnis	$\Delta V = 0,5657D_T - 3,652$	(3.6)	Iekrāsojuma diametrs
Melnalksnis	$\Delta V = 0,0036D_T^{2,2386}$	(3.7)	Iekrāsojuma diametrs
Bērzs	$\Delta V = 0,3795D_T - 1,1329$	(3.8)	Mīkstās trupes diametrs

Tab. 3.8. Faktiskais stumbra biomasas samazinājums trupējušos kokos

Koku suga	Vienādojums	Nr.	Trupes veids
Egle	$\Delta V = 0,0114D_T^2 + 0,057 * D_T + 0,4399$ <i>kur</i> ΔV – stumbra biomasas samazinājums, kg; D_T – trupes diametrs un celma cirsma, cm.	(3.9)	Iekrāsojuma diametrs
Apse	$\Delta V = 0,0553D_T^2 + 0,8592 * D_T + 4,3345$	(3.10)	Iekrāsojuma diametrs
Baltalksnis	$\Delta V = 0,0011D_T^{3,0034}$	(3.11)	Iekrāsojuma diametrs
Melnalksnis	$\Delta V = 0,0011D_T^{3,0034}$	(3.12)	Iekrāsojuma diametrs
Bērzs	$\Delta V = 0,0737D_T^2 + 0,0355 * D_T + 4,3345$	(3.13)	Mīkstās trupes diametrs

Stumbra biomasas zudumu prognoze trupes ietekmē, atkarībā no inficētās koksnes (iekrāsojums vai mīkstā trupe) diametra, grafiski parādīta Att. 3.14. Lielākais potenciālais biomasas zudums raksturīgs bērzam (līdz 14%), ja mīkstās trupes diametrs sasniedz 30 cm, mazākais – egles audzēs (līdz 2%, iekrāsojuma diametram sasniedzot 30 cm).

Izstrādātos vienādojumus var izmantot trupes ietekmes mazināšanas darbību efektivitātes prognozēšanai atsevišķas mežaudzes līmenī, lai gan šobrīd praktisku risinājuma pielietošanu kavē lētu un pietiekoši precīzu metožu trūkums trupes izplatības novērtēšanai cīsmās.



Att. 3.14. Stumbra biomasas zudumu prognoze, atkarībā no iekrāsojuma vai mīkstās trupes diametra

Turpmākajos pētījuma etapos ir jāizvērtē uz attālās izpētes tehnoloģijām balstīti metodiskie risinājumi ar trupi inficētās celmu daļas mērīšanai, lai prognozētu klimata pārmaiņu mazināšanas darbību (sugu nomaiņa, celmu apstrāde) ietekmi uz SEG emisijām atsevišķas mežaudzes līmenī. Šādas metodes izstrādāšana ļautu iekļaut trupes ietekmes samazināšanas pasākumus Nacionālajā klimata un enerģētikas plānā un nacionālajos finanšu instrumentos klimata politikas mērķu sasniegšanai.

Pētījumā vērtēta arī meža aprītes ilguma saīsināšanas ietekme uz SEG emisijām ZIZIMM sektorā, salīdzinot līdz šim izmantotos biomasas un kokmateriālu iznākuma vienādojumus un vienādojumus, kas koriģēti atbilstoši trupes ietekmei uz oglekļa uzkrājumu dzīvo koku biomasā un nedzīvajā biomasā, kā arī kokmateriālu un meža biokurināmā iznākumu. Ietekmes novērtējums veikts apmērotais platībai, kurā SEG emisijas neietekmē oglekļa uzkrājums nedzīvajā koksne, kas veidojies iepriekšējās meža aprītēs. Bērzam, eglei un melnalksnim aprēķinos izmantots aprītes ilgums no 50 līdz 70 gadiem, apsei – no 30 līdz 70 gadiem, baltalksnim – no 30 līdz 50 gadiem. Aprēķinā nav ietverti dabisko traucējumu riski.

Apmežojot lauksaimniecībā izmantojamo zemi ar bērzu (Tab. 3.9), aprītes ilguma samazināšana līdz 50 gadiem samazina kopējo CO₂ piesaisti par 5%, tajā skaitā trupes ietekme uz CO₂ piesaisti ir nenozīmīga, neatkarīgi no aprītes ilguma, ja tas nepārsniedz 70 gadus. Trupe samazina koksnes biokurināmā radīto aizstāšanas efektu. Melnalkšņa audzēs aprītes ilguma saīsināšana līdz 50 gadiem samazina prognozējamo CO₂ piesaisti par 11%, salīdzinot ar 70 gadus apriti, taču trupes ietekme ir nosacīti pozitīva, pateicoties tam, ka pieaug koksnes biokurināmā radītais aizstāšanas efekts. Ja aizstāšanas efektu neņem vērā, trupes ietekme ir negatīva, tāpat kā bērza audzēs. Arī egles audzēs aprītes ilguma samazināšana no 70 līdz 50 gadiem būtiski neietekmē prognozējamo CO₂ piesaisti, bet koksnes biokurināmā iznākuma īpatsvara pieaugums nodrošina nosacītu pozitīvu efektu, pateicoties biokurināmā radītajam emisiju aizstāšanas efektam.

Apes audzēs aprēķinā ietverts garāks periods – aprītes ilgums no 30 līdz 70 gadiem (Tab. 3.10). Īsāka aprītes perioda piemērošana būtiski samazina SEG emisiju samazināšanas potenciālu. Atšķirībā no citām koku sugām, saīsināts aprītes gadījumā būtiski samazinās arī trupes negatīvā ietekme. Neatkarīgi no aprītes ilguma, samazinās arī koksnes biokurināmā radītais aizstāšanas efekts.

Baltalkšņa audzēs (Tab. 3.11) aprites ilguma saīsināšana no 50 līdz 30 gadiem samazina SEG emisiju samazināšanas potenciālu, bet trupes radītajiem oglekļa zudumiem ir nebūtiska ietekme uz SEG emisijām, tajā skaitā koksnes biokurināmā radīto aizstāšanas efektu.

Vērtējot šo rezultātu, jāņem vērā, ka aprēķinos nav ņemts vērā dabisko traucējumu iespējamais negatīvais efekts, kas pieaug, palielinoties mežaudžu vecumam, tāpēc turpmākajos pētījuma etapos, vērtējot dažādu darbību ietekmi uz SEG emisijām, atkarībā no aprites ilguma, ir jāvērtē arī šis faktors.

Tab. 3.9. Aprites ilguma izmaiņu ietekme uz SEG emisiju samazinājumu bērza, melnalkšņa un egles audzēs

Rādītājs	Mērv.	Aprites ilgums, gadi				
		70	65	60	55	50
Bērzs						
SEG emisiju samazinājums, salīdzinot ar garāko aprites periodu	-	100%	97%	93%	90%	95%
Kumulatīvās SEG emisijas	t CO ₂ ekv. ha ⁻¹	-2604	-2534	-2415	-2346	-2473
Trupes ietekme uz SEG emisiju samazinājumu vidēji gadā	t CO ₂ ekv. ha ⁻¹ gadā	-0,01	-0,01	0,00	-0,01	-0,01
Trupes ietekme uz SEG emisiju samazinājumu 200 gadu laikā	t CO ₂ ekv. ha ⁻¹	-1,20	-1,03	-0,96	-1,09	-1,24
Trupes ietekme uz biokurināmā aizstāšanas efektu	-	-0,27%	-0,21%	-0,26%	-0,37%	-0,28%
Melnalksnis						
SEG emisiju samazinājums, salīdzinot ar garāko aprites periodu	-	100%	96%	90%	86%	89%
Kumulatīvās SEG emisijas	t CO ₂ ekv. ha ⁻¹	-2923	-2809	-2628	-2508	-2600
Trupes ietekme uz SEG emisiju samazinājumu vidēji gadā	t CO ₂ ekv. ha ⁻¹ gadā	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01
Trupes ietekme uz SEG emisiju samazinājumu 200 gadu laikā	t CO ₂ ekv. ha ⁻¹	3,44	3,39	2,88	2,42	1,82
Trupes ietekme uz biokurināmā aizstāšanas efektu	-	0,68%	0,79%	0,78%	0,82%	0,99%
Egle						
SEG emisiju samazinājums, salīdzinot ar garāko aprites periodu	-	100%	97%	90%	83%	99%
Kumulatīvās SEG emisijas	t CO ₂ ekv. ha ⁻¹	-4501	-4353	-4057	-3724	-4445
Trupes ietekme uz SEG emisiju samazinājumu vidēji gadā	t CO ₂ ekv. ha ⁻¹ gadā	0,21	0,20	0,14	0,05	0,10
Trupes ietekme uz SEG emisiju	t CO ₂ ekv. ha ⁻¹	42,64	39,95	28,41	10,02	19,41

Rādītājs	Mērv.	Aprites ilgums, gadi				
		70	65	60	55	50
samazinājumu 200 gadu laikā						
Trupes ietekme uz biokurināmā aizstāšanas efektu	-	7,00%	8,31%	6,80%	4,75%	7,21%

Tab. 3.10. Aprites ilguma izmaiņu ietekme uz SEG emisiju samazinājumu apses audzēs

Rādītājs	Mērv.	Aprites ilgums, gadi				
		70	60	50	40	30
Apse						
SEG emisiju samazinājums, salīdzinot ar garāko aprites periodu	-	100%	88%	81%	82%	61%
Kumulatīvās SEG emisijas	t CO ₂ ekv. ha ⁻¹	-3875	-3420	-3153	-3174	-2348
Trupes ietekme uz SEG emisiju samazinājumu vidēji gadā	t CO ₂ ekv. ha ⁻¹ gadā	-0,21	-0,11	-0,09	-0,12	-0,05
Trupes ietekme uz SEG emisiju samazinājumu 200 gadu laikā	t CO ₂ ekv. ha ⁻¹	-42,51	-22,24	-17,75	-24,96	-9,38
Trupes ietekme uz biokurināmā aizstāšanas efektu	-	-1,29%	-1,24%	-1,23%	-1,35%	-3,08%

Tab. 3.11. Aprites ilguma izmaiņu ietekme uz SEG emisiju samazinājumu baltalkšņa audzēs

Rādītājs	Mērv.	Aprites ilgums, gadi				
		50	45	40	35	30
Baltalksnis						
SEG emisiju samazinājums, salīdzinot ar garāko aprites periodu	-	100%	98%	103%	94%	89%
Kumulatīvās SEG emisijas	t CO ₂ ekv. ha ⁻¹	-2661	-2619	-2745	-2498	-2380
Trupes ietekme uz SEG emisiju samazinājumu vidēji gadā	t CO ₂ ekv. ha ⁻¹ gadā	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Trupes ietekme uz SEG emisiju samazinājumu 200 gadu laikā	t CO ₂ ekv. ha ⁻¹	-0,20	-0,12	-0,14	-0,05	-0,02
Trupes ietekme uz biokurināmā aizstāšanas efektu	-	-0,03%	-0,02%	-0,02%	-0,01%	-0,01%

4. SEG EMISIJU SAMAZINĀŠANA MEŽA APSAIMNIEKOŠANĀ KLIMATA PĀRMAIŅU MAZINĀŠANAS KONTEKSTĀ

4.1. Esošo modeļteritoriju un pētījumu apzināšana un ietekmes uz oglekļa uzkrājumu un SEG emisijām apzināšana

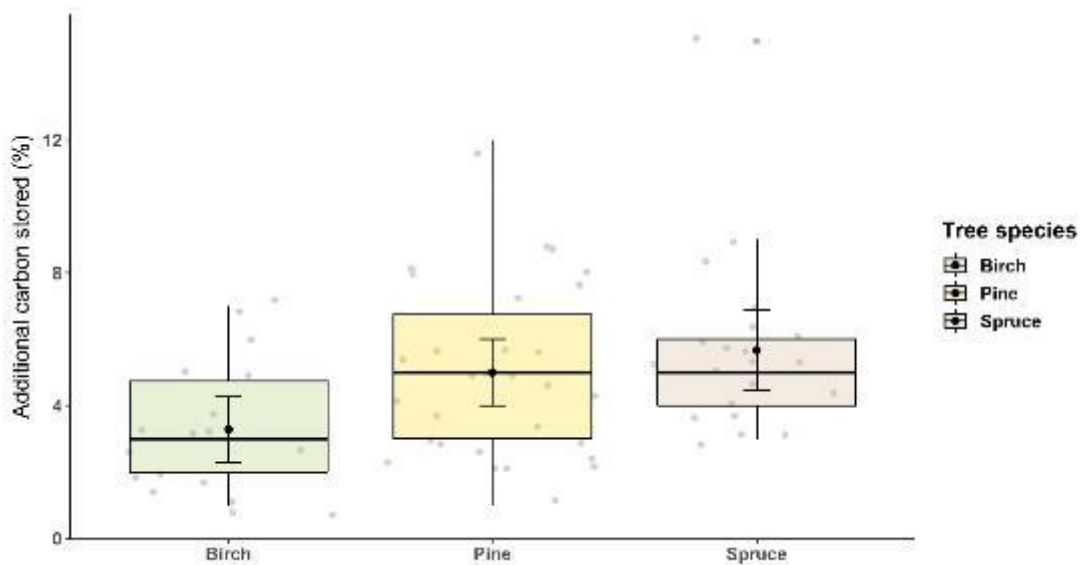
4.1.1. Jaunaudžu kopšanas cirtes

Pētījuma mērķis ir raksturot jaunaudžu kopšanas īstermiņa ietekmi uz SEG emisijām un izveidot rekomendācijas maksimāla klimata pārmaiņu mazināšanas efekta nodrošināšanai.

Līdzšinējo pētījumu, kuros vērtēta krājas kopšanas ciršu ietekme uz papildus oglekļa uzkrājumu 5-10 gadus pēc kopšanas, rezultātu kopsavilkums dots Att. 4.1 (Bickovskis et al., 2024). Šī pētījuma mērķis bija izvērtēt pirmās retināšanas ietekmi uz papildu oglekļa krājumu pieaugumu dzīvo koku biomasā Latvijā. Pētījumā analizēta priedes (*Pinus sylvestris* L.), egles (*Picea abies* L. Karst.) un bērza (*Betula pendula* Roth.) audžu reakcija uz retināšanu 5 un 10 gadus pēc tās veikšanas.

Pētījumā konstatēts, ka 5 gadus pēc kopšanas cirtes bērza audzēs papildu oglekļa uzkrājums veidoja 3% no kopējā uzkrājuma ($2,4 \pm 0,7 \text{ t C} \cdot \text{ha}^{-1}$). Egles audzēs papildu uzkrājums bija 6% no kopējā krājuma ($5,0 \pm 0,8 \text{ t C} \cdot \text{ha}^{-1}$). Priedes audzēs papildu uzkrājums sasniedza 5% no kopējā uzkrājuma ($4,1 \pm 0,7 \text{ t C} \cdot \text{ha}^{-1}$). Oglekļa krājumu palielinājums 10 gadus pēc kopšanas cirtes egles audzēs ir $10,7 \pm 2,1 \text{ t C} \cdot \text{ha}^{-1}$, priedes audzēs – $7,2 \pm 2,1 \text{ t C} \cdot \text{ha}^{-1}$. Bērzu reakcija netika novērota ilgākā laika posmā. Pētījumā konstatēts, ka vecums ietekmē papildu oglekļa krājuma pieaugumu. Papildu oglekļa uzkrājums samazinās ar vecumu, īpaši bērzu audzēs, kur oglekļa uzkrājuma pieaugums pēc kopšanas cirtes samazinās pēc 40-50 gadu vecuma sasniegšanas.

Pētījumā secināts, ka pirmajai krājas kopšanas cirtei ir pozitīva ietekme uz papildu oglekļa uzkrājumu visu pētīto koku sugu audzēs, īpaši skuju koku audzēs. Kopšanas ietekme turpinās vismaz 10 gadus, īpaši izteikta tā ir egles audzēs.



Att. 4.1. Oglekļa papilduzkrājums (%) pēc kopšanas²

Iepriekšējos pētījumos izmantotā metodika pielāgota arī jaunaudžu kopšanas cirtēm, lai novērtētu kopšanas ietekmi jaunākās audzēs. Stumbra tilpuma papildus pieaugums aprēķināts balstoties uz I. Liepas (1996) izstrādāto metodiku:

$$Z_M^{kp} = 1.2732.4\psi(GH^\alpha D^{\beta lgH-\varphi-2} - G_t H_t^\alpha D_t^{\beta lgH-\varphi-2}), \quad (4.1)$$

kur

Z_M^{kp} – kumulatīvais stumbra tilpuma papildus pieaugums, $m^3 \cdot ha^{-1}$;

$\psi, \alpha, \beta, \varphi$ – koeficienti (Tab. 4.1);

t – vērtēšanas periods, gadi;

G, G^t – audzes šķērslaukums un prognozētā šķērslaukuma vērtība perioda beigās t , $m^2 \cdot ha^{-1}$.

$$G_t = \frac{D_t^2 G}{D^2}, \quad (4.2)$$

kur

D, D_t – audzes vidējais diametrs 1,3 m augstumā un prognozētā vērtība perioda beigās t , cm.

$$D_t = D - 0,1 \times Z_D^{kp}, \quad (4.3)$$

kur

Z_D^{kp} – audzes vidējā diametra kumulatīvais papildus pieaugums, cm.

$$Z_D^{kp} = 2u \left(\sum_j^t i_j + \sum_j^t i_j \right), \quad (4.4)$$

kur

u – mizas biezuma koeficients (Tab. 4.1);

i_j – vidējais gadskārtu platums vērtētajās audzēs, mm. Tas sastāv no $t + t'$, kas ir aprēķināts no ievāktajiem koksnes gadskārtu urbumiem;

² Melnā līnija apzīmē mediānu; melnais punkts apzīmē vidējo vērtību $\pm 95\%$ ticamības intervālu; pelēki punkti apzīmē katra atsevišķa novērojuma vērtību.

$$Z_M^{kp} = 1.2732.4\psi(GH^\alpha D^{\beta lgH-\varphi-2} - G_t H_t^\alpha D_t^{\beta lgH-\varphi-2}), \quad (4.1)$$

kur

Z_M^{kp} – kumulatīvais stumbra tilpuma papildus pieaugums, $m^3 \cdot ha^{-1}$;

$\psi, \alpha, \beta, \varphi$ – koeficienti (Tab. 4.1);

t – vērtēšanas periods, gadi;

G, G^t – audzes šķērslaukums un prognozētā šķērslaukuma vērtība perioda beigās t , $m^2 \cdot ha^{-1}$.

t' – retrospekcijas intervāls, gadi;

i'_j – koriģētais gadskārtu platums koksnes gadskārtu urbumiem vērtētajās audzēs, mm.

Korekcijas vienādojums:

$$Z_D^{kp} = 2u \left(\sum_j^t i_j + \sum_j^t i'_j \right), \quad (4.5)$$

kur

u – mizas biezuma koeficients (Tab. 4.1);

i_j – vidējais gadskārtu platums vērtētajās audzēs, mm. Tas sastāv no $t + t'$, kas ir aprēķināts no ievāktajiem koksnes gadskārtu urbumiem;

t' – retrospekcijas intervāls, gadi;

i'_j – koriģētais gadskārtu platums koksnes gadskārtu urbumiem vērtētajās audzēs, mm.

$$i'_j = \eta i'_{k,j} \wedge \rho, \quad (4.6)$$

kur

η, ρ – koeficienti;

i_k – kontroles koku vidējais gadskārtu platums, mm.

H, H_t – audzes vidējais augstums un prognozētā vērtība perioda beigās t , m:

$$H_t = H - Z_H^{kp}, \quad (4.7)$$

kur

Z_H^{kp} – kumulatīvais audzes augstuma papildus pieaugums, m:

$$Z_H^{kp} = \frac{HZ_D^{kp}(aD + b)}{u(cD + 100)}, \quad (4.8)$$

kur

a, b, c, u – koeficienti (Tab. 4.1).

Aprakstītais algoritms aprēķina kumulatīvo stumbra tilpuma papildus pieaugumu ar mizu. Indeksa vērtība bez mizas, $m^3 \cdot ha^{-1}$:

$$Z_{M;bm}^{kp} = \frac{Z_M^{kp}}{s}, \quad (4.9)$$

kur

s – mizas tilpuma koeficients, ko aprēķina šādi:

$$s = \frac{pD + q}{wD + 100}, \quad (4.10)$$

kur

p, q, w – koeficienti (Tab. 4.1).

Tab. 4.1. Koeficientu vērtības kumulatīvā stumbra tilpuma papildu pieauguma aprēķiniem

u	a	b	c	ψ	α	β	φ	p	q	w
1,046	-0,0256	1,693	5,794	$2,3106 \cdot 10^{-4}$	0,78193	0,34175	1,18811	5,25	117,6	5,0

Oglekļa uzkrājums dzīvos kokos aprēķināts, izmantojot divpakāpju procesu. Pirmkārt, izmantoti biomasas modeļi, kas izstrādāti Latvijā saimnieciski nozīmīgākajām koku sugām (Liepiņš et al., 2017), lai novērtētu koku biomasu pēc to tilpuma un blīvuma. Otrkārt, aprēķināts oglekļa saturs koku biomasā, izmantojot Latvijā izstrādātus oglekļa satura koeficientu vērtības (Bārdule et al., 2021). Šie aprēķini ņem vērā oglekļa uzkrājumu gan virszemes, gan pazemes biomasā (Tab. 4.2).

Tab. 4.2. Oglekļa satura koeficienti koku biomasā (virszemes/pazemes) dažādām koku sugām Latvijā, g kg⁻¹ (Bārdule et al., 2021)

Rādītājs	Parastā egļe	Parastā priede	Āra bērzs
Virszemes biomasā	524,4	530,4	520,6
Pazemes biomasā	529,9	531,5	527,9
Visa koka biomasā	526,5	533,2	521,4

Turpmākajā pētījuma etapā plānots ievākt datus par jaunaudžu kopšanas īstermiņa ietekmi uz SEG emisijām.

Meža ekosistēmas uzkrāj ievērojamu oglekļa daudzumu, un oglekļa uzkrājums dzīvo koku biomasā ir viena no lielākajām oglekļa krātuvēm meža ekosistēmās. Meža apsaimniekošanas prakse, piemēram, retināšana var uzlabot koku augšanu un ražību kā arī palielināt oglekļa piesaisti meža ekosistēmās, tādējādi sekmējot klimata pārmaiņu mazināšanas mērķus. Tomēr informācija par oglekļa uzkrājuma papildpieaugumu pirmajos 10 gados pēc retināšanas hemiboreālajā reģionā trūkst. Tāpēc šajā pētījumā vērtēts oglekļa uzkrājuma papildpieaugums biežāk sastopamajām koku sugām (parastā priede, parastā egļe un āra bērzs) minerālaugsnēs hemiboreālajos mežos Latvijā, īpaši koncentrējoties uz retināšanas ietekmi 5 un 10 gadus pēc tās veikšanas.

Retināšana rezultējās ar papildu oglekļa uzkrājumu visām koku sugām. Retināšanas efekts variēja no 3 līdz 6%, atkarībā no koku sugas. Lielākais oglekļa uzkrāšanas pieaugums novērots skuju kokiem (papildu 7,2 un 10,7 t C · ha⁻¹ pēc 10 gadiem, attiecīgi, priedei un eglei). Mežaudzes vidējam vecumam ir būtiska ietekme uz oglekļa uzkrājuma papildpieaugumu – pozitīvā retināšanas ietekme samazinās pieaugot mežaudzes vecumam. Mūsu rezultāti liecina, ka retināšana pozitīvi ietekmē oglekļa papildpieaugumu, un savlaicīgi veikta retināšana ir izšķiroša, lai sasniegtu labākos rezultātus. Savlaicīga retināšana nodrošina ievērojami lielāku oglekļa uzkrājuma papildpieaugumu, jo koki uzrāda izteiktāku reakciju jaunākā vecumā. Šis pētījums sniedz vērtīgu ieskatu niansētajās attiecībās starp koku sugām, audžu vecumu un retināšanas ietekmi uz oglekļa uzkrāšanu laika gaitā. Novērotās tendences uzsver meža apsaimniekošanas nozīmīgumu, ņemot vērā gan sugu specifiskās īpašības, gan audžu vecumu, lai efektīvi mazinātu klimata pārmaiņas.

4.1.2. Metodikas pilnveidošana mērķtiecīgas meža atjaunošanas ar selekcionētu stādmateriālu ietekmes uz SEG emisijām prognozēšanai

Pētījuma mērķis ir raksturot mērķtiecīgas meža atjaunošanas ar selekcionētu stādmateriāla izmantošanas ietekmi uz SEG emisijām un prognozēt klimata pārmaiņu mazināšanas efektu pilnā aprites ciklā.

Līdzšinējie pētījumi vērtē selekcijas ietekmi uz stādmateriālu augstuma pieaugumu, nodrošinot bāzes zināšanas selekcijas efektam un pieauguma modelēšanai (Zeltiņš et al., 2024). Pētījumā izmantota vispārinātā algebrisko atšķirību pieeju (GADA), lai modelētu pamatvecumā nemainīgu individuālo koku augstuma pieaugumu katrai sugai atsevišķi (Cieszewski & Bailey, 2000; Cieszewski & Strub, 2007). Līdzīga pieeja var tikt izmantota caurmēra pieaugumam, lai raksturotu selekcionēta stādmateriāla ietekmi uz SEG emisijām.

GADA modeļiem pēc bāzes vienādojuma atrisināšanas nenovērojamam teorētiskajam vietas mainīgajam X (Cieszewski and Bailey 2000) ir šāda vispārīga netieša forma:

$$h_{ij} = f(h_{0ij}, t_{0ij}, t_{ij}, \beta, \alpha_j) + \varepsilon_{ij} \quad (4.11)$$

kur

h_{ij} ir novērotais augstums;

t_{ij} kokam i stādmateriālu kategorijā j ;

h_{0ij} ir koka i augstums bāzes vecumā t_{0ij} ;

β ir parametra vektors, ko ietekmē fiksētais efekts α_j , kas saistīts ar stādmateriālu kategoriju j ;

ε_{ij} ir kļūdas attiecība, kas apzīmē nenovērotus faktorus un nejaušu troksni.

Katrai sugai mēs novērtējām modeļa parametrus, piemērojot divas stādmateriālu kategorijas fiksētās ietekmes kombinācijas uz modeļa koeficientiem b_1 , b_2 un b_3 :

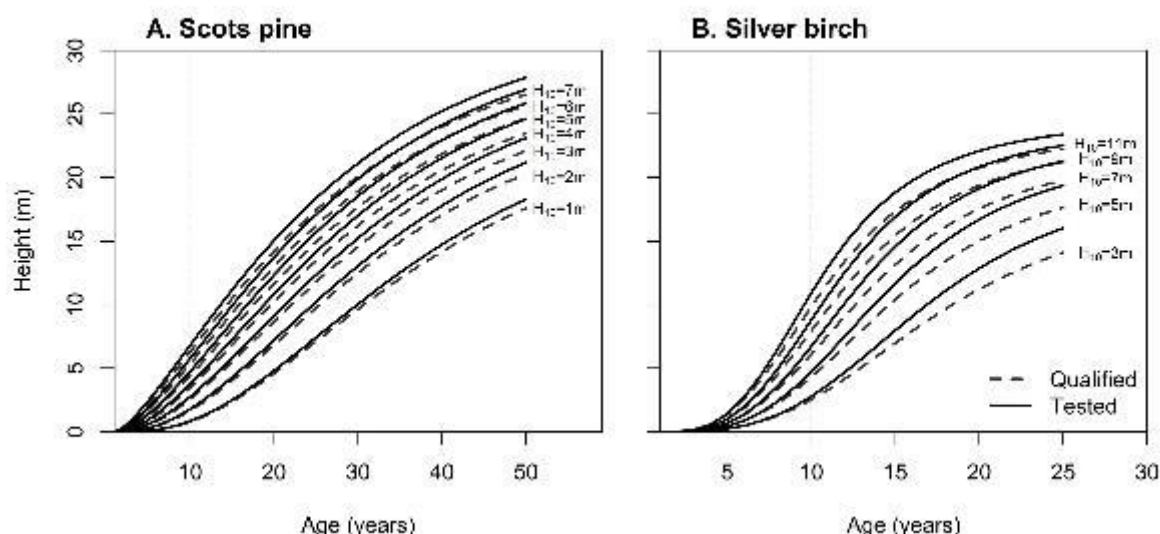
$$h_{ij} = f(h_{0ij}, t_{0ij}, t_{ij}, \alpha_{j1} \cdot b_{1j}, \alpha_{j2} \cdot b_{2j}, \alpha_{j3} \cdot b_{3j},) + \varepsilon_{ij} \quad (4.12)$$

kur

α_1 , α_2 un α_3 ir fiksēti efekti, kas saistīti ar stādmateriālu kategoriju j , kas ietekmē atbilstošos parametrus b_{1j} , b_{2j} un b_{3j} .

Izvēlētā nelineāro fiksēto efektu (NFE) pieeja parāda vēlamās īpašības, kas saistītas ar augšanas modeļu loģisko uzvedību (Cieszewski & Strub, 2018).

Augstuma pieauguma līkņu grafiskā pārbaude apstiprina statistiski novērtētās atšķirības modeļa parametrus atsevišķām FRM kategorijām “kvalificēts” un “pārbaudīts” (Att. 4.2). Abām sugām atšķirības starp stādmateriālu kategorijām ar vecumu nedaudz pieauga. Bāzes vecumā (10 gadi), kategorijas ‘pārbaudīts’ augstums bija vidēji par 7,5 un 10,8% lielāks parastajai priedei un āra bērzam, salīdzinot ar ‘kvalificēto’ materiālu. Tomēr dažādu kategoriju augšanas modeļi dažādām sugām bija atšķirīgi. Augšanas indeksu atšķirības bērzam dažādos vietu indeksos bija diezgan līdzīgas.



Att. 4.2. Paredzamais augstuma pieaugums vispiemērotākajiem modeļiem³

Šī modelēšanas pieeja var sniegt precīzāku informāciju, lai plānotu meža apsaimniekošanu, piemēram, pirmās krājas kopšanas laiku, un veicināt precīzākus reģionāla līmeņa biomasas aprēķinus, kas ir būtiski uz pierādījumiem balstītas politikas veidošanai jebkurā valstī vai reģionā, kur selekcionētam stādmateriālam ir būtiska loma meža atjaunošanā. Precīzāki reģionāla līmeņa biomasas aprēķini selekcionēta stādmateriāla izmantošanas gadījumā, ļautu precīzāk novērtēt SEG emisijas un oglekļa uzkrājumu šādās audzēs.

Saskaņā ar plānoto, turpmākajos pētījuma etapos ir plānots novērtēt SEG emisijas mežaudzēs atjaunotās ar selekcionētu stādmateriālu un klimata pārmaiņu mazināšanas efektu pilnā aprites ciklā, balstoties uz iepriekšējos etapos ievāktu informāciju un esošo kompetenci modelēšanā. Šī pētījuma datus plānots ievākt 2024./2025. gada ziemas periodā. Pētījuma aspekti aprakstīti arī Paula Zeltiņa PhD darbā, kas iesniegts vērtēšanai Latvijas Zinātņu akadēmijā.

4.2. Jaunu izpētes objektu ierīkošana klimata pārmaiņu mazināšanas darbību īstermiņa un ilgtermiņa ietekmes novērtēšanai

Pētījuma ietvaros 2024. gadā jaunu gāzu apmaiņas uzskaites objektu ierīkošana pakāpenisko ciršu ietekmes uz SEG emisijām raksturošanai un mežizstrādes īstermiņa ietekmes uz SEG emisijām no augsnes slapjainos un purvainos un platībās ar kūdras augsnēm, kur veikta augsnes sagatavošana ar ekskavatoru. Gāzu apmaiņas datu un vides parametru iegūšana pabeigta divās platībās (egles un priedes audzēs), kur veikta pakāpeniskā cirte. Kontrolei izmantotas vienlaidus cirtes līdzīgos apstākļos. Izmēģinājumu objekti ierīkoti LIFE OrgBalt projekta ietvaros emisiju samazināšanas efekta demonstrēšanai. Šajā pētījumā veicām mērījumus divus gadus pēc mežizstrādes. Tāpat pabeigta plānotā gāzu apmaiņas datu un vides parametru iegūšana izcirtumos, kas izstrādāti ar vienlaidus cirtes paņēmieni, slapjainos un purvainos mežizstrādes ietekmes uz SEG raksturošanai. Mērījumi turpināti divus gadus pēc mežizstrādes, raksturojot īstermiņa ietekmi. Ilgtermiņa ietekmes raksturošanai un līdzsvara stāvokļa iestāšanās brīža noteikšanai mērījumi atkārtojami vismaz piecus un desmit gadus pēc mežizstrādes. Šajā etapā pabeidzām arī gāzu

³ Nepārtrauktās melnas un tumši pelēkas pārtrauktas līnijas uzlaboto meža reproduktīvo materiālu kategorijām "pārbaudīts" un "kvalificēts" parastās priedes (A) un āra bērza (B) modeļiem. Augšanas līknes atspoguļo dažādas augstuma klases 10 gadu bāzes vecumā.

apmaiņas datu un vides parametru monitoringu iepriekš ierīkotajos izpētes objektos, kur pēc vienlaidus cirtes augsnes sagatavošana veikta ar ekskavatoru, nosakot SEG emisijas no pacilām, bedrēm un kontroles platībās. Mērījumi veikti kūdreņos un purvainos, lai noteiktu mitruma režīma ietekmi uz SEG emisijām. Mērījumi šajos objektos jāatkārto piecus un desmit gadus pēc augsnes sagatavošanas, lai konstatētu, kurā brīdī SEG emisiju rādītāji no pacilām, bedrēm un pārējās audzes daļas izlīdzinās un sasniedz pieaugušai audzei raksturīgus rādītājus.

4.2.1. Pakāpenisko ciršu ietekmes uz SEG emisijām

Lai raksturotu pakāpeniskās cirtes ietekmi uz siltumnīcefekta gāzu (CO_2 , CH_4 , N_2O) emisijām kūdras augsnēs, veikti gāzu apmaiņas un dažādu vides parametru mērījumi kūdreņos, kur galvenā cirte veikta ar pakāpeniskās, izlases un vienlaidus cirtes paņēmieni, tajā skaitā priedei salīdzināta joslu pakāpeniskā cirte un vienlaidus cirte, bet eglei divās audzēs salīdzināta izlases cirte un vienlaidus cirte, vērtējot atmosfēras siltumnīcefekta gāzu (SEG) apmaiņu mežos ar meliorētām kūdras augsnēm (Tab. 4.3).

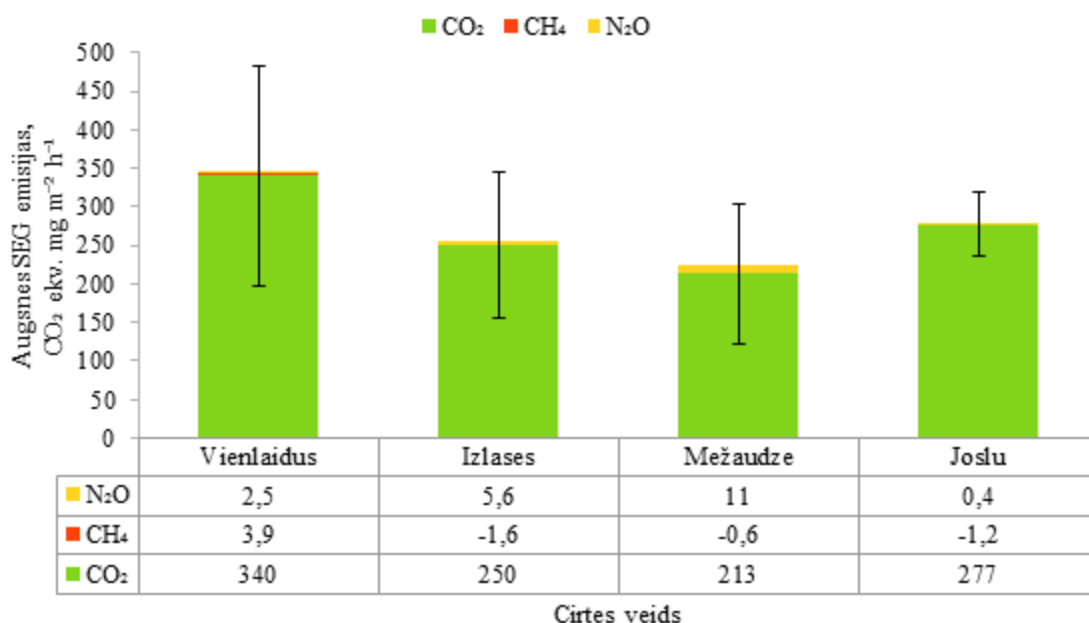
Tab. 4.3. Gāzu apmaiņas mērīšanas parauglaukumi cirtes veida ietekmes raksturošanai

Objekta identifikators	Koordinātes	Mērījumu periods	Saimnieciskā darbība	Piezīmes
012-193-27 (LVC313)	57.26991, 25.99252	02.02.2021-30.07.2024	Joslu pakāpeniskā cirte priedes audzē 2021. gada decembrī, augsnes sagatavošana 08.2022, priede stādīta 10.2022	Kontroles objekts LVC116, kurā veikta vienlaidus cirte, atrodas tajā pašā nogabalā
012-193-27 (LVC116)	57.26889, 25.99285	20.01.2021-30.07.2024	Atjaunošanas cirte priedes audzē ar vienlaidus cirtes paņēmieni 22.02.2022; augsnes sagatavošana 25.08.2022; stādīta priede 24.10.2022	Objektā veikti arī mērījumi, lai raksturotu SEG emisijas no risēm (objekts LVMCA_R4)
012-218-4 (LVC309)	57.27915, 25.85371	20.01.2021-30.07.2024	Atjaunošanas cirte egles audzē ar vienlaidus cirtes paņēmieni 22.03.2022; augsnes sagatavošana 2022. gada jūnijā, vienlaikus ierīkojot dziļvagas un atjaunojot esošos grāvjus	Objektā veikti arī mērījumi, lai raksturotu SEG emisijas no risēm (objekts LVMCA_R1)
031-108-4 (LVC312)	57.311643, 25.936089	20.01.2021-30.07.2024	Atjaunošanas cirte egles audzē ar vienlaidus cirtes paņēmieni 24.05.2022, augsnes sagatavošana 2022. gada augustā; 2023. gada aprīlī stādīta egle uz pacilām, bet mitrākajā daļā melnalksnis	Objektā veikti arī mērījumi, lai raksturotu SEG emisijas no risēm (objekti LVMCA_R1 un LVMCA_R2)
031-51-11 (LVC112)	57.33731, 26.02635	18.01.2021-30.07.2024	Atjaunošanas cirte egles audzē 23.02.2022; augsnes sagatavošana	References dati iegūti LIFE OrgBalt projektā, gāzu mērīšanas aprīkojums

Oglekļa aprite meža ekosistēmā

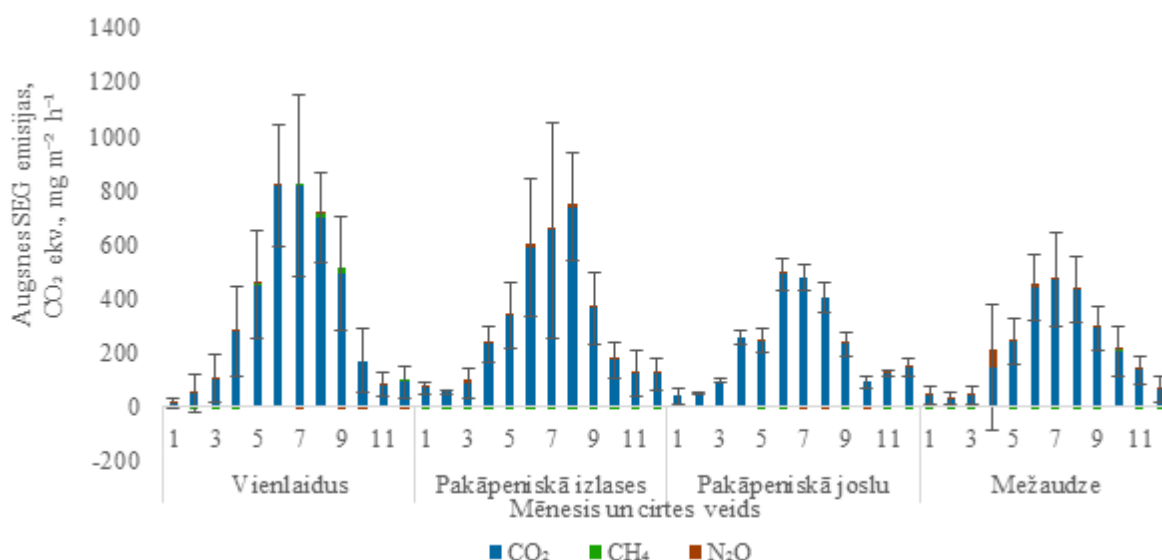
			24.08.2022; stādīta egle 26.10.2022	atjaunots 2023. gada jūlijā
012-203-1 (LVC113)	57.27199, 26.03160	22.01.2021- 16.10.2024	Pakāpeniskā izlases cirte egles audzē 2021. gada februārī	Pusē nogabala ienesti koksnes pelni. References dati pirms mežizstrādes iegūti LIFE OrgBalt projektā.
031-21-21 (LVC308)	57.34716, 25.92523	21.01.2021- 15.12.2022	Pakāpeniskā izlases cirte egles audzē 2022. gada februārī	References dati pirms mežizstrādes iegūti LIFE OrgBalt projektā.
012-218-51 (LVC311)	57.27887, 25.85441	20.01.2021- 30.07.2024	Atjaunošanas cirte ar vienlaidus cirtes paņēmienu egles audzē 25.04.2022; augsnes sagatavošana 2022. gada jūnijā, ierīkojot dziļvagas liekā ūdens novadīšanai, un atjaunoti esošie grāvji	References dati pirms mežizstrādes iegūti LIFE OrgBalt projektā. Gāzu mērīšanas aprīkojums atjaunots 2023. gada jūlijā; objektā veikta gāzu apmaiņas mērīšana dziļvagu ietekmes uz SEG emisijām raksturošanai, bet objekta mitrākā daļa izmantota, lai raksturotu mežizstrādes ietekmi izcirtumā

Salīdzinot ar datiem pirms mežizstrādes, pēc pakāpeniskās un vienlaidus cirtes vidējais augsnes SEG emisiju pieaugums vislielākais bija platībās, kur veikta vienlaidus cirte un SEG emisijas pieauga vidēji par 123 mg CO₂ ekv. m² h⁻¹ jeb par 55 %, salīdzinot ar sākotnējo stāvokli. Joslu un izlases pakāpeniskajās cirtēs emisiju pieaugums bijis mazāks, tām pieaugot par attiecīgi vidēji 30 un 53 mg CO₂ ekv., m² h⁻¹, jeb par 24 un 14 % (Att. 4.3).



Att. 4.3. SEG emisijas no augsnes atkarībā no cirtes veida

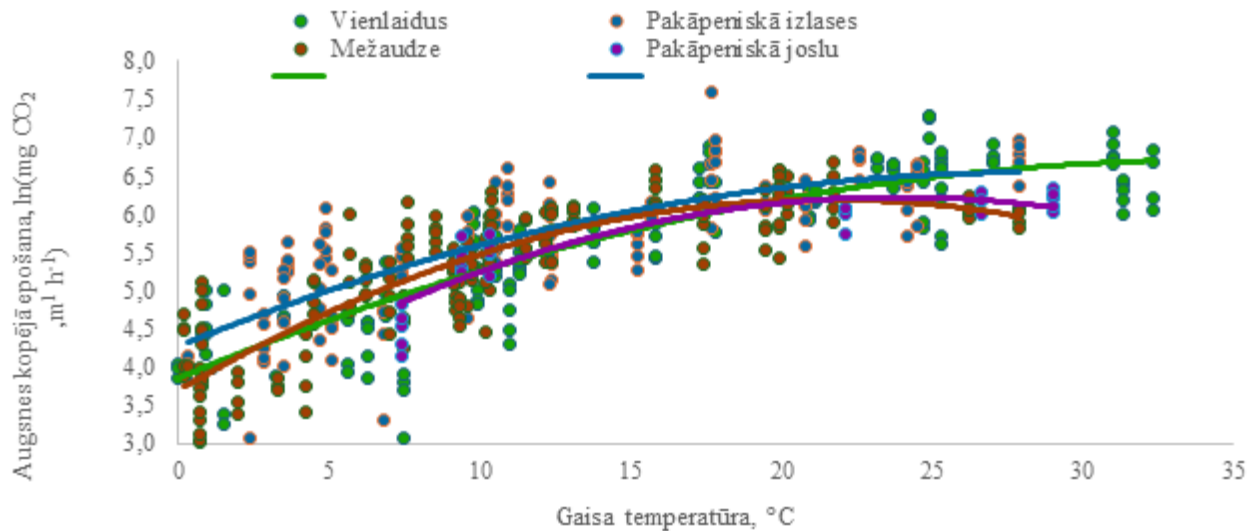
Salīdzinot augsnes emisijas atkarībā no mēneša un cirtes veida, novērojams, ka pakāpeniskajās cirtēs un kontroles platībās ir līdzīga emisiju dinamika (Att. 4.4). Pētījuma rezultāti apstiprina hipotēzi, ka pēc pakāpeniskās izlases un joslu cirtes SEG emisiju no augsnes pieaugums ir mazāks nekā pēc vienlaidus cirtes, taču atšķirība nav tik liela, lai pie vienāda plānotā mežizstrādes apjoma pakāpeniskās cirtes ļautu samazināt SEG emisiju no augsnes pieaugumu, jo pakāpeniskajās cirtēs iegūst vidēji trīs reizes mazāk kokmateriālu nekā vienlaidus cirtēs, attiecīgi vienāda koksnes apjoma ieguvei nepieciešama trīs reizes platība, un kopējās emisijas pakāpenisko ciršu scenārijā būtu lielākas.



Att. 4.4. Augsnes SEG emisijas atkarībā no cirtes vaida un kalendārā mēneša

Emisiju pieaugums pēc mežizstrādes nav saistīts ar palielinātu augsnes CO₂ emisiju jutīgumu pret temperatūras izmaiņām – emisijas līdzīgos atmosfēras temperatūras apstākļos ir bijušas līdzīgas kontroles platībās un platībās ar dažādām cirtēm, attiecīgi, visticamāk, ka

samazināts apēnojums nav veicinājis augsnes mineralizāciju (Att. 4.5). Palielinātas emisijas var būt saistītas ar augsnes bojājumiem un svaigu mežizstrādes atlieku sadalīšanos, līdzīgi kā novērots citu izmēģinājumu platībās. Piemēram, pieaugušas augsnes emisijas novērotas salīdzinot arī situāciju pirms un pēc augsnes sagatavošanas.



Att. 4.5. Augsnes kopējā elpošana atkarībā no gaisa temperatūras un cirtes veida

4.2.2. Kūdras augsnes sagatavošana ar ekskavatoru ietekme uz augsnes SEG emisijām

Šajā etapā pabeidzām arī gāzu apmaiņas datu un vides parametru monitoringu iepriekš ierīkotajos izpētes objektos, kur augsnes sagatavošana veikta ar ekskavatoru, nosakot SEG emisijas un ietekmējošo faktoru parametrus uz pacilām, bedrēs un kontroles platībās. Mērījumi veikti kūdreņos un purvainos, lai noteiktu augsnes sagatavošanas ietekmi uz SEG emisijām. Mērījumi šajos objektos jāatkārto piecus un desmit gadus pēc augsnes sagatavošanas, lai konstatētu, kurā brīdī SEG emisiju rādītāji izlīdzinās.

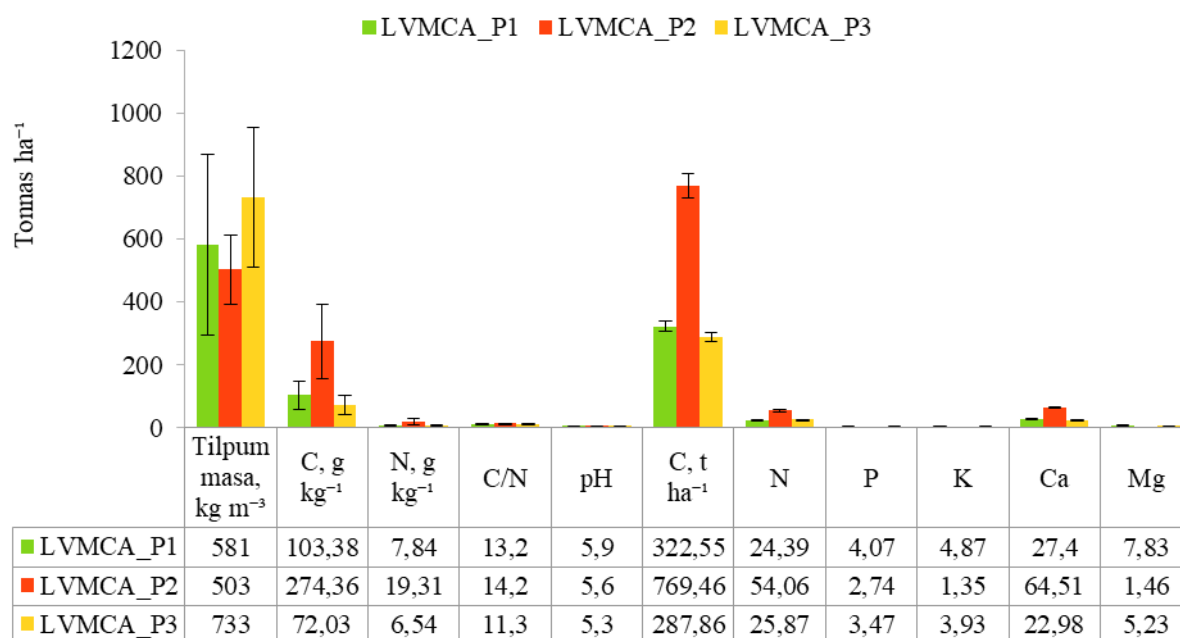
Lai raksturotu augsnes sagatavošanas ietekmi uz siltumnīcefekta gāzu (CO_2 , CH_4 , N_2O) emisijām kūdras augsnēs, 2022.-2024. gadā veikti mērījumi trīs objektos, vērtējot augsnes – atmosfēras siltumnīcefekta gāzu apmaiņu mežos ar kūdras augsnēm uz pacilām, bedrēs un augsnes sagatavošanas neskartajā platībā (Att. 4.4). Siltumnīcefekta gāzu emisiju un ietekmējošo faktoru mērījumi šajos objektos uzsākti vismaz vienu gadus pirms atjaunošanas cirtes veikšanas, nodrošinot references datus augsnes sagatavošanas ietekmes raksturošanai. Pēc galvenās cirtes un augsnes sagatavošanas gāzu apmaiņas mērīšanas parauglaukumi atjaunoti, ierīkojot papildus mērījumu vietas uz pacilām un bedrēs un mērījumi turpināti, lai iegūto mērījumu dati raksturotu augsnes sagatavošanas ietekmi uz siltumnīcefekta gāzu emisijām meža zemē.

Tab. 4.4. Gāzu apmaiņas mērīšanas parauglaukumi atjaunotās platībās

Objekta identifikators	PL	Augsnes organiskā slāņa biezums, cm	Koordinātes	Saimnieciskā darbība	Piezīmes
LVMCA_P1	A	30	57.32261, 26.07043	Pacilošana 25.11.2021,	References dati iegūti LIFE OrgBalt
	B	35	57.32282, 26.07054		

Objekta identifikators	PL	Augsnes organiskā slāņa biezums, cm	Koordinātes	Saimnieciskā darbība	Piezīmes
	C	35	57.32291, 26.07015	2022. gada pavasarī stādīts melnalksnis	projektā (LVC303)
LVMCA_P2	A	27	56.23043, 21.12416	Pacilošana 23.11.2020, 2021. gada pavasarī stādīta egle	References dati iegūti LIFE OrgBalt projektā (LVC302)
	B	25	56.23026, 21.12373		
	C	27	56.23013, 21.12322		
LVMCA_P3	A	10	56.77243, 24.75648	Pacilošana 2022. gada novembrī, 2023. gada aprīlī stādīts melnalksnis	References dati iegūti E2SOILAGRI projektā (E2S3)
	B	15	56.77254, 24.75663		
	C	25	56.77279, 24.75687		

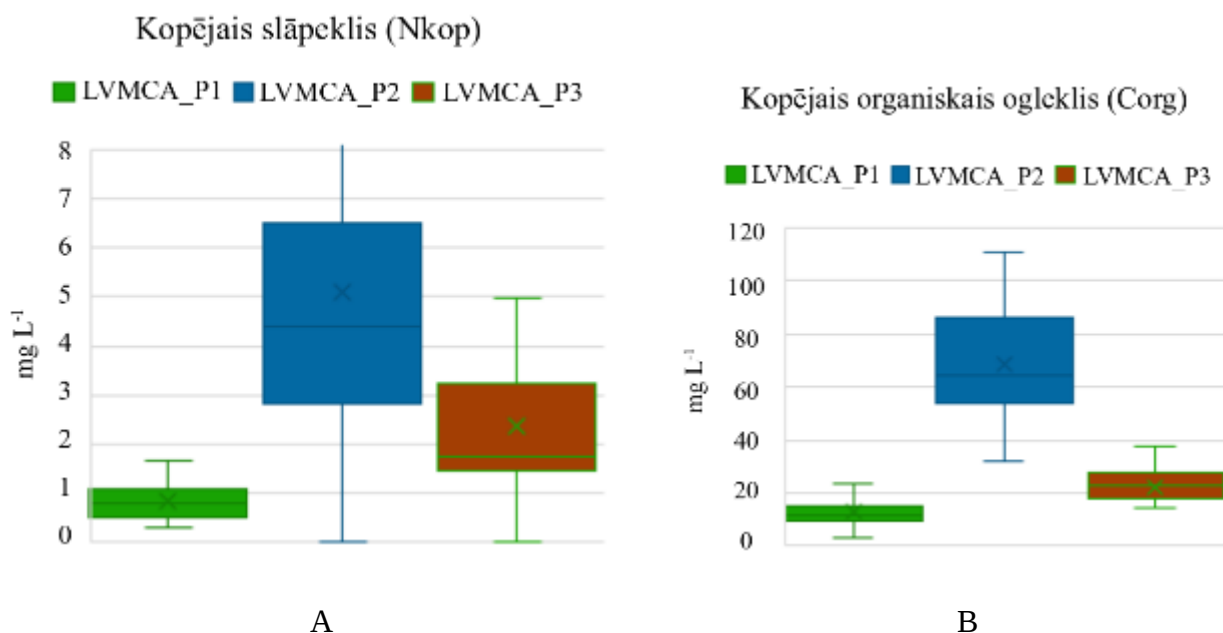
Objektos augsne ir ar palielinātu skābumu ($\text{pH } 5,6 \pm 0,3$), nedaudz sablīvēta (tilpummasa $606 \pm 117 \text{ kg m}^{-3}$) un ar augstu mineralizācijas pakāpi – organiskā un kopējā slāpekļa attiecība (C/N) 13 ± 1 . Organiskā oglekļa (C) uzkrājums augsnes virskārtā (0-30 cm) objektos P1 un P3 ir vidēji $305 \pm 37 \text{ t C ha}^{-1}$, bet objektā P2 $770 \pm 118 \text{ t C ha}^{-1}$. Objektā P2 novērojams salīdzinoši lielāks kalcija (Ca) uzkrājums, bet mazāks K un Mg uzkrājums (Att. 4.6).



Att. 4.6. Biogēno elementu uzkrājums atjaunotās platībās

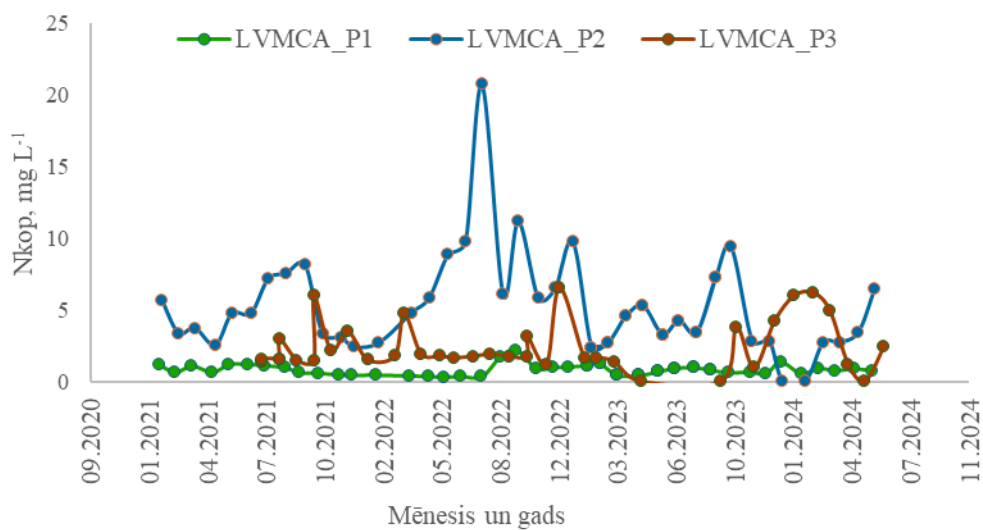
Augsnes ūdens kopējā slāpekļa (Nkop) un izšķīdušā organiskā oglekļa (DOC) koncentrācija izmēģinājumu laikā bijusi liela variācija, tomēr izmēģinājumu objektos novērojamas atšķirīgas tendences. Vislielākās koncentrācijas novērotas objektā LVMCA_P2 – Nkop $5,32 \pm 3,29 \text{ mg L}^{-1}$,

bet DOC $71,54 \pm 23,76 \text{ mg L}^{-1}$, bet vismazākās objektā LVMCA_P1 - Nkop $0,83 \pm 0,38 \text{ mg L}^{-1}$, bet DOC $12,91 \pm 5,57 \text{ mg L}^{-1}$ (Att. 4.7).

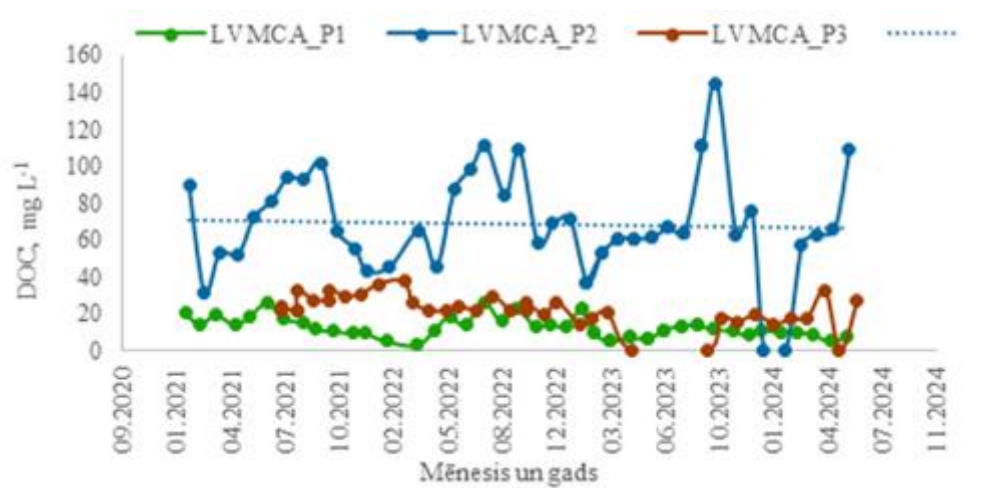


Att. 4.7. Slāpekļa (A) un izšķīdušā organiskā oglekļa (B) koncentrāciju variācija augsnes ūdenī atjaunotās platībās

Augsnes ūdens paraugiem, kas ievākti vienā mēnesī dažādos gados vidējā Nkop un DOC koncentrācijai raksturīga liela variācija – relatīvā standartnovirze attiecīgi $42 \pm 22 \%$ un $27 \pm 18 \%$, kā arī nav novērojamas šo parametru ikmēneša koncentrāciju izmaiņu tendenču izmaiņas izmēģinājuma laikā (Att. 4.8).



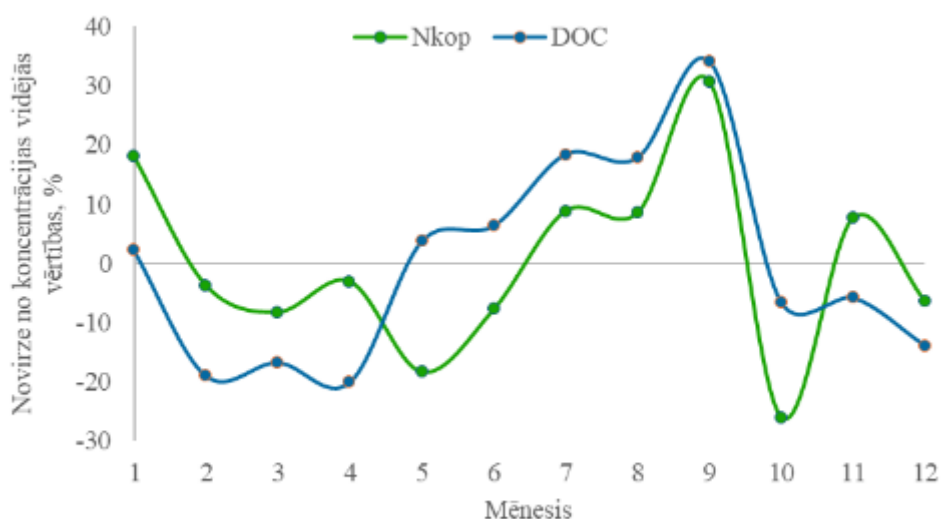
A



B

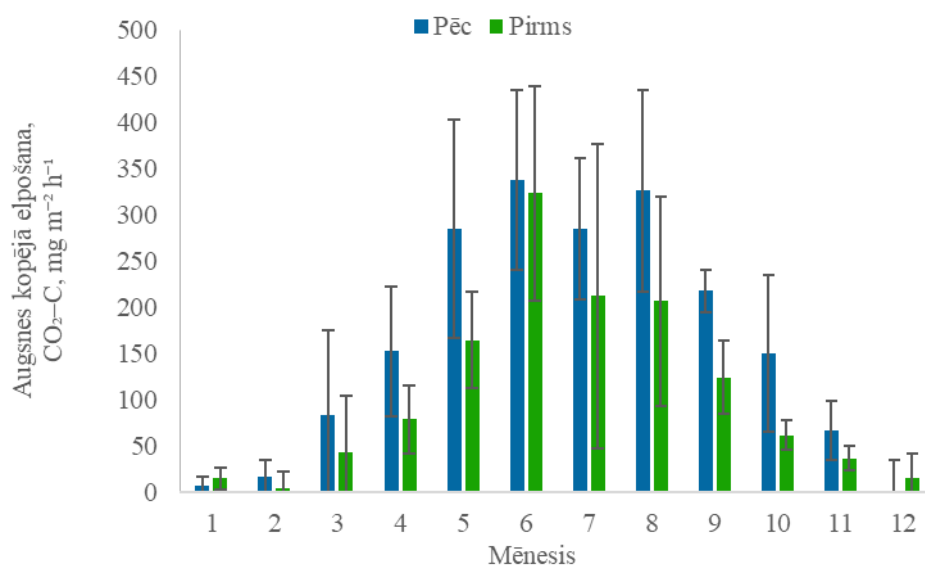
Att. 4.8. Slāpekļa (A) un izšķīdušā organiskā oglekļa (DOC) (B) koncentrācijas izmaiņas augsnes ūdenī atjaunotās platībās

Novērojama augsnes ūdens Nkop un DOC koncentrācijas samazināšanās tendence vēsajās sezonās, bet pieaugt vasaras laikā. Koncentrāciju pieauguma tendence sākas aprīlī vai maijā, maksimumu sasniedzot septembrī (Att. 4.9).



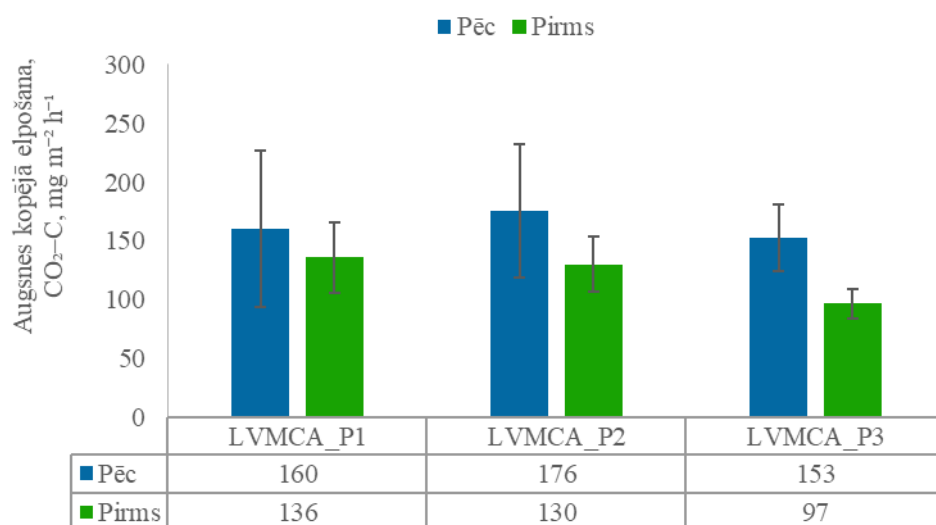
Att. 4.9. Slāpekļa (A) un DOC (B) koncentrācijas izmaiņu tendences augsnes ūdenī atjaunotās platībās

Pirms pacilošanas augsnes kopējās elpošanas vidējās CO_2 emisijas bija $107 \text{ mg CO}_2\text{-C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. Augsnes kopējā elpošana kontroles mērījumu vietās (bez tiešas augsnes sagatavošanas ietekmes) pēc augsnes sagatavošanas pieaugušas vidēji 1,5 reizes (Att. 4.10).



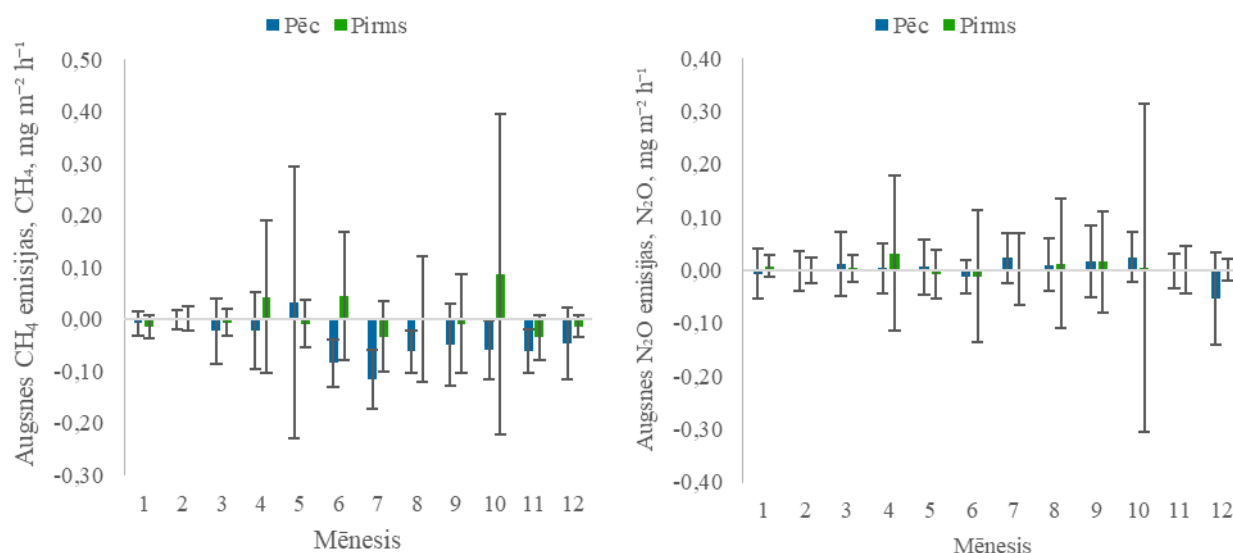
Att. 4.10. Augsnes kopējā elpošana kontroles mērījumu vietās dažādos mēnešos pirms un pēc augsnes sagatavošanas

Vidējos rādītājus būtiski ietekmē kontroles mērījumu rezultāti objektā LVMCA_P3 pirms augsnes sagatavošanas – augsnes kopējās elpošanas emisijas bijušas vidēji $97 \pm 13 \text{ mg CO}_2\text{-C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, kamēr pārējos objektos nedaudz lielākas – vidēji $133 \pm 27 \text{ mg CO}_2\text{-C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. Savukārt, pēc augsnes sagatavošanas visos objektos kontroles mērījumi bija līdzīgi, vidēji $164 \pm 50 \text{ mg CO}_2\text{-C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. Mazākas emisijas objektā LVMCA_P3 pirms augsnes sagatavošanas augsnes un augsnes ūdens ķīmiskais saturs neizskaidro. Pēc augsnes sagatavošanas augsnes emisijas kontroles mērījumu punktos pieauga vidēji $1,37 \pm 0,20$ reizes (attēls 4.11).



Att. 4.11. Vidējās augsnes kopējā elpošanas radītās SEG emisijas kontroles mērījumu vietās pirms un pēc augsnes sagatavošanas

Kontroles mērījumu punktos pirms augsnes sagatavošanas konstatētas nelielas CH₄ emisijas, vidēji $4 \pm 36 \mu\text{g CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, bet pēc sagatavošanas nodrošinājusi atmosfēras CH₄ piesaisti $42 \pm 40 \mu\text{g CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ (Att. 4.12). Arī N₂O emisijas kontroles mērījumu punktos būtiski neatšķiras, novērtētās vidējās emisijas pirms un pēc sagatavošanas ir, attiecīgi, 5 ± 11 un $2 \pm 21 \mu\text{g N}_2\text{O m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ (Att. 4.12). Nedaudz lielākas CH₄ emisijas, bet mazākas N₂O emisijas, pirms augsnes sagatavošanas var būt skaidrojamas ar augstāku gruntsūdens līmeni periodā pirms augsnes sagatavošanas – vidēji 61 cm. Pēc augsnes sagatavošanas vidējais gruntsūdens līmenis bija 75 cm.



A

B

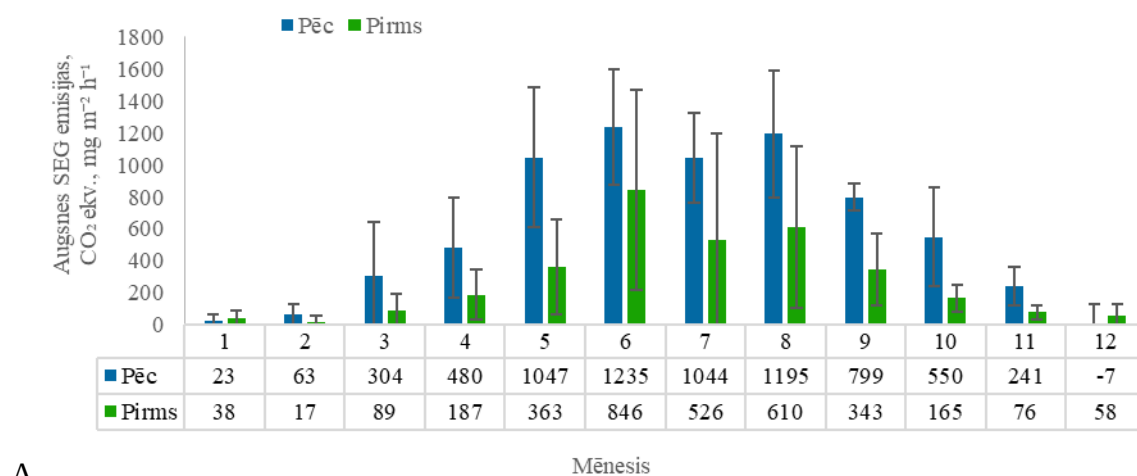
Att. 4.12. Augsnes CH₄ (A) un N₂O (B) emisijas pirms un pēc augsnes sagatavošanas

Vidējais gruntsūdens līmenis dažādos izpētes objektos atšķīrās, no 24 līdz 100 cm, un tas ir būtiski ietekmējis CH₄ emisiju tendences. Novērojama tipiska situācija, ka metāna emisijas ir novērojamas periodos, kad vidējais gruntsūdens līmenis ir augstāk par 30 cm (Tab. 4.5).

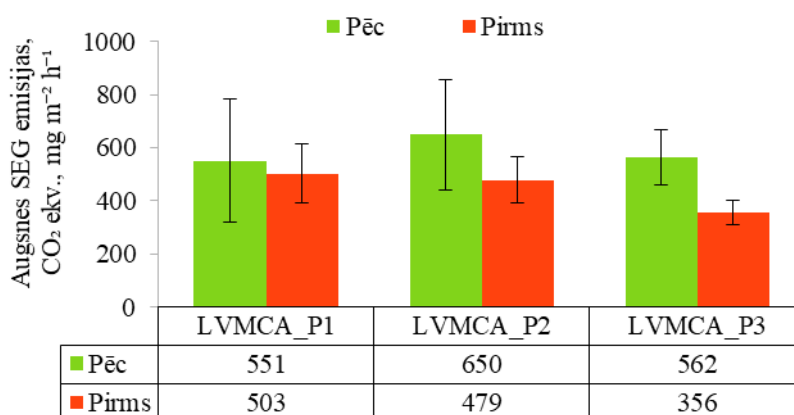
Tab. 4.5. CH₄ un N₂O emisijas kontroles mērījumu vietās

Pirms vai pēc augsnes sagatavošanas	Objekts	Rel. mitruma saturs augsnē, %	Gruntsūdens līmenis, cm	CH ₄ μg m ⁻² h ⁻¹	N ₂ O, μg m ⁻² h ⁻¹
Pēc	LVMCA_P2	63±32	14±34	36±125	3±32
Pirms	LVMCA_P2	56±22	30±31	22±53	8±22
Pirms	LVMCA_P1	67±18	35±22	56±132	1±4
Pēc	LVMCA_P1	83±25	55±28	-33±32	5±39
Pirms	LVMCA_P3	30±13	91±35	-35±57	6±31
Pēc	LVMCA_P3	26±15	113±38	-77±43	-1±34

Kontroles mērījumos CH₄ un N₂O emisijām ir bijusi nebūtiska ietekme uz kopējām SEG emisijā, attiecīgi, augsnes SEG emisijas CO₂ ekvivalentos galvenokārt nosaka CO₂ emisiju dinamika (Att. 4.13). CH₄ un N₂O emisijas, pēc augsnes sagatavošanas bija par 34 ± 24% lielākas.



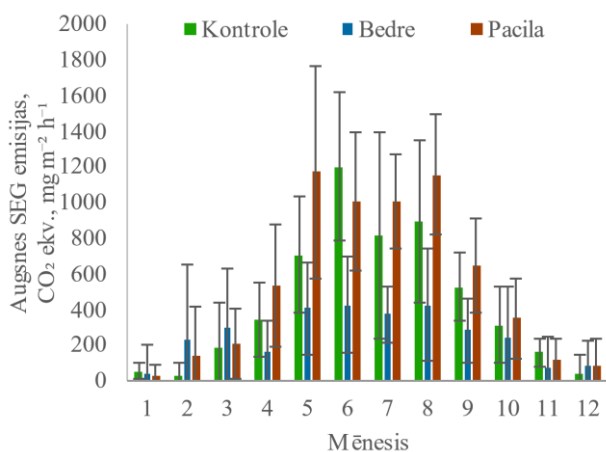
A



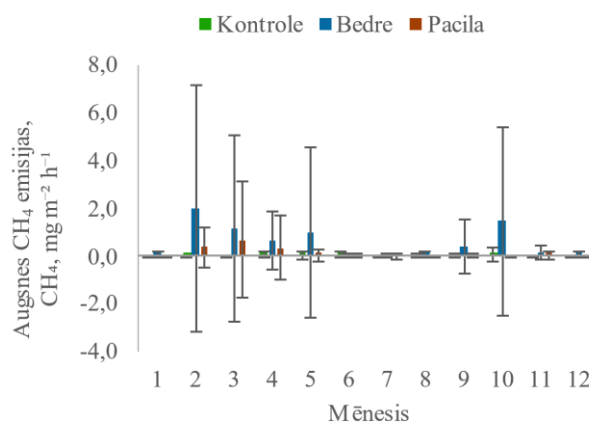
B

Att. 4.13. Augsnes kontroles mērījumu SEG emisijas (B) un to ikmēneša dinamika (A)

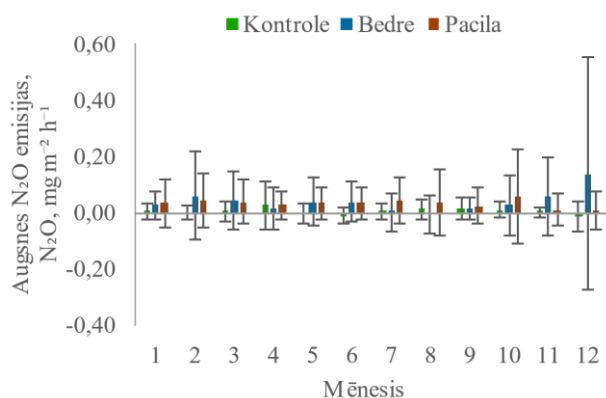
Salīdzinot ar kontroles mērījumiem, CO₂ emisijas no bedrēm ir par 55% mazākas, bet no pacilām par 10% lielākas. Attiecīgi, pieaugušās emisijas no pacilām tiek kompensētas ar mazākām emisijām no bedrēm. Mazākas CO₂ emisijas no bedrēm skaidrojamas ar palielinātu mitruma saturu augsnē bedrēs, kā arī ar minerālaugunes slāņa atsegšanu seklās kūdras augsnēs. Vidējais relatīvā mitruma saturs augsnes bedrēs un pacilās bija 55%, bet kontroles mērījumu vietās – 45%. Palielināts mitruma saturs augsnē bedrēs atspoguļojas arī CH₄ emisiju mērījumos. Metāna emisiju pieaugums novērojams pavasara un rudens mērījumos. Mēnešos, kad novērojams būtisks CH₄ emisiju pieaugums, tas sasniedz vidēji $1,1 \pm 0,6 \text{ mg CH}_4 \text{ m}^2 \text{ h}^{-1}$, CH₄ emisijām sasniedzot $30,4 \pm 16,3 \text{ mg CO}_2 \text{ ekv. m}^2 \text{ h}^{-1}$, jeb aptuveni 9% no vidējām augsnes emisijām kontroles punktos ($344 \pm 292 \text{ mg CO}_2 \text{ ekv. m}^2 \text{ h}^{-1}$). Novērojams arī CH₄ emisiju pieaugums no pacilām šajos periodos, tomēr emisiju pieaugums no pacilām nav būtisks. Bedres un pacilas rada risku desmitkārtot N₂O emisijas, tās palielinot no vidēji aptuveni 4 līdz $34 \mu\text{g N}_2\text{O m}^2 \text{ h}^{-1}$, jeb $10,1 \text{ mg CO}_2 \text{ ekv. m}^2 \text{ h}^{-1}$, (Att. 4.14), tomēr N₂O ietekme uz kopējām emisijām no augsnes ir nebūtiska.



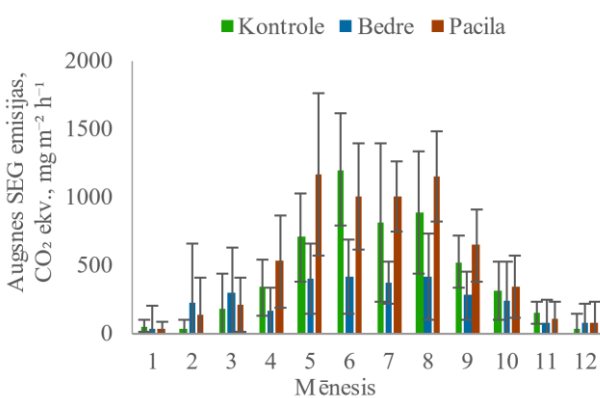
A



B



C

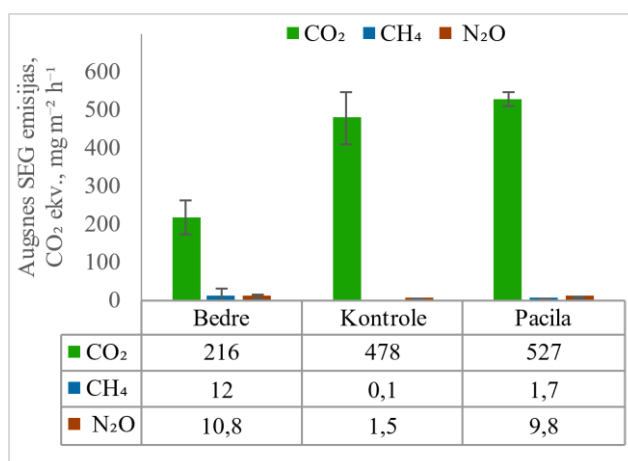


D

Att. 4.14. Augsnes CO₂ (A), CH₄ (B), N₂O (C) un SEG emisijas CO₂ ekvivalentos (D) kontroles, bedres un pacilas mērījumu punktos atkarībā no mēneša

Lai gan augsnes sagatavošana palielināja CH₄ un N₂O emisijas, tas nerada nozīmīgu ietekmi uz kopējām SEG emisijām, savukārt nelielo CO₂ emisiju pieaugumu no pacilām kompensē samazinātas emisijas no bedrēm (Att. 4.15). Divos izmēģinājuma objektos novērots, ka kontroles mērījumu CO₂ emisijas pieaugušas par aptuveni 30%, bet trešajā (LVMCA_P3) par 60%. Nav konstatētas būtiski palielinātas SEG emisijas saistībā ar pacilu un bedru izveidošanu, attiecīgi, iegūtie rezultāti neapstiprina pieņēmumu, ka augsnes sagatavošanas SEG emisijas var samazināt,

veidojot mazāku pacilu skaitu. Tomēr pēc augsnes sagatavošanas SEG emisijas no augsnes (kumulatīvā CO₂, CH₄ un N₂O ietekme) pieaug par 34 ± 24%. Emisiju pieaugums nav skaidrojams ar nelabvēlīgiem meteoroloģiskajiem apstākļiem – pirms augsnes sagatavošanas vidējais noteiktais gruntsūdens līmenis ir 55 cm, bet pēc sagatavošanas – 61 cm. Tas atspoguļojas arī mitruma saturā augsnē, kas pirms sagatavošanas bijis vidēji 45%, bet pēc sagatavošanas vidēji 53%. Tādēļ sausāki apstākļi nav bijis iemesls emisiju pieaugumam, tomēr pēc augsnes sagatavošanas novērojams lielāks to CO₂ emisiju temperatūras jutīgums – augstākas emisijas tajā pašā temperatūrā. Pēc augsnes sagatavošanas vidējie augsnes temperatūras mērījumi neatšķiras (vidēji 8,9 un 9,1 °C). Augsnes sagatavošanas ietekme uz kontroles mērījumiem var būt saistīta ar mežizstrādes ietekmi – svaigu kritalu nonākšanu augsnē un barības vielu pieejamības palielināšanos.



Att. 4.15. Augsnes SEG emisijas CO₂ ekvivalentos no bedrēm, pacilām un kontroles punktos

4.2.3. SEG emisijām no augsnes slapjajiem un purvainajiem

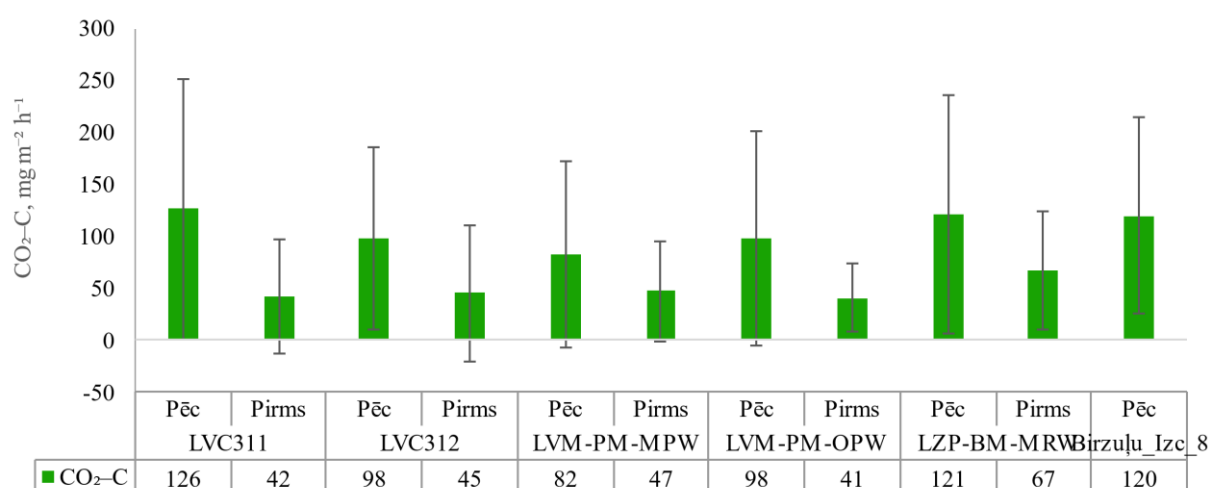
Pētījuma ietvaros ierīkoti seši objekti, veicot augsnes- atmosfēras gāzu apmaiņas mērījumus izcirtumos slapjajiem un purvainajiem vienlaidus atjaunošanas cirtes ietekmes uz SEG emisijām raksturošanai (Tab. 4.6). 2024. gadā turpināti gāzu apmaiņas un vides parametru mērījumi iepriekš ierīkotajos parauglaukumos, lai raksturotu mežizstrādes ietekmi uz SEG emisijām.

Tab. 4.6. Gāzu apmaiņas mērīšanas parauglaukumi izcirtumos slapjajiem un purvainajiem

Objekts	Koordinātes	Valdošā koku suga	Meža tips	Augsnes auglība	Mērījumu periods	Mežizstrāde
129-11 (LZP-BM-MRW)	57.29669 25.91146	B	Slapjainis	Auglīgs	30.05.2022- 30.06.2024	08.02.2023
67-21 (LVM-PM-MPW)	57.32998 26.0123	P	Slapjainis	Mazauglīgs	26.05.2022- 30.06.2024	08.02.2023
187-10 (LVM-PM-OPW)	57.28949 26.01518	P	Purvainis	Mazauglīgs	31.05.2022- 30.06.2024	08.02.2023
133-23 (Birzuļu_Izc_8)	56.703091 24.403671	B	Purvainis	Auglīgs	09.10.2020- 30.06.2024	2019. gada ziema

Objekts	Koordinātes	Valdošā koku suga	Meža tips	Augsnes auglība	Mērījumu periods	Mežizstrāde
012-218-51 (LVC311, LVMCA_R1) ⁴	57.27887, 25.85441	E	Purvainis	Auglīgs	20.01.2021- 28.10.2024	25.04.2022
031-108-4 (LVC312, LVMCA_R2)	57.26991, 25.99252	E	Purvainis	Auglīgs	20.01.2021- 29.10.2024	24.05.2022

Salīdzinot ar situāciju pirms atjaunošanas cirtes, izcirtumos augsnes CO₂ emisijas pieauga vidēji $2,2 \pm 0,5$ reizes (Att. 4.16). Pirms atjaunošanas cirtes augsnes vidējās CO₂ emisijas izmēģinājuma objektos bija no 43 līdz 68 mg CO₂-C m² h⁻¹, bet izcirtumos robežas no 83 līdz 127 mg CO₂-C m² h⁻¹.

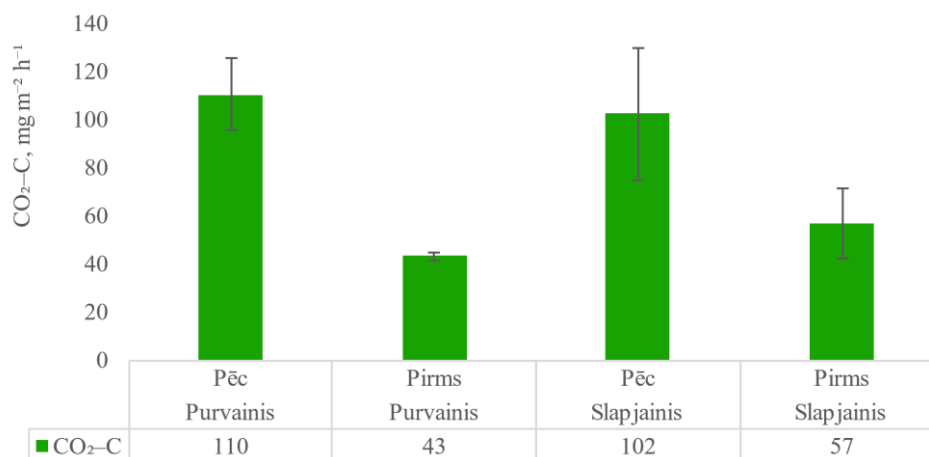


Att. 4.16. Augsnes CO₂ emisijas pirms un pēc atjaunošanas cirtes

Purvainos novērots lielāks emisiju pieaugums pēc atjaunošanas cirtes nekā slapjajos. Purvainos CO₂ emisijas pieauga vidēji 2,6 reizes, bet slapjajos 1,8 reizes; attiecīgi, purvainos emisijas pieauga no vidēji 43 ± 2 līdz 111 ± 15 mg CO₂-C m² h⁻¹, bet slapjajos no 57 ± 15 līdz 102 ± 27 mg CO₂-C m² h⁻¹. Izcirtumos novērojam lielāka emisiju nenoteiktība (Att. 4.17).

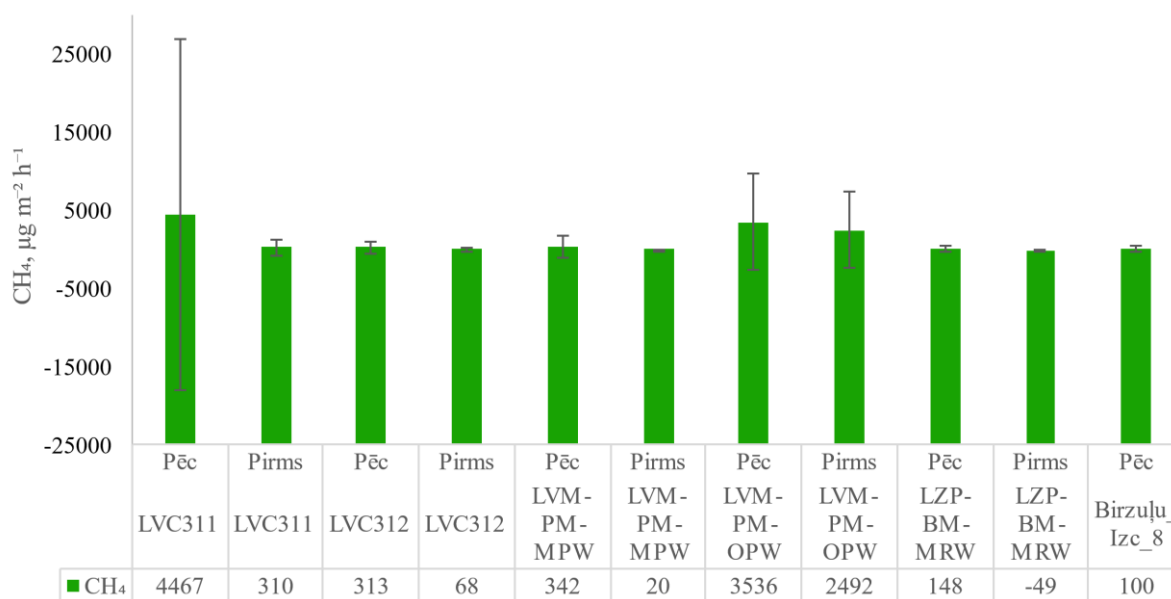
⁴ Objektā ierīkoti trīs gāzu mērījumu parauglaukumi, raksturojot mitruma režīma gradientu.

Oglekļa aprīte meža ekosistēmā



Att. 4.17. Augsnes CO₂ emisijas pirms un pēc atjaunošanas cirtes purvainos un slapjajos

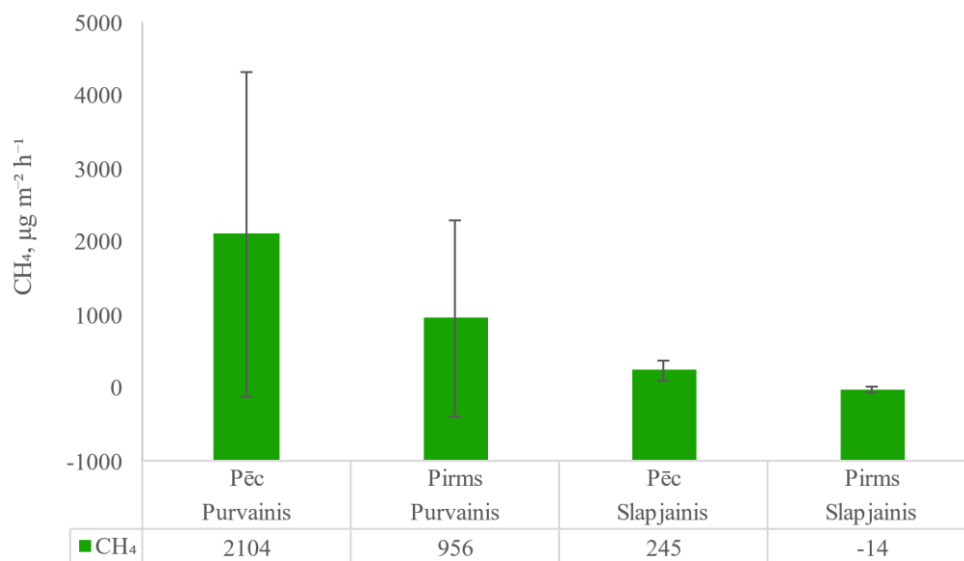
Augsnes CH₄ emisijas lielākoties bijušas maznozīmīgās. Divu objektu (LVC311 un LVM-PM-OPW) izcirtumos novērojamas ievērojamas CH₄ emisijas vidēji 4,0 mg CH₄ m² h⁻¹, jeb vidēji 112 mg CO₂ ekv. m² h⁻¹, radot būtisku ietekmi uz kopējām SEG emisijām. Objektā LVM-PM-OPW lielas CH₄ emisijas 2,5 ± 4,9 mg CH₄ m² h⁻¹ bijušas arī pirms atjaunošanas cirtes (Att. 4.18).



Att. 4.18. Augsnes CH₄ emisijas pirms un pēc atjaunošanas cirtes

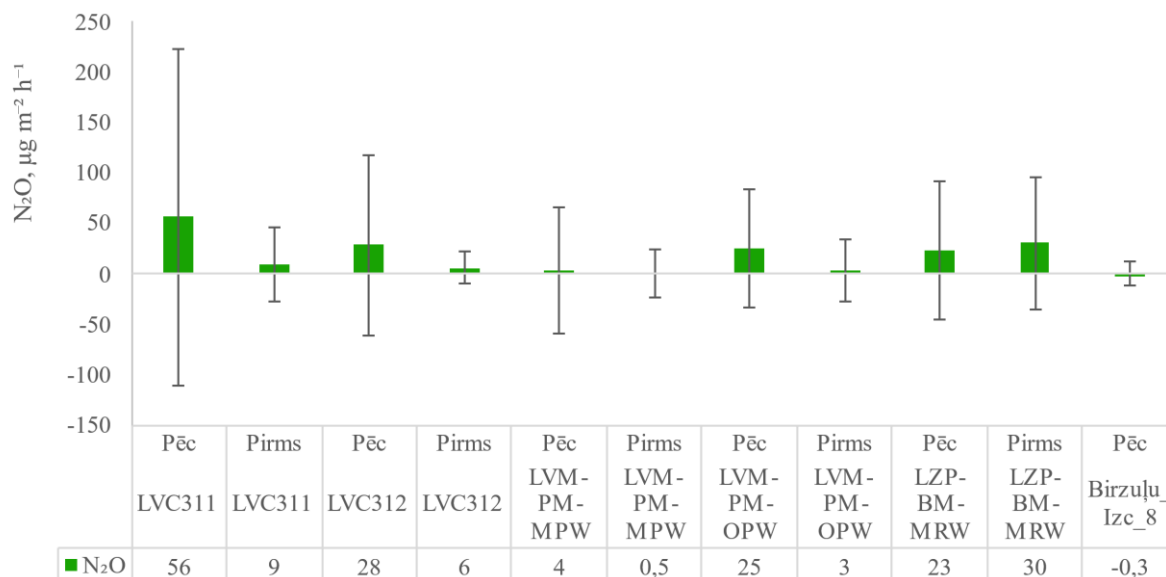
Slapjajos pirms atjaunošanas cirtes metāna emisijas bija vidēji 0,95 ± 1,3 mg CH₄ m² h⁻¹, bet izcirtumos 2,1 ± 2,2 mg CH₄ m² h⁻¹, jeb attiecīgi 27 un 59 mg CO₂ ekv. m² h⁻¹. Attiecīgi purvainos pēc atjaunošanas cirtes emisijas pieaugušas 2,2 reizes. Slapjajos CH₄ emisijas pirms atjaunošanas cirtes bija nebūtiskas, bet izcirtumos pieauga līdz vidēji 2,5 ± 1,4 mg CH₄ m² h⁻¹ (Att. 4.19).

Oglekļa aprite meža ekosistēmā



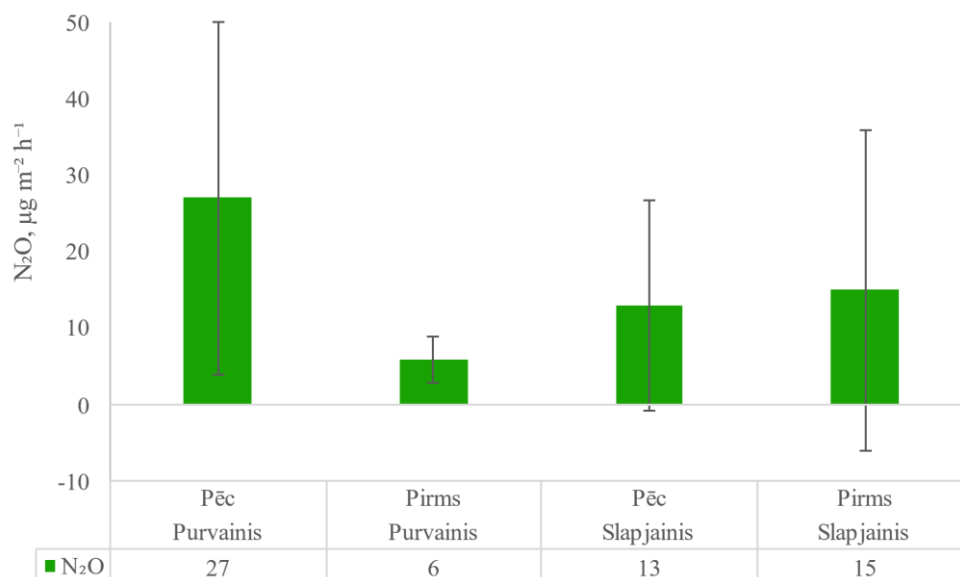
Att. 4.19. Augsnes CH₄ emisijas pirms un pēc atjaunošanas cirtes purvainos un slapjajos

Atjaunošanas cirtes ietekme uz pieaugošām emisijām novērojama arī N₂O gadījumā, emisijas pieaugušas vidēji $5,5 \pm 3,0$ reizes. Pirms atjaunošanas cirtēs augsnes N₂O emisijas izmēģinājuma objektos bijušas no vidēji 1 līdz 30 μg N₂O m² h⁻¹, bet izcirtumos no vidēji -0,3 līdz 56 μg N₂O m² h⁻¹ (Att. 4.20).



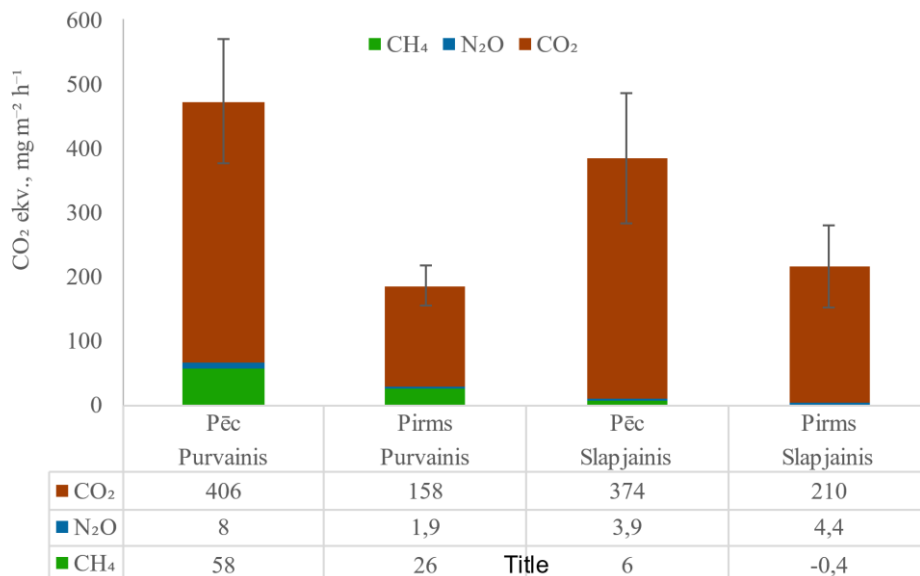
Att. 4.20. Augsnes N₂O emisijas pirms un pēc atjaunošanas cirtes

N₂O emisiju pieaugums atjaunošanas cirtes ietekmē novērots purvainos, emisijām pieaugot vidēji 4,4 reizes no 6 ± 3 līdz 28 ± 23 μg N₂O m² h⁻¹, jeb no 1,9 līdz 8,0 mg CO₂ ekv. m² h⁻¹. Slapjajos pirms un pēc mežizstrādes augsnes N₂O emisijas bijušas līdzīgas – vidēji 15 ± 1 μg N₂O m² h⁻¹ (Att. 4.21).



Att. 4.21. Augsnes N₂O emisijas pirms un pēc atjaunošanas cirtes purvaiņos un slapjainos

CO₂, CH₄ un N₂O emisijas vērtējot CO₂ ekvivalentos, purvaiņos atjaunošanas cirtes rezultātā augsnes emisijas pieauga no 187 ± 32 līdz 474 ± 97 , bet Slapjainos no 227 ± 64 līdz 393 ± 100 mg CO₂ ekv. m² h⁻¹. Purvaiņos ir lielākas CH₄ emisijas, kas pirms un pēc mežizstrādes veido no vidēji $13 \pm 1\%$ no kopējām SEG emisijām. N₂O emisijas ir nebūtiskas gan purvaiņos gan kūdreņos. Augsnes CO₂ emisijas purvaiņos un slapjainos būtiski neatšķiras (Att. 4.22), kas norāda, ka augsnes bruto emisijas neatkarīgi no augsnes veida – minerālaugsne vai organiskā augsne – galvenokārt nosaka strauja ikgadējo nobiru sadalīšanās, nevis vēsturiskās organiskās vielas sadalīšanās. Salīdzināmas bruto emisijas no minerālaugsnes un organiskās augsnes norāda, ka pie nosacījuma, ka arī ikgadējā oglekļa ienese augsnē ar biomasas atmirumu ir salīdzināms, tad organiskās augsnes oglekļa uzkrājums ir tik pat stabils kā organiskās augsnēs. Izmēģinājumā novērotās purvaiņu augsnes emisijas ir salīdzināmas ar tipiskām kūdreņu emisijām, kas sniedz norādi, ka secinājums par oglekļa uzkrājuma stabilitāti varētu būt attiecināms arī uz kūdreņiem. Hipotēze ir apstiprināma turpinot ievākt empīrisko materiālu, kas ļauj salīdzināt organisko un minerālaugšņu oglekļa apriti tajā skatā vērtējot gan bruto emisijas, gan ienesi augsnē ar atmirušo biomasu, lai vērtētu neto oglekļa uzkrājuma izmaiņas. Novērojuma rezultāti sniedz jaunu perspektīvu pierādījumu meklēšanā par organiskās augsnes oglekļa uzkrājuma stabilitāti.



Att. 4.22. Augsnes SEG emisijas pirms un pēc atjaunošanas cirtes purvainos un slapjajos

Sākotnējie rezultāti publicēti zinātniskā rakstā “Short term effect of clear-felling on greenhouse gas emissions from naturally wet organic and mineral soils” (Upenieks et al., 2024). Rakstā vērtēta mežizstrādes īstermiņa ietekme uz SEG emisijām mežos ar dabiski mitrām organiskajām un minerālaugsnes. Galvenās atziņas, kas ietvertas rakstā:

- Mežizstrāde ar vienlaidus cirtes paņēmieni, kas ir dominējošā meža atjaunošanas metode pārmitrās augsnēs, būtiski ietekmē SEG emisijas no augsnes, jo tā pakļauj augsni palielinātam saules starojumam, paaugstinot augsnes temperatūru un veicinot organisko vielu sadalīšanos. Tas var izraisīt ievērojamu oglekļa dioksīda (CO₂) un dislāpekļa oksīda (N₂O) emisiju pieaugumu;
- Mežizstrāde palielina mitruma saturu augsnes virskārtā un paaugstina gruntsūdens līmeni, jo izzūd veģetācija, kas nodrošināja ūdens transpirāciju. Šīs izmaiņas mitruma režīmā var radīt apstākļus, kas veicina anaerobus procesus mitrās augsnēs, tādējādi palielinot metāna (CH₄) emisijas.
- Organisko un minerālaugšņu emisiju raksturs var atšķirties atkarībā no augsnes tipa un mitruma režīma pēc mežizstrādes. Tas nozīmē, ka emisiju dinamika ir sarežģīta un atkarīga no vietējiem apstākļiem. Kopīga tendence ir būtiski mazākas emisijas pārmitrās minerālaugsnēs.

Iegūtās atziņas norāda uz nepieciešamību rūpīgi izvērtēt meža apsaimniekošanas praksi, lai samazinātu siltumnīcefekta gāzu emisijas un mazinātu klimata pārmaiņu ietekmi.

4.3. Klimata pārmaiņu mazināšanas darbību kataloga mežsaimniecībai izstrādāšana

Darba nolūks 2024. gadā ir klimata pārmaiņu mazināšanas darbību zemes izmantošanas, zemes izmantošanas maiņas un mežsaimniecības (ZIZIMM) sektorā kataloga papildināšana, tajā skaitā darbību ietekmes pamatojuma pilnveidošana.

Pētījuma ietvaros turpinās iegūto atziņu ietveršana klimata pārmaiņu mazināšanas darbību ietekmes aprēķinos un literatūras analīze un klimata pārmaiņu mazināšanas darbību ietekmes novērtējuma pilnveidošana atbilstoši Latvijā validētiem pētījumu rezultātiem. Darbību īstenošanas izmaksu un ieņēmumu prognozes tiek pilnveidotas atbilstoši Centrālā statistikas biroja un citiem publiski pieejamiem datiem.

Pētījuma īstenošanas gaitā publicēti vairāki raksti ar LIFE REstore un citu projektu rezultātiem, kas raksturo SEG emisijas kūdras ieguves laukos (Bārdule et al., 2023; Dubra et al., 2023; Meļņiks et al., 2023, 2024; Samariks et al., 2023, tāpēc nozīmīgākie uzlabojumi saistīti ar metodikas pilnveidošanu bijušo kūdras ieguves lauku rekultivācijas ietekmes uz SEG emisijām prognozēšanai. Aprēķini veidoti atbilstoši Starpvalstu klimata pārmaiņu padomes vadlīniju prasībām pirmā un otrā līmeņa metodēm, t.i. izmantoti statistiski emisiju faktori un pieņēmumi oglekļa aprites aprēķiniem. Piemēram, 2024. gadā publicēti emisiju faktori un oglekļa aprites vienādojumi dzērveņu un melleņu laukiem izstrādātajās kūdras raktuvēs (Bārdule et al., 2024). Pētījuma ietvaros apkopotī projektā LIFE REstore ietvaros iegūtie līdz šim npublicētie mērījumu dati par SEG emisijām no barības vielām nabadzīgām organiskajām augsnēm dzērveņu (*Vaccinium macrocarpon*) un melleņu (*Vaccinium corymbosum*) plantācijās, kas izveidotas bijušajos kūdras ieguves laukos, salīdzinot ar aktīviem kūdras ieguves laukiem un neskartiem augstajiem purviem Latvijā. Ogulāju plantācijās un kūdras ieguves laukos gada neto CO₂ veidoja lielāko daļu no kopējām SEG emisijām – vairāk nekā 67%, un temperatūrai bija vislielākā ietekme uz CO₂ emisijām. Turpretī gada CH₄ emisijas bija galvenais faktors, kas noteica kopējās neto SEG emisijas neskartā augstajā purvā, kurā veidojās nelielas CO₂ piesaistes. N₂O emisijas bija salīdzinoši zemas visos pētītajos zemes izmantošanas veidos. Aprēķinātās gada kumulatīvās SEG emisijas (CO₂, CH₄ un N₂O neto emisiju summa) dzērveņu un melleņu stādījumos, attiecīgi, 1,50 un 3,25 t CO₂ ekv. ha⁻¹ gadā, bija būtiski mazākas nekā kūdras ieguves laukos (6,23 t CO₂ ekv. ha⁻¹ gadā) un neskartajos augstajos purvos (4,66 t CO₂ ekv. ha⁻¹ gadā). Tādējādi dzērveņu un melleņu stādījumu ierīkošana bijušajos kūdras ieguves laukos (augstajos purvos) uzskatāma par efektīvu klimata pārmaiņu samazināšanas pasākumu pēc kūdras ieguves pabeigšanas.

Lielākās neto CO₂ emisijas gadā tika novērotas aktīvajos kūdras ieguves laukos (1,56 ± 0,19 t CO₂-C ha⁻¹ gadā), savukārt neskarti augstie purvi bija nelieli CO₂ piesaistītāji (-0,07 ± 0,68 t CO₂-C ha⁻¹ gadā). Visos pētītajos zemes izmantošanas veidos vissvarīgākais vides mainīgais, kas ietekmēja CO₂ emisijas, bija temperatūra. Gada CH₄ plūsmu īpatsvars kopējā kumulatīvajā gada neto SEG plūsmā visos pētītajos zemes izmantošanas veidos bija salīdzinoši neliels (6,3-24,1%), izņemot neskartos augstos purvus, kur gada CH₄ emisijas (128,0 ± 27,5 kg CH₄-C ha⁻¹ gadā) bija galvenais avots. Ievērojami lielākas gada CH₄ emisijas neskartajos augstajos purvos, salīdzinājumā ar citiem zemes izmantošanas veidiem bija saistītas ar atšķirīgiem augsnes mitruma apstākļiem, kas atkarīgi no gruntsūdens līmeņa. Visi pētītie zemes izmantošanas veidi bija nelieli N₂O emisiju avoti, un vidējās gada N₂O emisijas bija no 0,18 ± 0,15 kg N₂O-N ha⁻¹ gadā dzērveņu plantācijās līdz 0,65 ± 0,33 kg N₂O-N ha⁻¹ gadā melleņu plantācijās. Tomēr netika konstatētas skaidras sakarības starp gada N₂O emisijām un dažādiem vides mainīgajiem lielumiem, tostarp N koncentrāciju augsnē. Šis rezultāts atbilst tam, ko esam ieguvuši arī citos zemes izmantošanas veidos (mežs, aramzemes, zālāji), tāpēc turpmākajos pētījumos jāiekļauj biežāki (tostarp diennakts mērījumi) un ilgtermiņa SEG emisijas monitorings, lai vēl vairāk uzlabotu organisko augšņu ieguldījuma novērtēšanu kopējā SEG emisiju bilancē ZIZIMM sektorā.

5. MEŽA IEAUDZĒŠANAS UN KOKAUGU STĀDĪJUMU IERĪKOŠANAS MELIORĀCIJAS SISTĒMU BUFERJOSLĀS IETEKMES UZ SEG EMISIJĀM UN CO₂ PIESAISTI IZPĒTE

5.1. Eksperimentālo stādījumu ierīkošana un esošo apmežojumu apzināšana meža ieaudzēšanas un kokaugu stādījumu ietekmes uz SEG emisijām un CO₂ piesaisti demonstrēšanai minerālaugsnēs un organiskajās augsnēs

Darba nolūks 2024. gadā ir empīrisko datu ieguve meža ieaudzēšanas un kokaugu stādījumu ierīkošanas ietekmes uz SEG emisijām un CO₂ piesaisti demonstrēšanai platībās ar organiskajām augsnēm. 2024. gadā turpināta empīrisko datu ieguve kūdras slāņa biezuma ietekmes raksturošanai, kā arī gāzu apmaiņas un vides parametru mērījumi pārslāpinātās un apmežotās pļavās un sadarbībā ar Meža pētīšanas staciju ierīkoti izpētes objekti meža ieaudzēšanas (koku sugas un stādīšanas biezums) ietekmes uz dažādām oglekļa krātuvēm raksturošanai.

5.1.1. Kūdras slāņa biezuma ietekme uz SEG emisijām apmežotās teritorijās

Gāzu apmaiņas un vides parametru mērījumi apmežotā platībā kūdras slāņa biezuma ietekmes raksturošanai veikti SEG emisiju un vides parametru mērījumi melnalkšņu stādījumā Ķeguma apkārtnē (objekts LVMCA_P3). Objektā ierīkoti trīs parauglaukumi (Tab. 5.1) augsnes sagatavošanas, veidojot pacilas, un kūdras slāņa biezuma ietekmes uz SEG emisijām raksturošanai apmežotās platībās. Kūdras slāņa biezums parauglaukumos bija 10 līdz 25 cm. Platība pirms tam izmantota lauksaimniecībā, tāpēc kūdras slānis ir sajaukts ar minerālaugsnī.

Tab. 5.1. Objekta LVMCA_P3 (apmežojums Ķeguma apkārtnē) raksturojums

Parauglaukums	WGS84 koordinātes		Kūdras slāņa biezums, cm
	x	yy	
A	56.77243	24.75648	10
B	56.77254	24.75663	15
C	56.77279	24.75687	25

SEG emisiju monitorings objektā veikts no 2021. gada jūlija līdz 2024. gada septembrim. Augsnes sagatavošana un stādīšana veikta 2023. gada pavasarī, attiecīgi, mērījumu periods raksturo situāciju pirms un pēc meža ieaudzēšanas. Paraugi augsnes īpašību raksturošanai visos parauglaukumos ievākti divos atkārtojumos, paraugošanu veicot no sekojošiem augsnes slāņiem: 0-10; 10-20; 20-30; 30-40; 40-50; 50-75; 75-100 cm. Augsne paraugiem noteikta tilpummasa (kg m⁻³), pH (KCl ekstraktā), kopējā oglekļa (C), slāpekļa (N), fosfora (P), kālija (K), kalcija (Ca) un magnija (Mg) saturs (g kg⁻¹). Objekts gāzu apmaiņas un vides parametru mērījumu veikšanai apmeklēts vidēji reizi mēnesī. SEG emisiju un apstākļus raksturojošie mērījumi veikti uz pacilas, bedrēs un neskartā platībā. Monitoringa ietvaros veikti ekosistēmas SEG apmaiņas un augsnes heterotrofās elpošanas mērījumi. Ekosistēmas SEG apmaiņas mērījumi raksturo augsnes N₂O un CH₄ emisijas, kā arī augsnes kopējo elpošanu – augsnes heterotrofās un zemsedzes veģetācijas

(virszemes un pazemes) autotrofās elpošanas summu. Ekosistēmas SEG apmaiņas raksturošanai ievākti 1572 gāzu paraugi, iegūstot 1179 CO₂, CH₄ un N₂O emisiju mērījumu rezultātus, kuros gāzu koncentrācijas izmaiņas raksturo lineāri regresijas vienādojumi. Monitoringa periodā veģetācijas sezonās veikts 251 augsnes heterotrofās elpošanas mērījums.

Vienlaicīgi ar SEG emisiju mērījumiem veikti arī vides ietekmi raksturojošo parametru mērījumi (monitoringa periodā kopā 854 mērījumi):

1. gaisa temperatūra, °C;
2. augsnes temperatūra 6; 10; 20; 30 un 40 cm dziļumā, °C;
3. augsnes mitrums (tilpums⁻¹), %;
4. gruntsūdens līmeņa dziļums, cm;
5. gruntsūdens temperatūra, °C;
6. gruntsūdens pH, elektrovadītspēja, skābekļa saturs, oksidēšanās – reducēšanās potenciāls;
7. sniega kārtas biezums ziemā, cm.

Monitoringa laikā no parauglaukumu gruntsūdens līmeņa mērījumu akām ievākti 38 ūdens paraugi to fizikāli ķīmisko īpašību raksturošanai. Ievāktajiem ūdens paraugiem ISO17025 akreditētā laboratorijā noteikts pH, elektrovadītspēja (EVS, μS cm⁻¹), kopējā slāpekļa (N), izšķīdušā organiskā oglekļa (DOC), kālija (K), kalcija (Ca) un magnija (Mg) koncentrācija (mg L⁻¹).

Dati, kas iegūti pirms meža ieaudzēšanas izmantoti zinātniskā raksta “Impact of Soil Organic Layer Thickness on Soil-to-Atmosphere GHG Fluxes in Grassland in Latvia” (Purviņa et al., 2024) sagatavošanā. Raksts iepazīstina ar augsnes organiskā slāņa biezuma ietekmes uz augsnes SEG emisijām ietekmes izvērtējuma rezultātiem. Iegūto datu analīze neļāva konstatēt, ka augsnes organiskā slāņa biezums un esošais organiskā oglekļa uzkrājums zālajos varētu būt viens no galvenajiem faktoriem, kas ietekmē CO₂ emisijas no augsnes (vidēji 3,48 ± 0,33 t CO₂-C ha⁻¹ gadā) no apsaimniekotas organiskās augsnes. Pirms meža ieaudzēšana augsne bija N₂O emisiju avots (vidēji 2,39 ± 0,70 kg N₂O-N ha⁻¹ gadā); savukārt, CH₄ emisijas, atkarībā no organiskās slāņa biezuma, variēja no -3,26 ± 1,33 līdz 0,96 ± 0,10 kg CH₄-C ha⁻¹ gadā. Attiecīgi, nozīmīgākā ietekme uz SEG emisijām bija tieši CO₂ zudumiem no augsnes, jo ikgadējā C ienese augsnē ar virszemes un pazemes veģetācijas daļām zālajos nekompensē augsnes C zudumus, ko rada augsnes organisko vielu mineralizācija. SEG emisiju novērtējams pēc augsnes sagatavošanas un meža ieaudzēšanas ļaus veikt to ietekmi uz emisijām salīdzinājumā ar situāciju pirms šo darbību īstenošanas. Otrs secinājums, kas apstiprinās arī citos pētījumos, ka esošajam organisko vielu uzkrājumam nav būtiskas ietekmes uz SEG emisijām, un arī seklas organiskās augsnes ir nozīmīgs SEG emisiju avots (Leiber-Sauheitl et al., 2014; Petersen et al., 2012; Purvina et al., 2023), attiecīgi arī šādu platību apmežošana var būtiski samazināt SEG emisijas no augsnes.

Dažādu augsnes slāņu (0-20 cm, 20-50 cm un 50-100 cm) fizikāli ķīmiskā sastāva raksturojums pētījuma objektā LVMCA_P3 parādīts Tab. 5.2.

Tab. 5.2. Dažādu augsnes slāņu (0-20 cm, 20-50 cm un 50-100 cm) fizikāli ķīmisko īpašību raksturojums pētījuma objektā LVMCA_P3 (apmežojums Ķeguma apkārtnē)

Parauglaukums	Kūdras slāņa biezums, cm	Augsnes blīvums, kg m ⁻³	pH	C, g kg ⁻¹	N, g kg ⁻¹	P, g kg ⁻¹	K, g kg ⁻¹	Ca, g kg ⁻¹	Mg, g kg ⁻¹
Augsnes slānis: 0-20 cm									
A	10	733,9	5,6	81,0	7,10	0,67	0,83	5,69	1,16
B	15	790,5	5,0	53,8	4,82	0,51	0,65	4,09	0,64

Parauglaurkums	Kūdras slāņa biezums, cm	Augsnes blīvums, kg m ⁻³	pH	C, g kg ⁻¹	N, g kg ⁻¹	P, g kg ⁻¹	K, g kg ⁻¹	Ca, g kg ⁻¹	Mg, g kg ⁻¹
C	25	676,1	5,2	81,4	7,71	1,40	1,32	7,18	1,99
Augsnes slānis: 20-50 cm									
A	10	1305,8	5,8	5,20	0,45	0,17	0,78	1,10	0,78
B	15	1421,8	5,5	1,14	0,13	0,13	0,59	0,75	0,46
C	25	1329,0	5,4	0,89	0,14	0,21	0,61	0,92	0,59
Augsnes slānis: 50-100 cm									
A	10	1552,8	6,0	1,00	0,14	0,15	0,56	0,66	0,45
B	15	1550,5	5,5	1,27	0,14	0,17	0,67	0,79	0,54
C	25	1551,8	5,7	1,12	0,16	0,18	0,49	0,79	0,46

Ekosistēmas SEG apmaiņas mērījumu rezultātu kopsavilkums pētījuma objektā LVMCA_P3 parādīts Tab. 5.3.

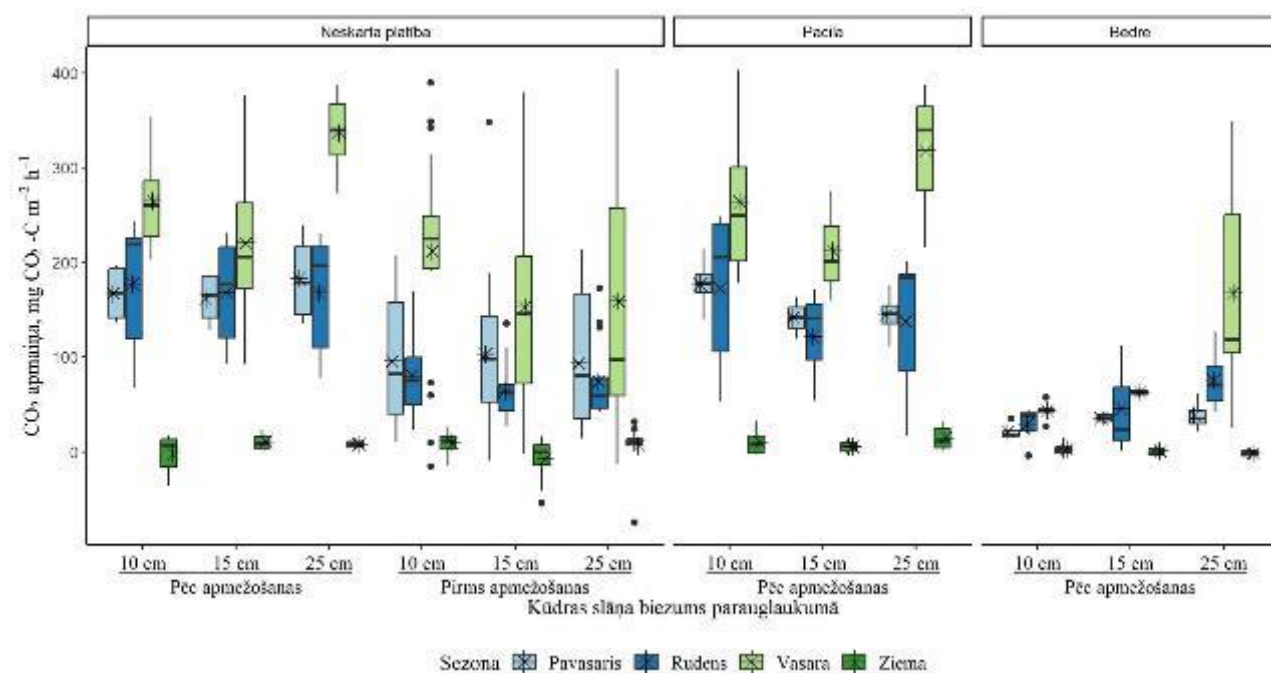
Tab. 5.3. Ekosistēmas SEG apmaiņas mērījumu kopsavilkums pētījuma objektā LVMCA_P3 (apmežojums Ķeguma apkārtnē)

SEG, mērvienība	Mērījuma veids	Vidējā vērtība ± standartklūda	Min. vērtība	Maks. vērtība	Mediāna
CO ₂ ⁵ , mg CO ₂ -C m ⁻² h ⁻¹	Neskarta platība (pirms apmežošanas)	97,1 ± 6,3	0,0	404,3	63,0
	Neskarta platība (pēc apmežošanas)	153,8 ± 14,2	0,0	387,0	176,9
	Uz pacilas (pēc apmežošanas)	147,1 ± 15,5	0,0	402,9	163,8
	Bedrē (pēc apmežošanas)	46,1 ± 8,7	0,0	349,1	34,9
CH ₄ , mg CH ₄ -C m ⁻² h ⁻¹	Neskarta platība (pirms apmežošanas)	-0,035 ± 0,005	-0,280	0,667	-0,039
	Neskarta platība (pēc apmežošanas)	-0,058 ± 0,005	-0,169	0,008	-0,053
	Uz pacilas (pēc apmežošanas)	-0,045 ± 0,009	-0,188	0,309	-0,046
	Bedrē (pēc apmežošanas)	-0,006 ± 0,011	-0,195	0,313	-0,011
N ₂ O, mg N ₂ O-N m ⁻² h ⁻¹	Neskarta platība (pirms apmežošanas)	0,0055 ± 0,0032	-0,1011	0,4476	0,0065
	Neskarta platība (pēc apmežošanas)	-0,0008 ±	-0,1338	0,0697	-0,0005

⁵ CO₂ apmaiņa atspoguļo augsnes kopējo elpošanu – augsnes heterotrofās un zemsedzes veģetācijas (virszemes un pazemes) autotrofās elpošanas summu.

SEG, mērvienība	Mērījuma veids	Vidējā vērtība ± standartklūda	Min. vērtība	Maks. vērtība	Mediāna
	apmežošanas)	0,0042			
	Uz pacilas (pēc apmežošanas)	0,0249 ± 0,0079	-0,0651	0,2489	0,0141
	Bedrē (pēc apmežošanas)	0,0183 ± 0,0076	-0,1407	0,1660	0,0165

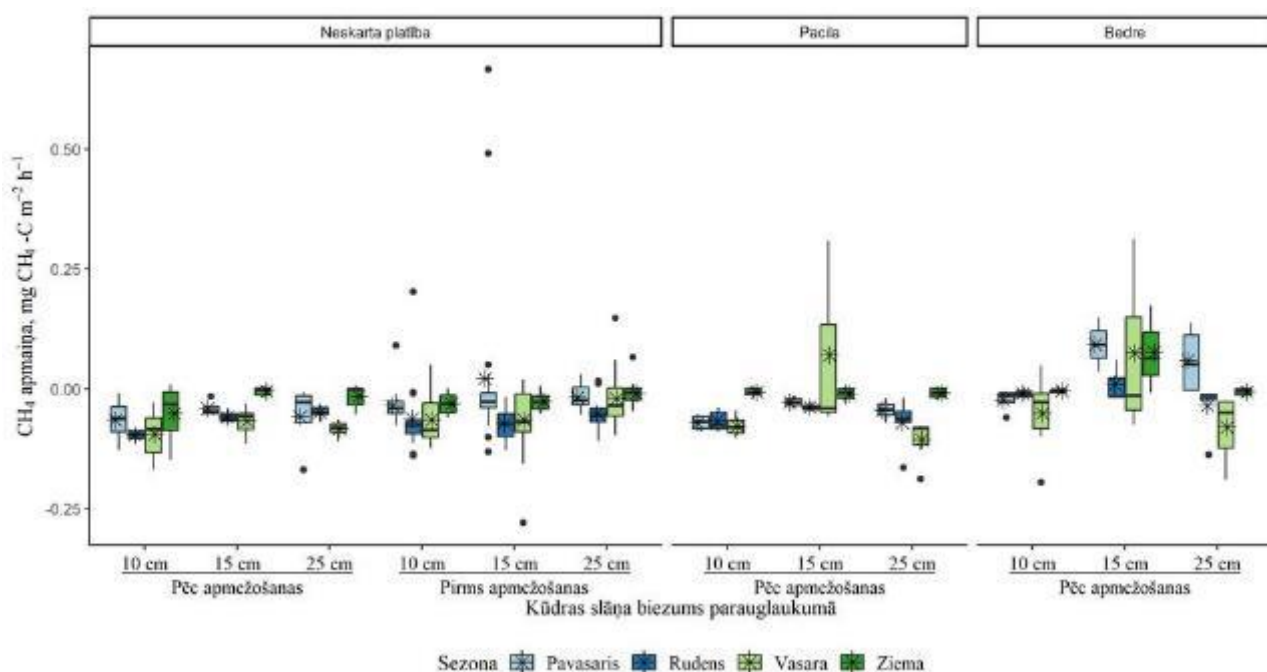
Augsnes kopējās elpošanas (CO_2 apmaiņas) variācija dažādās mērījumu vietās (neskarta platība, uz pacilas, bedrē) atkarībā no sezonas (pavasaris, vasara, rudens, ziema) un kūdras slāņa biezuma parauglaukumā (10 cm, 15 cm, 25 cm) atspoguļota Att. 5.1. Vidējā CO_2 apmaiņa mērījuma vietās variē no $24,3 \text{ mg CO}_2\text{-C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ (bedrē A parauglaukumā, kur kūdras slāņa biezums ir 10 cm) līdz $172,9 \text{ mg CO}_2\text{-C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ (neskarta platība C parauglaukumā, kur kūdras slāņa biezums ir 25 cm). Viennozīmīga un statistiski būtiska kūdras slāņa biezuma ietekme uz CO_2 emisijām netika novērota nevienā no mērījuma vietām. Savukārt, vērojama izteikta sezonālās ietekmes - lielākās CO_2 emisijas novērotas vasarā, bet būtiski mazākas CO_2 emisijas novērotas ziemā. Salīdzinot CO_2 emisijas vasaras sezonā starp dažādām mērījumu vietām, lielākās CO_2 emisijas novērotas neskartā platībā un uz pacilas pēc apmežošanas C parauglaukumā, kur kūdras slāņa biezums ir 25 cm (attiecīgi, $336,7 \pm 17,3$ un $318,3 \pm 27,5 \text{ mg CO}_2\text{-C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$).



Att. 5.1. CO_2 apmaiņas variācija dažādās mērījumu vietās (neskarta platība, uz pacilas, bedrē) pirms un pēc apmežošanas atkarībā no sezonas (pavasaris, vasara, rudens, ziema) un kūdras slāņa biezuma parauglaukumā⁶

⁶ Pavasaris: marts – maijs; vasara: jūnijs – augusts; rudens: septembris – novembris; ziema: decembris – februāris. CO_2 apmaiņa atspoguļo augsnes kopējo elpošanu – augsnes heterotrofās un zemsedzes veģetācijas (virszemes un pazemes) autotrofās elpošanas summu. Vērtību amplitūdas diagrammā mediāna ir parādīta ar horizontālo līniju (treknrakstā) taisnstūrī, vidējā vērtība ir parādīta ar zvaigznīti, neraksturīgās vērtības ir atspoguļotas ar melniem punktiem.

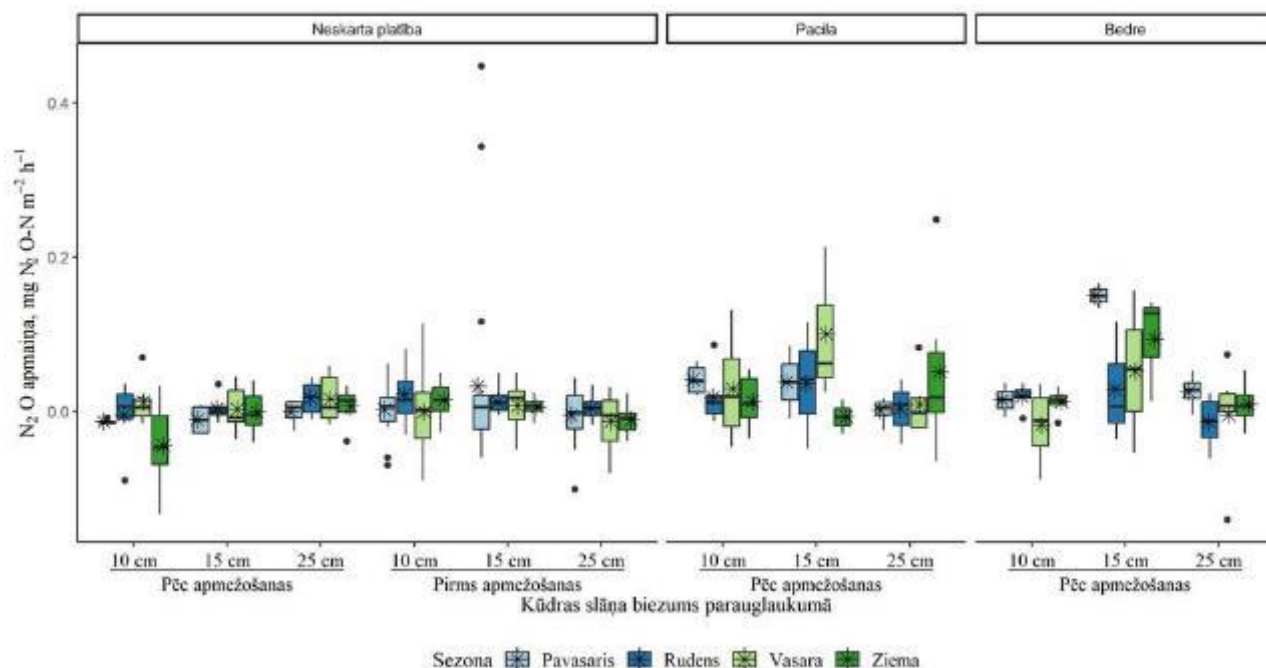
Augsnes CH₄ apmaiņas variācija dažādās mērījumu vietās (neskarta platība, uz pacilas, bedrē) atkarībā no sezonas (pavasaris, vasara, rudens, ziema) un kūdras slāņa biezuma parauglaukumā (10 cm, 15 cm un 25 cm) atspoguļota Att. 5.2. Pētījuma periodā galvenokārt vērojama neliela CH₄ piesaiste, vidējā vērtība variē līdz -0,078 mg CH₄-C m⁻² h⁻¹ (neskartā platībā pēc apmežošanas, A parauglaukums, kur kūdras slāņa biezums ir 10 cm). Izņēmuma gadījums ir bedre B parauglaukumā (kūdras slāņa biezums ir 15 cm), kur vidējā CH₄ apmaiņas vērtība atspoguļo emisijas (0,060 ± 0,034 mg CH₄-C m⁻² h⁻¹). Neskartās platībās gan pirms, gan pēc apmežošanas vērojama tendence, ka CH₄ piesaiste samazinās palielinoties kūdras slāņa biezumam. Bedrēs un uz pacilām šāda tendence netika novērota. Tas nozīmē, ka šajā pētījumā neapstiprinās pieņēmums, ka lokālās ieplakās būtiski pieaug CH₄ emisijas (Waddington & Roulet, 1996). Iespējams, ka tas ir saistīts ar bedres dziļumu – tas ir lielāks par kūdras slāņa biezumu, un atsegtajā minerālaugsnes slānī neveidojas CH₄ emisijas. Bez tam augsne bedrēs nav sablīvēta, kas ir bieži minēts iemesls emisiju pieaugumam platībās ar tehnikas sablīvētu augsni (Frey et al., 2011).



Att. 5.2. CH₄ apmaiņas variācija dažādās mērījumu vietās (neskarta platība, uz pacilas, bedrē) pirms un pēc apmežošanas atkarībā no sezonas (pavasaris, vasara, rudens, ziema) un kūdras slāņa biezuma parauglaukumā⁷

Augsnes N₂O apmaiņas variācija dažādās mērījumu vietās (neskarta platība, uz pacilas, bedrē) atkarībā no sezonas (pavasaris, vasara, rudens, ziema) un kūdras slāņa biezuma parauglaukumā (10 cm, 15 cm un 25 cm) atspoguļota Att. 5.3. Vidējā N₂O apmaiņa mērījuma vietās variē no -0,013 ± 0,010 mg N₂O-N m⁻² h⁻¹ (neskarta platība A parauglaukumā, kur kūdras slāņa biezums ir 10 cm, pēc apmežošanas) līdz 0,075 ± 0,024 mg N₂O-N m⁻² h⁻¹ (bedre B parauglaukumā, kur kūdras slāņa biezums ir 15 cm). Vienota tendence attiecībā uz kūdras slāņa biezuma ietekmi uz N₂O emisijām netika novērota.

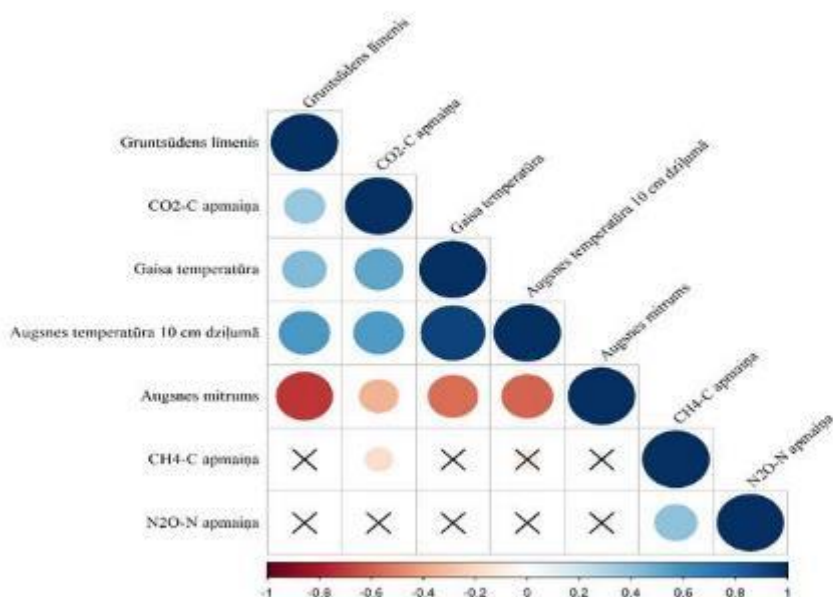
⁷ Pavasaris: marts – maijs; vasara: jūnijs – augusts; rudens: septembris – novembris; ziema: decembris – februāris. Vērtību amplitūdas diagrammā mediāna ir parādīta ar horizontālo līniju (treknrakstā) taisnstūrī, vidējā vērtība ir parādīta ar zvaigznīti, neraksturīgās vērtības ir atspoguļotas ar melniem punktiem.



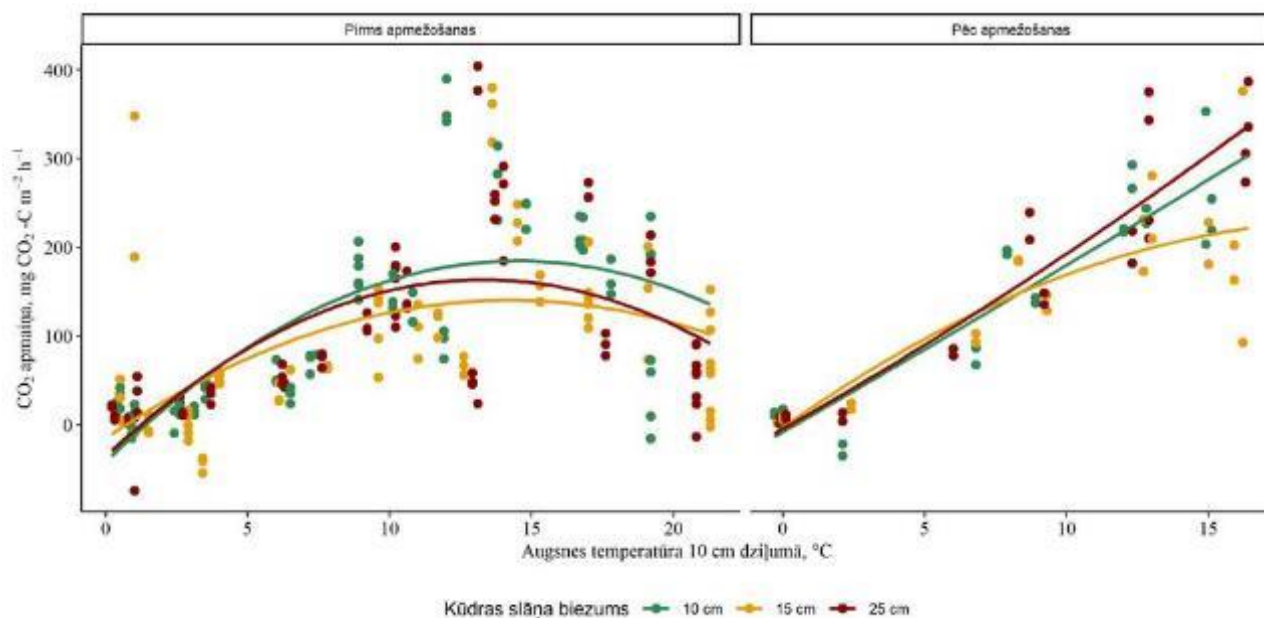
Att. 5.3. N_2O apmaiņas variācija dažādās mērījumu vietās (neskarta platība, uz pacilas, bedrē) pirms un pēc apmežošanas atkarībā no sezonas (pavasaris, vasara, rudens, ziema) un kūdras slāņa biezuma parauglaukumā⁸

Att. 5.4 atspoguļotas sakarības starp SEG apmaiņas intensitāti un dažādiem vides parametriem (gaisa temperatūra, augsnes temperatūra 10 cm dziļumā, augsnes mitrums, gruntsūdens līmenis) neskartās platībās (Spīrmena korelācijas koeficientu ρ matrica). CO_2 emisijas pozitīvi ($p < 0,001$) korelē ar augsnes temperatūru 10 cm dziļumā ($\rho = 0,56$, Att. 5.5), gaisa temperatūru ($\rho = 0,53$) un gruntsūdens līmeni ($\rho = 0,38$), savukārt negatīva korelācija novērota ar augsnes mitrumu ($\rho = -0,34$). Būtiskas sakarības starp CH_4 un N_2O apmaiņas intensitāti un dažādiem vides parametriem netika konstatētas (Att. 5.4).

⁸ Pavasaris: marts – maijs; vasara: jūnijs – augusts; rudens: septembris – novembris; ziema: decembris – februāris. Vērtību amplitūdas diagrammā mediāna ir parādīta ar horizontālo līniju (treknrakstā) taisnstūrī, vidējā vērtība ir parādīta ar zvaigznīti, neraksturīgās vērtības ir atspoguļotas ar melniem punktiem.



Att. 5.4. Spīrmena korelācijas koeficientu (ρ) matrica, kas atspoguļo sakarības starp SEG apmaiņas intensitāti un dažādiem vides parametriem neskartā platībā⁹



Att. 5.5. Sakarības starp CO₂ apmaiņas intensitāti un augšnes temperatūru 10 cm dziļumā neskartā platībā atkarībā no kūdras slāņa biezuma¹⁰

⁹ Apkopoti mērījumu rezultāti no visiem parauglaukumiem (A, B un C).

¹⁰ CO₂ apmaiņa atspoguļo augšnes kopējo elpošanu – augšnes heterotrofās un zemsedzes veģetācijas (virszemes un pazemes) autotrofās elpošanas summu.

5.1.2. Pārslapināšanas ietekme uz SEG emisijām no augsnes apmežotos zālajos

2024. gadā pabeigti arī gāzu apmaiņas un vides parametru mērījumi pārslapinātās un apmežotās pļavās ietekmes uz emisijām no augsnes novērtēšanai mitruma režīma izmaiņu rezultātā. Pētījumā ietverti trīs objekti Smiltenes un Rucavas apkārtnē, kuros atjaunots mitruma režīms. Kontrolei izmantoti projekta LIFE OrgBalt ietvaros ierīkotie izpētes objekti. Datu analīzē ietverti gāzu apmaiņas mērījumi, kas veikti pēc augsnes sagatavošanas, no kontroles platībām. Izmēģinājumu objekti uzskaitīti Tab. 5.4. Pētījuma ietvaros gāzu apmaiņas mērījumi veikti 24 mēnešus, sešos gāzu apmaiņas mērīšanas un paraugu ievākšanas punktos katrā objektā. Kopā veikti 432 heterotrofās elpošanas mērījumi un ievākti 1728 gāzu paraugi.

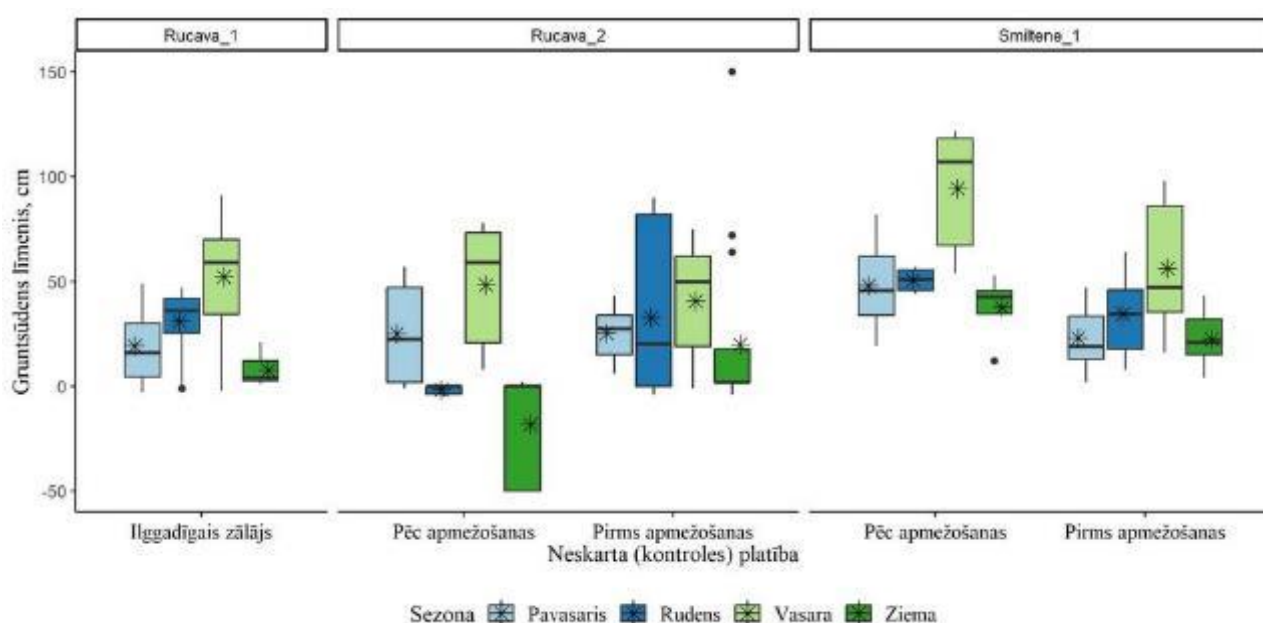
Tab. 5.4. Izpētes objekti, kuros novērtēta pārslapināšanas ietekme uz SEG emisijām

Objekts	Mitruma režīms	Apsaimniekošanas režīms	Kūdras slāņa biezums, cm	LKS92 koordinātes
LV103	Meliorēts	Ilggadīgais zālājs lopbarības ražošanai, integrētā apsaimniekošanas sistēma	35	56.55928, 22.84283
LV301	Meliorēts	Ilggadīgais zālājs lopbarības ražošanai, līdz 2017. gadam aramzeme, integrētā apsaimniekošanas sistēma	23	56.46735, 22.92954
LV306	Meliorēts	Ilggadīgais zālājs lopbarības ražošanai, līdz 2016. gadam aramzeme, integrētā apsaimniekošanas sistēma	21	56.21155, 21.18903
LV310	Meliorēts	Ilggadīgais zālājs lopbarības ražošanai, līdz 2017. gadam aramzeme, integrētā apsaimniekošanas sistēma	21	56.21228, 21.18977
Rucava_1	Pārslapināts	Ilggadīgais zālājs lopbarības ražošanai, ekstensīvi kultivēts bez mēslojuma	32	56.22810, 21.11740
Rucava_2	Pārslapināts	Ilggadīgais zālājs lopbarības ražošanai, ekstensīvi kultivēts bez mēslojuma	27	56.22949, 21.12201
Smiltene_1	Pārslapināts	Aizaugusi lauksaimniecības zeme, agrāk izmantota lopbarības ražošanai	30	57.32282, 26.07054

Pētījuma rezultāti publicēti rakstā “Case study on effect of rewetting of grassland with organic soils on the greenhouse gas (GHG) emissions from soil” (Skranda, Spalva, Bardule, et al., 2024). Pētījumā secināts, ka meliorētas un pārslapinātas teritorijas ar organiskām augsnēm ir nozīmīgi SEG emisiju avoti, kuros dominē CO₂ emisijas, un nav būtiskas atšķirības starp meliorētām un pārslapinātām vietām, neskatoties uz tendenci palielināties CO₂ emisijas meliorētās teritorijās un CH₄ emisiju pieauguma tendenci pārslapinātās teritorijās. Iegūtais rezultāts skaidrojams ar to, ka, lai gan pārslapinātajās teritorijās meliorācijas sistēmas nefunkcionē un ūdens nevar aizplūst pa grāvjiem, gruntsūdens līmenis veģetācijas sezonā būtiski pazeminās, kā rezultātā palielinās CO₂ emisijas un samazinās CH₄ emisijas. Biomasas pieaugums un oglekļa ienese

augsnē ar augu atliekām ir svarīgākie faktori, kas nosaka neto SEG emisijas no organiskajām augsnēm zālajos; tomēr trūkst ticamu datu par biomasas pieaugumu atkarībā no mitruma režīma, un pielietotie pieņēmumi var izraisīt ietekmes pārvērtēšanu vai nepietiekošu emisiju novērtēšanu. Svarīgākie parametri augsnes heterotrofās elpošanas prognozēšanai ir gaisa temperatūra un gruntsūdens līmenis. Citām gāzēm emisiju aprēķinos var piemērot vidējās gada vērtības. Emisiju novērtēšana ir jāturpina, lai raksturotu pārslāpīšanās vidēja termiņa un ilgtermiņa ietekmi uz SEG emisijām un vides parametriem, piemēram, gruntsūdens līmeņa svārstībām.

Gruntsūdens līmeņa izmaiņas pārslāpīnātās un apmežotās pļavās (Rucava_1, Rucava_2, Smiltene_1) dažādās sezonās (pavasaris, vasara, rudens, ziema) atspoguļota Att. 5.6. Kopumā izpētes objektos gruntsūdens līmenis svārstījās no 50 cm virs augsnes virskārtas (applūdusi platība) līdz 150 cm dziļumam; vidēji lielākais gruntsūdens līmenis konstatēts vasaras sezonā (vidēji $52,8 \pm 3,1$ cm), bet mazākais ziemā (vidēji $16,4 \pm 3,0$ cm).



Att. 5.6. Gruntsūdens līmeņa variācija pārslāpīnātās un apmežotās pļavās (Rucava_1, Rucava_2, Smiltene_1) dažādās sezonās (pavasaris, vasara, rudens, ziema)¹¹

Ekosistēmas SEG apmaiņas mērījumu rezultātu kopsavilkums pētījuma objektos pārslāpīnātās un apmežotās pļavās (Rucava_1, Rucava_2, Smiltene_1) parādīts Tab. 5.5.

Tab. 5.5. Ekosistēmas SEG apmaiņas mērījumu kopsavilkums pētījuma objektos pārslāpīnātās un apmežotās pļavās (Rucava_1, Rucava_2, Smiltene_1)

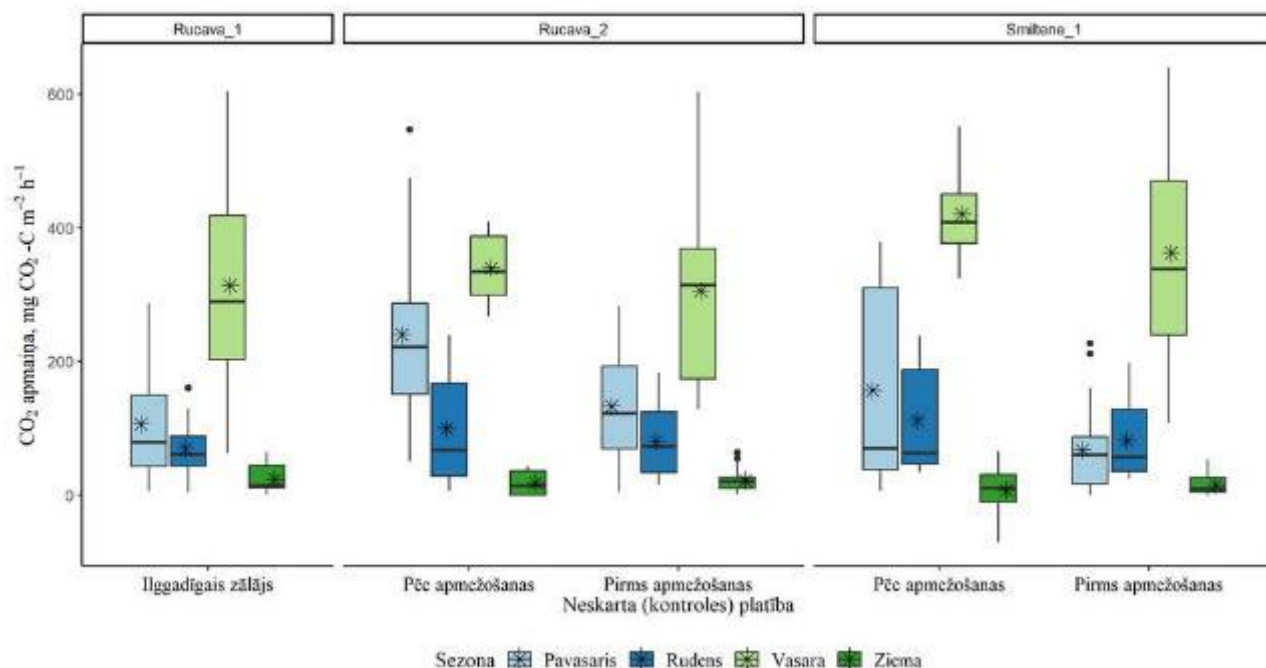
SEG, mērvienība	Pētījuma objekts, mērījuma veids	Vidējā vērtība ± standartklūda	Min. vērtība	Maks. vērtība	Mediāna
CO ₂ ¹² ,	Rucava_1, ilggadīgais zālājs	143,1 ± 14,5	1,0	603,9	80,1

¹¹ Pavasaris: marts – maijs; vasara: jūnijs – augusts; rudens: septembris – novembris; ziema: decembris – februāris. Vērtību amplitūdas diagrammā mediāna ir parādīta ar horizontālo līniju (treknrakstā) taisnstūrī, vidējā vērtība ir parādīta ar zvaigznīti, neraksturīgās vērtības ir atspoguļotas ar melniem punktiem.

¹² CO₂ apmaiņa atspoguļo augsnes kopējo elpošanu – augsnes heterotrofās un zemsedzes veģetācijas (virszemes un pazemes) autotrofās elpošanas summu.

SEG, mērvienība	Pētījuma objekts, mērījuma veids	Vidējā vērtība ± standartklūda	Min. vērtība	Maks. vērtība	Mediāna
mg CO ₂ -C m ⁻² h ⁻¹	Rucava_2, neskarta platība pirms apmežošanas	130,1 ± 11,8	1,3	602,5	98,6
	Rucava_2, neskarta platība pēc apmežošanas	177,0 ± 27,7	0,0	546,7	163,9
	Smiltene_1, neskarta platība pirms apmežošanas	136,7 ± 15,1	0,0	640,0	63,6
	Smiltene_1, neskarta platība pēc apmežošanas	160,4 ± 32,4	0,0	552,3	67,5
CH ₄ , mg CH ₄ -C m ⁻² h ⁻¹	Rucava_1, ilggadīgais zālājs	-0,013 ± 0,038	-0,466	2,317	-0,061
	Rucava_2, neskarta platība pirms apmežošanas	0,017 ± 0,005	-0,047	0,294	0,001
	Rucava_2, neskarta platība pēc apmežošanas	0,027 ± 0,022	-0,129	0,660	0,000
	Smiltene_1, neskarta platība pirms apmežošanas	0,042 ± 0,012	-0,057	0,855	0,001
	Smiltene_1, neskarta platība pēc apmežošanas	-0,025 ± 0,006	-0,079	0,053	-0,022
N ₂ O, mg N ₂ O-N m ⁻² h ⁻¹	Rucava_1, ilggadīgais zālājs	0,0547 ± 0,0117	-0,0078	0,6302	0,0069
	Rucava_2, neskarta platība pirms apmežošanas	0,0051 ± 0,0020	-0,0068	0,2051	0,0008
	Rucava_2, neskarta platība pēc apmežošanas	0,0019 ± 0,0056	-0,0655	0,0823	0,0000
	Smiltene_1, neskarta platība pirms apmežošanas	0,0005 ± 0,0004	-0,0102	0,0139	0,0001
	Smiltene_1, neskarta platība p apmežošanas	0,0030 ± 0,0069	-0,1076	0,0766	0,0108

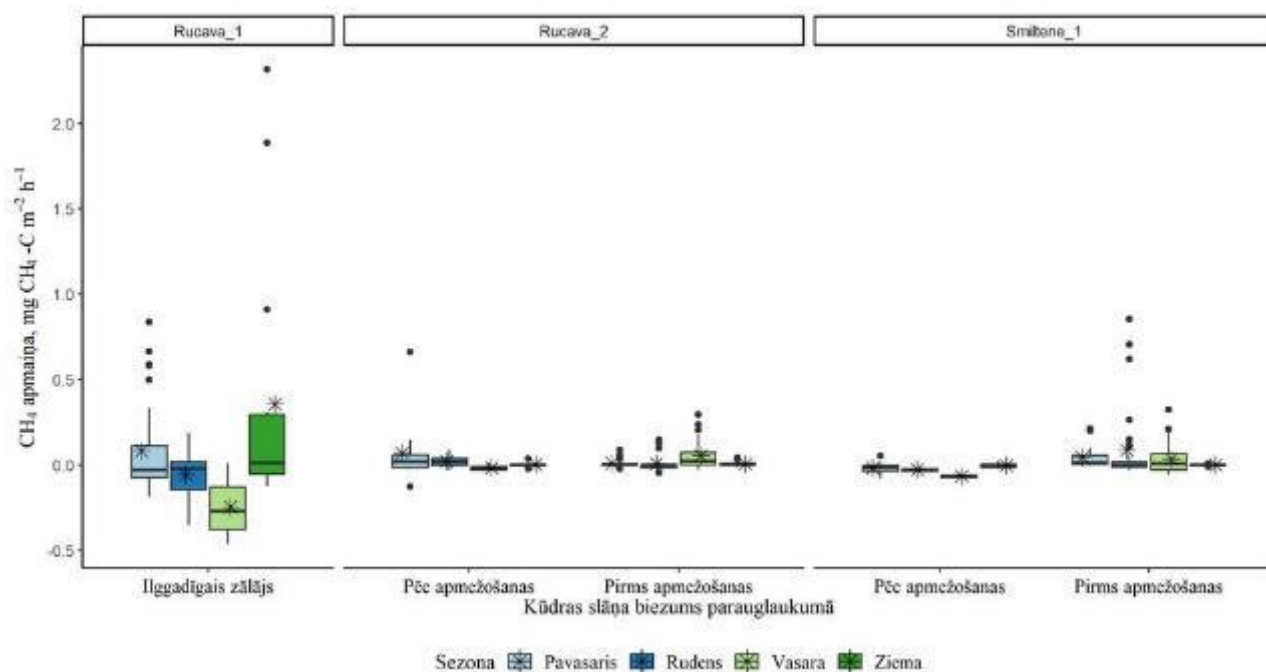
Augsnes kopējās elpošanas (CO₂ apmaiņas) variācija pārslāpinātās un apmežotās pļavās (neskarta platība) atkarībā no sezonas (pavasaris, vasara, rudens, ziema) atspoguļota Att. 5.7. Vidējā CO₂ apmaiņa mērījumu vietās variē salīdzinoši šaurā diapazonā no 130,1 ± 11,8 mg CO₂-C m⁻² h⁻¹ (izpētes objekts Rucava_2 pirms apmežošanas) līdz 177,0 ± 27,7 CO₂-C m⁻² h⁻¹ (izpētes objekts Rucava_2 pēc apmežošanas). Vērojama izteikta sezonalitātes ietekme - lielākās CO₂ emisijas novērotas vasarā, bet būtiski mazākas CO₂ emisijas novērotas ziemā.



Att. 5.7. CO₂ apmaiņas variācija no augsnes neskartā platībā (kontroles punktos) pārslāpinātās un apmežotās pļavās dažādās sezonās (pavasaris, vasara, rudens, ziema)¹³

Augsnes CH₄ apmaiņas variācija pārslāpinātās un apmežotās pļavās (neskarta platībā) atkarībā no sezonas (pavasaris, vasara, rudens, ziema) atspoguļota Att. 5.8. Pētījuma periodā kopumā vērojama gan neliela CH₄ piesaiste, gan emisijas; vidējā vērtība variē no $-0,025 \pm 0,006$ mg CH₄-C m⁻² h⁻¹ (izpētes objekts Smiltene_1 pēc apmežošanas) līdz $0,042 \pm 0,012$ mg CH₄-C m⁻² h⁻¹ (izpētes objekts Smiltene_1 pirms apmežošanas).

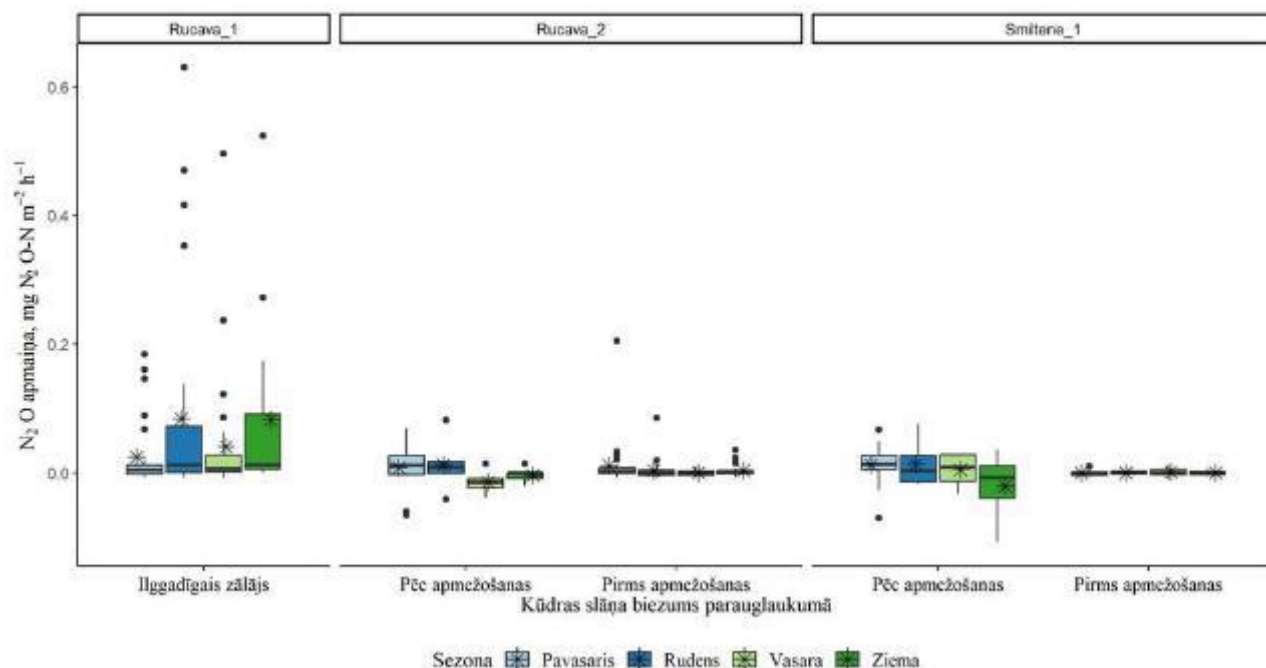
¹³ Pavasaris: marts – maijs; vasara: jūnijs – augusts; rudens: septembris – novembris; ziema: decembris – februāris. CO₂ apmaiņa atspoguļo augsnes kopējo elpošanu – augsnes heterotrofās un zemsedzes veģetācijas (virszemes un pazemes) autotrofās elpošanas summu. Vērtību amplitūdas diagrammā mediāna ir parādīta ar horizontālo līniju (treknrakstā) taisnstūrī, vidējā vērtība ir parādīta ar zvaigznīti, neraksturīgās vērtības ir atspoguļotas ar melniem punktiem.



Att. 5.8. CH_4 apmaiņas variācija no augsnes neskartā platībā (kontroles punktos) pārsļāpinātās un apmežotās pļavās dažādās sezonās (pavasaris, vasara, rudens, ziema)¹⁴

Augsnes N_2O apmaiņas variācija pārsļāpinātās un apmežotās pļavās (neskarta platībā) atkarībā no sezonas (pavasaris, vasara, rudens, ziema) atspoguļota Att. 5.9. Pētījuma periodā kopumā vērojamas N_2O emisijas; vidējā vērtība variē salīdzinoši plašā diapazonā no $0,0005 \pm 0,0004 \text{ mg N}_2\text{O-N m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ (izpētes objekts Smiltene_1 pirms apmežošanas) līdz $0,0547 \pm 0,0117 \text{ mg N}_2\text{O-N m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ (izpētes objekts Rucava_1).

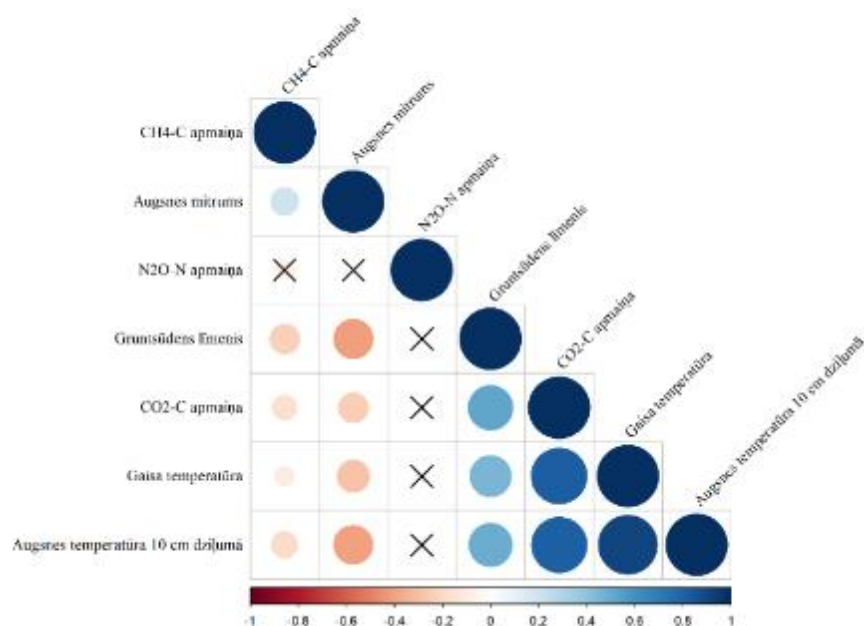
¹⁴ Pavasaris: marts – maijs; vasara: jūnijs – augusts; rudens: septembris – novembris; ziema: decembris – februāris. Vērtību amplitūdas diagrammā mediāna ir parādīta ar horizontālo līniju (treknrakstā) taisnstūrī, vidējā vērtība ir parādīta ar zvaigznīti, neraksturīgās vērtības ir atspoguļotas ar melniem punktiem.



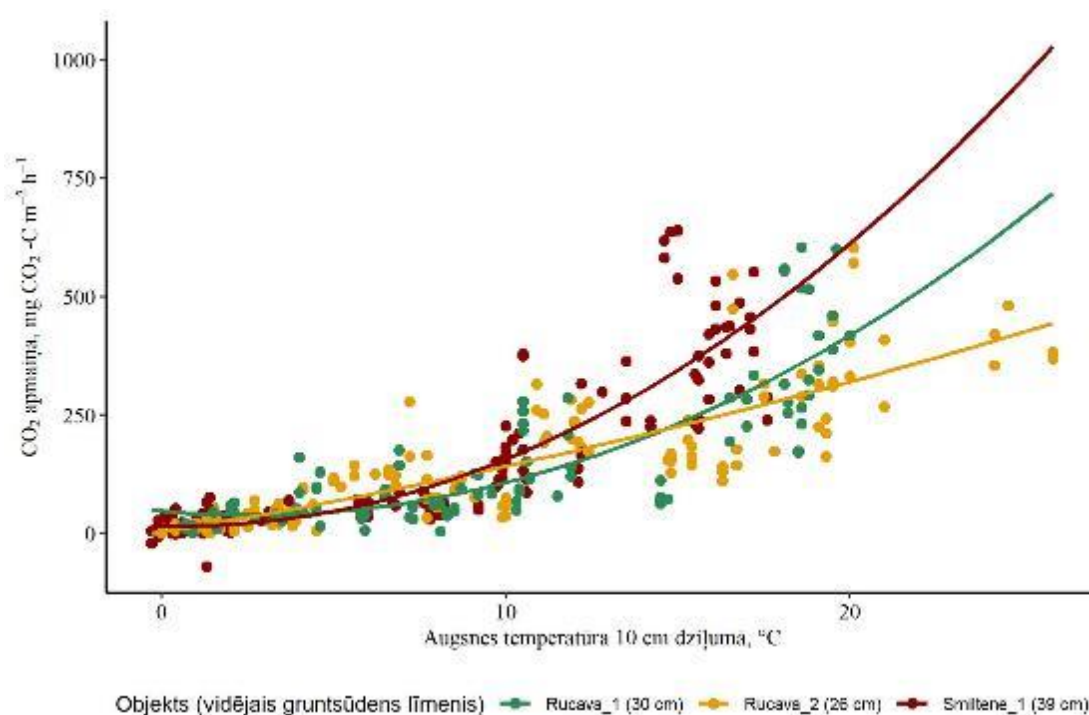
Att. 5.9. N_2O apmaiņas variācija no augsnes neskartā platībā (kontroles punktos) pārsļāpinātās un apmežotās pļavās dažādās sezonās (pavasaris, vasara, rudens, ziema)¹⁵

Att. 5.10 atspoguļotas sakarības starp SEG apmaiņas intensitāti un dažādiem vides parametriem (gaisa temperatūra, augsnes temperatūra 10 cm dziļumā, augsnes mitrums, gruntsūdens līmenis) neskartās platībās (Spīrmena korelācijas koeficientu ρ matrica). CO_2 emisijas pozitīvi ($p < 0,001$) korelē ar augsnes temperatūru 10 cm dziļumā ($\rho = 0,82$, Att. 5.11), gaisa temperatūru ($\rho = 0,82$) un gruntsūdens līmeni (CO_2 emisiju intensitāte palielinās līdz ar gruntsūdens līmeņa padziļināšanos, $\rho = 0,53$), savukārt negatīva korelācija novērota ar augsnes mitrumu ($\rho = -0,24$). Pretēji CO_2 emisijām, CH_4 emisijām as pozitīvi ($p < 0,001$) korelē ar augsnes mitrumu ($\rho = -0,21$), bet negatīvi ar gruntsūdens līmeni ($\rho = -0,24$, Att. 5.12), augsnes temperatūru 10 cm dziļumā ($\rho = -0,19$) un gaisa temperatūru ($\rho = -0,10$). Būtiskas sakarības starp N_2O apmaiņas intensitāti un dažādiem vides parametriem netika konstatētas (Att. 5.10).

¹⁵ Pavasaris: marts – maijs; vasara: jūnijs – augusts; rudens: septembris – novembris; ziema: decembris – februāris. Vērtību amplitūdas diagrammā mediāna ir parādīta ar horizontālo līniju (treknrakstā) taisnstūrī, vidējā vērtība ir parādīta ar zvaigznīti, neraksturīgās vērtības ir atspoguļotas ar melniem punktiem.



Att. 5.10. Spīrmena korelācijas koeficientu (ρ) matrica, kas atspoguļo sakarības starp SEG apmaiņas intensitāti un dažādiem vides parametriem neskartā platībā¹⁶

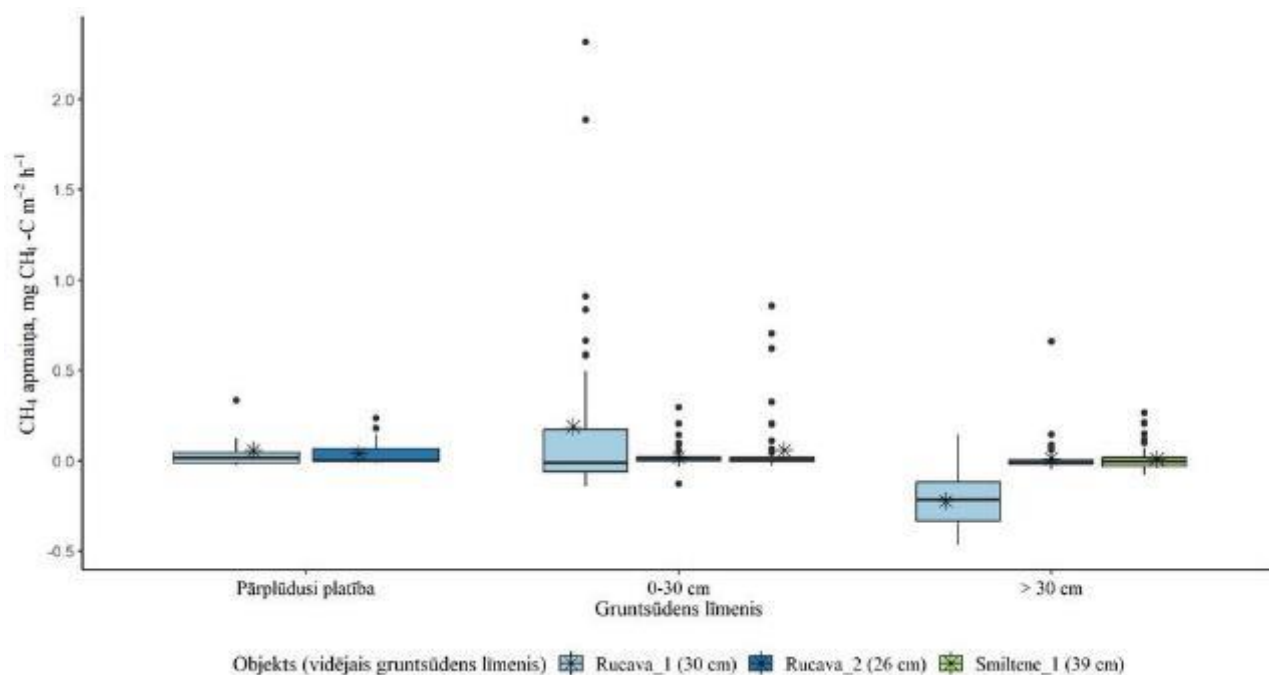


Att. 5.11. Sakarības starp CO₂ apmaiņas intensitāti un augsnes temperatūru 10 cm dziļumā neskartā platībā dažādos objektos¹⁷

¹⁶ Apkopotī mērījumu rezultāti no visiem objektiem (Rucava_1, Rucava_2, Smiltene_1).

¹⁷ CO₂ apmaiņa atspoguļo augsnes kopējo elpošanu – augsnes heterotrofās un zemsedzes veģetācijas (virszemes un pazemes) autotrofās elpošanas summu.

Att. 5.12 atspoguļota CH₄ apmaiņas variācija no augsnes neskartā platībā (kontroles punktos) pārslapinātās un apmežotās pļavās atkarībā no gruntsūdens līmeņa. Lielākās CH₄ emisijas novērotas izpētes objektā Rucava_1, kad gruntsūdens līmenis ir robežās no 0-30 cm ($0,188 \pm 0,079$ mg CH₄-C m⁻² h⁻¹). Mazākās metāna emisijas visos izpētes objektos novērotas, kad gruntsūdens līmenis > 30 cm, turklāt izpētes objektā Rucava_1 vidējā CH₄ apmaiņas vērtība norāda uz piesaisti ($-0,224 \pm 0,020$ mg CH₄-C m⁻² h⁻¹).

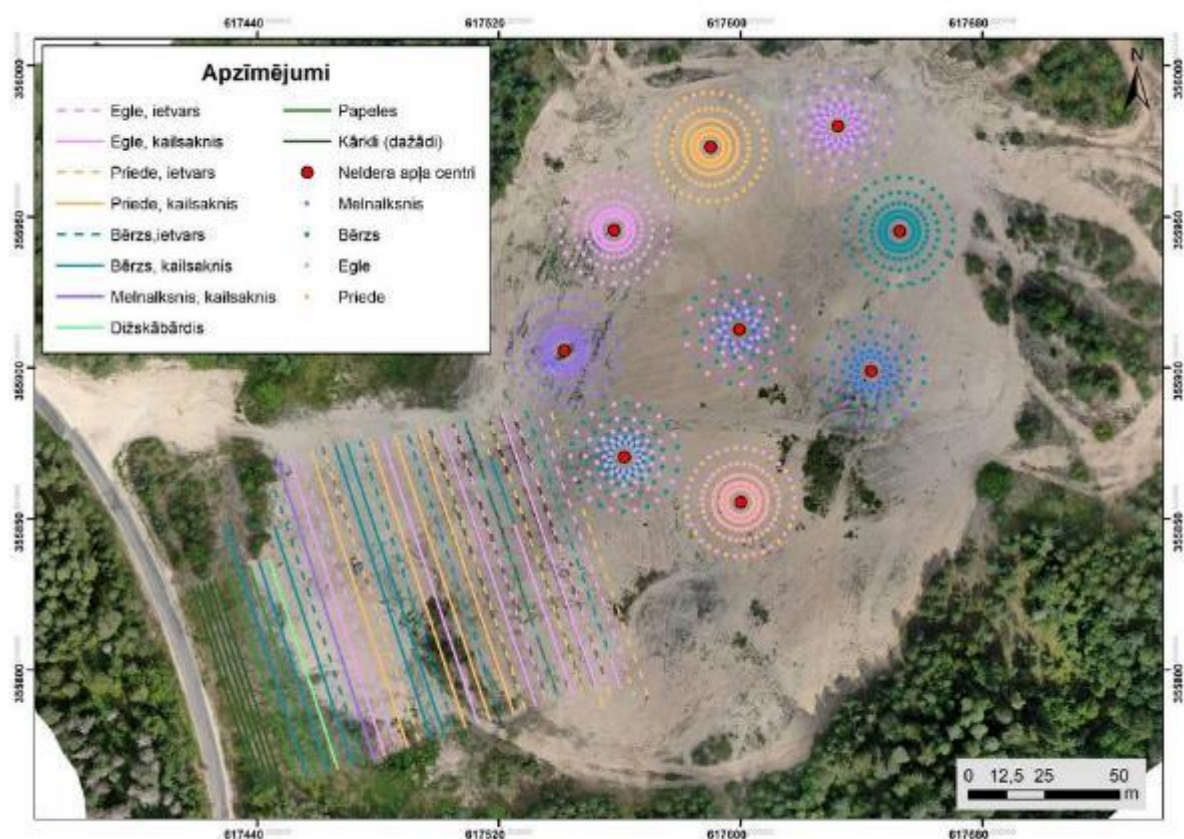


Att. 5.12. CH₄ apmaiņas variācija no augsnes neskartā platībā (kontroles punktos) pārslapinātās un apmežotās pļavās atkarībā no gruntsūdens līmeņa¹⁸

5.1.3. Priedes, egles, bērza un melnalkšņa stādījumi attāluma starp kokiem ietekmes uz oglekļa uzkrājumu novērtēšanai

Atbilstoši 2023. gadā apstiprinātajam Kapusila rekultivācijas rekultivācijas plānam un LVMI Silava 2023. gadā izstrādātajam eksperimentālo stādījumu dizainam (Att. 5.13), 2024. gada 19. aprīlī ierīkoti priedes (*Pinus sylvestris* L.), egles (*Picea abies* (L.) H. Karst.), bērza (*Betula pendula* Roth), melnalkšņa stādījumi (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.) stādījumi, lai ilgtermiņā demonstrētu un pārbaudītu ne tikai saimnieciski nozīmīgāko sugu piemērotību grants karjeru rekultivācijai, bet arī stādīšanas attāluma ietekmi uz koku attīstību ilgtermiņā.

¹⁸ Vērtību amplitūdas diagrammā mediāna ir parādīta ar horizontālo līniju (treknrakstā) taisnstūrī, vidējā vērtība ir parādīta ar zvaigznīti, neraksturīgās vērtības ir atspoguļotas ar melniem punktiem.



Att. 5.13. MPS Mežole, Kapusila karjerā ierīkoto stādījuma shēma

Vienas sugas, divu un trīs sugu mistrojuma koki stādīti dažādā attālumā viens no otra – Neldera apļos. Uz apļa līnijas koki viens no otra iestādīti ~ 1,1; 1,5; 2,1; 2,9; 4 metru attālumā (Tab. 5.6).

Tab. 5.6. Mistrojumi un koku izvietojums Neldera apļos

Suga	Suga				Stari apli	Koki, skaits	1.-5. apļa rādiuss, m				
	P	E	B	Ma			1.	2.	3.	4.	5.
E	-	140	-	-	28	140	4,80	6,68	9,30	12,94	18,01
E Ma	-	70	-	70							
Ma	-	-	-	140							
Ma B	-	-	70	70							
B	-	-	140	-							
E B	-	70	70	-							
E B Ma	47	-	47	46	36	180	4,51	6,37	9,01	12,74	18,02
P	180	-	-	-							
P E	90	90	-	-							

Atbilstoši rekultivācijas plānam, karjera malās, kas robežojas ar ceļu ierīkota buferjosla stādot papeles, kārkļus, bērzus un melnalkšņus (Tab. 5.7). Stādīts arī dižskābārdis, kas izaudzēts no Latvijā iegūtām sēklām. 2024. gada sezonas pavasarī un rudenī veikta stādīto priežu un briežu

biežāk apkosto lapu koku sugu aizsardzības ar līdzekli “Trico”. 2025. gada pavasarī būs jāveic stādījuma papildināšana.

Tab. 5.7. Pētījumu programma ietvaros ierīkotās buferjoslas un to saglabāšanās, %

Metri	Rinda	Suga / veids	Attālumi starp kokiem rindā	Saglabāšanās, %
0	1	<i>LvX1 (S. alba) / S. trinadra</i>	2 m koks x 2 m abas sugas pamīšus diagonāli	50
2	2	<i>LvX2+ Alba 5 (S. alba) /S. viminals</i>	2 m koks x 2 m abas sugas pamīšus diagonāli	50
4	3	<i>S. fragilis</i>	2 m koks x 2 m abas sugas pamīšus diagonāli	50
6	4	Platonis <i>S.alba</i>	2 m koks x 2 m starp rindām diagonāli pamīšus	50
8	5	Platonis <i>S.alba</i>	2 m koks x 2 m starp rindām diagonāli pamīšus	50
12	6	<i>Populus spp.</i>	2 m koks x 4 m starp rindām diagonāli pamīšus	70
16	7	<i>Betula pendula</i>	2 m koks x 4 m starp rindām diagonāli pamīšus	80
20	8	<i>Populus spp.</i>	2 m koks x 4 m starp rindām diagonāli pamīšus	70
24	9	<i>Betula pendula</i>	2 m koks x 4 m starp rindām diagonāli pamīšus	80
28	10	<i>Fagus sylvatica</i>	2 m koks x 4 m starp rindām diagonāli pamīšus	10

Mežoles Kapusila karjera rekultivācijas darbi veikti īstenojot vairākus pētījumus, kuros arī notiek koku biomasas uzkrāšanās un augsnes ielabošanas efekta vērtēšana, lai veicinātu papildus C piesaisti augsnē un koku biomasā. Izmēģinājumi ar govju, cūku un putnu mēslu izcelsmes biogāzes ražošanas fermentācijas atliekām – digestātu notiek, īstenojot pētījumu “Inovatīvs mikroorganismus saturošs organiskais mēslošanas līdzeklis” (Tab. 5.8), bet kokšķiedras substrātus kā mulčas materiālu testē pētījuma “Koksnes šķiedras kūdras substrātu īpašību uzlabošanai un ekoloģiskās pēdas mazināšanai” ietvaros (Tab. 5.9), savukārt aitas vilnas efektivitātes pārbaude notiek pētījuma “Jaunaudžu mehāniskās aizsardzības līdzekļu izstrāde no aitu vilnas” ietvaros (Tab. 5.10).

Tab. 5.8. Pētījuma “Inovatīvs mikroorganismus saturošs organiskais mēslošanas līdzeklis”¹⁹ ietvaros ierīkotie stādījumi

Metri	Rinda	Suga / stādmateriāla veids	Attālums	Varianti
32	11	Bērza kailsakņi ar uzlabotu sakņu	1m koks x 4 m	Putnu / Govju / Cūku

¹⁹ <https://www.silava.lv/petnieciba/aktive-petijumi/inovativs-mikroorganismus-satuross-organiskais-meslošanas-lidzeklis>

Metri	Rinda	Suga / stādmateriāla veids	Attālums	Varianti
		sistēmu	starp rindām	mēslu digestāts un Putnu / Govju mēsli / Cūku mēslu digestāts ar baktēriju piedevu (10 koki katrs)
36	12	Bērza ietvarstādi		
40	13	Melnalksnis kailsakņi ar uzlabotu sakņu sistēmu		
44	14	Egles kailsakņi ar uzlabotu sakņu sistēmu		
48	15	Egles ietvarstādi		
52	16	Priedes kailsakņu stādi		
56	17	Priedes ietvarstādi		

Tab. 5.9. Pētījuma “Koksnes šķiedras kūdras substrātu īpašību uzlabošanai un ekoloģiskās pēdas mazināšanai” ietvaros ierīkto stādījumi

Metri	Rinda	Sugas/ stādmateriāla veids	Tvaicētas, plucinātas kokšķiedras īpatsvars substrātā
88	25	Priedes kailsakņu stādi	0 % / Kontrole / 15 % / Kontrole / 30 % / Kontrole / 50 % / Kontrole (20 koki katra % sadaļa, 5 koki kontrole)
92	26	Priedes ietvarstādi	
96	27	Egles kailsakņu stādi	
100	28	Egles ietvarstādi	
104	29	Bērza ietvarstādi	
108	30	Priede, Bērza, Egles kailsakņi	Mistrots stādījums
112	31	Priedes ietvarstādi	0 % / Kontrole / 15 % / Kontrole / 30 % / Kontrole / 50 % / Kontrole (20 koki katra % sadaļa, 5 koki kontrole)
116	32	Egles kailsakņu stādi	
120	33	Egles ietvarstādi	

Tab. 5.10. Pētījuma ”Jaunaudžu mehāniskās aizsardzības līdzekļu izstrāde no aitu vilnas”²⁰ ietvaros ierīkto stādījumi

Metri	Rinda	Suga / stādmateriāla veids	Varianti
60	18	Bērza kailsakņi ar uzlabotu sakņu sistēmu	Vilna 2 koki gaišā vilna kā mēslojums un mulča, 2 koki tumšā vilna kā mēslojums un mulča, 2 koki bez vilnas
64	19	Bērza kailsakņi ar uzlabotu sakņu sistēmu	Vilnas granulas 2 koki ar 1/2 , 2 koki 1, divi kontrole

²⁰ <https://www.silava.lv/petnieciba/aktive-petijumi/jaunaudzu-mehaniskas-aizsardzibas-lidzeklu-izstrade-no-aitu-vilnas>

Metri	Rinda	Suga / stādmateriāla veids	Varianti
68	20	Bērza ietvarstādi	Vilna 2 koki gaišā vilna kā mēslojums un mulča, 2 koki tumšā vilna kā mēslojums un mulča, 2 koki bez vilnas
72	21	Priedes kailsakņu stādi	Vilna 2 koki gaišā vilna kā mēslojums un mulča, 2 koki tumšā vilna kā mēslojums un mulča, 2 koki bez vilnas
76	22	Egles kailsakņu stādi	Vilna 2 koki gaišā vilna kā mēslojums un mulča, 2 koki tumšā vilna kā mēslojums un mulča, 2 koki bez vilnas
80	23	Priedes kailsakņu stādi	Vilnas granulas 2 koki ar 1/2 , 2 koki 1, divi kontrole
84	24	Bērza ietvarstādi	Vilnas granulas 2 koki ar 1/2 , 2 koki 1, divi kontrole

Sezonas noslēgumā uzmērīti Neldera apļos un citu pētījumu ietvaros ar dažādiem mēslojuma/mulčējuma variantiem iestādītie koki. Līdzīgi, kā iepriekš veiktos pētījumos, novērots, ka pirmajā gadā pēc papildus barošanās elementu ienešanas vai mulčēšanas nav vērojama būtiska tā ietekme uz ikgadējo pieaugumu veidošanos. Tomēr mulčēšana ietekmē iestādīto koku saglabāšanos, jo aizkavē augsnes eroziju un koku sakņu atsegšanos un iekalšanu (Att. 5.14).



Att. 5.14. MPS Mežole, Kapusila karjerā stādītās egles un melnalkšņi 2024. gada vasarā

Pirmās veģetācijas sezonas laikā novērota neliela novietojuma attiecībā pret debespusi ietekme uz stādu augšanu. Labāki auguši pret austrumiem un dienvidiem vērstajās nogāzēs stādītie kociņi. 2025. gada maijā varēs novērtēt nogāzes slīpuma un virziena ietekmi pirmās veģetācijas sezonas laikā, tajā skaitā to, kā koki ir pārziemojuši.

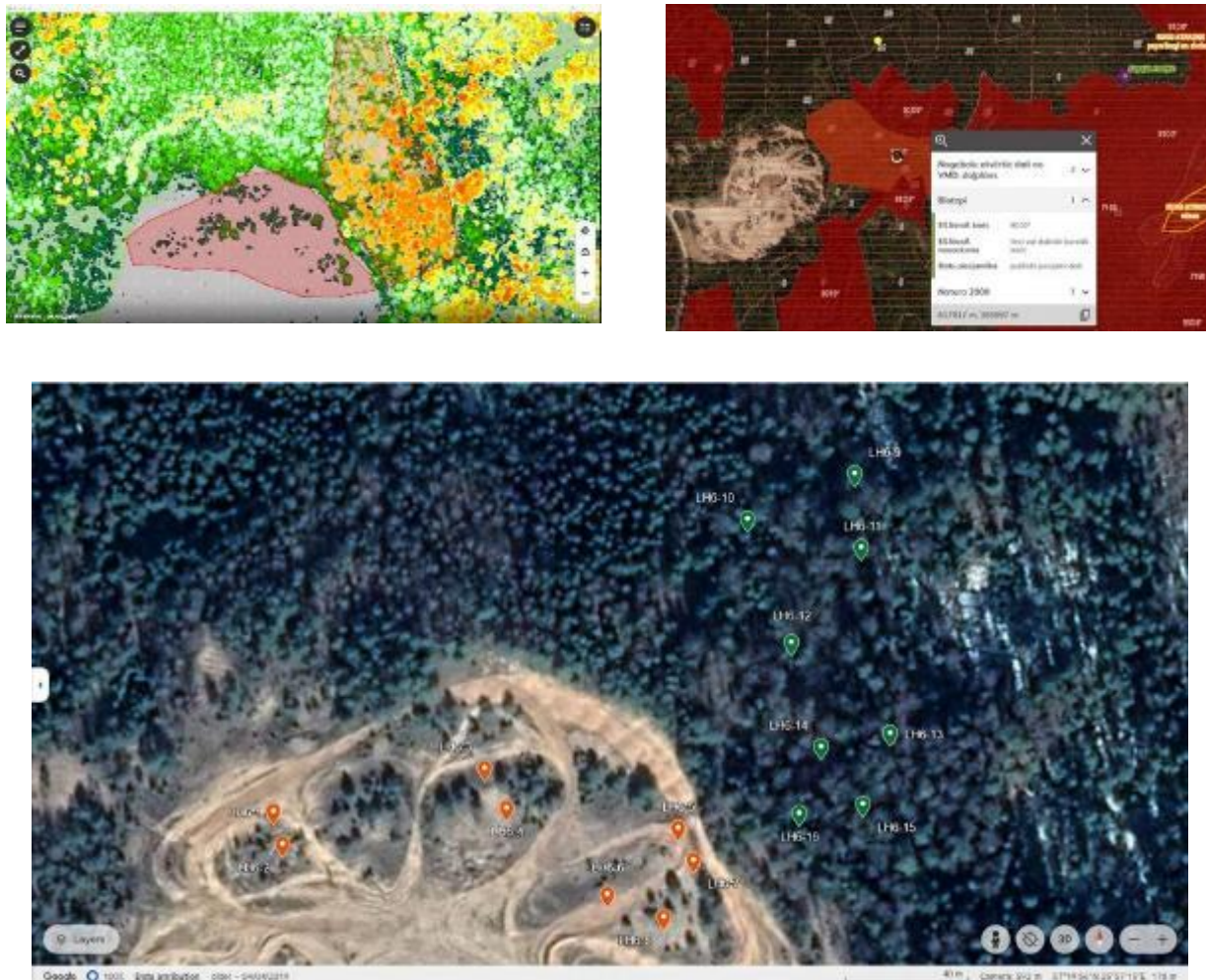
Tab. 5.11. Neldera apļos stādīto koku augstums cm 2024 . gada nogalē

Suga	Aplis	Projekcija pret debess pusēm				
		Z	A	D	R	C
Bērzs	1	89,93	-	-	94,07	106,00
	2	100,86	-	-	97,24	107,67
	3	105,79	-	-	98,45	104,78
	4	106,93	-	-	101,31	113,22
	5	102,86	-	-	98,43	104,67

Suga	Aplis	Projekcija pret debess pusēm				
		Z	A	D	R	C
	vidēji	101,27	-	-	97,90	107,27
Egle	1	25,03	27,93	24,71	-	21,89
	2	22,88	30,96	27,43	-	25,22
	3	22,34	30,43	27,29	-	23,56
	4	23,65	29,46	23,00	-	23,11
	5	20,88	32,54	24,36	-	27,56
	vidēji	22,95	30,26	25,36	-	24,27
Melnalksnis	1	-	59,21	57,64	52,21	44,40
	2	-	55,61	52,71	54,00	48,40
	3	-	61,79	69,93	61,93	59,50
	4	-	65,25	62,21	58,71	58,40
	5	-	59,86	76,07	58,21	51,90
	vidēji	-	60,34	63,71	57,01	52,52
Priede	1	16,44	-	19,69	-	
	2	18,39	-	19,25	-	
	3	17,94	-	18,11	-	
	4	18,94	-	18,78	-	
	5	18,28	-	19,69	-	
	vidēji	18,00	-	19,11	-	

Savukārt, īstenojot Horizon pētījumu InBestSoil²¹, šajā pašā izmēģinājumu objektā iegūstam informāciju par veģetācijas atjaunošanās dabiskās sukcesijas ceļā, tajā skaitā vērtējot augsnes ķīmiskās īpašības un bioloģisko daudzveidību karjera Ziemeļu vaļņa pretējā pusē augošajās mežaudzēs (Att. 5.15).

²¹ <https://www.silava.lv/petnieciba/aktive-petijumi/InBestSoil>



Att. 5.15. InBestSoil ierīkto augsnes monitoringa punkti MPS Mežole, Kapusila karjerā (LVMGEO veģetācijas slānis un biotopi)

Karjera daļā, kur bija sācies dabiskās apmežošanās process, ienākot priedes sējeņiem, un grants un smilts ieguves neskartajās mežaudzēs katrā ierīkoti 8 monitoringa punkti. 2024. gadā noskaidrots, ka karjera malās, vietās, kur sācies dabiskās apmežošanas process, augsne ir blīvāka, satur mazāk C un N (Tab. 5.12). InBestSoil partnerinstitūcijā ar DNS analīzes metodi turpinās augsnes virsējā slānī sastopamo organismu klātbūtnes raksturošana augsnes bioloģiskās daudzveidības raksturošanai.

Tab. 5.12. Kapusila karjera augsnes un pieguļošas mežaudzes kopējais C un N un augsnes blīvums

Paraugu ievākšanas punkts		Augsnes blīvums, kg m ⁻³	Ckop., g kg ⁻¹	Nkop., g kg ⁻¹	C/N
karjera mala	1	1488	8,4	0,1	84
	2	1470	5,5	0,1	55
	3	1583	8,4	0,3	28

Paraugu ievākšanas punkts		Augsnes blīvums, kg m ⁻³	Ckop., g kg ⁻¹	Nkop., g kg ⁻¹	C/N
	4	1474	8,6	0,3	29
	5	1688	12,1	0,1	121
	6	1606	7,4	0,2	37
	7	1568	7,4	0,3	25
	8	1202	14,0	0,8	18
vid. starpība = mežaudze - karjers		-407	10	1	-33
pieguļošās mežaudzes	9	1295	9,5	0,7	14
	10	955	29,7	1,6	19
	11	1225	13,7	0,9	15
	12	762	44,5	2,8	16
	13	1321	7,0	0,4	18
	14	834	22,9	1,4	16
	15	1195	9,9	0,6	17
	16	1236	15,5	0,8	19

5.2. Eksperimentālu kokaugu stādījumu ierīkošanas meliorācijas sistēmu buferjoslās LIZ ar organiskam augsnēm un minerālaugsnēm

Mežu pētīšanas stacijas Kalsnavas meža novada 144. kvartāls, kurā ierīkota kokaugu aizsargjosla un citi agromežsaimniecības izmēģinājumi, ir iežogots. Izmēģinājumu objekta teritorijā iepriekš ierīkoti Balto vītoli (*Salix alba*) joslu stādījumi, pirms stādījuma ierīkošanas veicot vienlaidu augsnes sagatavošanu un apauguma novākšanu, kā arī pirms tam turot platību papuvē vienu gadu. Otrā variantā stādījums ierīkots, saglabājot dabisko pļavas veģetāciju (Att. 5.16). Abos izmēģinājumos stādīti 130 cm un 20 cm gari kārklus spraudēni.



Salix alba ieaudzēts ar garajiem spraudņiem



Salix alba Platonis stādījums saglabājot pļavai raksturīgo veģētāciju

Att. 5.16. Kalsnavas stādījums ar garajiem un īsajiem spraudņiem 2023. gada vasarā

Blakus vienlaidus sagatavotajā joslā ierīkotajam kārķu stādījumam, iestādīta vietējās izcelsmes kārķu sugu un papeļu klonu buferjosla. 2023. gada pavasarī stādījums papildināts (Att. 5.17).



Papildinātas un atēnotas baltā vītola u.c. vietējās izcelsmes vītola buferjoslas



Galvenie bojājumi stumbra miza un sakņu kakla apgrauzumi

Att. 5.17. Situācija MPS Kalsnava stādījumā 2023. gada veģētācijas sezonā

Stādījuma ierīkošana uzsākta 2023. gadā, plānojot to kā dažādu agromežsaimniecības prakšu, tostarp buferjoslu, demonstrācijas vietu. 2023. gada nogalē veikta mežizstrāde, novācot dabisko krūmu un koku apaugumu (Att. 5.18).



Att. 5.18. Izmēģinājumu objekts pēc apauguma novākšanas, 2024. gada marts

Pēc apauguma novākšanas mainījās platības mitruma režīms un 2024. gada pavasarī iepriekšējā gadā ierīkots kārķu stādījums, tajā skaitā arī daļa bufersjoslas, applūda (Att. 5.19).



Att. 5.19. Situācija izmēģinājumu objektā 2024. gada pavasarī (2024. gada 6.marts, applūdusī stādījuma daļa)

Daļa kārķu stādījuma iznīka applūšanas rezultātā. Atsevišķi koki vasarā veidoja celmu atvases, taču lielākā daļa stādījuma gāja bojā. Saglabājusies papeļu buferjosla un kārķu stādījums, kas ierīkots ar gariem spraudņiem, tāpēc 2025. gadā stādījumu papildināsim tikai ar garajiem spraudņiem, vai jau pieaudzētiem spraudņstādiem (Att. 5.20).



Stādīšanai sagatavoti 1,5 cm gari spraudēņi



Veģetācijas traukos pieaudzēti *Salix alba* spraudenstādi

Att. 5.20. *Salix alba* garie spraudēņi un veģetācijas traukos pieaudzēti spraudenstādi

2024. gada pavasarī pieņemts lēmumu tupināt teritorijas labiekārtošanu, ierīkojot grāvjus, kas novada lieko mitrumu un novērš applūšanas risku nākotnē. Stādījuma papildināšanai 2025. gada pavasarī varēs izmantot stādmateriālu, kas 2023./24. gadā izaudzēts konteineros un veģetācijas traukos.

Patlaban šajā objektā ierīkotas trīs vietas SEG mērīšanai un gruntsūdeņu līmeņa monitoringam (56.69228°,25.93046°; 56.69245°,25.92952°; 56.69205°,25.92993°). Visas trīs gāzu paraugu vākšanas vietas ierīkotas stādījuma daļā, kur stādītie kārkli un papeles saglabājušies vismaz 70% apjomā (Att. 5.21).



Situācija 2024. gada 26. aprīlis

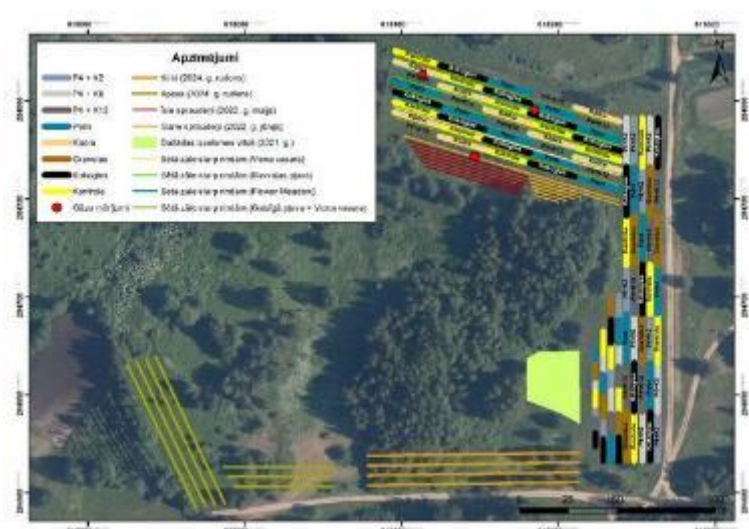


2024. gada 16. jūlijs

Att. 5.21. Situācija MPS Kalsnava izmēģinājumos 2024. gada pavasarī un vasarā

Vasaras un rudens sezonā daļa stādījuma papildināta – ierīkots apses hibrīdu (*Populus tremula tremuloides*) demonstrācijas stādījumu, kas var kalpot gan kā vējlauze, gan augsnes ūdeņos esošos biogēnos elementus un no atmosfēras CO₂ piesaistoša buferjosla.

Paralēli iežogotajā teritorijā notiek arī citu pētījumu finansētu stādījumu ierīkošana, piemēram dažādu izcelsmju no sēklām audzētu saldo ķiršu (*Prunus avium*) stādījumu – biogrupu ierīkošana un ar koksnes pelnu un kūdras maisījumu mēslotu baltā vītola sleju uzturēšana (Att. 5.22).



2025. gadā papildus ierīkotās buferjoslas un stādījums shēma pēc hidrotehniskās meliorācijas darbu veikšanas



2024. gada 25. oktobrī ierīkots apses hibrīdu stādījums

Att. 5.22. Līdz šim ierīkoto izmēģinājumu stādījumu shēma

Pēc novadgrāvju ierīkošanas ir novērsts atkārtotas applūšanas risks un, lai arī 2024. gada veģetācijas sezonā no jauna izraktajā grāvī vienmēr bija ūdens, tas tagad tiek uzreiz novadīts uz novadgrāvi.

Tajās teritorijās, kur 2024. gada pavasarī applūdušais kārklu un papeļu stādījums veido celma atvases, 2025. gada pavasarī vērtēsim saglabāšanās rezultātu un bojā gājušo joslu vietā turpināsim ierīkot papildus demonstrācijas stādījumus gan kā agro mežsaimniecības koku grupas, gan kā buferjoslas gar grāvju malām. Vajadzēs papildināt vai atjaunot apmēram 50% no kopējās stādījuma platības.

5.3. Sabiedrības informēšanas materiālu sagatavošana par meža ieaudzēšanas un citu darba uzdevumā iekļauto darbību ietekmi uz SEG emisijām

LVMI Silava patlaban ir partneris vairākos starptautiskos pētījumos, kuros viens no izpētes tematiem ir ar oglekļa apriti. Publicitātes darbības šajos izpētes projektos ir savstarpēji saistītas, lai nodrošinātu sinerģijas efektu un maksimāli efektīvi izmantotu līdzekļus.

Šī gada 5.-6. jūnijā LVMI Silava organizēja HORIZON Europe “InBestSoil – Ietvars augsnes veselības aspekta iekļaušanai politikas veidošanas procesos: augsnes ekosistēmas pakalpojumu ekonomiskais novērtējums un iniciatīvas ieguldījumiem augsnes veselībā” ikgadējo sanāksmi, kuras ietvaros 7. jūnijā apmeklāti Meža pētīšanas stacijas Mežoles meža novada demonstrējumu objekti, kuros notiek C aprites un meža augšanas apstākļu uzlabošanas pētījumi. Dažādu valstu zinātnieki iepazīstināti ar koksnes pelnu izmantošanas pieredzi, kā arī Kapusila grants karjera apmežojums, kur ierīkoti dažāda blīvuma saimnieciski nozīmīgāko koku sugu stādījumi.

LIFE OrgBalt projekta noslēguma konferences izbraukuma sesijā 15. jūnijā konferences dalībnieki iepazīstināti ar koku audzēšanas iespējām kūdras augsnēs, samazinot augsnes emisijas un piesaistot oglekli biomasā 2017. gadā ierīkotos izstrādāto kūdras atradņu apmežojumos²² (Att. 5.23).



2017. gada 11. oktobris



2024. gada 15. jūnijs

Att. 5.23. LIFE OrgBalt konferencē demonstrētā platība 2017. un 2024. gadā

Pētījuma ietvaros sagatavots vispārīgs, skaidrojošs video sižets par oglekļa apriti meža ekosistēmā, kas translēta kanālā RīgaTV24, raidījumā „Aktualitātes” 29.06.2024 plkst.17:30 un atkārtojumā 01.07.2024 plkst. 07:40. Sižeta ieraksts saglabāts LVMI Silava [youtube.com](https://www.youtube.com) kanālā.

²² <https://www.silava.lv/aktualitates/aicinam-uz-life-orgbalt-nosleguma-konferenci-13-14-junija-riga>

Līdzīga satura sižets ar informāciju par apmežošanas aktivitātēm un to ietekmi uz oglekļa aprīti translēts RīgaTV24 kanālā raidījumā „Aktualitātes” 23.11.2024 plkst. 17:30 un atkārtojums 27.11.2024 plkst. 7:30 (Att. 5.24).



Att. 5.24. Ekrānšāviņš no video stāsta²³

2024. gada sākuma publicēts podkāsts “# 5 Kokaugu stādījumi nemeža zemēs”, kurā stāstīts par novārtā atstātām lauksaimniecības zemju platībām, izstrādātiem kūdrājiem un citām derīgo izrakteņu ieguves vietām, kas Latvijas ainavā veido nelielu, tomēr vērā ņemamu zemes platību, ko var izmantot meža ieaudzēšanai. Šajā podkāsta epizodē LVMI Silava vadošā pētniece Dagnija Lazdiņa stāstīja par apmežošanu, kā vienu no efektīvākajiem kūdras ieguves ietekmētas teritorijas rekultivācijas veidiem, par to, kas ir agromežsaimniecība un kādas ir šī saimniekošanas paņēmiena priekšrocības, kā arī dalījās ar derīgo izrakteņu ieguves vietu rekultivācijas veiksmes stāstiem²⁴. Līdz 2024. gada nogalei šim podkāstam bija 232 skatījumi.

Radio Skonto 2024. gada 25. jūlijā sniegta intervija raidījumu ciklam “SARUNAS MEŽĀ” [2024 par aktualitātēm oglekļa piesaistes un mežu atjaunošanas jautājumos. Raidījums translēts 2024. gada oktobrī, raidījuma ieraksts pieejams Radio Skonto mājas lapā²⁵: “Radio Skonto” programmas Sarunas mežā studijā vadošie pētnieki Dagnija Lazdiņa un Andis Lazdiņš stāsta par mežu atjaunošanas stratēģiju valsts un privātajos mežos, jaunu koku stādīšana nemeža teritorijās, oglekļa dioksīda emisiju samazināšanas nepieciešamību; uzsverot arī to, ka mežu atjaunošanas stratēģija arī Latvijā tiek veidota, domājot ne tikai par ekonomisko, bet arī ekoloģisko situāciju. Raidījumā uzsvērts, ka, apmežojot jaunas platības, kurās jau ienācis vai vēl ienāks mežs, jāreķinās ar pakāpeniskām izmaiņām, līdz vēlamais klimata un saimnieciskais mērķis tiek sasniegts. Saite uz Radio Skonto raidierakstu ievietota arī LVMI Silava mājas lapā pētījuma profilā²⁶.

²³ ieraksts pieejams LVMI Silava Youtube kanālā <https://www.youtube.com/@lvmsilava7938/videos> un pētījuma profilā LVMI Silava mājas lapā <https://www.silava.lv/petnieciba/aktive-petijumi/oglekla-aprite-meza-ekosistema>

²⁴ https://youtu.be/UZD9wb_vMuM?si=dQfL0wUZgqo60Pkl

²⁵ <https://radioskonto.lv/klausies-sarunas-meza-2024/>

²⁶ <https://www.silava.lv/petnieciba/aktive-petijumi/oglekla-aprite-meza-ekosistema>

6. MEŽA RESURSU IZMANTOŠANAS EFEKTIVITĀTES PALIELINĀŠANA KLIMATA PĀRMAIŅU MAZINĀŠANAI

6.1. Kokmateriālu iznākuma sadalījuma prognozēšanas algoritmu pilnveidošana

Pētījuma ietvaros esam izveidojuši mašīnmācīšanās modei saražoto apaļo kokmateriālu prognozēšanai meža nogabalu vai Meža resursu monitoringa parauglaukuma līmenī. Salīdzinot ar 2023. gada etapa ziņojumu, papildināti aprēķinu rezultāti un aprēķinu metodika.

6.1.1. Metodika

Pētījumā analizētas apaļo kokmateriālu sortimentu prognozēšanas iespējas AS „Latvijas Valsts Meži” (LVM) cirsmu ietvaros. No LVM iegūta datu kopa, kura satur 353 905 ierakstus par sagatavotajiem apaļo kokmateriālu sortimentiem 2021. gadā izstrādātajās atjaunošanas cirtēs. Datu kopa satur informāciju par koku sugu, sugu grupu, sagatavotā apaļo kokmateriālu sortimenta veidu un apjomu, cirsmas ID, cirtes veidu, kā arī nogabala identificēšanai nepieciešamo informāciju. Apaļo kokmateriālu sortimentu veidi un to atšifrējumi atrodami apaļo kokmateriālu kvalitātes aprakstā (AS Latvijas valsts meži, 2022).

Datu kopas sagatavošana tālākajai analīzei veikta R (R Core Team, 2022) programmatūras vidē. Šajā posmā veiktas sekojošas darbības:

- atlasītas cirsmas, kur mežizstrāde veikta viena nogabala robežās, tādējādi nodrošinot savienojamību ar LVM nogabalu datubāzi;
- atlasītas platības, kur veikta atjaunošanas cirte (KC);
- no koku sugas un apaļo kokmateriālu sortimenta kolonnām ģenerēta jauna kolonna, lai iegūtu sarakstu ar visām datu kopā sastopamajām koku sugu un apaļo kokmateriālu sortimentu kombinācijām;
- pēc īpašībām līdzīgie apaļo kokmateriālu sortimenti apvienoti lielākās grupās, tādējādi samazinot prognožu apjomu un palielinot ierakstu skaitu katram no apaļo kokmateriālu sortimentu veidiem (Tab. 6.1).

Tab. 6.1. Apaļo kokmateriālu sortimentu apvienotās grupas

Nr.	Apvienotie sortimenti	Apaļo kokmateriālu sortimentu veids
1.	Malka	Visu sugu malka (MA4X; MA5X; MAXS8X)
2.	Skuju koku papīrmalka	Priede (PM6X), Egle (PM6X)
3.	Skuju koku tehnoloģiskā koksne	Priede (TK5X; TK6X), Egle (TK5X; TK6X)
4.	Skuju koku tara	Priede (TA12X18), Egle (TA12X; TA12X18)
5.	Priedes zāģbaļķi <18	Priede (ZB10X14; ZB14X18)
6.	Priedes zāģbaļķi >18	Priede (ZB18X; ZC18X)
7.	Priedes zāģbaļķi >28	Priede (ZB28X; ZA28X)
8.	Egles zāģbaļķi <18	Egle (ZB10X14; ZB14X18)

Nr.	Apvienotie sortimenti	Apaļo kokmateriālu sortimentu veids
9.	Egles zāģbaļķi >18	Egle (ZC18X; ZB18X28)
10.	Egles zāģbaļķi >28	Egle (ZB28X; ZB50X)
11.	Bērza finierkluči <18	Bērzs (FI14X18)
12.	Bērza finierkluči >18	Bērzs (FI18X; FIB18X)
13.	Bērza kamīnmalka	Bērzs (KM10X)
14.	Lapu koku papīrmalka	Bērzs (PM6X), apse (PM6X)
15.	Bērza tara	Bērzs (TA12X; TA 12X24)
16.	Lapu koku tehnoloģiskā koksne	Bērzs (TK5X; TK6X), apse (TK5X; TK6X), baltalksnis (TK5X, TK6X), melnalksnis (TK5X; TK6X)
17.	Lapu koku tara	Apse (TA12X24), Baltalksnis (TA12X24), melnalksnis (TA12X24)
18.	Mīksto lapu koku zāģbaļķi	Apse (Z24X), melnalksnis (Z24X)
19.	Mīksto lapu koku kamīnmalka	Baltalksnis (KM8X), melnalksnis (KM8X)

Ja apvienotajā grupā viena nogabala ietvaros ir vairāku apaļo kokmateriālu sortimentu veidi, to apjoms summēts;

Jaunizveidotajai datu kopai, balstoties uz cirsmas identifikatoru, pievienota informācija no LVM nogabalu datubāzes versijas, kura datēta ar 16.10.2019, tādējādi katram datu kopas ierakstam pievienota informācija par mežaudzes koku sugu sastāvu un dažādiem meža inventarizācijas parametriem (koku suga, nogabala platība, mežaudzes augšanas apstākļu tips, sugu sastāva formula, krāja, vidējais koku augstums un diametrs, šķērslaukums, biezība un atjaunošanas veids);

Koku sugu sastāva formula izmantota par pamatu jaunas datu kopas kolonnas ģenerēšanai, kura satur informāciju par katras koku sugas īpatsvaru mežaudzē. Tā kā pieraksta veids koku sugu sastāva formulā ir dažāds, tālākai apstrādei izmantota tikai tā informācija, kas ietver koku sugu sastāva formulas pirmo burtu un skaitļu virkni (līdz pirmajai atstarpei), piemēram, no koda „7E3P91 +P41” izmantota tikai pirmā daļa, jeb „7E3P91”. Ja kopējā koku sugu proporcija pēc šīs darbības nesasniedz 10, šī datu rinda dzēsta, piemēram, kods „7P91 3P61 +P121” apgrieztajā formātā ir „7P91”.

Informācija par mežaudzes augšanas apstākļu tipu no pieraksta teksta veidā pārveidota uz bināru pierakstu, atsevišķās kolonnās izdalot cirtes piederību augšanas apstākļu tipam.

Apaļo kokmateriālu sortimentu prognozēšanai izvēlēts *XGBTree* algoritms (Kuhn, 2008), kas paredzēts klasifikācijas veikšanai un regresijas analīzei. Modeļa apmācīšanai pēc nejaušības principa atlasīti 70% no datu kopas, savukārt atlikušie 30% izmantoti modeļa precizitātes pārbaudei, jeb validācijai. Lai novērtētu paredzamā modeļa veikspēju un ierobežotu tādas problēmas kā pārmērīga vai nepietiekama pielāgošana, veikta 5-kārtēja savstarpējā validācija, kas ir plaši izplatīta dažādos mašīnmācīšanās uzdevumos.

Tāpat novērtēta arī *nrounds*, jeb koku (kārtu) skaita un *maks._depth*, jeb koka dziļuma ietekme uz modeļa prognozēšanas veikspēju. *nrounds* kontrolē, cik daudz kokus (iterācijas) modelis izmantos, lai uzlabotu prognozes. Pārāk daudz koku var novest pie pārmācīšanās, savukārt pārāk maz var samazināt modeļa precizitāti. Savukārt *maks._depth* kontrolē katra koka dziļumu (līmeņu skaitu). Mazāks dziļums novērš pārāk sarežģītus modeļus, bet pārāk liels dziļums var izraisīt pārmācīšanos. Abiem šiem parametriem ir svarīga loma modeļa pielāgošanā, lai atrastu

līdzsvaru starp modeļa spēju iemācīties no datiem un tā spēju vispārināt uz jauniem, neredzētiem datiem.

6.1.2. Rezultāti

Pētījuma rezultāti liecina, ka apaļo kokmateriālu sortimentu prognozēšana, izmantojot mašīnmācīšanās metodes, uzrāda atšķirīgu precizitāti dažādām apaļo kokmateriālu sortimentu grupām. Dažādu apaļo kokmateriālu sortimentu grupu apjoma prognozēšanas spējas atainotas Tab. 6.2. Bērza finierkluču (tievgaļa caurmērs lielāks par 18 cm), egles zāģbaļķu (tievgaļa caurmērs lielāks par 18 cm), lapu koku tehnoloģiskās koksnes un visu veidu priedes zāģbaļķu prognozes ir ar samērā augstu precizitāti ($R^2 > 0,6$). Savukārt bērza finierkluči (tievgaļa caurmērs mazāks par 18 cm), visa veida malka, mīksto lapu koku kamīnmalka, un visa veida papīrmalka prognožu modelim sagādā grūtības ($R^2 < 0,3$). Šie rezultāti, iespējams, ataino apaļo kokmateriālu sortimentu pieprasījuma ietekmi, jo vērtīgākie sortimenti prognozēti ar lielāku precizitāti, kamēr pārējiem apaļo kokmateriālu sortimentu veidiem to iespējamā apjoma iznākums ir grūtāk nosakāms.

Tab. 6.2. Apaļo kokmateriālu sortimentu grupu prognožu precizitāte

Apaļo kokmateriālu sortimentu grupa	RMSE	R^2	MAE
Bērza finierkluči <18	4,29	0,03	1,22
Bērza finierkluči >18	24,45	0,73	13,06
Bērza kamīnmalka	16,28	0,52	9,15
Bērza tara	15,39	0,59	8,32
Egles zāģbaļķi >18	32,98	0,64	19,06
Egles zāģbaļķi >28	18,56	0,46	8,39
Egles zāģbaļķi <18	16,22	0,51	10,76
Lapu koku tara	18,79	0,51	7,84
Lapu koku tehnoloģiskā koksne	43,53	0,68	21,83
Malka	9,69	0,11	5,67
Mīksto lapu koku zāģbaļķi	18,2	0,48	5,74
Priedes zāģbaļķi >18	44,55	0,83	21,4
Priedes zāģbaļķi >28	37,86	0,7	14,29
Priedes zāģbaļķi <18	14,77	0,66	6,31
Skuju koku tara	13	0,46	8,19
Skuju koku tehnoloģiskā koksne	27,67	0,52	18,35
Mīksto lapu koku kamīnmalka	14,63	0,28	4,79
Lapu koku papīrmalka	13,41	0,08	5,14
Skuju koku papīrmalka	7,71	0,00	1,38

6.1.3. Secinājumi

Pētījumā izmantots *XGBTree* mašīnmācīšanās algoritms un LVM apaļo kokmateriālu sortimentu dati un mežaudžu nogabalu datubāze. Izveidoto mašīnmācīšanās modeļu prognozēšanas spējas pa dažādām apaļo koksnes sortimentu grupām ir atšķirīga.

Kamēr zāģbaļķu apjoms dažādām koku sugām nosakāms ar lielu precizitāti (R^2 pat 0,83), malkas un papīrmalkas apjoms nav nosakāms, jo to būtiski ietekmē darba uzdevums konkrētā cīsmā ($R^2 < 0,3$).

Tādiem apaļo kokmateriālu sortimentiem kā malka, tehnoloģiskā koksne, stabi un kamīnmalka mašīnmācīšanās modeļu precizitāte ir zema (R^2 pārsvarā zem 0,2), bet taras klučiem, finierklučiem un dažādu šķiru zāģbaļķiem tā sasniedz pat 0,81.

Vēl atšķirības var skaidrot ar pieejamo datu apjomu un kvalitāti. Prioritāro apaļo kokmateriālu sortimentu prognozes ir precīzākas, kamēr pārējām apaļo kokmateriālu sortimentu grupām ir iespējams gadījuma raksturs, līdz ar to lielāka apjoma variācija un lielākas grūtības labi apmācīt mašīnmācīšanās modeli.

Salīdzinot ar iepriekšējā pētījuma etapā izmantoto pieeju, prognožu precizitāte kopumā ir uzlabota. Tādi apaļo kokmateriālu sortimentu kā malka, tara un tehniskā koksne slikti prognozēta abos gadījumos, tomēr apvienojot līdzīgos apaļo kokmateriālu sortimentus pēc īpašībām vienotās grupās, ir uzlabojumi. Piemēram, bērza finierklučiem ar tievgaļa diametru virs 18 cm tā uzlabojās no $R^2 = 0,69$ uz $R^2 = 0,73$, dažādām egles zāģbaļķu klasēm – no $R^2 = (0,27-0,55)$ līdz $R^2 = (0,46-0,64)$, savukārt dažādām priedes zāģbaļķu klasēm – no $R^2 = (0,44-0,81)$ līdz $R^2 = (0,66-0,83)$.

6.2. Mežizstrādes metožu ietekmes uz SEG emisijām ietekmes novērtēšana modelēšana

6.2.1. SEG emisijas no risēm izcirtumos ar organiskajām augsnēm

2023. un 2024. gadā četros objektos platībās ar kūdras augsnēm (Tab. 6.3) veikti gāzu apmaiņas mērījumi, raksturojot risu ietekmi uz SEG emisijām kūdras augsnēs. Mežizstrāde šajos objektos veikta 2022. gada ziemā. Mērījumi pabeigti 2024. gada ceturtajā ceturksnī, nodrošinot 24 mēnešus ilgu mērījumu datu rindu pēc mežizstrādes un 12-24 mēnešus ilgu mērījumu datu rindu pirms mežizstrādes. Dati pirms mežizstrādes iegūti LIFE OrgBalt projekta ietvaros. Katrā objektā ir divi gāzu apmaiņas mērīšanas parauglaukumi, tajā skaitā viens risē un otrs platībā, kur tehnika nav pārvietojusies. Katrā parauglaukumā ir divi gredzeni gāzu paraugu ievākšanai un trīs punkti augsnes heterotrofās elpošanas mērīšanai. Katrā parauglaukumu pāri uzstādīta viena aka gruntsūdens līmeņa mērīšanai.

Tab. 6.3. Izpētes objekti

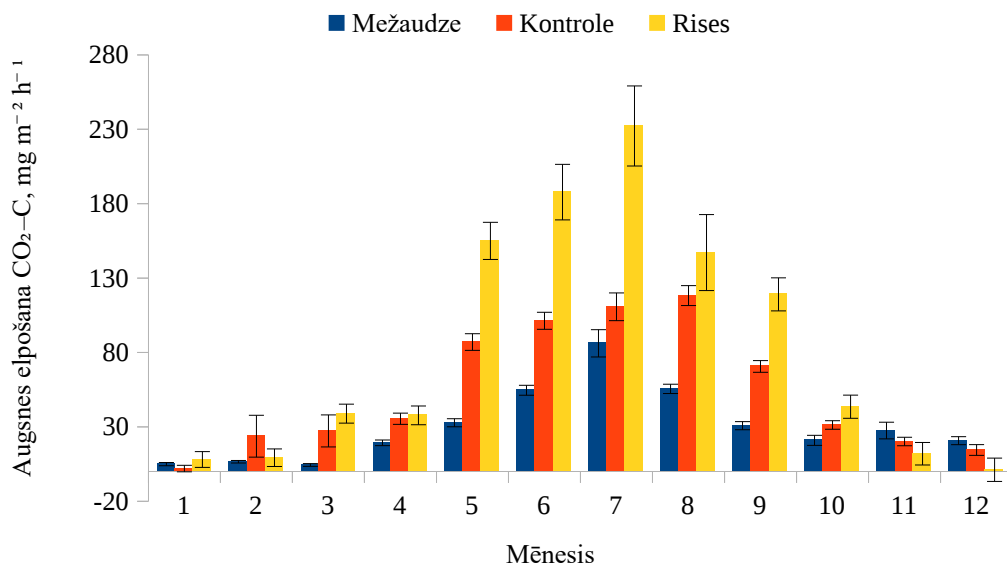
Nr.	Objekta identifikators	Nogabals
1.	LVMCA_R1	MPS Mežoles meža novada 218. kv. 4. nog.
2.	LVMCA_R2	MPS Mežoles meža novada 108. kv. 4. nog.
3.	LVMCA_R3	MPS Mežoles meža novada 218. kv. 4. nog.
4.	LVMCA_R4	MPS Mežoles meža novada 193. kv. 27. nog.

Augsnes kopējās elpošanas emisijas pirms un pēc atjaunošanas circes bija vidēji 59 ± 6 un 101 ± 15 $\text{CO}_2\text{-C mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$; attiecīgi, CO_2 emisijas pēc mežizstrādes platībā ar kūdras augsni pieauga aptuveni 1,7 reizes (Tab. 6.4). Pieaugums skaidrojams ne tikai ar augsnes bojājumu veicinātu

augšnes organisko vielu mineralizāciju, bet arī ar mežizstrādes atlieku sadalīšanās ietekmi. Jāņem vērā, ka emisiju mērījums ietver arī autotrofo elpošanu. Pēc atjaunošanas cirtes zemsedzes veģetācijas biomasa pieaug un tas atspoguļojas arī veiktajos augšnes kopējās elpošanas mērījumos (Att. 6.1). Novērojumu apstiprināšanai vai padziļinātai izvērtēšanai tie jāvērtē kompleksi ar augšnes heterotrofās elpošanas mērījumiem.

Tab. 6.4. Augšnes – atmosfēras SEG apmaiņas un vides parametru mērījumu rezultāti

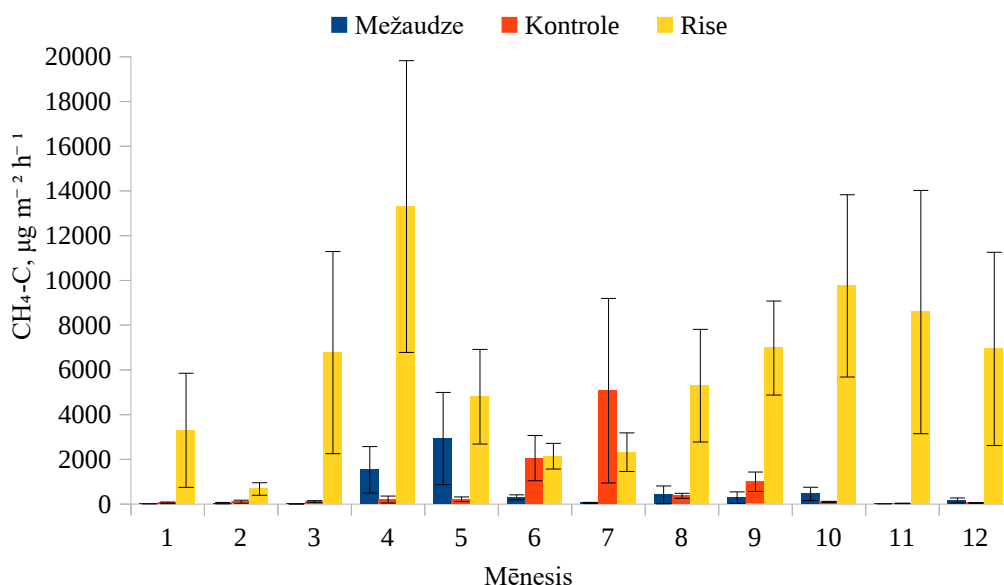
Parametrs	Kontrole pirms	Kontrole pēc	Rise
CO ₂ -C, mg m ⁻² h ⁻¹	27,5 ± 1,6	54,5 ± 2,7	83,2 ± 5,6
CH ₄ -C, µg m ⁻² h ⁻¹	582,4 ± 244,5	900,6 ± 427,2	5811,5 ± 1013,6
N ₂ O-N, µg m ⁻² h ⁻¹	2,9 ± 0,9	18,1 ± 3,7	9,8 ± 3,3



Att. 6.1. Augšnes heterotrofās elpošanas mērījumu vidējās vērtības atkarībā no mērījuma mēneša

Metāna emisiju vidējie mērījumi uzrāda netipisku situāciju. Sagaidāms, ka pēc atjaunošanas cirtes transpirācijas ietekmē gruntsūdens līmenis paaugstinās, arī metāna emisijas palielinās. Pētījuma periodā novērots, ka kontroles mērījumos metāna emisijas bija lielākas pirms atjaunošanas cirtes. (Att. 6.2) Tajā pašā laikā arī šāds šķietami neloģisks novērojums skaidrojams ar joprojām plašā zinātniskā sabiedrībā nenoskaidrojamiem metānu ietekmējošiem faktoriem. Uz to norāda arī mērījumu vidējās vērtības standartnovirzes indikatori. Jāņem vērā arī tas, ka 2023. gada vasarā nokrišņu apjoms bija būtiski mazāks nekā iepriekšējā gadā; attiecīgi, nenotika prognozētais gruntsūdens līmeņa pieaugums vasaras mēnešos, kad pārmitrās augsnēs ir CH₄ emisiju maksimums. Gruntsūdens līmenis ir labs CH₄ emisiju lieluma indikators. Robežvērtība, pie kuras veidojas CH₄ emisijas vai piesaiste, ir 20-30 cm – augstāks gruntsūdens līmenis saistīts ar CH₄ emisiju pieaugumu (Att. 6.4).

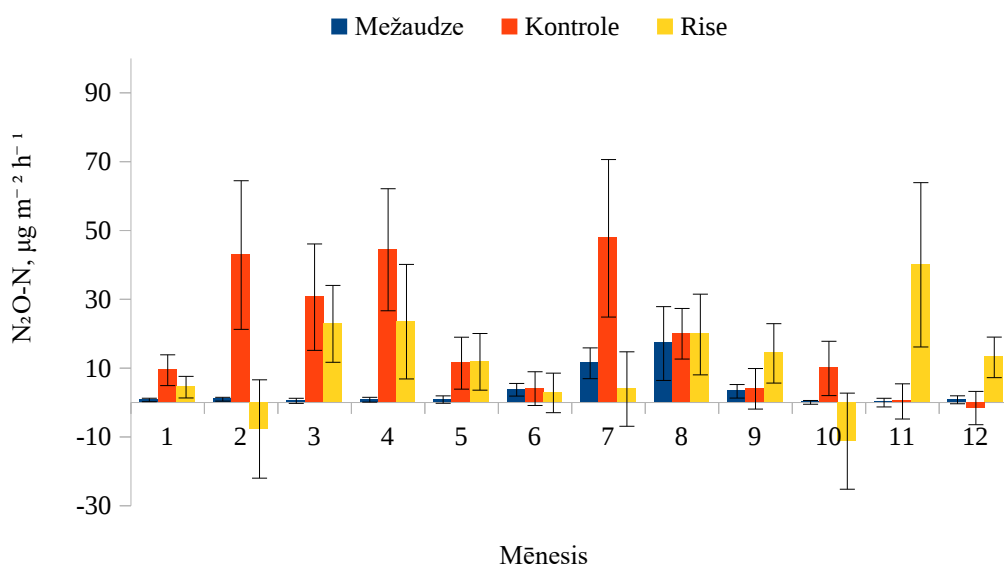
CH₄ emisijas no risēm ir 10 reizes lielākas nekā no kontroles platībām, kas apstiprina pētījuma iepriekšējā etapā konstatēto likumsakarību, pie kam CH₄ emisiju atšķirība starp risēm un pārējo izcirtuma platību divu gadu laikā ir tikai pieaugusi.



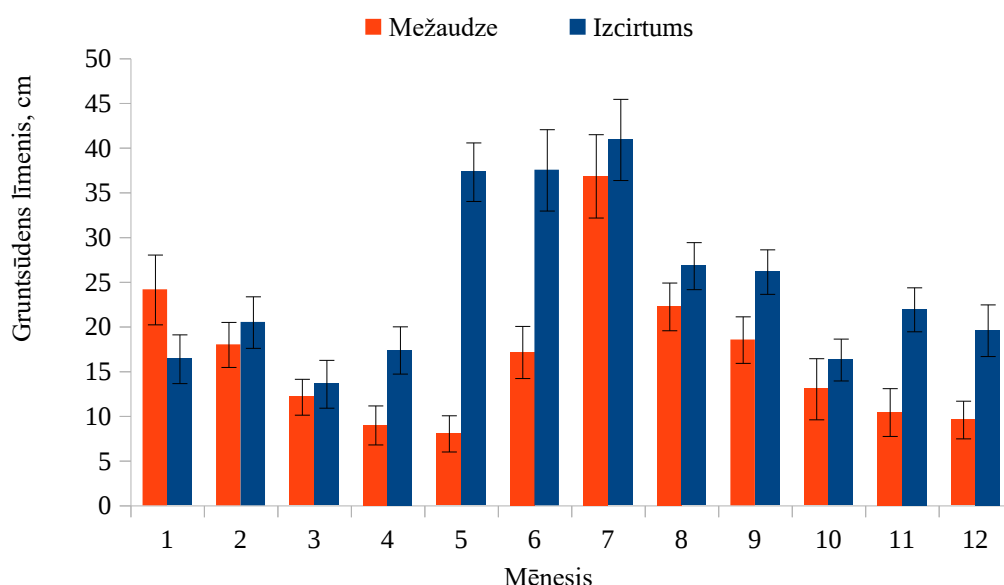
Att. 6.2. Augsnis – atmosfēras CH₄ emisiju mērījumu vidējās vērtības atkarībā no mērījuma mēneša

Zīmīgi, ka gruntsūdens līmeņu svārstības izmēģinājumu platībās nekorelē ar CH₄ emisijām. Novērotais ļauj izvirzīt tēzi, ka emisiju izmaiņas var potenciāli būt skaidrojamas ne tikai ar galveno emisijas ietekmējošo faktoru – gruntsūdens līmeni, bet arī ar zemsedzes veģetācijas dažādību un izplatību, mikroorganismu adaptāciju vides apstākļiem.

Augsnis N₂O emisijas pēc atjaunošanas cirtes būtiski pieauga. Līdzšinējie pētījumi, kuri veikti platībās bez meža apsaimniekošanas intervences, novērots, ka N₂O emisijas ir stabilas, neatkarīgi no gruntsūdens līmeņa un temperatūras (Att. 6.3). Lai skaidrotu N₂O emisiju pieauguma likumsakarības, iespējams, jāpievērš padziļināta uzmanība augsnes ūdens kvalitātes izmaiņām, tajā skaitā jāvērtē gruntsūdens un nokrišņu ūdens īpatsvars barības vielu nodrošinājumā. N₂O emisijas no risēm nav lielākas kā no pārējās izcirtuma daļas (Att. 6.4).



Att. 6.3. Augsnis – atmosfēras N₂O emisiju mērījumu vidējās vērtības atkarībā no mērījuma mēneša



Att. 6.4. Gruntsūdens līmeņa ikmēneša izmaiņas

6.2.2. SEG emisijas no risēm izcirtumos ar minerālaugsņēm

Pētījums tika veikts divos izcirtumos vidēja vecuma egļu audzēs slapajā damaksnī (Tab. 6.5), kas 2023. gada vasarā tika nozāģētas kailcirtē. Mērījumu punkti tika ierīkoti vietās ar nepārtrauktām, dziļām (20 cm vai vairāk) risēm. Kontrolmērījumu punkti ierīkoti zonā starp pievešanas ceļiem, 4-5 m attālumā no mērījumu punktiem risēs vietās.

Tab. 6.5. Izmēģinājumu objekti

Zemes gabala ID	Tips	Mērījumu vieta	Unikālais ID	WGS84 koordinātas	
				X	Y
LVMCA_R5	Kontrole	A	80-09-07-610-260 11-0	56.72704	24.08938
LVMCA_R5	Kontrole	B	80-09-07-610-260 10-0	56.7274	24.08985
LVMCA_R5	Rises	A	80-09-07-610-260 11-0	56.72704	24.08938
LVMCA_R5	Rises	B	80-09-07-610-260 10-0	56.7274	24.08985
LVMCA_R6	Kontrole	A	80-09-07-610-260 11-0	56.72779	24.09095
LVMCA_R6	Kontrole	B	80-09-07-610-260 10-0	56.72813	24.09089
LVMCA_R6	Rises	A	80-09-07-610-260 11-0	56.72779	24.09095
LVMCA_R6	Rises	B	80-09-07-610-260 10-0	56.72813	24.09089

Visās mērījumu vietās īstenotas vairākas mērījumu programmas, tostarp: 1) gruntsūdens līmeņa mērījumi; 2) siltumnīcefekta gāzu (CH_4 un N_2O) paraugu ņemšana gāzu hromatogrāfijas (GC) analizēm un heterotrofās elpošanas mērījumi, izmantojot EGM5 analizatoru; 3) augsnes temperatūras mērījumi 10 cm dziļumā apmeklējumu laikā; 4) gaisa temperatūras mērījumi; un 5) augsnes mitruma mērījumi. Turklāt no gruntsūdens akām ņemtajam ūdenim noteikts pH, elektrovadītspēja, redoks potenciāls un skābekļa saturs.

Mērījumu parauglaurumi tika apmeklēti reizi mēnesī. Heterotrofās elpošanas mērījumi turpinājās 180 sekundes, 3 atkārtējumi katrā vietā, kameras pirms katra mērījuma tika izvēdinātas.

CH₄ un N₂O mērījumus turpināja visu mērījumu laiku (katrā vietā tika iegūti 5 paraugu komplekti). Pēc ierašanās parauglaukumā kameras tika izskalotas un novietotas virs pastāvīgi uzstādītajām aplocēm (2 aploces katrā mērījumu vietā). Ik pēc 10 minūtēm 30 min. periodā (4 paraugi sērijā) paņēma 100 cm³ gaisa paraugus. Kameras tilpums ir 0,0655 m³ (apakšējais diametrs 50 cm, augšējais diametrs 42,5 cm, augstums 39,5 cm). CH₄, N₂O un CO₂ savāktajos paraugos noteica laboratorijā, izmantojot GC tehnoloģiju. Pirms ūdens paraugu vākšanas akas tika iztukšotas, lai analīzēm iegūtu svaigus paraugus. Heterotrofās elpošanas aprēķināšanai izmantots R programmatūras pakotnes CRAN modulis *Gasfluxes* (R Core Team, 2022), mērījumu perioda sākums (parasti 30 sek.) nogriezts, lai sasniegtu augstāko korelācijas koeficientu. Lai aprēķinātu SEG plūsmas GC datus, izmantota izklājlapas programma 6.1. vienādojumu. No SEG emisiju novērtējuma izslēgti mērījumi, kuros CO₂ koncentrācijas izmaiņu lineārās regresijas R² < 0,95. Saskaņā ar IPCC vadlīnijās (Eggleston et al., 2006) sniegto ieteikumu netika izslēgtas citas novirzes, piemēram, ļoti lielas CH₄ emisijas. Piemērotais CH₄ CO₂ ekvivalents ir 28, bet N₂O ekvivalents – 265 (Field et al., 2014).

$$\frac{CO_2 - C(N_2O - N, CH_4 - C)[\mu gC(N)m^{-2}h^{-1}]}{M[gmol^{-1}] * P[Pa] * V[m^3] * \delta v[ppm(v)]} = \frac{R[m^3PaK^{-1}mol^{-1}] * T[K] * A[m^2] * ppm}{(6.1)}$$

P - 101300 Pa;

R - 8,3143 m³ Pa K⁻¹ mol⁻¹;

V - 0,0655 m³ un 0,023 m³;

A - 0,19625 m² un 0,076 m²;

M CO₂ - 44,01 g mol⁻¹; M CH₄ - 16,04 g mol⁻¹; M N₂O - 44,01 g mol⁻¹.

Vidējās emisijas aprēķinātas katram mērījumu punktam un apstākļiem (rises vai kontrole). Korelācijas un regresijas analīze veikta, lai atrastu faktorus, kas ietekmē SEG emisijas, atsevišķi vērtēta gaisa temperatūru un gruntsūdens līmenis, kas uzrāda lielāko korekciju ar SEG emisijām organiskajās augsnēs. Nenoteiktība ir izteikta kā vidējās standartklūda.

Vides parametru mērījumu rezultāti ir apkopoti Tab. 6.6, bet SEG un augsnes elpošanas mērījumu apkopojums – Tab. 6.7.

Tab. 6.6. Vides mainīgo lielumu mērījumu rezultātu sagrupēta statistika

Dati	Vidējais	Minimāls	Maksimālais	Standartklūda
Gruntsūdens līmenis, cm	148	87	200	34,9
Gaisa temperatūra, °C	19,5	12,2	26,5	4,5
Augsnes temperatūra, °C	14,2	8,7	18,3	3,3
Augsnes mitrums, %	42	29	87	19
pH	5,42	4,73	6,39	0,57
EC, μS cm ⁻¹	28	14	44	14
ORP, mV	195	17	333	138
O ₂ koncentrācija, %	64	48	89	16

Tab. 6.7. SEG mērījumu rezultātu rezultātu kopsavilkums

Tips	CH ₄ -C, $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$			N ₂ O-N, $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$			Augsnes elpošana CO ₂ -C, $\text{mg m}^{-2} \text{h}^{-1}$		
	vidēji	standartklūda	maks.	vidēji	standartklūda	maks.	vidēji	standartklūda	maks.
Kontrole	4,25	217,79	520,65	43,18	65,74	174,29	86,80	68,95	206,04
Rises	495,78	511,81	1641,97	18,49	46,68	172,43	69,01	95,75	258,48

Statistiskā analīze atklāj būtiskas SEG emisiju atšķirības risēs un kontroles platībās. Metāna emisijas (CH₄), tāpat kā organiskajās augsnēs, bija ievērojami lielākas risu skartajos parauglaukumos ($t = -3,53$, $p = 0,002$). Visticamāk, ka augsnes sablīvēšanās un ūdens uzkrāšanās risēs rada anaerobus apstākļus, kas veicina metanoģenēzi. Šis secinājums saskan ar iepriekš veiktajiem pētījumiem, kas konstatēja palielinātas CH₄ emisijas no pārslāpinātām organiskām augsnēm meža zemēs. CH₄ emisiju izmaiņas nekorelē ar gruntsūdens līmeņa svārstībām, norādot uz to, ka augsnes sablīvēšanās rada anaerobus apstākļus pat tad, ja gruntsūdens ir 2 m dziļumā.

Dislāpekļa oksīda (N₂O) emisijas risēs un kontroles platībās būtiski neatšķiras ($t = 1,22$, $p = 0,231$), tāpat kā organiskās augsnēs. Šis rezultāts var liecināt par to, ka gan risēs, gan kontroles platībās ir mainīga skābekļa pieejamība, kas ietekmē N₂O veidošanos nitrifikācijas un denitrifikācijas procesos. Līdzīgas tendences konstatētas pētījumos purvainos un kūdreņos, kur svārstīgs gruntsūdens līmenis nekorelē ar nevienmērīgu N₂O emisijām (Butlers et al., 2023).

Arī oglekļa dioksīda (CO₂) emisijas, ko rada augsnes elpošana, būtiski neatšķiras kontroles platībās un risēs ($t = 0,60$, $p = 0,551$), kas nozīmē, ka heterotrofā elpošana abos variantos var būt vienlīdz nomākta, jo augsnes sablīvēšanās ierobežo aerāciju un sakņu darbību. CO₂ emisijas negatīvi korelē ar augsnes mitrumu ($r = -0,56$, $p < 0,001$) un gaisa temperatūru ($r = -0,49$, $p = 0,004$), kas liecina, ka sausāki un siltāki apstākļi veicina augsnes elpošanu. Jāatzīmē, ka mērījumu vietās uz pievešanas ceļiem ieklātas mežizstrādes atliekas, tāpēc augšējo augsnes slāni risēs veido svaigas nobiras, kas sadalās straujāk. Šādos apstākļos sagaidāms ievērojams CO₂ emisiju pieaugums organisko vielu sadalīšanās rezultātā, bet šajā gadījumā anaerobie apstākļi kavēja organisko vielu sadalīšanos. Iespējams, ka mežizstrādes atlieku ieklāšanu ceļos minerālaugsnēs var vērtēt arī kā klimata pārmaiņas mazinošu pasākumu, tomēr pagaidām pietrūkst datu ilgtermiņa ietekmes novērtēšanai, salīdzinot ar mežizstrādes atlieku atstāšanu izklaidus.

Interesanti, ka CH₄ emisijām nebija korelācijas ar augsnes mitrumu ($r = 0,04$, $p = 0,819$) vai augsnes temperatūru ($r = 0,13$, $p = 0,495$), kas liecina, ka CH₄ emisijas, visticamāk, nosaka lokāli anaerobie karstie punkti, nevis liela mēroga vides parametru izmaiņas.

Pētījuma rezultāti norāda uz to, ka rises arī minerālaugsnēs ir būtisks SEG emisijas ietekmējošs faktors, kas jāietver meža apsaimniekošanas ietekmes uz SEG emisijām novērtējumā. Nozīmīgs iztrūkums zināšanās ir darbību dati emisiju aprēķiniem – risu jeb sablīvētu joslu izplatība mežos. Šādu datu iegūšana, kā sakarību starp rises raksturojošajiem rādītājiem un SEG emisijām izpēti ir jāietver turpmākajos izpētes etapos.

6.2.3. Metode risu attālinātai raksturošanai

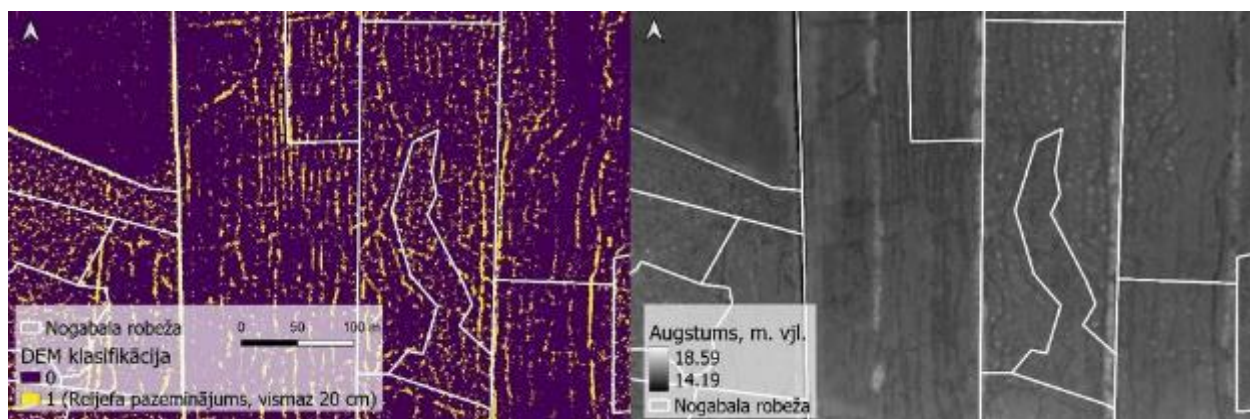
Pētījuma mērķis 2024. gadā bija pilnveidot 2023. gadā izstrādāto metodi risu izplatības raksturošanai, izmantojot no bezpilota gaisa kuģa iegūtus lāzerskenēšanas datus un lauka

mērījumus. Veikti mežizstrādes tehnikas atstāto risu uzmērīšana uz lauka, kā arī iegūti lāzerskenēšanas dati 10 meža nogabalos, kuros risu izplatība vērtēta arī pētījumu programmas “Tehnoloģijas meža apsaimniekošanas procesu efektivitātes paaugstināšanai” ietvaros. Lauka mērījumi iegūti objektos, kur risu dziļums atsevišķās vietās bija vismaz 20 cm. Lāzerskenēšanas dati iegūti 12 objektos, veikta risu izplatības modelēšana, aprakstīti iegūtie rezultāti un izdarīti sākotnējie secinājumi par metodes pielietojanu praksē. Secināts, ka risu automātiska identificēšana, izmantojot lāzerskenēšanas datus, ir iespējama ar augstu precizitāti, ja ir pieejami mežizstrādes tehnikas pārvietošanās ceļu telpiskie dati.

Ņemot vērā risu potenciāli būtisko ietekmi uz SEG emisijām, kas konstatēta šajā pētījumā, ir jārēķinās ar detalizētākas informācijas par risu veidošanos kopšanas un galvenajā cirtē iegūšanas nepieciešamību ražošanas apstākļos. Šī mērķa īstenošanai 2024. gadā izvērtējam 2023. gadā izstrādātās metodikas piemērotību risu identificēšanai valsts mērogā, izmantojot LĢIA aerolāzerskenēšanas datus.

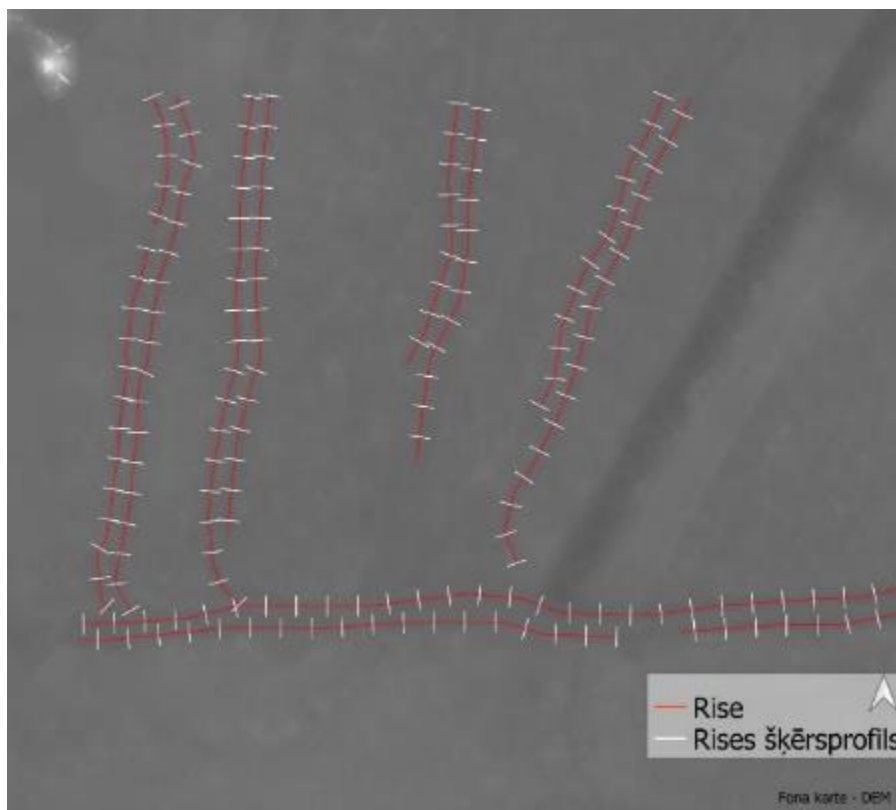
Metodika

Visi meža nogabali atlasīti Kurzemes reģionā, izmantojot MVR datus par mežizstrādes gadu, paņēmienu un meža tipu. Atlasīti meža nogabali purvainu un kūdreņu meža tipos, kuros kailcirtē veikta 2015. gadā, gadu pirms lāzerskenēšanas. Nogabalus atlasījām tikai teritorijās, kur pieejami arī LĢIA 2. cikla lāzerskenēšanas dati, lai novērtētu risu izplatības izmaiņas periodā starp skenēšanas cikliem – 2015. un 2022. gadā. Šajos nogabalos, izmantojot LĢIA LiDAR datus izveidoti DEM ar horizontālo izšķirtspēju 0,2 m, kas apstrādāti ĢIS vidē, izmantojot iepriekš izstrādāto metodiku (Att. 6.5). Lai iegūtu references datus, veikta manuāla risu kartēšana, izmantojot DEM ēnojuma modeli.



Att. 6.5. Risu identificēšanas piemērs izmantojot LĢIA datus

Risu klasifikācija pēc to platuma un dziļuma veikta, izmantojot iegūto risu vektordatu slāni, kas atbilst rīses centrālajai asij digitālajā reljefa modelī. Izmantojot šo slāni, ģenerēti virtuāli šķērsprofili ar 2 m atstatuma soli (Att. 6.6). Šie šķērsprofili sniedz informāciju par risu dziļumu, kā arī par abu malu augstumu. Šīs darbības veiktas, izmantojot SAGA ĢIS rīku *Cross Profiles* QGIS vidē.



Att. 6.6. Risu klasifikācijas piemērs izmantojot DEM šķēršņus

Atšķirībā no 2023. gadā analizētajiem mūsu pašu iegūtajiem LiDAR datiem paraugteritorijās, veicot plašu reģionu analīzi, izmantojot LĢIA datus, nav pieejami mežizstrādes tehnikas pārvietošanās ceļu GPS dati. Atbilstoši iepriekš iegūtajiem rezultātiem, šie dati nepieciešami lai nogabala robežās nodalītu risus no citiem objektiem, kas morfometriski atbilst tām atbilst.

Rezultāti

Kopējā kailciršu platība kūdreņu un purvainu meža tipos 2015. gadā, teritorijās Kurzemē, kur vienlaikus aerolāzerskenēšana pirmo reizi veikta 2016. gadā, kā arī otro reizi 2022. gadā, ir 107,2 ha, no kuriem 46,9 ha ir valstij piederoši meži. Šo platību viedo 38 meža nogabali ar vidējo platību 1,23 ha.

Iegūtie rezultāti parāda, ka no 38 meža nogabaliem vismaz 30 m risu konstatētas 24 nogabalos (Tab. 6.8). Vidējais manuāli kartēto risu garums šajos nogabalos ir 214 m ha^{-1} . Izmantojot automātisku risu kartēšanu un pirmā cikla LiDAR datus – 135 m ha^{-1} , bet otrā cikla datus šajos nogabalos identificēti vidēji 99 m ha^{-1} risu. Risu platuma un dziļuma analīzei izmantoti pirmā cikla dati un vidējais risu platums ir 2,9 m (faktiski šis rādītājs parāda brauktuves platumu), bet dziļums – 0,23 m.

Salīdzinot ar manuālu kartēšanu, automātiskā metode 1. cikla datus sniedz vidēji par 37% mazāku risu kopējo garumu, bet, salīdzinot pirmā cikla datus ar otrā cikla datiem, vērojams 27% risu garuma samazinājums. Divos gadījumos šajā laikā ir veikta mērķtiecīga meža atjaunošana, pirms tam sagatavojot augsni, un rises otrā cikla datus vairs nav konstatētas.

Tab. 6.8 Risu parametri atlasītajās purvaiņu un kūdreņu cirmās dažādos datu avotos

NPK	Kadastra Nr.	Platība, ha	Manuāli uzmērīts garums, m	Vidējais platums, m	Vidējais dziļums, m	Garums 2016. gadā, m	Garums 2022. gadā, m
1	88500290008	0,8	266	3,4	0,3	165	137
2	98740020061	0,92	150	2,6	0,3	50	0
3	88920070013	0,38	153	3,0	0,3	94	75
4	98700020114	0,91	110	2,4	0,2	80	0
5	88720190012	1,36	355	2,6	0,2	220	184
6	88720190012	1,02	170	2,0	0,2	144	112
7	88500290008	0,86	71	2,0	0,2	55	50
8	98600070116	1,08	250	2,8	0,2	132	115
9	98660090070	0,42	65	3,2	0,3	60	51
10	64860060085	1,30	192	2,4	0,2	104	97
11	88500290009	2,24	35	2,6	0,2	30	25
12	98440010114	1,02	415	3,0	0,2	209	154
13	98700020114	0,82	175	3,4	0,2	84	80
14	98700020114	1,48	148	2,6	0,2	88	67
15	98740020042	1,85	270	3,8	0,2	204	52
16	98500030172	0,69	180	4,2	0,4	175	170
17	98700020114	1,81	590	2,8	0,3	385	354
18	88720190012	1,30	121	3	0,2	83	20
19	98700020114	2,14	810	2,8	0,2	542	538
20	98500020304	1,41	285	2,2	0,2	115	52
21	98500030172	0,70	270	3,6	0,2	157	0
22	98740020042	1,64	106	3	0,2	69	57
23	88820080715	2,25	714	3,2	0,2	521	514
24	88500230067	2,07	352	3	0,3	184	152

Secinājumi

Mežizstrādes tehnikas atstāto risu kartēšana valsts mēroga, izmantojot no LĢIA LiDAR datiem ģenerētu digitālo reljefa modeli, ir iespējama. Kartēšanai nepieciešams izveidot digitālo reljefa modeli ar vismaz 0,2 izšķirtspēju, kas būtiski palielina datu apjomu un to apstrādes laiku. Šāda DEM izšķirtspēja, izmantojot LĢIA datus, ir iegūstama tikai teritorijās, kurās ir attiecīgais atstarojuma no zemes virsas punktu blīvums, kas ir atkarīgs no datu iegūšanas sezonas, veģetācijas

blīvuma, virsmas raupjuma, slīpuma un citiem faktoriem. Ņemot vērā šos limitējošos faktorus, risu identificēšana var nebūt iespējama, izmantojot datus, kuri iegūti veģetācijas sezonā, kā arī skenēšanas brīdī pārmitrās teritorijās. Gadījumos, kad nav pieejami mežizstrādes tehnikas pārvietošanās ceļu GPS dati, nepieciešams izmantot meža nogabalu robežu informāciju, lai no risēm atdalītu citus veidojumus reljefā, piemēram, grāvjus, kuru morfometriskās īpašības atbilst risēm. Salīdzinot ar manuālu kartēšanu, izmantojot automātisko metodi, sagaidāms mazāks iegūtais kopējais risu garums, kas šajā gadījumā, analizējot konkrētos nogabalus, ir 37%. Izmantojot otrā cikla datus, var novērtēt risu kopējā garuma izmaiņas, kā arī mežaudzes atjaunošanas ietekmi uz risu izplatību.

7. MELIORĀCIJAS SISTĒMU APSAIMNIEKOŠANAS PLĀNOŠANAS SISTĒMA

7.1. Empīrisko datu ieguve un metodikas izstrādāšana meliorācijas sistēmu ietekmes uz SEG emisijām no augsnes un CO₂ piesaisti modelēšanai minerālaugsnēs un organiskās augsnēs

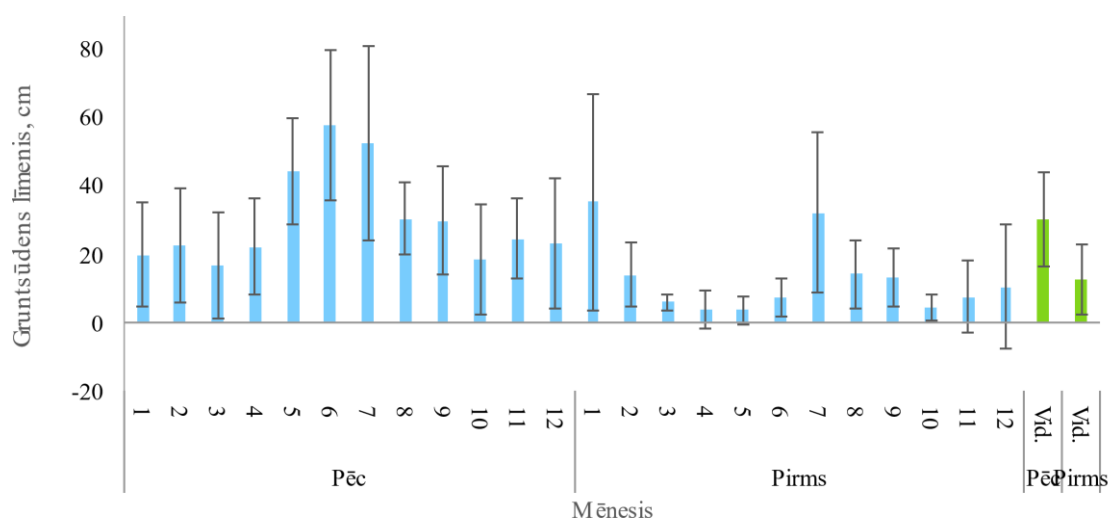
7.1.1. Dziļvagu ierīkošanas ietekme uz SEG emisijām mežos ar pārmitrām organiskām augsnēm

Pētījuma ietvaros veiktie lauka darbi ir ietekmes uz SEG emisijām no augsnes novērojumi trīs objektos purvaiņos (Tab. 7.1), kur pēc galvenās cirtes veikta augsnes sagatavošana ar ekskavatoru un ierīkotas dziļvagas ūdens novadīšanai, lai salīdzinātu mežizstrādes ietekmi uz SEG emisijām purvaiņos un dziļvagu ierīkošanas koriģējošo ietekmi uz emisiju pieaugumu pēc mežizstrādes.

Tab. 7.1. Gāzu apmaiņas mērīšanas parauglaukumi atjaunotās platībās

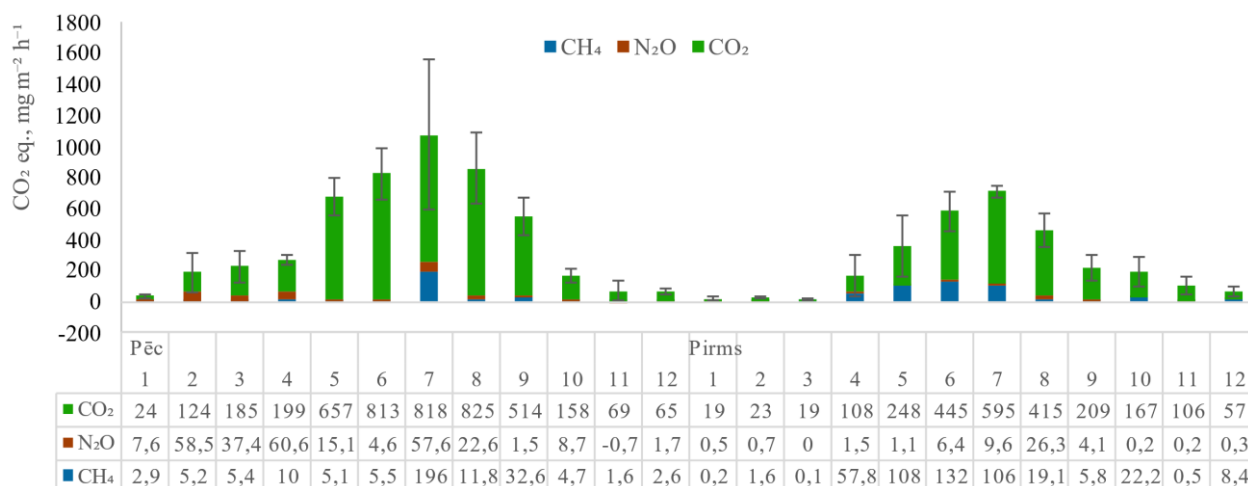
Objekta identifikators	Koordinātes	Mērījumu periods	Saimnieciskā darbība	Piezīmes
031-108-4 (LVC312, LVMCA_R2, LVMCA_R3)	57.311643, 25.936089	20.01.2021- 30.07.2024	Atjaunošanas cirte pirms mērījuma 24.05.2022, augsnes sagatavošana pirms mērījumiem 23.08.2022; 2023. gada aprīlī stādīta uz pacilām egle, bet mitrākajā daļā melnalksnis.	Objektā uzsākti arī gāzu apmaiņas mērījumi, lai raksturotu SEG emisijas no risēm (objekts LVMCA_R2 un LVMCA_R3). Visi mērījumi notiek platībā, kur stādīta egle.
012-218-51 (LVC311, LVMCA_R1)	57.27887, 25.85441	20.01.2021- 30.07.2024	Atjaunošanas cirte pirms mērījuma 25.04.2022; dziļvagu ierīkošana liekā ūdens novadīšanai, un atjaunoti esošie grāvji pirms mērījuma 19.07.2022	References dati iegūti LIFE OrgBalt projektā, gāzu mērīšanas aprīkojums atjaunots 2023. gada jūlijā
012-218-4 (LVC309)	57.27889, 25.85366	20.01.2021- 19.12.2022	Saimnieciskā darbība nav veikta	Platība blakus LVC311, saimnieciskā darbība nav veikta, izmantojama kā kontrole

Pēc dziļvagu ierīkošanas gruntsūdens līmenis pazeminājies no vidēji 13 līdz 30 cm (Att. 7.1); attiecīgi, dziļvagu ierīkošana nodrošinājusi optimālu mitruma režīmu, ap 30 cm, kam vajadzētu ierobežot CO₂ emisijas, salīdzinot ar grāvju tīklu, un novērst CH₄ emisiju pieauguma risku, paaugstinoties gruntsūdens līmenim. Faktiski gruntsūdens līmenis vasaras mēnešos pazeminās zem 30 cm, kas var izraisīt CO₂ emisiju pieaugumu, lai arī šāda gruntsūdens līmeņa pazemināšanās novērota arī pirms mežizstrādes.



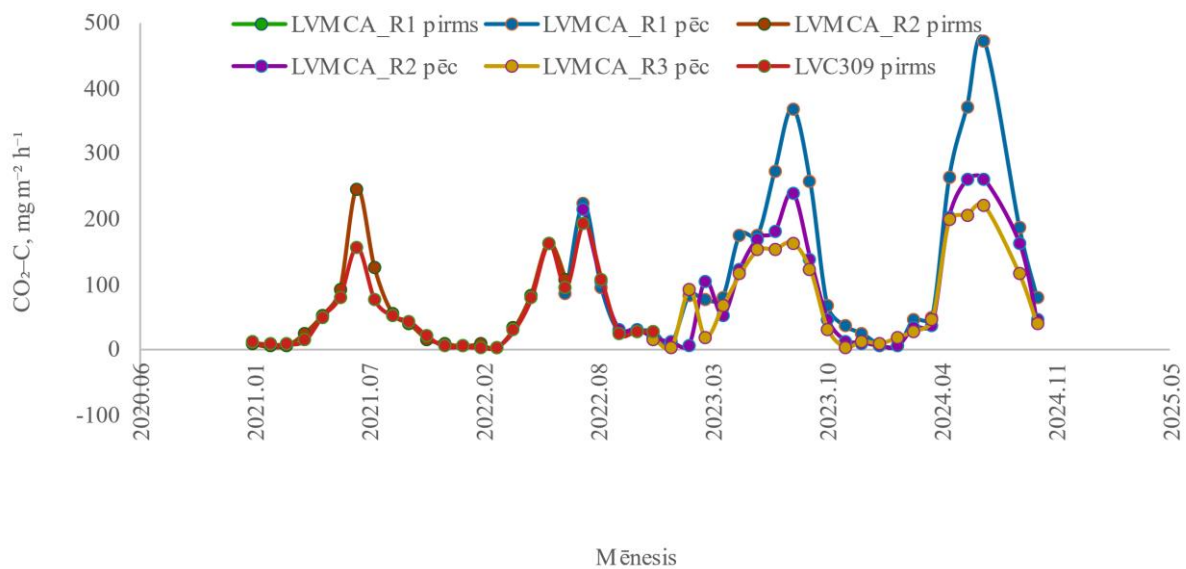
Att. 7.1. Gruntsūdens līmenis pirms un pēc dziļvagu ierīkošanas

Salīdzinot ikmēneša mērījumu rezultātus, CO₂ emisijas pēc dziļvagu ierīkošanas bija vidēji $2,6 \pm 2,4$ reizes lielākas nekā pirms mežizstrādes (Att. 7.2). Palielinātas emisijas var būt saistītas ar svaigu organisko vielu ienešanu augsnē ar mežizstrādes atliekām nevis gruntsūdens līmeņa izmaiņām, jo palielinātas CO₂ emisijas ir bija gada pirmajos mēnešos pēc dziļvagu ierīkošanas, bet rudens mēnešos – mazākas. Turpinot mērījums, iespējams sagaidīsim, ka CO₂ emisijas stabilizēties un atgriezīsies līmenī, kāds tas bija pirms mežizstrādes.



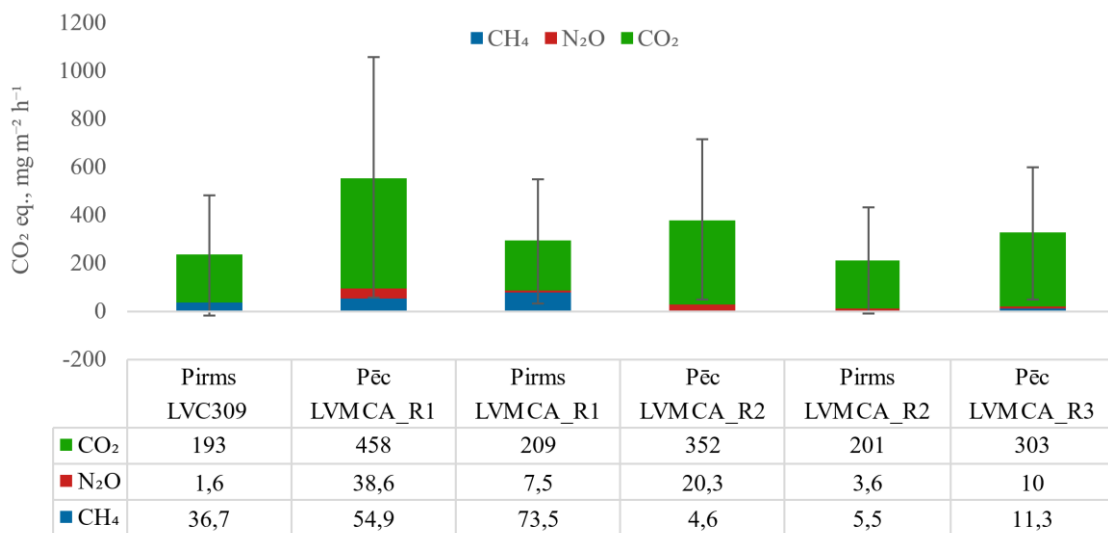
Att. 7.2. Augsnes SEG emisijas pirms un pēc dziļvagu ierīkošanas atkarībā no mēneša

CO₂ emisiju vidējo pieaugumu pēc dziļvagu ierīkošanas nosaka krass emisiju pieaugums parauglaukumā LVMCA_R1. Tas skaidrojams ar to, ka šajā objektā sākotnēji bijis visaugstākais gruntsūdens līmenis vidēji 10 ± 15 cm, bet pēc dziļvagu ierīkošanas viszemākais – vidēji 42 ± 26 cm. Pārējos objektos vidējais gruntsūdens līmenis pirms un pēc dziļvagu ierīkošanas bija, attiecīgi, 15 ± 1 cm un 23 ± 3 cm (Att. 7.3).



Att. 7.3. Augsnes CO₂ emisiju tendences pirms un pēc dziļvagu ierīkošanas

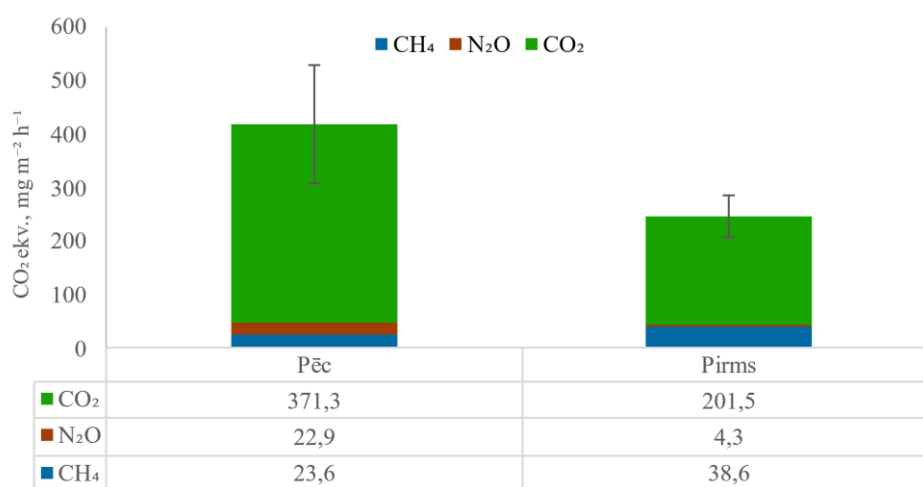
SEG emisijas objektos galvenokārt nosaka CO₂ emisijas, jo kopējā SEG emisiju bilanci CH₄ un N₂O emisijām bijis mazs īpatsvars (Att. 7.4). Pirms un pēc dziļvagu ierīkošanas metāna īpatsvars kopējā SEG bilanci bija, attiecīgi, vidēji 16 un 6%, bet N₂O īpatsvars SEG emisiju bilanci, attiecīgi, 2 un 6%. N₂O un CH₄ emisiju īpatsvars SEG bilanci pirms dziļvagu ierīkošanas bija 18%, bet pēc tās – 12%. Dziļvagu ierīkošana mazinājusi CH₄ emisijas, bet palielinājusi N₂O emisijas, tomēr izmaiņu ietekme uz kopējo SEG bilanci ir neliela.



Att. 7.4. Augsnes SEG emisijas pirms un pēc dziļvagu ierīkošanas izmēģinājumu objektos

Izmēģinājumu platībās, kur ierīkotas dziļvagas, SEG emisijas pēc mežizstrādes ar vienlaidus cirtes paņēmieni, pieauga 1,7 reizes, no vidēji 242 ± 40 līdz 401 ± 110 mg CO₂ ekv. m² h⁻¹. Objektos, kuros vidējais gruntsūdens līmenis pazeminājās no 15 līdz 23 cm, ietekme uz SEG emisijām bija mazāka, tās pieauga 1,5 reizes jeb par 119 mg CO₂ ekv. m² h⁻¹, no 220 ± 17 līdz 339 ± 33 mg CO₂ ekv. m² h⁻¹. Savukārt objektā, kurā gruntsūdens līmenis pazeminājās no vidēji

10 ± 15 cm, līdz 42 ± 26 cm, SEG emisijas pieauga par 240 mg CO₂ ekv. m² h⁻¹ jeb 1,8 reizes (Att. 7.5). Izmēģinājuma rezultāti parāda, ka arī neliela gruntsūdens līmeņa pazemināšanās var nozīmīgi ietekmēt augsnes SEG emisijas. Dziļvagu ierīkošanas ietekmi uz SEG emisijām nosaka sākotnējais un panāktais gruntsūdens līmeņa režīms. Plānojot dziļvagu ierīkošanu, jāizvērtē sākotnējais un plānotais gruntsūdens līmeņa režīms, lai minimizētu SEG emisiju pieaugumu pēc mežizstrādes. Emisiju pieaugums hidromeliorācijas ietekmē var būt pārvērtēts, jo pētījumā konstatēts, ka emisijas visvairāk ietekmē svaigas mežizstrādes atliekas (Wang et al., 2022; Yamulki et al., 2021), kas sadalās straujāk nekā nedzīvā zemsega, kā arī būtiski palielinājusies zemsedzes veģetācija, kuras autotrofā elpošana un to nobiru sadalīšanās atspoguļojas bruto kopējās elpošanas mērījumos. Lai pārliecinātos, ka palielinātām emisijām ir īstermiņa ietekme, nepieciešams ilgāks monitoringa periods.



Att. 7.5. Vidējās augsnes SEG emisijas pirms un pēc dziļvagu ierīkošanas izmēģinājumu objektos

7.1.2. SEG emisiju salīdzinājums pārmitrās un meliorētās minerālaugsnēs

2022. un 2023. gadā iegūtie dati par CO₂ emisijām no augsnes slapjajiem un āreņiem apkopoti zinātniskā publikācijā “Soil carbon turnover of drained and naturally wet mineral forest soils in Latvia” (Zvaigzne et al., 2024). Rakstā secināts, ka CO₂ emisijas no augsnes heterotrofās elpošanas rezultātā pētāmajos slapjajiem un āreņiem bija līdzīgas, norādot uz to, ka augsnes mitruma režīms maz ietekmē oglekļa zudumus no augsnes. Oglekļa bilanci galvenokārt nosaka augu atliekas un nobiras. Lai saglabātu vai palielinātu C krājumu mežos ar pārmitrām minerālaugsnēm, ir svarīgi uzturēt augsnes mitruma režīmu, kas sekmē augu atlieku (nobiras, zemsedzes veģetācija) veidošanos un zemsedzes uzkrāšanos. Otrā rakstā “Comparison of nitrous oxide (N₂O) and methane (CH₄) fluxes in naturally wet and drained mineral forest soil” (Skranda, Spalva, Muiznieks, et al., 2024) salīdzinātas CH₄ un N₂O emisijas slapjajiem un āreņiem. Pētījumā secināts, ka starp meliorētām un dabiski mitrām augsnēm, kā arī starp barības vielām bagātām un trūcīgām augsnēm nav būtiskas CH₄ un N₂O emisiju atšķirības, tomēr ir novērota N₂O emisiju pieauguma tendence periodiski pārmitrās augsnēs, īpaši pavasara mēnešos. N₂O arī ir lielāks emisiju avots nekā CH₄; tomēr, ņemot vērā, ka N₂O emisijas nepalielinās meliorētās platībās, šo avotu var izslēgt no valsts siltumnīcefekta gāzu inventarizācijas kā tādu, ko neietekmē saimnieciskā darbība; tomēr ir nepieciešami turpmāki pētījumi, lai precizētu iespējamās emisiju no augsnes izmaiņas meža meliorācijas ietekmē. Mazākas N₂O un CH₄ emisijas no augsnes konstatētas priedes un melnalkšņu audzēs; tomēr ir nepieciešami turpmāki pētījumi, lai pārbaudītu šo atziņu, jo mazākas kopējās ikgadējās emisijas galvenokārt ir saistītas ar N₂O pieauguma pavasarī pārējās platībās, kas

var nebūt saistīts ar valdošo koku sugu, bet citiem faktoriem. Izslēdzot no aprēķina pavasara emisiju pieauguma ekstrēmumus, SEG emisijas koku sugu griezumā vairs būtiski neatšķiras.

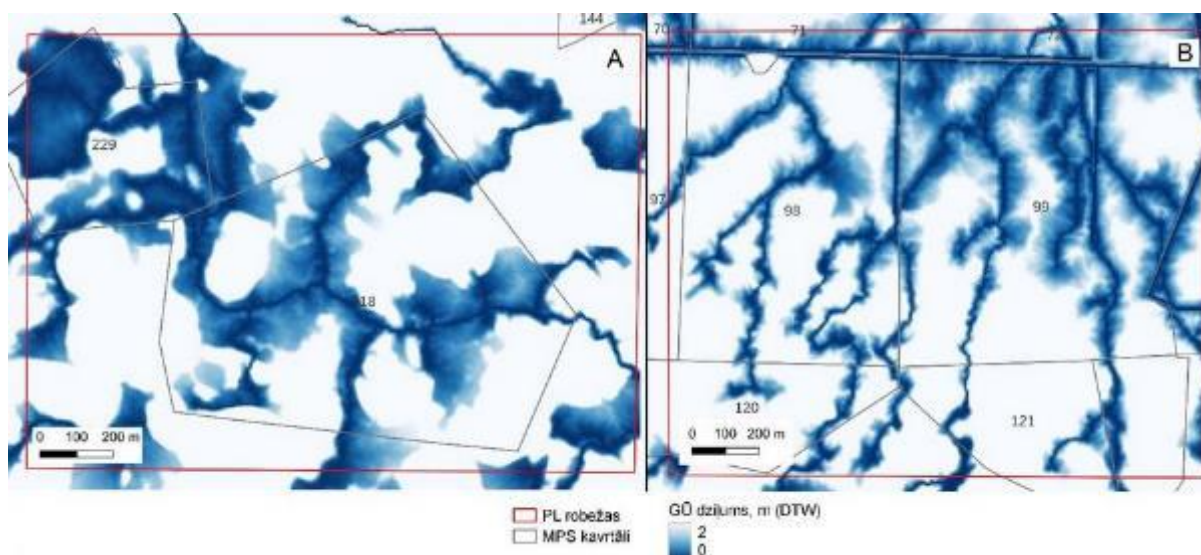
7.2. Lēmuma pieņemšanas atbalsta rīka izstrādāšana meliorācijas sistēmu uzturēšanai un modernizēšanai

Pētījuma mērķis ir lēmuma pieņemšanas atbalsta rīka izstrādāšana meliorācijas sistēmu uzturēšanai un modernizēšanai klimata pārmaiņu mazināšanas darbību īstenošanas ietvaros. Tas sevī ietvēra metodikas izstrādi un darbību datu sagatavošanu meliorācijas sistēmu atjaunošanas un paplašināšanas plānošanas risinājumam SEG emisiju mazināšanai un CO₂ piesaistes palielināšanai.

Pētījuma rezultātā 2023. gadā izstrādāta metodika esošo meliorācijas grāvju atjaunošanai, kā arī dziļvagu izvietojuma plānošanai un modelēšanai. Pētījumā secināts, ka, izmantojot brīvpieejas datus un ĢIS rīkus, var sekmīgi veikt grāvju atjaunošanas modelēšanu, identificēt grāvju rakšanai un dziļvagu ierīkošanai piemērotākās vietas, kā arī novērtēt šo pasākumu efektivitāti, tajā skaitā novērtēt ietekmi uz SEG emisijām, lai gan vienādojumiem SEG emisiju prognozēšanai pagaidām ir liela nenoteiktība un turpmākajos pētījumos ir jākoncentrējas uz empīrisku datu iegūvi, lai samazinātu prognožu nenoteiktību.

7.2.1. Metodika

Salīdzinot ar 2023. gadu, kad izstrādāta metodika paraugteritorijās, ir atlasīti divi objekti Smiltenes MPS (Att. 7.6). Viens no tiem ietver sateces baseinu 218., 229. MPS kvartālā (objekts A), bet otrs – 98., 99., 120. un 121. kvartālā (objekts B). Šajos objektos 2023. un 2024. gadā veikta meliorācijas sistēmu atjaunošana. Šajos objektos 2024. gada novembrī, pēc veģetācijas sezonas noslēgšanās iegūti aerolāzerskenēšanas dati, izmantojot Zenmuse L1 lāzerskeneri, kurš uzstādīts uz DJI Matrice 300 bezpilota lidaparāta. Ar lāzerskeneri iegūts LiDAR punktu mākonis ar blīvumu 160 punkti · m⁻², kas izmantoti DEM izveidei. Balstoties uz iepriekšējos pētījuma posmos izstrādāto metodiku, veikta meliorācijas grāvju atjaunošanas un dziļvagu izvietojuma modelēšana, kuras rezultāti salīdzināti ar projektēto un atjaunoto meliorācijas grāvju izvietojumu.

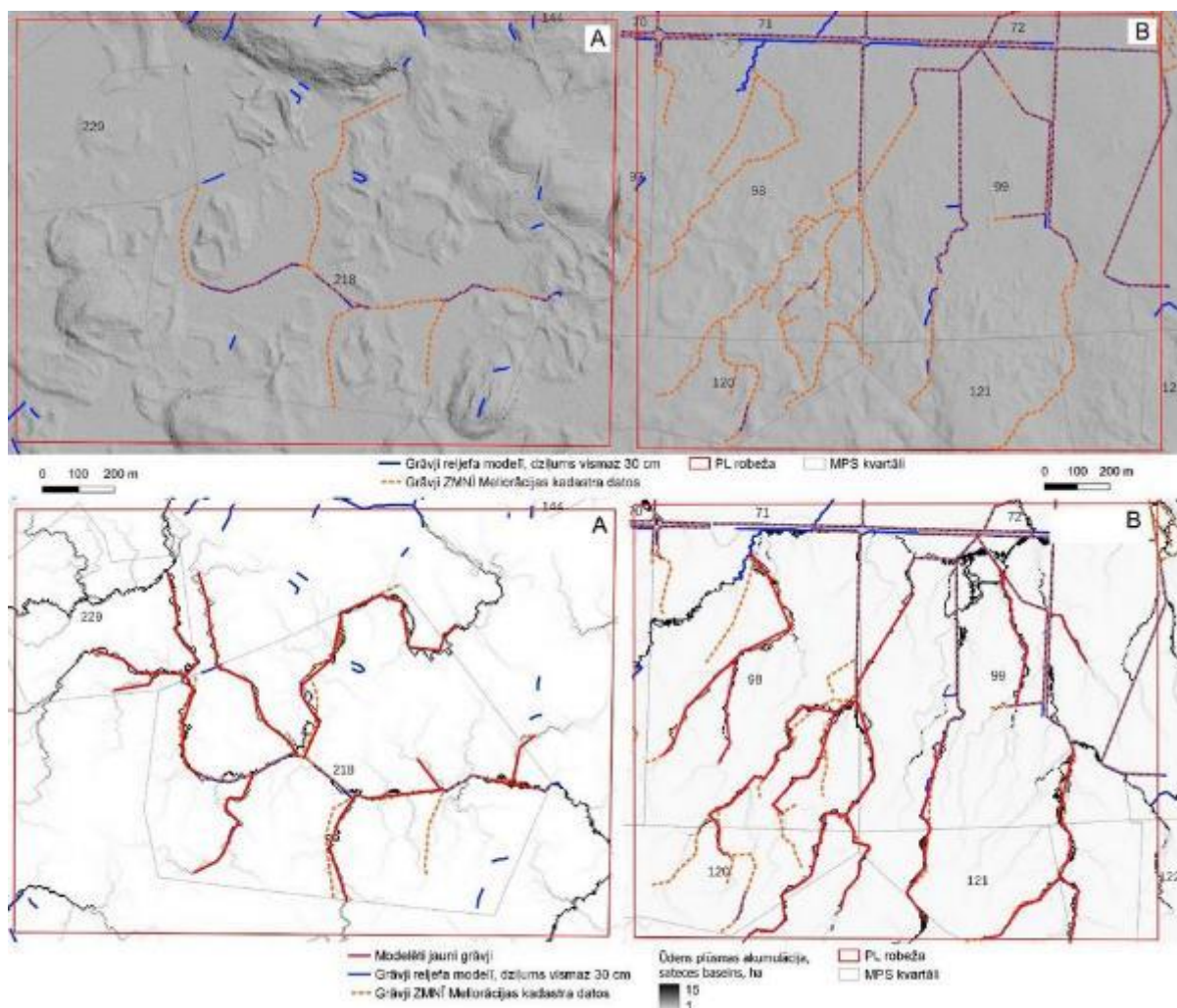


Att. 7.6. Sākotnējais gruntsūdens dziļuma (DTW) modelis MPS paraugteritorijās

7.2.2. Rezultāti

Aktuālajos Meliorācijas kadastra datos A teritorijā atrodas 2,59 km meliorācijas grāvju, bet, pielietojot algoritmu automātiskai grāvju atpazīšanai reljefa datos, identificēti 0,78 km grāvji, kuru

dziļums ir vismaz 30 cm (Att. 7.7). Šāda atšķirība starp vēsturiskajiem datiem un aktuālajiem reljefa datiem liecina, ka lielākā daļa (1,81 km) grāvju LiDAR skenēšanas laikā ir bijuši aizsērējuši vai piepildīti ar ūdeni, pilnvērtīgi neveicot savu funkciju pazemināt GŪ līmeni un novadīt ūdeni no teritorijas. Līdzīga situācija novērojama B teritorijā, kur Meliorācijas kadastra datos atrodas 11,5 km grāvju, neskaitot grāvjus ceļa uzbērumu malās, bet reljefa datos identificēti 4,65 km grāvju.

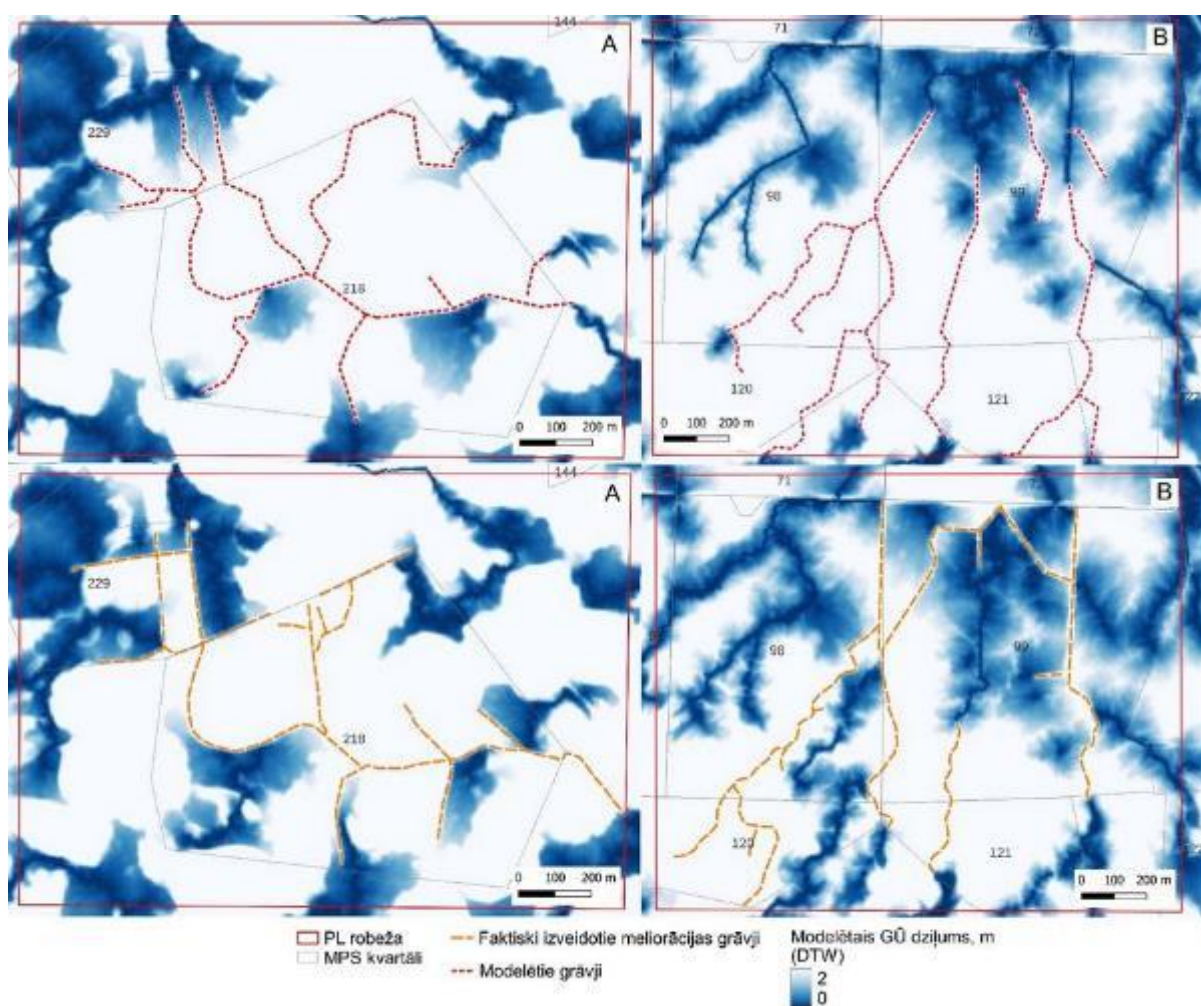


Att. 7.7. Augšdaļā – esošie meliorācijas grāvji dažādos datu avotos abās paraugteritorijās. Fona karte – DEM ēnojums. Lejasdaļā – esošie un modelētie meliorācijas grāvji uz emisijas akumulācijas modeļa fona

Atbilstoši iepriekš izstrādātajai metodikai, jaunu vai atjaunojamu grāvju modelēšana veikta izmantojot emisijas akumulācijas datus (Att. 7.7). Šajā gadījumā, lai turpmākie modelēšanas rezultāti būtu savstarpēji salīdzināmi, izmantoti emisijas akumulācijas dati ar sateces baseinu, kas ir vienāds ar sākotnējā DTW modelī (30 ha). Rezultātā konstatēts, ka teritorijā A nepieciešams izveidot vai atjaunot 4,63 km grāvju, bet teritorijā B – 5,74 km. Izmantojot jauniegūtos abu teritoriju DEM, kas izveidoti no 2024. gada novembrī iegūtajiem aktuālajiem LiDAR datiem, novērtēts projektēto un faktiski izveidoto vai atjaunoto grāvju kopējais garums. Teritorijā A faktiski izveidoti vai atjaunoti 4,93 km grāvju, kas ir par 0,34 km vairāk nekā aktuālajos Meliorācijas kadastra datos, bet teritorijā B – 5,45 km grāvju, kas ir vairāk nekā divas reizes mazāk kā Meliorācijas kadastra datos.

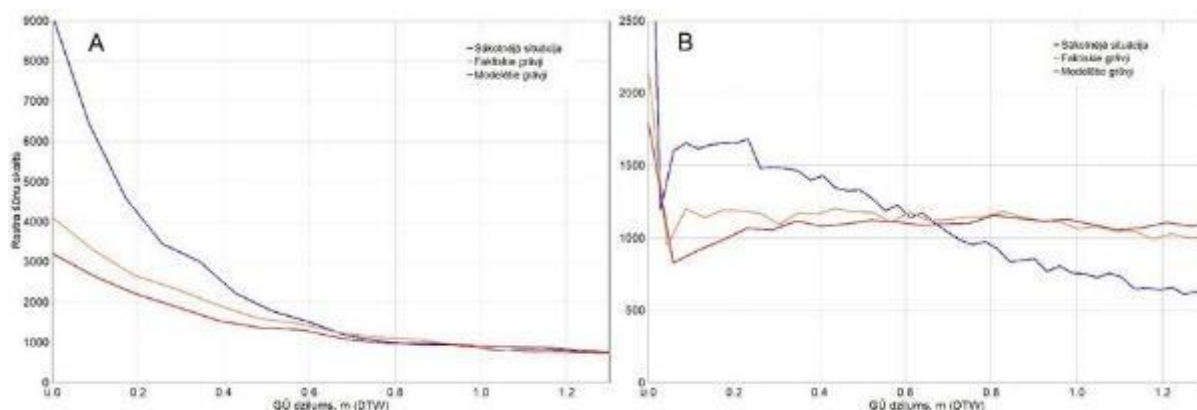
Salīdzinot modelēto kopējo nepieciešamo grāvju garumu ar projektēto un izveidoto, teritorijā A faktiski izveidoti grāvji ar 0,3 km lielāku kopējo garumu, nekā modelētajos rezultātos, bet teritorijā B – ar 0,29 km mazāku kopējo garumu.

Pēc jaunu grāvju izvietojuma modelēšanas veikta šo grāvju iestrādāšana reljefa modelī, pieņemot, ka to platums atbilst izmantotā DEM izšķirtspējai (5 m), bet dziļums ir 1,5 m, un jaunu teritorijas DTW modeļu izveide (Att. 7.8). Tāpat izveidoti jauni DTW modeļi abām teritorijām, izmantojot aktuālos DEM.



Att. 7.8. GŪ dziļuma salīdzinājums DTW modelī abās paraugteritorijās, izmantojot modelēto (attēla augšējā daļa) un faktiski izveidoto meliorācijas grāvju (attēla lejasdaļa) izvietojumu

Salīdzinot sākotnējo DTW modeli ar DTW, kas izveidoti, izmantojot abus grāvju izveidošanas scenārijus (modelētie un faktiskie), teritorijas A visa parauglaukuma vidējais GŪ līmenis sākotnēji ir 3,1 m, modelēto grāvju izveidošanas scenārijā – 4,4 m, bet ar faktiski izveidotajiem grāvjiem – 4,1 m (Att. 7.9). Tāpat, abos scenārijos paredzams vairāk kā divkārtīgs pārmitro platību ar GŪ dziļumu, kas seklāks par 0,3 m, samazinājums. Teritorijā B vidējais GŪ līmenis sākotnēji ir 1,3 m, modelēto grāvju izveidošanas scenārijā – 3,2 m, bet ar faktiski izveidotajiem grāvjiem – 2,2 m. Šajā teritorijā DTW modelis abos jaunajos scenārijos uzrāda mazāk būtisku ietekmi uz pārmitro platību (GŪ dziļums < 0,3 m) izplatību kā A teritorijā.



Att. 7.9. GŪ dziļuma un tā telpiskā sadalījuma izmaiņu DTW modeli histogramma, izmantojot modelēto un faktisko grāvju izvietojumu, salīdzinājumā ar sākotnējo DTW modeli

Neskatoties uz iegūtajiem sekmīgajiem rezultātiem, šiem rīkiem ir arī trūkumi un lielu datu kopu apstrāde prasa būtiskus datora apstrādes resursus (Bhattacharjee et al., 2021; Lin et al., 2021). DTW karšu precizitāte var samazināties līdzenās teritorijās, kā arī ar mainīgiem gruntsūdens līmeņiem (White et al., 2012). Tāpat emisijas akumulācijas algoritmi var pārāk vienkāršot sarežģītas hidroloģiskās mijiedarbības, neņemot vērā tādu faktorus kā mainīgas augsnes īpašības vai veģetāciju (Moore et al., 1991; Nardi et al., 2013). Šo risinājumu pielietošana var būtiski uzlabot grāvju plānošanas efektivitāti, sniedzot iespēju optimāli novirzīt ūdens emisijas, īpaši mitrās teritorijās vai teritorijās ar apgrūtinātu piekļušanu (Lidberg et al., 2017; Nobre et al., 2011). Plānošanā izmantotās augstas izšķirtspējas kartes un algoritmi, piemēram, D8, uzlabo precizitāti, vienlaikus samazinot manuālās kartēšanas kļūdu iespējamību (Nardi et al., 2013; White et al., 2012). Tomēr šo pieeju efektivitāte atkarīga no to izvērtēšanas un pielāgošanas konkrētajiem apgabaliem un dabiskajiem apstākļiem, piemēram, gruntsūdeņu svārstībām vai sarežģītiem reljefa un ģeoloģiskajiem apstākļiem (Bhattacharjee et al., 2021; Poulter et al., 2008). Uzlabojumi algoritmos, kas integrē gan topogrāfiskos, gan veģetācijas datus, ļautu ne tikai novērst pārmērīgas nosusināšanas risku, bet arī mazināt iespējamo negatīvo ietekmi uz ekosistēmām un saglabāt optimālu augsnes mitruma režīmu pēc iespējas lielākā teritorijā, kas būtisks ilgtspējīgai mežsaimniecībai (Lidberg et al., 2017; Rapinel et al., 2013).

7.2.3. Secinājumi un rekomendācijas

Izstrādātā metodika ir piemērota jaunu un atjaunojamu meliorācijas grāvju plānošanā, izmantojot reljefa datus. Izmantotais emisijas akumulācijas algoritms ļauj identificēt ūdens pārvietošanās virzienu reljefā un klasificēt ūdens emisijas pēc sateces baseina izmēra, kas tās veido. Šī informācija ir būtiska, plānojot grāvju izmērus. Izmantojot DTW gruntsūdens dziļuma modelēšanas metodiku, var veikt arī meliorācijas grāvju izveidošanas ietekmes modelēšanu, balstoties uz emisijas akumulācijas virzienu un apjomu. Modelējot jauno grāvju ietekmi uz gruntsūdens līmeņa dziļumu, novērotas vairākas nepilnības, piemēram, modelis nespēj ņemt vērā grāvja dziļuma izmaiņas. Tāpat, modelis pēc jaunu grāvju izveidošanas pārvērtē gruntsūdens līmeni (norāda uz pārmitriem apstākļiem) vietās, kur meliorācijas grāvja tuvumā atrodas citas emisijas akumulācijas vietas, bet tajās nav izveidots grāvis. Ņemot vērā šos pētījuma ietvaros izstrādātās metodikas pagaidām vēl neatrisinātās nepilnības, nepieciešams turpināt darbu, lai modelēšanā iekļautu grāvja dziļuma parametrus un to ietekmi uz blakus teritorijām.

7.3. Izstrādāt modelēšanas instrumentus Hg, SEG emisiju un biogēno

elementu izneses aprēķiniem

Pētījuma mērķis ir raksturot evapotranspirācijas, reljefa un citu darbību datu pielietošanas iespējas ūdens noteces prognozēšanai un netiešo SEG emisiju un ķīmisko elementu izneses novērtēšanai. 2023. gadā iegūti sākotnējie rezultāti par evapotranspirāciju, noteci un izšķīdušā organiskā oglekļa (DOC) noteci no kūdrājiem ar dažādiem zemes lietojuma veidiem.

Saskaņā ar Ziemeļeiropas un Baltijas valstīs veiktu pētījumu rezultātiem, slāpekļa savienojumu notece no meliorētām kūdras augsnēm ir no 10 līdz 25 kg ha⁻¹ gadā. Slāpekļa savienojumu koncentrācijas var ievērojami palielināties sniega kušanas periodos (Mattsson et al., 2003). Pētījumos Norvēģijā konstatēts, ka meliorētās kūdras augsnēs slāpekļa savienojumu notece mainās atkarībā no zemes apsaimniekošanas prakses, sasniedzot pat 30 kg ha⁻¹ gadā intensīvi apsaimniekotās teritorijās, bet mazāki noteces rādītāji ir reģionos ar minimālu cilvēka saimnieciskās darbības ietekmi (Kløve et al., 2010).

Pētījumā Somijā fosfora savienojumu notece, lai arī ievērojami mazāka nekā slāpekļa savienojumu notece, atbilst 0,2-0,5 kg ha⁻¹ gadā (Väänänen et al., 2008). Pētījumos Somijā konstatēts, ka fosfora savienojumu koncentrācija noteces ūdeņos var pieaugt līdz 0,15 mg L⁻¹ intensīvu lietusgāžu laikā, kas veicina fosfora izskalošanos no augsnēs virskārtas (Westman & Laiho, 2003). Citā pētījumā Zviedrijā fosfora savienojumu zudumi no meliorētajām kūdras augsnēm meža zemēs pēc mēslošanas pieauga līdz pat 1 kg ha⁻¹ gadā, fosfora savienojumu saturam ūdenī pieaugot pēc periodiem ar lielu nokrišņu daudzumu (Piirainen et al., 2013).

Pētījumā Zviedrijā kālija savienojumu noteces rādītāji ir no 5 līdz 15 kg ha⁻¹ gadā, un kālija savienojumu koncentrācijas noteces ūdenī ir 1-4 mg l⁻¹. Koncentrāciju izmaiņas galvenokārt saistītas ar kūdras ķīmiskajām īpašībām un veģetācijas sastāvu (Piirainen et al., 2013). Līdzīgos pētījumos Somijā konstatēts, ka kālija koncentrācijas var pieaugt līdz 6 mg L⁻¹ (Silfverberg & Moilanen, 2008; Silvan, 2004). Šīs izmaiņas ir saistītas ar augsnēs minerālvielu sastāvu un reģiona veģetāciju, kur kūdras augsnēs ar blīvu veģetāciju parasti rada mazākus zudumus.

7.3.1. Metodika

Salīdzinot ar 2023. gadu, 2024. gadā papildus izvērtēti evapotranspirāciju un noteci ietekmējošie faktori, kā arī aprēķināti DOC emisiju faktori meliorētām organiskajām augsnēm Latvijā, atkarībā no zemes lietojuma veida. Šo rezultātu iegūšanai, izmantoti ikmēneša gruntsūdens un augsnēs ūdens ķīmisko analīžu rezultāti, dažādi vides parametri, kā gaisa un augsnēs temperatūra, gruntsūdens līmenis, kā arī tuvāko meteoroloģisko staciju dati, lai aprēķinātu ikmēneša DOC noteci un analizētu to ietekmējošos faktorus. Pētījumā izmantoti dažādu Latvijā un tuvējās ārvalstīs iegūtu pētījumu un vides monitoringa dati.

Lielākā DOC koncentrācija konstatēta priedes (*Pinus sylvestris* L.) audzēs (113,7 ± 4,4 mg l⁻¹) un kūdras ieguves vietās (109,7 ± 14,1 mg l⁻¹), bet mazākās koncentrācijas – bērza (*Betula pendula* Roth) audzēs (51,8 ± 8,1 mg l⁻¹) un aramzemēs (14,2 ± 1,6 mg l⁻¹). Statistiski būtiskas atšķirības DOC koncentrācijā konstatētas starp visiem vērtētajiem zemes izmantošanas veidiem. Statistiski būtiskas korelācijas konstatētas starp DOC koncentrāciju un vairākiem gruntsūdens ķīmiskajiem parametriem, tajā skaitā pH, elektrovadītspēja un Ca, Mg, K koncentrācija. Lielākā DOC notece novērota kūdras ieguves vietās (513,1 ± 38,7 kg ha⁻¹ gadā), bet mazākā – zālajos (61,9 ± 4,4 kg ha⁻¹ gadā), kur Ca un Mg koncentrācija gruntsūdenī un elektrovadītspēja bija lielāka. Līdzšinējie rezultāti ir publicēti žurnālā Land, rakstā “Quantifying Dissolved Organic Carbon Efflux from Drained Peatlands in Hemiboreal Latvia” (Meļņiks et al., 2024).

7.3.2. Rezultāti

Slāpekļis, fosfors un kālijs

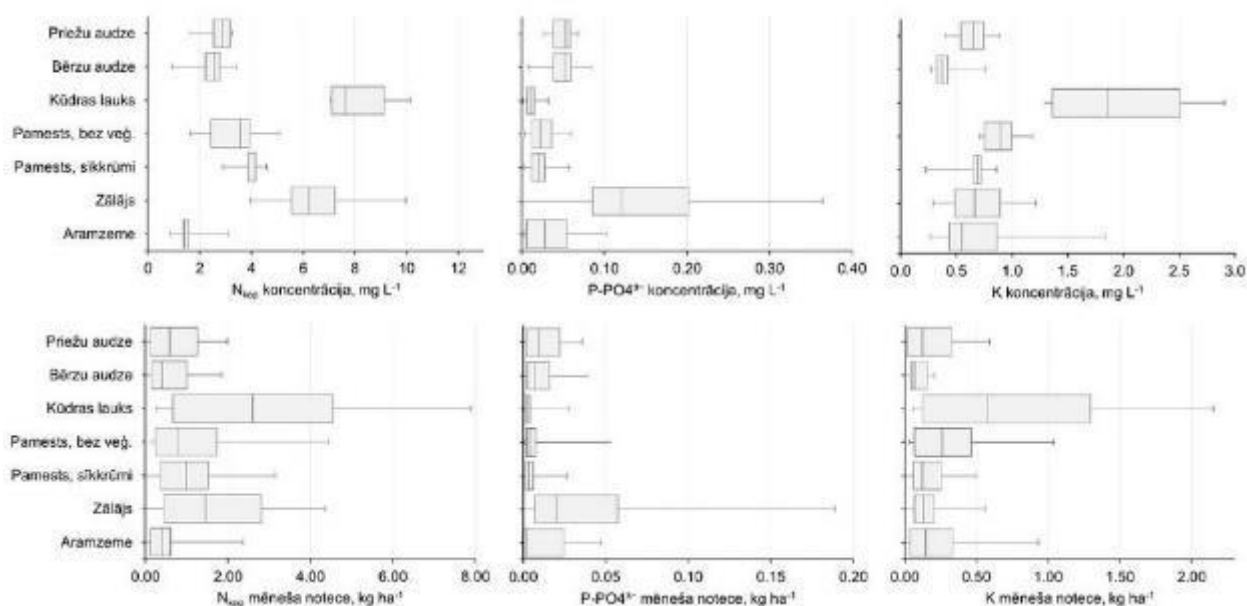
Gada vidējā slāpekļa koncentrācija GŪ paraugos ir no $1,57 \pm 0,54 \text{ mg l}^{-1}$ aramzemēs līdz $8,11 \pm 1,21 \text{ mg l}^{-1}$ kūdras ieguves laukos (Att. 7.10). Bērza audzēs gada vidējā koncentrācija ir $2,46 \pm 0,68 \text{ mg l}^{-1}$, bet priedes audzēs $2,78 \pm 0,48 \text{ mg l}^{-1}$. Vidējā maksimālā slāpekļa koncentrācija ir no $3,09 \text{ mg l}^{-1}$ aramzemēs novembrī līdz $10,16 \text{ mg l}^{-1}$ kūdras ieguves vietās oktobrī. Mazākā vidējā minimālā slāpekļa koncentrācija ($0,85 \text{ mg l}^{-1}$) konstatēta aramzemēs augustā, bet lielākā ($7,04 \text{ mg l}^{-1}$) kūdras ieguves vietās maijā. Slāpekļa koncentrācijas izmaiņas visos zemes izmantošanas veidos, izņemot zālājus, ir ar līdzīgu tendenci – mazāka koncentrācija konstatētas, sākoties veģetācijas sezonai aprīlī un maijā, bet lielākā – veģetācijas sezonas beigās oktobrī un novembrī.

Lielākā slāpekļa notece 2022. gadā bija novembrī, vidēji visos pētījuma objektos vidēji $3,18 \pm 1,36 \text{ kg ha}^{-1} \text{ m}^{-1}$, bet mazākā – $0,06 \pm 0,1 \text{ kg ha}^{-1} \text{ m}^{-1}$ jūnijā, kad notece veidojās tikai kūdras ieguves vietās un pamestās kūdras ieguves vietās bez veģetācijas. Mazākā vidējā mēneša vidējā slāpekļa notece, kā arī variācija konstatēta priedes ($0,73 \pm 0,66 \text{ kg ha}^{-1} \text{ m}^{-1}$) un bērza audzēs ($0,64 \pm 0,60 \text{ kg ha}^{-1} \text{ m}^{-1}$).

Gada vidējā fosfātu koncentrācija ievāktajos ūdens paraugos variē no $0,013 \pm 0,009 \text{ mg l}^{-1}$ kūdras ieguves vietās līdz $0,148 \pm 0,106 \text{ mg l}^{-1}$ zālājos. Priedes un bērza audzēs gada vidējā fosfora koncentrācija augsnes ūdenī būtiski neatšķiras, attiecīgi, $0,049 \pm 0,012 \text{ mg l}^{-1}$ un $0,049 \pm 0,020 \text{ mg l}^{-1}$. Vidējā maksimālā fosfora koncentrācija ir no $0,032 \text{ mg l}^{-1}$ kūdras ieguves vietās augustā līdz $0,364 \text{ mg l}^{-1}$ zālājos decembrī. Mazākā vidējā minimālā fosfora koncentrācija ($0,001 \text{ mg l}^{-1}$) konstatēta kūdras ieguves vietās septembrī, bet lielākā ($0,027 \text{ mg l}^{-1}$) priedes audzēs janvārī. Visos pētījuma objektos fosfora koncentrācijas izmaiņām gada laikā ir līdzīgas tendences, tai palielinoties jūnijā un jūlijā, bet samazinoties no novembra līdz janvārim. Izņēmums ir objekti zālājos, kur konstatēts būtisks fosfora koncentrācijas pieaugums no oktobra līdz decembrim.

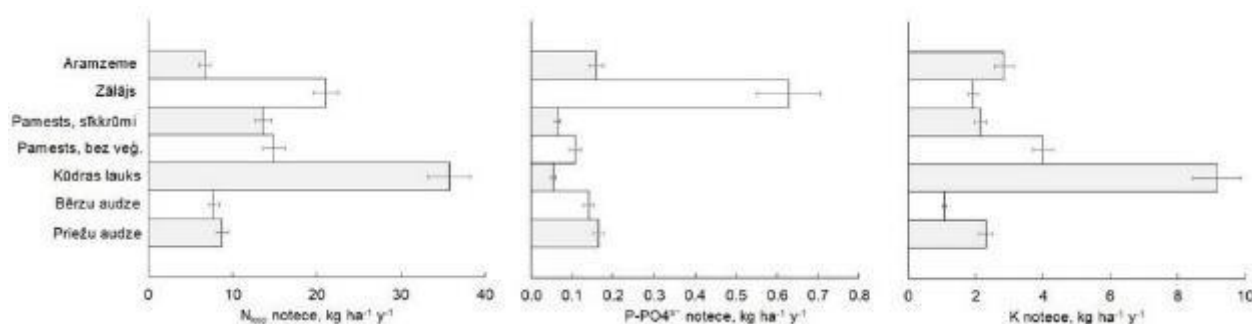
Lielākā fosfora savienojumu mēneša vidējā notece konstatēta zālājos ($0,054 \pm 0,077 \text{ kg ha}^{-1} \text{ m}^{-1}$), bet mazākā – kūdras ieguves vietās ($0,005 \pm 0,007 \text{ kg ha}^{-1} \text{ m}^{-1}$). Vidēji lielākā fosfora savienojumu notece bija decembrī ($0,051 \pm 0,074 \text{ kg ha}^{-1} \text{ m}^{-1}$), bet mazākā – jūnijā, kad noteces kļuvas robežās nebija.

Lielākā gada vidējā kālija savienojumu koncentrācija konstatēta kūdras ieguves vietās ($1,96 \pm 0,62 \text{ mg l}^{-1}$), bet mazākā – bērza audzēs ($0,40 \pm 0,13 \text{ mg l}^{-1}$). Vidējā maksimālā kālija savienojumu koncentrācija ir no $2,91 \text{ mg l}^{-1}$ kūdras ieguves vietās oktobrī, līdz $0,76 \text{ mg l}^{-1}$ bērza audzēs februārī. Mazākā vidējā minimālā kālija savienojumu koncentrācija ($0,23 \text{ mg l}^{-1}$) konstatēta pamestās kūdras ieguves vietās ar sīkrūmu veģetāciju augustā, bet lielākā ($1,29 \text{ mg l}^{-1}$) kūdras ieguves vietās aprīlī. Kālija koncentrāciju izmaiņas gada laikā dažādos pētījumu objektos būtiski atšķiras. Stabīlākas vērtības, bet ar izteiktām izmaiņām, konstatētas parauglaukumos, kur nenotiek aktīva saimnieciskā darbība (pamestās kūdras ieguves vietās ar un bez veģetācijas, kā arī priedes un bērza audzēs), bet lielākas izmaiņas konstatētas kūdras ieguves vietās, zālājos un aramzemēs, kas var būt saistīts ar saimnieciskās darbības (augšnes apstrādes, ražas novākšanas, mēslojuma ienešanas u.c.) radīto ietekmi.



Att. 7.10. Slāpekļa, fosfora, kālija koncentrācijas un mēneša noteces mainība

Gada vidējā kopējā slāpekļa savienojumu notece visos pētījuma objektos ir $15,52 \pm 9,47$ kg ha⁻¹ gadā (Att. 7.11). Augstākā gada slāpekļa notece konstatēta kūdras ieguves vietās ($35,78 \pm 2,41$ kg ha⁻¹ gadā) un zālajos ($21,08 \pm 1,42$ kg ha⁻¹ gadā), bet mazākā – aramzemēs ($6,74 \pm 0,64$ kg ha⁻¹ gadā) un bērza audzēs ($7,75 \pm 0,60$ kg ha⁻¹ gadā). Vidējā ikgadējā fosfora savienojumu notece visos pētījuma objektos ir $0,18 \pm 0,16$ kg ha⁻¹ gadā. Mazākā ikgadējā fosfora savienojumu notece ir kūdras ieguves vietās ($0,05 \pm 0,007$ kg ha⁻¹ gadā), bet lielākā – zālajos ($0,62 \pm 0,07$ kg ha⁻¹ gadā). Gada vidējā kālija savienojumu notece ir $3,34 \pm 2,51$ kg ha⁻¹ gadā. Lielākā ikgadējā kālija savienojumu notece konstatēta kūdras ieguves vietās ($9,16 \pm 2,51$ kg ha⁻¹ gadā), bet mazākā – bērza audzēs ($1,06 \pm 2,51$ kg ha⁻¹ gadā).



Att. 7.11. Slāpekļa, fosfora, kālija gada notece pētījuma objektos ar dažādiem zemes izmantošanas veidiem 2022. gadā

Dzīvsudrabs

Šī pētījuma ietvaros kopējā dzīvsudraba (THg) un metildzīvsudraba (MeHg) koncentrācija ūdens paraugos nav noteikta, bet vidējās vērtības ir iegūtas, izmantojot vairākus literatūras avotus (Huang et al., 2024; Kļaviņa et al., 2021; Negrazis et al., 2022; Saniewska et al., 2014). Šajos pētījumos Hg koncentrācija analizēta mežos ar organiskām augsnēm, tajā skaitā vērtējot saimnieciskās darbības intensitāti. Visos pētījumos secināts, ka THg un MeHg koncentrācija sezonāli variē. Lielākā THg un MeHg koncentrācija ir pavasara un vasaras mēnešos meliorētās teritorijās, kurās notiek saimnieciskā darbība ($1,8\text{--}4,05$ ng L⁻¹), bet mazākā koncentrācija ziemas

mēnešos, kad tā pietuvojas noteikšanas metodes apakšējai robežai ($0,05-0,1 \text{ ng L}^{-1}$). Gada vidējā MeHg koncentrācija pētījumā Latvijā (Kļaviņa et al., 2021) ir no $0,27 \pm 0,1 \text{ ng L}^{-1}$ dabiski mitrās platībās līdz $1,36 \pm 0,91 \text{ ng L}^{-1}$ meliorētā platībā ar nesenu saimniecisko darbību. Iepriekš uzskaitītajos pētījumos Somijā un Zviedrijā THg un MeHg koncentrācija variē no $0,15$ līdz $3,8 \text{ ng L}^{-1}$, norādot uz līdzīgām sezonālām izmaiņām. Lielākā koncentrācija visos pētījumos konstatēta vasaras mēnešos. Lielākā MeHg koncentrācija konstatēta reljefa pazeminājumos un lokālās beznoteces ieplakās, kas ir pretrunā ar atziņu, ka vidēji mazāka šo savienojumu koncentrācija ir platībās ar dabiski mitrām augsnēm.

Lai aprēķinātu gada vidējo MeHg noteci, izmantojām šo savienojumu koncentrācijas no iepriekš uzskaitītajiem Latvijā, Zviedrijā un Somijā veiktajiem pētījumiem, kā arī mūsu pētījumā aprēķināto ikmēneša noteci bērza un priedes audzēs. Ņemot vērā būtiskas koncentrācijas variācijas, kas novērojamas gan sezonāli, gan telpiski (piemēram, visos pētījumos ir norādīts uz koncentrācijas ekstrēmiem lokālās reljefa ieplakās un pēc mežizstrādes), izmantojām vidējo MeHg koncentrāciju meža parauglaukumos – attiecīgi $0,8 \text{ ng l}^{-1}$.

Aprēķinu rezultāti parāda, ka gada kopējā MeHg notece priedes audzēs ir $2,46 \pm 0,18 \text{ mg ha}^{-1}$ gadā, bet bērza audzēs – $2,45 \pm 0,17 \text{ mg ha}^{-1}$ gadā.

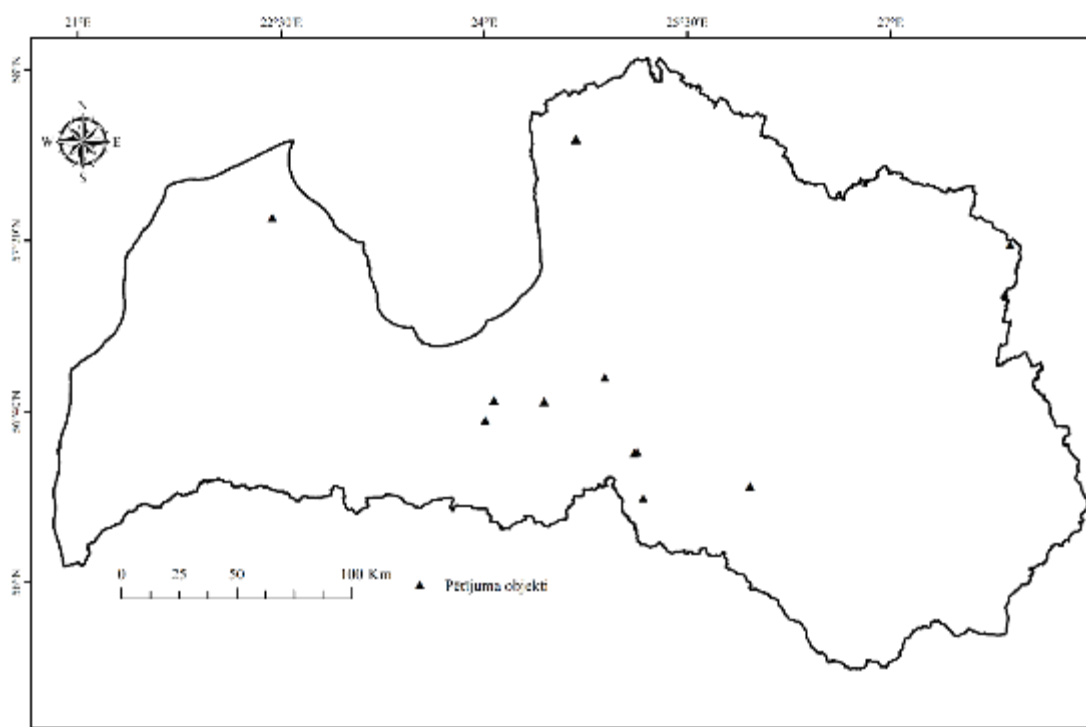
Secinājumi

Mūsu izmantotā metodika organiskā izšķīdušā oglekļa, kā arī biogēno elementu noteces aprēķināšanai un modelēšanai norāda uz līdzīgām vielu noteces tendencēm, kā līdzīgos pētījumos mērenajā un boreālajā klimata joslā. Vielu koncentrācijas gruntsūdenī galvenokārt ir atkarīgas no augsnes ķīmiskajām īpašībām, veģetācijas, lietojuma veida un saimnieciskās darbības. Šī iemesla dēļ, biogēno elementu koncentrācijām gada laikā novērojama liela mainība un ir būtiski turpināt pētījumus ievācot datus par ikmēneša dažādu elementu koncentrācijām gruntsūdenī, lai iegūtu pilnīgāku datu kopu un novērtētu dažādu faktoru ietekmi uz to mainību. Nepieciešams arī turpināt pētījumus, lai izmantojot iegūtos datus par vielu koncentrācijām un evapotranspirācijas izmaiņām dažādos zemes izmantošanas veidos, raksturotu un aprēķinātu noteci sateces baseinu līmenī un novērtētu zemes lietojuma maiņas un saimnieciskās darbības ietekmi uz noteci.

8. OGLEKĻA BILANCE VECĀS MEŽAUDZĒS

8.1. Empīrisku datu ieguve un vienādojumu izstrādāšana oglekļa aprites un SEG emisiju raksturošanai bioloģiski vecās un pieaugušās audzēs kūdreņos

Pētāmais objekts ir vecas melnalkšņu (*Alnus glutinosa*) mežaudzes dumbrājā (Db - *Dryopteris-caricosa*) Latvijā (Att. 8.1). Saskaņā ar plānoto darbu izpildes plānu kopā atlasītas 24 mežaudzes. Iepriekšējā pētījuma etapā uzmērītas 11 mežaudzes šaurlapu kūdreņī, vecumā no 111 līdz 146 gadiem. Šajā pētījuma etapā uzmērītas atlikušās 13 mežaudzes dumbrājā, vecumā no 112 līdz 147 gadiem (Tab. 8.1). Saskaņā ar iepriekšējos etapos aprakstīto metodiku ierīkoti parauglaukumi un veikta kokaudzes un atmirušās koksnes uzmērīšana oglekļa (C) uzkrājuma raksturošanai dzīvo koku biomasā, atmirušajā koksnē un augsnē.



Att. 8.1. Pētāmo objektu izvietojums

Tab. 8.1 Pētāmo objektu raksturojums

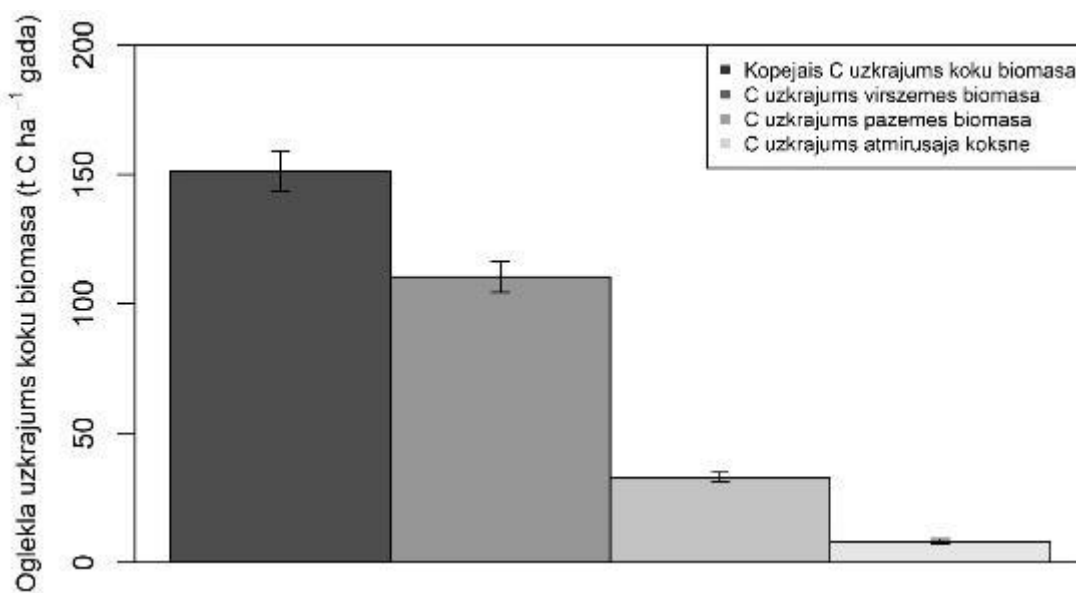
NPK	Koka suga	Atrašanās vieta (kv.apg_kv_nog)	Meža tips	Vecums	C uzkrājums dzīvajā biomasā, t C ha ⁻¹
1	Melnalksnis	305_83_1	Db	124	99,5
2	Melnalksnis	402_352_10	Db	143	101,9
3	Melnalksnis	402_361_5	Db	123	113,8
4	Melnalksnis	501_140_16	Db	126	114,7
5	Melnalksnis	505_193_27	Db	127	129,1

NPK	Koka suga	Atrašanās vieta (kv.apg_kv_nog)	Meža tips	Vecums	C uzkrājums dzīvajā biomasā, t C ha ⁻¹
6	Melnalksnis	506_142_17	Db	147	109,2
7	Melnalksnis	506_144_9	Db	112	76,3
8	Melnalksnis	511_49_16	Db	133	122,2
9	Melnalksnis	604_406_5	Db	133	85,2
10	Melnalksnis	610_119_7	Db	124	55,7
11	Melnalksnis	610_215_8	Db	124	112,0
12	Melnalksnis	703_420_22	Db	127	49,5
13	Melnalksnis	804_232_6	Db	114	84,5

Salīdzinājumam izmantoti dati no meža statistiskās inventarizācijas (MRM) par jaunākām melnalkšņu audzēm dumbrājā. Audžu vecums variē no 21 līdz 95 gadiem, tādējādi nodrošinot objektīvi salīdzināmus datus vecām audzēm.

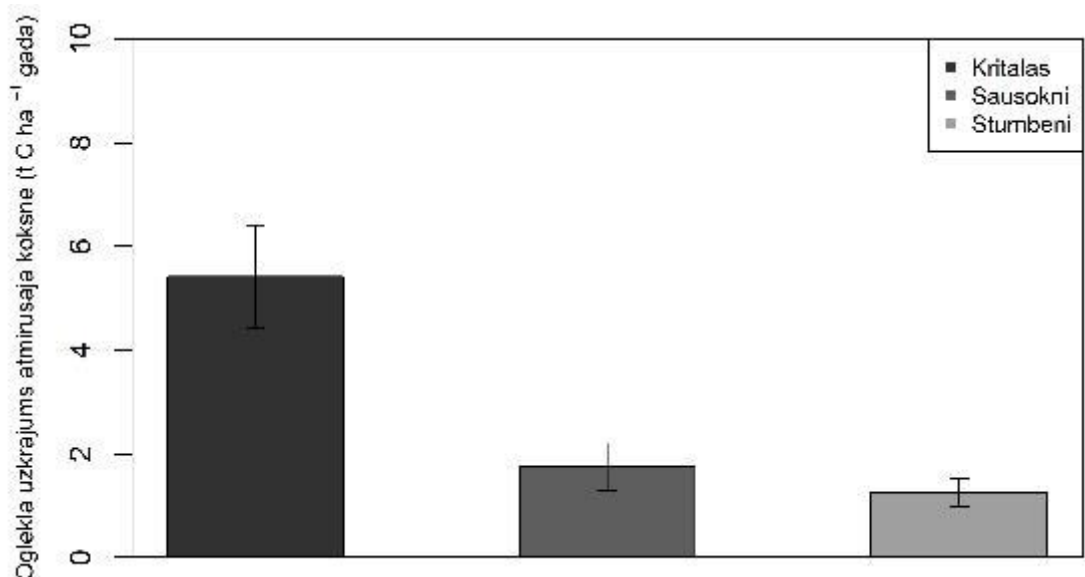
Vecās melnalkšņu audzēs dumbrājā novērotas statistiski būtiskas ($p > 0.001$) atšķirības C uzkrājumā starp visām analizētajām frakcijām: virszemes, pazemes, atmirušās koksnes un kopējā biomasā (Att. 8.2). Vidējais C uzkrājums (dzīvo koku biomasā + atmirusī koksne) melnalkšņu audzēs šaurlapu kūdrenī ir $151,7 \pm 10,3$ t C ha⁻¹ ($\pm 95\%$ ticamības intervāls). Vidējais C uzkrājums virszemes biomasā ir $110,4 \pm 2,2$ t C ha⁻¹, bet pazemes biomasā $32,9 \pm 7,1$ t C ha⁻¹. C uzkrājums atmirušajā koksnē ir $8,4 \pm 1,0$ t C ha⁻¹. Konstatēts, ka, pieaugot mežaudzes vecumam, palielinās oglekļa uzkrājums dzīvo koku biomasā.

Koku virszemes biomasā (stumbrs + zari) uzkrātais C apjoms ir 73%, pazemes biomasā (balstsaknes, uzsūcošās saknes un celms) – 22%, bet atmirusī koksne – 5%, no vidējā kopējā uzkrātā C apjoma.



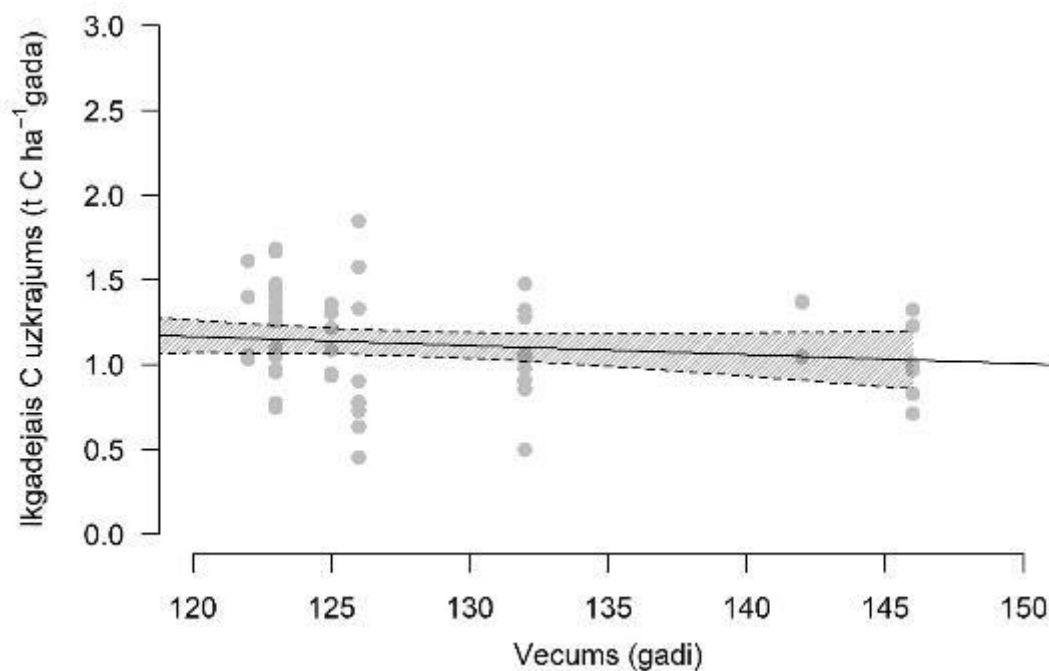
Att. 8.2. Vidējais oglekļa (C) uzkrājums šaurlapu kūdrenī dažādās koka frakcijās un atmirušajā koksnē ($\pm 95\%$ ticamības intervāls)

Atmirušās koksnes lielākā grupa ir kritālas – $5,4 \pm 1,0 \text{ t C ha}^{-1}$, otru lielāko C uzkrājumu veido sausokņi – $1,7 \pm 0,5 \text{ t C ha}^{-1}$, bet trešā lielākā grupa ir stumbeņi – $1,3 \pm 0,3 \text{ t C ha}^{-1}$ (Att. 8.3). Kritālās uzkrātais C apjoms veido 64%, sausokņos 20%, bet stumbeņos 16% no kopējā C uzkrājums atmirušajā koksne. Oglekļa uzkrājuma atšķirības ir statistiski būtiskas ($p < 0,001$) starp visām atmirušās koksnes frakcijām.



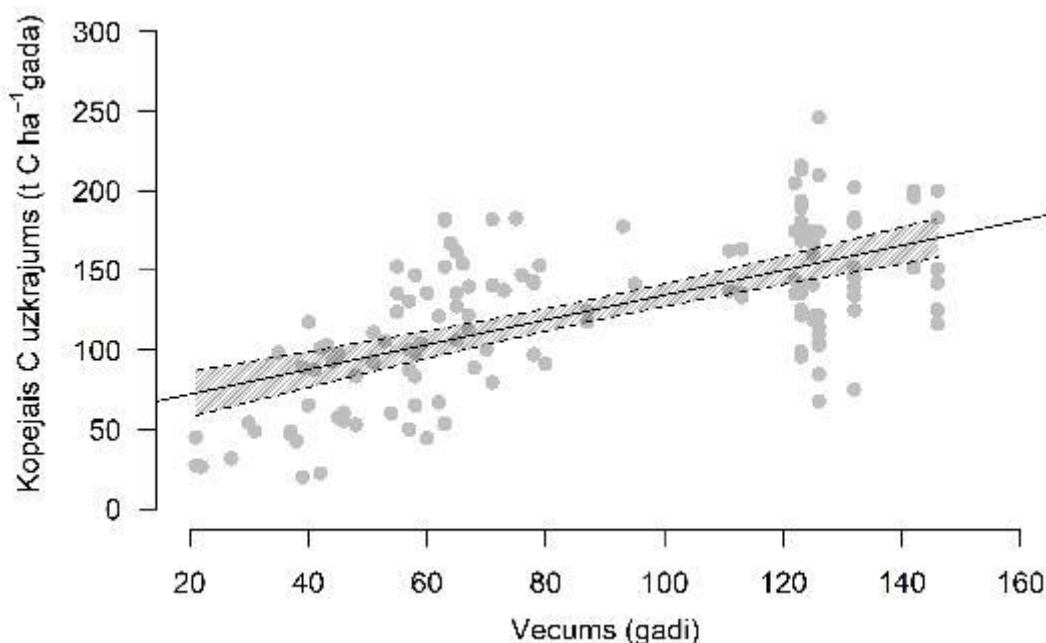
Att. 8.3. Vidējais C uzkrājums dažādās atmirušās koksnes frakcijās ($\pm 95\%$ ticamības intervāls)

Ikgadējais C uzkrājums dzīvo koku biomasā un atmirušajā koksne raksturo C uzkrājuma dinamiku un izmaiņas laikā (Att. 8.4). Vidējais ikgadējais C uzkrājuma pieaugums vecās melnalkšņu audzēs dumbrājā ir $1,1 \pm 0,07 \text{ t C ha}^{-1}$ gadā.



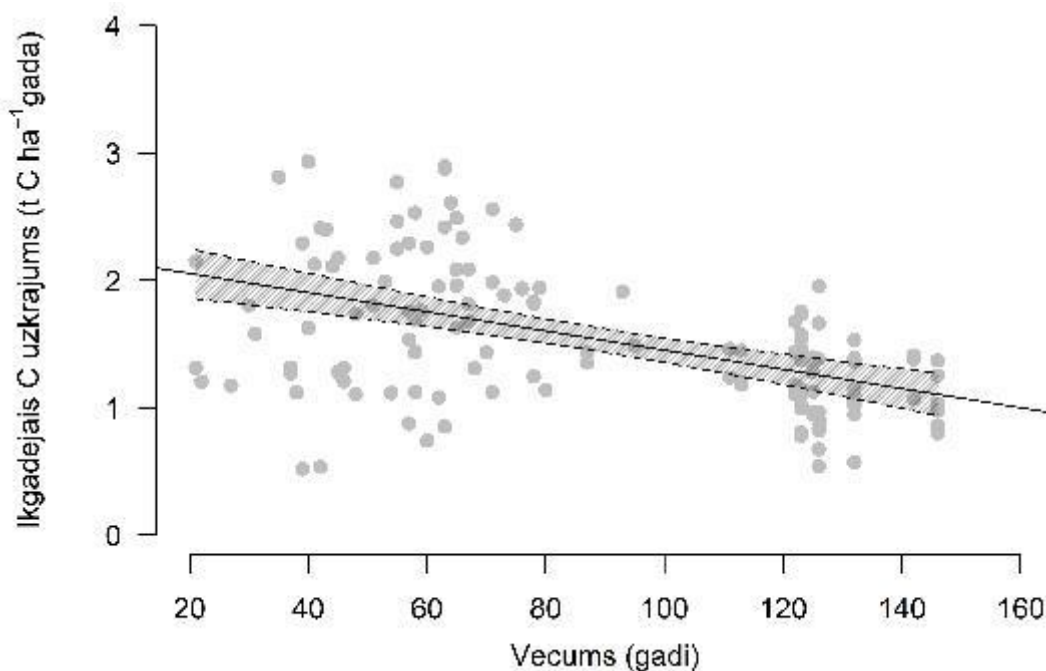
Att. 8.4. Ikgadējais C uzkrājums biomasā un atmirušajā koksne atkarībā no audzes vecuma vecās audzēs (pelēkais iekrāsojums apzīmē $\pm 95\%$ ticamības intervālu)

Lai iegūtu ieskatu par oglekļa uzkrājuma atšķirībām jaunākās melnalkšņu audzēs salīdzināšanai izmantoti MRM dati par jaunākām audzēm organiskajās augsnēs. Atlasīto MRM audžu vidējais vecums ir 57 ± 4 gadi. Kopējais C uzkrājums vecās audzēs ir būtiski ($p < 0,001$) lielāks nekā jaunākās audzēs ($104,6 \pm 11,5 \text{ t C ha}^{-1}$), turklāt kopējais oglekļa uzkrājums vecās mežaudzēs palielinās pieaugot vecumam, un vecuma ietekme ir statistiski būtiska (Att. 8.5). Rezultāti liecina par līdzīgu atmirušās koksnes C daudzumu jaunākās mežaudzēs ($6,8 \pm 1,3 \text{ t C ha}^{-1}$) salīdzinājumā ar vecām. Oglekļa uzkrājums dažādās koka frakcijās proporcionāli neatšķiras no vecām audzēm. Jaunākās audzēs virszemes biomasā (stumbrs + zari) uzkrātais C apjoms veido 75%, pazemes biomasā sastāda 18%, bet atmirusī koksne veido 7% no vidējā uzkrātā C apjoma.



Att. 8.5. Kopējais C uzkrājums biomasā un atmirušajā koksne atkarībā no audzes vecuma vecās un jaunākās melnalkšņu audzēs (pelēkais iekrāsojums apzīmē $\pm 95\%$ ticamības intervālu)

Pētījumā konstatēts, ka ikgadējais C uzkrājums samazinās pieaugot audzes vecumam (Att. 8.6), turklāt vecuma ietekme ir statistiski būtiska ($p < 0,05$). Salīdzinot ikgadējo C uzkrājumu vecās audzēs ar jaunākām audzēm novērotas būtiskas ($p < 0,05$) atšķirības. Jaunākās audzēs ikgadējais C uzkrājums ir būtiski lielāks ($1,8 \pm 0,2 \text{ t C ha}^{-1} \text{ gadā}$).



Att. 8.6. Ikgadējais C uzkrājums biomasā un atmirušajā koksne atkarībā no audzes vecuma vecās un jaunākās melnalkšņu audzēs (pelēkais iekrāsojums apzīmē $\pm 95\%$ ticamības intervālu)

Kopā līdz šim ievākti visi paredzētie paraugi (26 pētījuma objekti) no veco melnalkšņu audzēm ar organiskām augsnēm (Tab. 8.2), un visi paraugi ir LVMI Silava meža vides laboratorijā, tālākai apstrādei pēc SEG inventarizācijā apstiprinātas metodikas (Att. 8.7).

Tab. 8.2 Augsnes paraugu ievākšanai atlasīto veco melnalkšņu audžu raksturojums šaurlapu kūdrenī un dumbrājā

NPK	Koka suga	Atrašanās vieta (kv.apg_kv_nog)	Meža tips	Vecums
1	Melnalksnis	104_155_23	Ks	125
2	Melnalksnis	111_141_1	Ks	136
3	Melnalksnis	401_96_12	Ks	128
4	Melnalksnis	405_273_3	Ks	123
5	Melnalksnis	405_402_7	Ks	123
6	Melnalksnis	406_144_11	Ks	133
7	Melnalksnis	501_474_1	Ks	131
8	Melnalksnis	507_320_7	Ks	132
9	Melnalksnis	401_51_10	Ks	133
10	Melnalksnis	604_74_7	Ks	134
11	Melnalksnis	610_215_8	Ks	124
12	Melnalksnis	804_157_16	Ks	144
13	Melnalksnis	305_83_1	Db	124
14	Melnalksnis	402_352_10	Db	143
15	Melnalksnis	402_361_5	Db	123
16	Melnalksnis	501_140_16	Db	126
17	Melnalksnis	505_193_27	Db	127
18	Melnalksnis	506_142_17	Db	147
19	Melnalksnis	506_144_9	Db	112
20	Melnalksnis	507_306_41	Db	112
21	Melnalksnis	511_49_16	Db	133
22	Melnalksnis	604_92_40	Db	134
23	Melnalksnis	604_406_5	Db	133
24	Melnalksnis	610_119_7	Db	124
25	Melnalksnis	703_420_22	Db	127
26	Melnalksnis	804_232_6	Db	114



Att. 8.7. Augsnes paraugu ievākšanas process

Pētījumā secināts, ka kopējais oglekļa uzkrājums vecās mežaudzēs palielinās, pieaugot vecumam, taču palielinās arī dabisko traucējumu risks, kas var būtiski ietekmēt C uzkrājumu. No klimata pārmaiņu mazināšanas mērķu konteksta vecas mežaudzes nav efektīvākais oglekļa piesaistes avots, jo jaunākas audzes ir noturīgākas pret dabiskajiem traucējumiem un spēj efektīvāk piesaistīt oglekli dzīvo koku biomasā, attiecīgi, arī pārējās oglekļa krātuvēs. Ikgadējais C uzkrājums jaunākās melnalkšņu audzēs dumbrājā vidēji ir $1,8 \text{ t C ha}^{-1}$ gadā, un tas ir par 48% lielāks nekā vecās melnalkšņa audzēs ($1,1 \text{ t C ha}^{-1}$ gadā). No klimata pārmaiņu mazināšanas mērķu konteksta platību izslēgšana no saimnieciskās darbības un vecu mežu platības palielināšanās pieļaujama platībās ar zemu ikgadējo C piesaistes spēju.

Pētījuma rezultāti apkopoti zinātniskā rakstā (Samariks, V., Jōgiste, K., Vodde, F., Rendenieks, Z., Bāders, E., Janons, Ā. Deadwood carbon pools in old-growth coniferous forest stands in hemiboreal region), kas iesniegts publicēšanai žurnālā *Forests*. Galvenās atziņas sagatavotajā rakstā:

- priede un egle ir galvenās mežsaimniecības mērķa sugas Ziemeļeiropā, turklāt meža ekosistēmas nodrošina oglekļa uzkrājumu dažādās krātuvēs ar potenciālu pozitīvu devumu klimata pārmaiņu mērķu sasniegšanā. Atmirušo koksni uzskata par nozīmīgu krātuvi gan bioloģiskās daudzveidības saglabāšanai, gan oglekļa uzkrāšanai. Tāpēc ir būtiski novērtēt arī atmirušās koksnes oglekļa krātuves lielumu precīzākai ekosistēmas oglekļa bilances izvērtēšanai. Pētījumā tika analizētas 95 vecās skujkoku audzes (vidējais vecums no 100-218 gadi) Latvijā. Tika pētīti un vērtēti atmirušās koksnes veidi, sadalīšanās pakāpes un oglekļa uzkrājums. Pētījuma mērķis bija kvantitatīvi noteikt atmirušās koksnes īpašības mežaudzēs ar sausām minerālaugsnēm, periodiski pārmitrām organiskajām augsnēm un meliorētām organiskajām augsnēm;
- vidējais atmirušās koksnes oglekļa uzkrājums skujkoku audzēs svārstījās no $4,6 \text{ C t ha}^{-1}$ līdz $14,9 \text{ C t ha}^{-1}$. Mazākais oglekļa uzkrājums tika konstatēts egļu audzēs ar periodiski pārmitrām organiskajām augsnēm, bet lielākais – priežu audzēs ar minerālaugsnēm.

Oglekļa aprite meža ekosistēmā

Visizplatītākais atmirušās koksnes veids priežu audzēs bija sausokņi, bet egļu audzēs – kritālas. Visos analizētajos augsnes tipos un dominējošo koku sugu audzēs tika konstatēta statistiski nozīmīga saistība starp atmirušās koksnes vidējo diametru un oglekļa uzkrājumu. Šie rezultāti uzsver skujkoku atmirušo koku būtisko lomu kā stabilām un uzticamām oglekļa krātuvēm hemiboreālajā reģionā, kas nodrošina gan oglekļa krājumus, gan bioloģiskās daudzveidības saglabāšanu.

LITERATŪRA

- Allikmäe, E., Laarmann, D., & Korjus, H. (2017). Vitality Assessment of Visually Healthy Trees in Estonia. *Forests*, 8(7), 223. <https://doi.org/10.3390/f8070223>
- 1) Arhipova, N., Gaitnieks, T., Donis, J., Stenlid, J., & Vasaitis, R. (2011a). Butt rot incidence, causal fungi, and related yield loss in picea abies stands of latvia. *Canadian Journal of Forest Research*, 41(12), 2337–2345. <https://doi.org/10.1139/X11-141>
 - 2) Arhipova, N., Gaitnieks, T., Donis, J., Stenlid, J., & Vasaitis, R. (2011b). Decay, yield loss and associated fungi in stands of grey alder (*Alnus incana*) in Latvia. *Forestry*, 84(4), 337–348. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpr018>
 - 3) AS Latvijas valsts meži. (2022). *Apaļo kokmateriālu kvalitātes apraksts*. https://www.lvm.lv/images/lvm/koksnes_produkta/aktualitates_un_piedavajumi/2021/2021_10_04_istermina_vsn/3_pielikums_apalo_kokmaterialu_kvalitates_apraksts.pdf
 - 4) Bārdule, A., Butlers, A., Spalva, G., Ivanovs, J., Meļņiks, R. N., Līcīte, I., & Lazdiņš, A. (2023). The Surface-to-Atmosphere GHG Fluxes in Rewetted and Permanently Flooded Former Peat Extraction Areas Compared to Pristine Peatland in Hemiboreal Latvia. *Water*, 15(10), 1954. <https://doi.org/10.3390/w15101954>
 - 5) Bārdule, A., Liepiņš, J., Liepiņš, K., Stola, J., Butlers, A., & Lazdiņš, A. (2021). Variation in Carbon Content among the Major Tree Species in Hemiboreal Forests in Latvia. *Forests*, 12(9), Article 9. <https://doi.org/10.3390/f12091292>
 - 6) Bārdule, A., Meļņiks, R. N., Zvaigzne, Z. A., Purviņa, D., Skranda, I., Prysiachniuk, O., Maliarenko, O., & Lazdiņš, A. (2024). Greenhouse Gas Fluxes from Cranberry and Highbush Blueberry Plantations on Former Peat Extraction Fields Compared to Active Peat Extraction Fields and Pristine Peatlands in Latvia. *Atmosphere*, 15(9), Article 9. <https://doi.org/10.3390/atmos15091102>
 - 7) Bhattacharjee, J., Marttila, H., Haghighi, A. T., Saarimaa, M., Tolvanen, A., Lepistö, A., Futter, M. N., & Kløve, B. (2021). Development of Aerial Photos and LIDAR Data Approaches to Map Spatial and Temporal Evolution of Ditch Networks in Peat-Dominated Catchments. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 147(4), 04021006. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001547](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001547)
 - 8) Bickovskis, K., Samariķs, V., & Jansons, A. (2024). Effect of forest stand thinning on tree biomass carbon stock. *Engineering for Rural Development*, 36–41. <https://doi.org/10.22616/ERDev.2024.23.TF009>
 - 9) Butlers, A., Lazdiņš, A., Kalēja, S., Purviņa, D., Spalva, G., Saule, G., & Bārdule, A. (2023). CH₄ and N₂O Emissions of Undrained and Drained Nutrient-Rich Organic Forest Soil. *Forests*, 14(7), Article 7. <https://doi.org/10.3390/f14071390>
 - 10) Buzacott, A. J. V., Kruijt, B., Bataille, L., Van Giersbergen, Q., Heuts, T. S., Fritz, C., Nouta, R., Erkens, G., Boonman, J., Van Den Berg, M., Van Huissteden, J., & Van Der Velde, Y. (2024). Drivers and Annual Totals of Methane Emissions From Dutch Peatlands. *Global Change Biology*, 30(12), e17590. <https://doi.org/10.1111/gcb.17590>
 - 11) Cieszewski, C. J., & Bailey, R. L. (2000). Generalized Algebraic Difference Approach: Theory Based Derivation of Dynamic Site Equations with Polymorphism and Variable Asymptotes. *Forest Science*, 46(1), 116–126. <https://doi.org/10.1093/forestscience/46.1.116>
 - 12) Cieszewski, C. J., & Strub, M. (2007). Parameter Estimation of Base–Age Invariant Site Index Models: Which Data Structure to Use?—A Discussion. *Forest Science*, 53(5), 552–555. <https://doi.org/10.1093/forestscience/53.5.552>
 - 13) Cieszewski, C. J., & Strub, M. (2018). Comparing properties of self-referencing models based on nonlinear-fixed-effects versus nonlinear-mixed-effects modeling approaches. *Mathematical and Computational Forestry & Natural-Resource Sciences (MCFNS)*, 10(2), Article 2.
 - 14) Dubra, S., Samariķs, V., Līcīte, I., Butlers, A., Purviņa, D., Lupiķis, A., & Jansons, Ā. (2023). Effects of Drainage on Carbon Stock in Hemiboreal Forests: Insights from a 54-Year Study. *Sustainability*, 15(24), Article 24. <https://doi.org/10.3390/su152416622>

- 15) Eggleston, S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., & Kiyoto, T. (Eds.). (2006). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Agriculture, Forestry and Other Land Use. In *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* (Vol. 4, p. 678). Institute for Global Environmental Strategies (IGES).
- 16) Field, C. B., Barros, V. R., & Intergovernmental Panel on Climate Change (Eds.). (2014). *Climate change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability: Working Group II contribution to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- 17) Frey, B., Niklaus, P. A., Kremer, J., Lüscher, P., & Zimmermann, S. (2011). Heavy-Machinery Traffic Impacts Methane Emissions as Well as Methanogen Abundance and Community Structure in Oxidic Forest Soils. *Applied and Environmental Microbiology*, 77(17), 6060–6068.
<https://doi.org/10.1128/AEM.05206-11>
- 18) Hodges, C. S. (1999). *Heterobasidion annosum*. Biology, Ecology, Impact and Control: S. Woodward, J. Stenlid, R. Karjalainen and A. Hutterman (eds). 16.5 × 24.5 cm, 589 pp. Wallingford, UK: CAB International, 1998. US\$140. ISBN 085199 275 7 (hardback). *Plant Pathology*, 48(4), 564–565.
<https://doi.org/10.1046/j.1365-3059.1999.0366b.x>
- 19) Huang, H., Mackereth, R. W., & Mitchell, C. P. J. (2024). Impacts of forest harvesting on mercury concentrations and methylmercury production in boreal forest soils and stream sediment. *Environmental Pollution*, 341, 122966. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122966>
- 20) Kļaviņa, Z., Bārdule, A., Eklöf, K., Bitenieks, K., Kļaviņš, I., & Lībiere, Z. (2021). Carbon, nutrients and methylmercury in water from small catchments affected by various forest management operations. *Forests*, 12(9). Scopus. <https://doi.org/10.3390/f12091278>
- 21) Kløve, B., Sveistrup, T. E., & Hauge, A. (2010). Leaching of nutrients and emission of greenhouse gases from peatland cultivation at Bodin, Northern Norway. *Geoderma*, 154(3), 219–232.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.08.022>
- 22) Köster, K., Metslaid, M., Engelhart, J., & Köster, E. (2015). Dead wood basic density, and the concentration of carbon and nitrogen for main tree species in managed hemiboreal forests. *Forest Ecology and Management*, 354, 35–42. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.06.039>
- 23) Kúdela, J., Ihráček, P., & Kačík, F. (2024). Discoloration and Surface Changes in Spruce Wood after Accelerated Aging. *Polymers*, 16(9), 1191. <https://doi.org/10.3390/polym16091191>
- 24) Kuhn, M. (2008). Building Predictive Models in R Using the **caret** Package. *Journal of Statistical Software*, 28(5). <https://doi.org/10.18637/jss.v028.i05>
- 25) Leiber-Sauheitl, K., Fuß, R., Voigt, C., & Freibauer, A. (2014). High CO₂ fluxes from grassland on historic Gleysol along soil carbon and drainage gradients. *Biogeosciences*, 11(3), 749–761.
<https://doi.org/10.5194/bg-11-749-2014>
- 26) Lidberg, W., Nilsson, M., Lundmark, T., & Ågren, A. M. (2017). Evaluating preprocessing methods of digital elevation models for hydrological modelling. *Hydrological Processes*, 31(26), 4660–4668.
<https://doi.org/10.1002/hyp.11385>
- 27) Liepa, I. (1996). *Pieauguma mācība*. LLU.
- 28) Liepiņš, J., Lazdiņš, A., Kalēja, S., & Liepiņš, K. (2022). Species composition affects the accuracy of stand-level biomass models in hemiboreal forests. *Land*, 11(1108), 1–14.
<https://doi.org/10.3390/land11071108>
- 29) Liepiņš, J., Lazdiņš, A., & Liepiņš, K. (2017). Equations for estimating above- and belowground biomass of Norway spruce, Scots pine, birch spp. And European aspen in Latvia. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 1–43. <https://doi.org/10.1080/02827581.2017.1337923>
- 30) Lin, Y.-C., Manish, R., Bullock, D., & Habib, A. (2021). Comparative Analysis of Different Mobile LiDAR Mapping Systems for Ditch Line Characterization. *Remote Sensing*, 13(13), 2485.
<https://doi.org/10.3390/rs13132485>
- 31) Mattsson, T., Finér, L., Kortelainen, P., & Sallantausta, T. (2003). Brook Water Quality and Background Leaching from Unmanaged Forested Catchments in Finland. *Water, Air, and Soil Pollution*, 147(1/4), 275–298. <https://doi.org/10.1023/A:1024525328220>
- 32) McGaughey, B. (2020). Overview of the FUSION/LDV Analysis and Visualization System. *USDA*

Forest Service, Pacific Northwest Research Station.

- 33) Meļņiks, R. N., Bārdule, A., Butlers, A., Champion, J., Kalēja, S., Skranda, I., Petaja, G., & Lazdiņš, A. (2023). Carbon Losses from Topsoil in Abandoned Peat Extraction Sites Due to Ground Subsidence and Erosion. *Land*, 12(12), 2153. <https://doi.org/10.3390/land12122153>
- 34) Meļņiks, R. N., Upenieks, E. M., Butlers, A., Bārdule, A., Kalēja, S., & Lazdiņš, A. (2024). Quantifying Dissolved Organic Compound Efflux from Drained Peatlands in Hemiboreal Latvia. *Land*, 13(6), Article 6. <https://doi.org/10.3390/land13060790>
- 35) Moore, I. D., Grayson, R. B., & Ladson, A. R. (1991). Digital terrain modelling: A review of hydrological, geomorphological, and biological applications. *Hydrological Processes*, 5(1), 3–30. <https://doi.org/10.1002/hyp.3360050103>
- 36) Nardi, F., Biscarini, C., Di Francesco, S., Manciola, P., & Ubertini, L. (2013). Comparing a Large-Scale Dem-Based Floodplain Delineation Algorithm with Standard Flood Maps: The Tiber River Basin Case Study. *Irrigation and Drainage*, 62(S2), 11–19. <https://doi.org/10.1002/ird.1818>
- 37) Negrazis, L., Kidd, K. A., Erdozain, M., Emilson, E. J. S., Mitchell, C. P. J., & Gray, M. A. (2022). Effects of forest management on mercury bioaccumulation and biomagnification along the river continuum. *Environmental Pollution (Barking, Essex: 1987)*, 310, 119810. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119810>
- 38) Nobre, A. D., Cuartas, L. A., Hodnett, M., Rennó, C. D., Rodrigues, G., Silveira, A., Waterloo, M., & Saleska, S. (2011). Height Above the Nearest Drainage – a hydrologically relevant new terrain model. *Journal of Hydrology*, 404(1), 13–29. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.03.051>
- 39) Noordermeer, L., Korpunen, H., Berg, S., Gobakken, T., & Astrup, R. (2023). Economic losses caused by butt rot in Norway spruce trees in Norway. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 38(7–8), 497–505. <https://doi.org/10.1080/02827581.2023.2273252>
- 40) Ozoliņš, R. (1981). *Lietkoku stumbru sortimentu struktūras analīze*. Apskats. LatZTIZPI.
- 41) Petersen, S. O., Hoffmann, C. C., Schäfer, C.-M., Blicher-Mathiesen, G., Elsgaard, L., Kristensen, K., Larsen, S. E., Torp, S. B., & Greve, M. H. (2012). Annual emissions of CH₄ and N₂O, and ecosystem respiration, from eight organic soils in Western Denmark managed by agriculture. *Biogeosciences*, 9(1), 403–422. <https://doi.org/10.5194/bg-9-403-2012>
- 42) Piirainen, S., Domisch, T., Moilanen, M., & Nieminen, M. (2013). Long-term effects of ash fertilization on runoff water quality from drained peatland forests. *Forest Ecology and Management*, 287, 53–66. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.09.014>
- 43) Poulter, B., Goodall, J. L., & Halpin, P. N. (2008). Applications of network analysis for adaptive management of artificial drainage systems in landscapes vulnerable to sea level rise. *Journal of Hydrology*, 357(3), 207–217. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.05.022>
- 44) Purvina, D., Licite, I., Butlers, A., Lazdiņš, A., Saule, G., Turks, A., & Prysiazhniuk, L. (2023). Evaluation of peat layer thickness effect on soil GHG fluxes. *Engineering for Rural Development*, 454–460. <https://doi.org/10.22616/ERDev.2023.22.TF096>
- 45) Purviņa, D., Zvaigzne, Z. A., Skranda, I., Meļņiks, R. N., Petaja, G., Līcīte, I., Butlers, A., & Bārdule, A. (2024). Impact of Soil Organic Layer Thickness on Soil-to-Atmosphere GHG Fluxes in Grassland in Latvia. *Agriculture*, 14(3), Article 3. <https://doi.org/10.3390/agriculture14030387>
- 46) QGIS Development Team. (2024). *QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project*.
- 47) R Core Team. (2022). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.r-project.org/>
- 48) R Studio team. (2022). *RStudio: Integrated Development Environment for R*. PCB.
- 49) Rapinel, S., Hubert-Moy, L., Clément, B., Nabucet, J., & Cudennec, C. (2013). Ditch network extraction and hydrogeomorphological characterization using LiDAR-derived DTM in wetlands. *Hydrology Research*, 46(2), 276–290. <https://doi.org/10.2166/nh.2013.121>
- 50) Rätty, J., Hietala, A. M., Breidenbach, J., & Astrup, R. (2023). An analysis of stand-level size distributions of decay-affected Norway spruce trees based on harvester data. *Annals of Forest Science*, 80(1), 2. <https://doi.org/10.1186/s13595-022-01170-8>

- 51) Romashkin, I., Shorohova, E., Kapitsa, E., Galibina, N., & Nikerova, K. (2021). Substrate quality regulates density loss, cellulose degradation and nitrogen dynamics in downed woody debris in a boreal forest. *Forest Ecology and Management*, 491, 119143. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119143>
- 52) Samariks, V., Lazdiņš, A., Bārdule, A., Kalēja, S., Butlers, A., Spalva, G., & Jansons, Ā. (2023). Impact of Former Peat Extraction Field Afforestation on Soil Greenhouse Gas Emissions in Hemiboreal Region. *Forests*, 14(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/f14020184>
- 53) Saniewska, D., Beldowska, M., Beldowski, J., Saniewski, M., Szubska, M., Romanowski, A., & Falkowska, L. (2014). The impact of land use and season on the riverine transport of mercury into the marine coastal zone. *Environmental Monitoring and Assessment*, 186(11), 7593–7604. <https://doi.org/10.1007/s10661-014-3950-z>
- 54) Silfverberg, K., & Moilanen, M. (2008). Long-term nutrient status of PK fertilized Scots pine stands on drained peatlands in North-Central Finland. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:126766632>
- 55) Silvan, N. (2004). Nutrient retention in a restored peatland buffer. *Environmental Science*. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:56453356>
- 56) Skranda, I., Spalva, G., Bardule, A., & Lazdins, A. (2024). Case study on effect of rewetting grassland with organic soils on greenhouse gas (GHG) emissions from soil. *Engineering for Rural Development*, 805–810. <https://doi.org/10.22616/ERDev.2024.23.TF158>
- 57) Skranda, I., Spalva, G., Muiznieks, E., & Lazdins, A. (2024). Comparison of nitrous oxide (N₂O) and methane (CH₄) fluxes in naturally wet and drained mineral forest soil. *Engineering for Rural Development*, 696–701. <https://doi.org/10.22616/ERDev.2024.23.TF134>
- 58) Thor, M., Ståhl, G., & Stenlid, J. (2005). Modelling root rot incidence in Sweden using tree, site and stand variables. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 20(2), 165–176. <https://doi.org/10.1080/02827580510008347>
- 59) Upenieks, E. M., Vanags Duka, M., Butlers, A., & Lazdins, A. (2024). Short term effect of clear-felling on greenhouse gas emissions from naturally wet organic and mineral soils. *Engineering for Rural Development*, 800–804. <https://doi.org/10.22616/ERDev.2024.23.TF157>
- 60) Väänänen, R., Nieminen, M., Vuollekoski, M., Nousiainen, H., Sallantausta, T., Tuittila, E.-S., & Ilvesniemi, H. (2008). Retention of phosphorus in peatland buffer zones at six forested catchments in southern Finland. *Silva Fennica*, 42(2). <https://doi.org/10.14214/sf.253>
- 61) Waddington, J. M., & Roulet, N. T. (1996). Atmosphere-wetland carbon exchanges: Scale dependency of CO₂ and CH₄ exchange on the developmental topography of a peatland. *Global Biogeochemical Cycles*, 10(2), 233–245. <https://doi.org/10.1029/95GB03871>
- 62) Wang, X., Gao, S., Chen, J., Yao, Z., & Zhang, X. (2022). Reducing soil CO₂, CH₄ and N₂O emissions through management of harvest residues in Chinese fir plantation. *Forest Ecology and Management*, 511, 120140. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120140>
- 63) Westman, C. J., & Laiho, R. (2003). Nutrient dynamics of drained peatland forests. *Biogeochemistry*, 63(3), 269–298. <https://doi.org/10.1023/A:1023348806857>
- 64) White, B., Ogilvie, J., Campbell, D. M. H. M. H., Hiltz, D., Gauthier, B., Chisholm, H. K. H., Wen, H. K., Murphy, P. N. C. N. C., & Arp, P. A. A. (2012). Using the Cartographic Depth-to-Water Index to Locate Small Streams and Associated Wet Areas across Landscapes. *Canadian Water Resources Journal / Revue Canadienne Des Ressources Hydriques*, 37(4), 333–347. <https://doi.org/10.4296/cwrj2011-909>
- 65) Yamulki, S., Forster, J., Xenakis, G., Ash, A., Brunt, J., Perks, M., & Morison, J. I. L. (2021). Effects of clear-fell harvesting on soil CO₂, CH₄, and N₂O fluxes in an upland Sitka spruce stand in England. *Biogeosciences*, 18(13), 4227–4241. <https://doi.org/10.5194/bg-18-4227-2021>
- 66) Zeltniš, P., Jansons, Ā., Baliuckas, V., & Kangur, A. (2024). Height growth patterns of genetically improved Scots pine and silver birch. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 97(3), 458–468. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpad057>
- 67) Žemaitis, P., & Stakenas, V. (2016). Ecological factors influencing frequency of Norway spruce butt rot in mature stands in Lithuania. *Russian Journal of Ecology*, 47(4), 355–363. <https://doi.org/10.1134/S1067413616040172>

- 68) Zupanc, A. (2017, December 19). Improving Cloud Detection with Machine Learning. *Sentinel Hub Blog*. <https://medium.com/sentinel-hub/improving-cloud-detection-with-machine-learning-c09dc5d7cf13>
- 69) Zvaigzne, Z. A., Purvina, D., Melniks, R. N., Butlers, A., & Lazdins, A. (2024). Soil carbon turnover of drained and naturally wet mineral forest soils in Latvia. *Engineering for Rural Development*, 678–682. <https://doi.org/10.22616/ERDev.2024.23.TF131>