

PĀRSKATS

PAR PĒTĪJUMA REZULTĀTIEM

Pētījuma nosaukums Oglekļa aprite meža ekosistēmā

Līguma Nr. 5_5.9.1_0081_101_21_87

Pētījuma zinātniskais
vadītājs Dr. silv. Andis Lazdiņš, LVMI Silava vadošais
pētnieks

Pētījums īstenots akciju sabiedrības “Latvijas valsts meži” un Latvijas Valsts mežzinātnes institūta “Silava” 2021. gada 13. septembra sadarbības līguma ietvaros

KOPSAVILKUMS

Pētījuma aktualitāti nosaka Latvijas valdības apņemšanās līdz 2050. gadam sasniegt klimata neitralitātes mērķi, kas definēti Parīzes nolīgumā, tajā skaitā aizstājot lauksaimniecības sektora radītās siltumnīcefekta gāzu (SEG) emisijas un līdz 10% no citu sektoru radītajām SEG emisijām, īstenojot klimata pārmaiņu mazināšanas darbības Zemes izmantošanas, zemes izmantošanas maiņas un mežsaimniecības (ZIZIMM) sektorā. Mežsaimniecība var dot vislielāko ieguldījumu šī mērķa sasniegšanā, tomēr pietrūkst empīrisku datu klimata pārmaiņas mazinājošo darbību ietekmes pamatošanai un prognozēšanai mainīga klimata apstākļos, kā arī šo darbību integrēšanai meža apsaimniekošanas sistēmā. Pētījuma mērķis ir arī identificēt un raksturot līdz šim nepietiekoši novērtētus, ar meža apsaimniekošanas risku mazināšanu saistītus SEG emisiju samazināšanas pasākumus, kā arī pasākumus, kas palielina mežaudžu produktivitāti, palielina koksnes produktu ražošanas efektivitāti, kā arī sekmē CO₂ piesaisti zemes izmantošanas maiņas rezultātā. Pētījuma aktualitāti nosaka arī nepieciešamība veikt SEG emisiju un CO₂ piesaistes aprēķinus SEG inventarizācijas un prognožu sistēmā, tajā skaitā prognozēt SEG emisijas, balstoties uz datiem, kas iegūti ar meža apsaimniekošanas optimizācijas modeļiem. Pētījuma mērķis ir samazināt oglekļa uzkrājuma izmaiņu un SEG emisiju aprēķinu nenoteiktību, izmantojot periodiski iegūstamus meža inventarizācijas datus. Pētījumu programma strukturēta 8 pētnieciskajos uzdevumos:

1. Mežaudžu oglekļa piesaistes un uzkrājuma aprēķina metodika AS “Latvijas valsts meži” (LVM) apsaimniekotajiem mežiem.
2. SEG inventarizācijas un prognožu datu modelēšanas rīku pilnveidošana.
3. Trupes ietekmes uz oglekļa uzkrājumu dzīvo koku biomasā modelēšana.
4. SEG emisiju samazināšana meža apsaimniekošanā klimata pārmaiņu mazināšanas kontekstā.
5. Meža ieaudzēšanas un kokaugu stādījumu ierīkošanas meliorācijas sistēmu buferjoslās ietekmes uz SEG emisijām un CO₂ piesaisti izpēte.
6. Meža resursu izmantošanas efektivitātes palielināšana klimata pārmaiņu mazināšanai.
7. Meliorācijas sistēmu apsaimniekošanas plānošanas sistēma.
8. Oglekļa bilance bioloģiski vecās mežaudzēs.

Pētījuma otrajā etapā lielākajā daļā no pētnieciskajiem uzdevumiem precizētas darba metodikas, 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. Aprēķiniem nepieciešami krājas un valdošās sugas īpatsvara dati, kas pieejami Meža valsts reģistrā. Koku biomasas prognozēšanai, izmantojot LiDAR un citus datus, aprobēts *rgbTree* algoritms, kas nodrošina R² 0,76-0,85; mazākā nenoteiktība ir virszemes, pazemes un stumbra biomasas prognozei. Izstrādāto metodi var integrēt SEG inventarizācijas sistēmā kā datu verificācijas instrumentu un oglekļa uzkrājuma raksturošanai lokālā līmenī. Pētījumā pilnveidota SEG inventarizācijas ziņojumā izmantotā metodika zemes izmantošanas maiņas uzskaitē, izmantojot Meža resursu monitoringa (MRM) datus, kā arī aprobēta iepriekšējā etapā izstrādātā metodika koku skaita un augstuma prognozēšanai, izmantojot LiDAR datus, un metodika zemes izmantošanas maiņas monitoringam, izmantojot no Sentinel 2 atvasinātu NDVI rastra datu slāni. Metodes paredzētas SEG inventarizācijas sistēmas pilnveidošanai un klimata pārmaiņu mazināšanas pasākumu ietekmes monitoringam lokālā līmenī. Turpināts darbs serdes trupes ietekmes uz oglekļa uzkrājumu biomasā raksturošanai lapu koku audzēs un izstrādāti vienādojumi trupes izplatības un stumbra biomasas samazinājuma sakarības raksturošanai. Pētījumā secināts, ka trupes izplatībai var būt izšķiroša ietekme uz oglekļa uzkrājuma izmaiņām un pat neliels (1% no pieauguma) biomasas zudums trupes ietekmē var pārvērst mežus par neto emisiju avotu pēc 2025. gada. Trupes ierobežošanas pasākumu ietekmi lokālā līmenī pagaidām nevar novērtēt, jo pasākumu ietekme atkarīga no daudziem ilgstošā laikā mežaudzi ietekmējošiem faktoriem, taču, ņemot vērā lielo

Oglekļa aprite meža ekosistēmā

potenciālo ietekmi, pasākumi serdes trapes ierobežošanai ir būtiski klimata pārmaiņu mazināšanas mērķu sasniegšanas kontekstā. Pētījumā izstrādāti vienādojumi kopšanas ciršu ietekmes uz CO₂ piesaisti kokaugū biomassā. Nākošajā pētījuma etapā publicēsim izstrādātos vienādojumus, lai nodrošinātu argumentāciju šī pasākuma iekļaušanai klimata pārmaiņu mazināšanas politikas instrumentos. Pētījumā novērtēta meža ieaudzēšanas īstermiņa (12-15 gadi) ietekme uz oglekļa uzkrājumu koku biomassā un augsnē, nodrošinot skaitlisku novērtējumu šai 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 purvainos un kūdreņos. Uzsākta izmēģinājumu objekta ierīkošana oglekļa aprites raksturošanai apmežotās platībās, tajā skaitā kūdras augsnēs, un kokaugū stādījumos ar minerālaugsnī. Apkopota informācija par SEG emisiju samazināšanas pasākumiem mežizstrādē, kā arī uzsākta mašīnmācības metodes izstrādāšana koksnes produktu iznākuma prognozēšanai. Meža zemēm adaptēts modelis meliorācijas grāvju tehniskā stāvokļa raksturošanai un turpināts izšķīdušā organiskā oglekļa emisiju faktoru izstrādāšanas darbs, tajā skaitā vērtējot HYPE un citu modeļu pielietojšanas iespējas. Turpināta datu ievākšana oglekļa uzkrājuma raksturošanai vecās audzēs ar kūdras augsnēm, tajā skaitā secināts, ka hidrotehniski meliorētās platībās bērza audzēs oglekļa uzkrājums ir par 28% lielāks, kā arī bioloģiski vecās bērza audzēs oglekļa uzkrājums ir mazāks nekā jaunās audzēs.

Pētījums veikts LVMI Silava un AS "Latvijas valsts meži" 2021. gada 13. septembra sadarbības līguma ietvaros.

SUMMARY

The importance of the study is determined by the Latvian government's commitment to achieve the goal of climate neutrality defined in the Paris Agreement by 2050, including replacing the greenhouse gas (GHG) emissions of the agricultural sector and up to 10% of the GHG emissions of other sectors, by implementation of the climate change mitigation measures in Land use, land use change and forestry (LULUCF) sector. Forestry can make the most significant contribution to achieve this goal, however, lack of data justifying and predicting the impact of the climate change mitigating measures under changing climate conditions, as well as for integration of these measures into the forest management system. The purpose of the study is also to identify and characterize undervalued GHG mitigation measures related to forest management risks, as well as measures which increases the productivity of forest stands, increase the efficiency of wood product production, as well as promote CO₂ sequestration as a result of land use change. The relevance of the research is also determined by the need to calculate GHG emissions and CO₂ uptake in the GHG inventory and forecasting system, including predicting GHG emissions based on data obtained with forest management optimization models. The aim of the study is to reduce the uncertainty of the estimates of carbon storage changes and GHG emission using periodically obtained forest inventory data. The research program is structured in 8 research tasks:

1. Methodology for calculation of carbon sequestration and accumulation of forest stands for the forests managed by Joint stock company "Latvia's state forests" (LVM);
2. Improvement of GHG inventory and forecast data modelling tools;
3. Modelling of hearth rot effects on carbon accumulation in biomass of living trees;
4. Reduction of GHG emissions in forest management in the context of climate change;
5. Impact of afforestation and the establishment of tree plantations in the buffer zones of drainage systems on GHG emissions and CO₂ capture;
6. Increasing the efficiency of the use of forest resources for mitigating climate change;
7. Management planning system of drainage systems;
8. Carbon balance in biologically old forest stands.

In the second stage of the study the work methodology was specified in most of the research tasks, the selection and installation of test objects, as well as the acquisition and analysis of empirical data, were started. Simplified equations for biomass and carbon accumulation calculations in the state forests have been developed and validated. Calculations require data on stock and proportion of dominant species, which are available in the State Register of Forests. The *xgbTree* algorithm has been approved for determination of tree biomass using LiDAR and other data, which provides accuracy of R² 0.76-0.85; the lowest uncertainty found in the above-ground, below-ground and stem biomass forecast. The developed method can be integrated into the GHG inventory system as a data verification tool and used for accounting of carbon stock at a local level. During the research the methodology used in the GHG inventory report for accounting for land use change using Forest Resource Monitoring (MRM) data was improved, as well as the methodology developed in the previous stage for predicting the number and height of trees using LiDAR data, and the methodology for monitoring land use change using Sentinel 2 derived NDVI raster data layer was verified. These methods are intended for improving the GHG inventory system and monitoring the impact of climate change mitigation measures at a local level. Continued work on the characterization of the influence of the hearth rot on the accumulation of carbon in the biomass in deciduous tree stands and developed equations for characterizing the relationship between the spread of the rot and the decrease in stem biomass. The study concludes that hearth rot can have a decisive impact on changes in carbon stock and even a small (1% of increment) biomass loss due to the rotting can turn forests into a net source of emissions after 2025. The impact of the hearth rot control measures at the local level cannot be assessed yet, as the impact of the measures depends on many factors affecting the forest stand over a

long period of time, but, taking into account the large potential impact, measures to control the hearth rot are essential in the context of achieving climate change mitigation goals. During the study the equations for estimation of the effect of thinnings on the CO₂ sequestration in the biomass of woody plants have been developed. In the next phase of the research, we will publish the developed equations to provide a rationale for including this measure in climate change mitigation policy instruments. The study assesses the short-term (12-15 years) impact of afforestation on accumulation of carbon in tree biomass and soil, providing a quantitative assessment of this climate change mitigation measure. New study sites have been installed and gas flux measurements has been started for the characterization of GHG emissions including assessment of the effect of deep furrows during regeneration of forests with wet organic soils, and GHG emissions from ruts after regenerative felling in drained and non-drained organic soils. Installation of a study site for the characterization of carbon turnover in afforested areas, including peat soils, and tree plantations with mineral soil has been started. Information on measures to reduce GHG emissions in forestry has been collected, as well as the development of a machine learning method for predicting the yield of wood products has been started. A model for characterization of the technical condition of drainage ditches was adapted for forest lands, and the work of developing dissolved organic carbon emission factors continued, including evaluating the possibilities of applying HYPE and other models. Continued data collection for the characterization of carbon accumulation in old stands with peat soils. According to the study results the carbon stock in drained areas in birch stands is 28% higher than in non-drained, as well as the carbon stock is smaller in biologically old birch stands in comparison to middle age stands.

The research was conducted within the framework of the cooperation agreement between LVMI Silava and JSC "Latvia's state forests" on September 13, 2021.

Saturs

| | |
|--|------------|
| 1. Mežaudžu oglekļa piesaistes un uzkrājuma aprēķina metodika LVM apsaimniekotajiem mežiem . | 23 |
| 1.1. Izzinātības apskats | 23 |
| 1.2. Rezultāti un to analīze..... | 27 |
| 2. SEG inventarizācijas un prognožu datu modelēšanas rīku pilnveidošana | 37 |
| 2.1. Metodika koku sugu sastāva telpiskās izplatības novērtēšanai Latvijas teritorijā un oglekļa uzkrājuma dinamikas modelēšanai | 37 |
| 2.1.1. Izzinātības apskats | 37 |
| 2.1.2. Metodika | 37 |
| 2.1.3. Rezultāti | 39 |
| Virszemes biomasas | 39 |
| Pazemes biomasas | 41 |
| Stumbra biomasas | 43 |
| Zaru biomasas | 45 |
| Celmu un sakņu biomasas | 47 |
| 2.1.4. Secinājumi | 49 |
| 2.2. Metodikas koku sugu sastāva telpiskās izplatības novērtēšanai integrēšana SEG inventarizācijas un prognožu sistēmā | 49 |
| 2.2.1. Zemes izmantošanas maiņas metodikas pilnveidošana | 49 |
| 2.2.2. Metodika Sentinel 2 un citu satelītattēlu izmantošanai zemes izmantošanas maiņas uzskaites pilnveidošanai | 55 |
| 2.2.3. Koku augstuma un skaita attālinātas noteikšanas metodes pārbaude | 59 |
| 3. Trupes ietekme uz oglekļa uzkrājumu dzīvo koku biomasā | 62 |
| 3.1. Trupes ietekmes uz oglekļa uzkrājumu dzīvajā biomasā LVM apsaimniekotajos mežos novērtējums | 62 |
| 3.1.1. Izzinātības apskats | 62 |
| 3.1.2. Rezultāti un to analīze..... | 66 |
| Serdes trupes ietekmes uz baltalkšņa un melnalkšņa kokaudžu biomasu izvērtēšana | 66 |
| Serdes trupes ietekmes izvērtēšana uz bērza un apses kokaudžu biomasu | 69 |
| 3.2. Oglekļa uzkrājuma izmaiņu trupes ietekmē prognozes pie dažādiem meža apsaimniekošanas scenārijiem | 73 |
| 3.3. Novērtēt trupes ierobežošanas pasākumu ietekmi uz SEG emisijām un CO ₂ piesaisti meža zemēs..... | 75 |
| 4. SEG emisiju samazināšana meža apsaimniekošanā klimata pārmaiņu mazināšanas kontekstā | 79 |
| 4.1. Esošo modeļteritoriju un pētījumu apzināšana un ietekmes uz oglekļa uzkrājumu un SEG emisijām apzināšana | 79 |
| 4.1.1. Kopšanas ciršu efekta novērtēšanas metodika | 79 |
| 4.1.2. Krājas papildpieauguma novērtēšanas rezultāti | 82 |
| Retināšanas ietekme uz oglekļa uzkrājumu 5 gadu periodā | 82 |
| Retināšanas ietekme uz oglekļa uzkrājumu līdz 10 gadu periodā..... | 83 |
| 4.1.3. Kopsavilkums par krājas papildpieauguma novērtējumu | 84 |
| 4.2. Jaunu izpētes objektu ierīkošana klimata pārmaiņu mazināšanas darbību īstermiņa un ilgtermiņa ietekmes novērtēšanai | 84 |
| 5. Meža ieaudzēšanas un kokaugu stādījumu ierīkošanas meliorācijas sistēmu buferjoslās ietekmes uz SEG emisijām un CO₂ piesaisti izpēte..... | 89 |
| 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 | 89 |
| 5.1.1. Meža ieaudzēšanas ietekmes uz oglekļa apriti novērtējums 2012. gadā ierīkotajos izpētes objektos..... | 89 |
| 5.1.2. Oglekļa aprites monitoringa objektu ierīkošana minerālaugšņu apmežojumos | 97 |
| 5.1.3. Gāzu apmaiņas monitorings jaunos meža ieaudzēšanas ietekmes uz SEG emisijām monitoringa objektos meliorētās un nemeliorētās organiskās augsnēs | 101 |
| 5.2. Eksperimentālu kokaugu stādījumu ierīkošanas meliorācijas sistēmu buferjoslās LIZ ar organiskam augsnēm un minerālaugsnēm | 106 |
| 5.3. Sabiedrības informēšanas materiālu sagatavošana par meža ieaudzēšanas un citu darba uzdevumā iekļauto darbību ietekmi uz SEG emisijām | 109 |
| 6. Meža resursu izmantošanas efektivitātes palielināšana klimata pārmaiņu mazināšanai | 111 |

Oglekļa aprite meža ekosistēmā

| | |
|--|------------|
| 6.1. Mežizstrādes metožu ietekmes uz SEG emisijām ietekmes novērtēšana | 111 |
| 6.1.1. Mežizstrādes metožu analīze | 111 |
| 6.1.2. Mežizstrādes mašīnu veidoto risu attālinātas identificēšanas metode | 111 |
| 6.1.3. SEG emisiju no risēm mērījumu objektu ierīkošana | 112 |
| Izpētes objekti | 113 |
| 6.2. Metodes izstrādāšana koksnes produktu un padziļinātas koksnes pārstrādes ietekmes uz SEG emisijām analīzei | 116 |
| 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 |
| 7.2. Lēmuma pieņemšanas atbalsta rīka izstrādāšana meliorācijas sistēmu uzturēšanai un modernizēšanai | 122 |
| 7.3. Izstrādāt modelēšanas instrumentus Hg, SEG emisiju un biogēno elementu izneses aprēķiniem | 124 |
| 8. Oglekļa bilance vecās mežaudzēs..... | 130 |
| 8.1. Empīrisku datu ieguve un vienādojumu izstrādāšana oglekļa aprites un SEG emisiju raksturošanai bioloģiski vecās un pieaugušās audzēs kūdreņos..... | 130 |
| 8.2. Rekomendāciju sagatavošana mežkopības praksei..... | 136 |

Attēli

| | |
|---|----|
| Attēls 1. Audzes kopējās biomasas izmaiņas atkarībā no dominējošās sugas koeficienta (CI) vērtības sastāva vienādojums. | 32 |
| Attēls 2. Aprēķināto un prognozēto biomasas vērtību izkliedes diagramma un regresijas taisne LVM apsaimniekotajiem mežiem..... | 33 |
| Attēls 3. Dažādu izstrādāto vienādojumu kļūda, prognozējot mežaudžu biomasu LVM apsaimniekotajos mežos. | 34 |
| Attēls 4. Kokaudžu oglekļa uzkrājums LVM apsaimniekotajās teritorijās dalījumā pa valdošajām koku sugām un piemistrojumu veidojošajām sugām. | 35 |
| Attēls 5. Piemistrojuma sugu oglekļa uzkrājuma īpatsvars izplatītāko sugu dominējošās audzēs. | 35 |
| Attēls 6. Mežaudžu oglekļa uzkrājuma datu kvalitātes pārbaude LVM apsaimniekotajās teritorijās. | 36 |
| Attēls 7. Pētījumā izmantoto MRM parauglūkumu telpiskais izvietojums..... | 38 |
| Attēls 8. Virszemes biomasas prognozēšanas būtiskākie parametri un prognožu rezultāti. | 40 |
| Attēls 9. Pazemes biomasas prognozēšanas būtiskākie parametri un prognožu rezultāti | 42 |
| Attēls 10. Stumbra biomasas prognozēšanas būtiskākie parametri un prognožu rezultāti. | 44 |
| Attēls 11. Zaru biomasas prognozēšanas būtiskākie parametri un prognožu rezultāti. | 46 |
| Attēls 12. Celmu un sakņu biomasas prognozēšanas būtiskākie parametri un prognožu rezultāti. | 48 |
| Vienādojumu kopa 3. Pastāvīgo zemes kategoriju noteikšanas formulas kolonnām Svars1, Svars2, Svars3. | 53 |
| Vienādojumu kopa 4. Ietekmes vērtības piešķiršanas formulas kolonnām Svars1, Svars2, Svars3. | 53 |
| Vienādojumu kopa 5. Aprēķinu formulas kolonnām Aprekini1, Aprekini2, Aprekini3..... | 54 |
| Vienādojumu kopa 6. Aprēķinu formulas kolonnai <i>Represent</i> | 54 |
| Vienādojumu kopa 7. Lineārās interpolācijas aprēķinu vienādojums..... | 55 |
| Attēls 13. Meža resursu monitoringa izvietojums valsts teritorijā..... | 56 |
| Attēls 14. Sektoros sadalīta MRM parauglūkuma piemērs..... | 57 |
| Attēls 15. Skenēšanas shēma. | 60 |
| Attēls 16. Atkārtotas skenēšanas shēma..... | 60 |
| Attēls 17. Rezistogrāfa mērījums uzrāda blīvuma samazinājumu, kas norāda uz mīkstās trupes klātbūtni stumbrā..... | 63 |
| Attēls 18. No bērza un apses šķērsriezuma ripām iegūtie trupējušās koksnes paraugi..... | 65 |
| Attēls 19. Āra un purva bērza sugu noteikšana ar ķīmisko metodi. Purva bērza paraugs paliek dzidrs, bet āra bērza paraugs kļūst duļķains. | 66 |
| Attēls 20. Atsevišķu koku trupes kolonnas tilpuma matemātiskā aprēķina kļūda, pētījumā stumbra | |

| | |
|---|-----|
| šķērsriezuma ripās ar lineālu mērot trupes diametru divos perpendikulāros virzienos..... | 67 |
| Attēls 21. Stumbra biomasas samazinājums, atkarībā no serdes trupes diametra celma augstumā..... | 68 |
| Attēls 22. Trupējušu koku īpatsvars parauglaukumā atkarībā no bērza un apses audzes vecuma..... | 69 |
| Attēls 23. Trupes izplatības noteikšana pēc stumbra šķērsriezuma ripām (a) bērzam un (b) apsei..... | 71 |
| Attēls 24. Reducētā blīvuma izmaiņas un trupes kolonnas vidējie parametri bērza un apses stumbros..... | 72 |
| Attēls 25. Trupes radītu oglekļa zudumu simulācija meža zemēs..... | 75 |
| Attēls 26. Pētījuma objektu atrašanās vietas Latvijā..... | 79 |
| Attēls 27. Vidējais vecums analizētajām koku sugām..... | 80 |
| Attēls 28. Papildus oglekļa uzkrājums 5 gadu periodā, %..... | 82 |
| Attēls 29. Oglekļa papilduzkrājums ($t C ha^{-1}$) atkarībā no valdošās koka sugas un vecuma..... | 83 |
| Attēls 30. Oglekļa papilduzkrājums ($t C ha^{-1}$) 5 un 10 gadus pēc retināšanas dažādām koka sugām..... | 84 |
| Attēls 31. Modelētā sagaidāmā beznoteces ieplaku platība pirms un pēc dziļvagu rakšanas paraugteritorijā..... | 86 |
| Attēls 32. Platība, kur ierīkots E stādījums Mežoles mežu novadā..... | 87 |
| Attēls 33. E stādīšanai sagatavota platība ar dziļvagām Mežoles mežu novadā..... | 87 |
| Attēls 34. Blīvuma izmaiņas 0-40 cm dziļā augsnes slānī..... | 94 |
| Attēls 35. Oglekļa uzkrājuma atšķirības 0-40 cm augsnes slānī..... | 95 |
| Attēls 36. Karjera atrašanās vieta (X: 617606, Y: 355881) un karjera kopskats..... | 98 |
| Attēls 37. Rekultivējamās platība un iespējamais apļu ar koksnes pelniem/mizām ielabojamās daļas izvietojums..... | 99 |
| Attēls 38. Ma stādījums Mežoles mežu novadā..... | 102 |
| Attēls 39. E stādījums Rucavas mežu novadā..... | 102 |
| Attēls 40. Apmežošanas objekts Ķeguma apkārtnē..... | 103 |
| Attēls 41. Kopējās ekosistēmas CO_2 aprites un gaisa temperatūras sakarība..... | 104 |
| Attēls 42. N_2O emisiju un gaisa temperatūras sakarība..... | 104 |
| Attēls 43. CH_4 emisiju un gaisa temperatūras sakarība..... | 104 |
| Attēls 44. Kopējās ekosistēmas CO_2 aprites un gruntsūdens līmeņa sakarība..... | 105 |
| Attēls 45. N_2O emisiju un gruntsūdens līmeņa sakarība..... | 105 |
| Attēls 46. CH_4 emisiju un gruntsūdens līmeņa sakarība..... | 105 |
| Attēls 47. Kokaugu stādījuma ierīkošanai paredzētā platība MPS apsaimniekotajos mežos..... | 107 |
| Attēls 48. Grāvis, gar kuru plānojam ierīkot kokaugu joslu stādījumu..... | 107 |
| Attēls 49. Plānotā stādījuma shēma..... | 108 |
| Attēls 50. Parauglaukumu izvietojuma shēma objektā LVMCA_R4..... | 113 |
| Attēls 51. Parauglaukumu izvietojuma shēma objektā LVMCA_R1..... | 114 |
| Attēls 52. Parauglaukumu izvietojuma shēma objektos LVMCA_R2 un LVMCA_R3..... | 114 |
| Attēls 53. Vispārīgā parauglaukuma shēma..... | 115 |
| Attēls 54. Datu apstrādes princips..... | 117 |
| Attēls 55. Kopējās ekosistēmas CO_2 aprites augsnē sakarība ar gaisa temperatūru..... | 120 |
| Attēls 56. N_2O emisiju no augsnes sakarība ar gaisa temperatūru..... | 120 |
| Attēls 57. CH_4 emisiju no augsnes sakarības ar gaisa temperatūru..... | 120 |
| Attēls 58. Kopējās ekosistēmas CO_2 aprites augsnē sakarība ar gruntsūdens līmeni..... | 121 |
| Attēls 59. N_2O emisiju no augsnes sakarība ar gruntsūdens līmeni..... | 121 |
| Attēls 60. CH_4 emisiju no augsnes sakarība ar gruntsūdens līmeni..... | 122 |
| Attēls 61. Grāvja šķērsprofilu analīzes piemērs..... | 123 |
| Attēls 62. Grāvju tīkla klasifikācijas piemērs..... | 124 |
| Attēls 64. Vidējais oglekļa (C) uzkrājums kūdreņos un niedrājos dažādās koka frakcijās un atmirušajā koksnē ($\pm 95\%$ ticamības intervāls)..... | 132 |
| Attēls 65. Vidējais C uzkrājums dažādās atmirušās koksnes frakcijās pa meža tipiēm ($\pm 95\%$ ticamības intervāls)..... | 133 |
| Attēls 66. Ikgadējais C uzkrājums biomasā un atmirušajā koksnē atkarībā no audzes vecuma dažādos meža tipos vecās bērza audzēs (pelēkais iekrāsojums apzīmē $\pm 95\%$ ticamības intervālu)..... | 134 |
| Attēls 67. Ikgadējais C uzkrājums biomasā un atmirušajā koksnē atkarībā no audzes vecuma dažādos meža tipos vecās bērza audzes salīdzinājumā ar jaunākām audzēm (pelēkais iekrāsojums apzīmē $\pm 95\%$ ticamības | |

| | |
|---|-----|
| intervālu)..... | 135 |
| Attēls 68. Augsnes paraugu ievākšana..... | 136 |
| Attēls 69. Pielieto lineārās regresijas modeli..... | 168 |
| Attēls 70. Lineārā regresijas modeļa vērtības..... | 169 |
| Attēls 71. Ridge regresijas modeļa vērtības..... | 170 |
| Attēls 72. Lasso regresijas modeļa vērtības..... | 171 |
| Attēls 73. Bagged CART regresijas modeļa vērtības..... | 172 |
| Attēls 74. Būtiskākie xgbTree modeļa ievades parametri..... | 175 |
| Attēls 75. xgbTree regresijas modeļa vērtības..... | 176 |
| Attēls 76. Histogramma modeļa precizitātes raksturošanai..... | 176 |

Tabulas

| | |
|---|----|
| Tabula 1. Pētījumu programmas virzieni un sagaidāmais rezultāts..... | 13 |
| Tabula 2. Pētījumu programmas uzdevumi 2022. gadā..... | 15 |
| Tabula 3. Mežu resursu monitoringa (MRM) datubāzē koku sugām piemērotie aprēķina vienādojumi kokaudžu biomasas aprēķiniem..... | 26 |
| Tabula 4. Mežaudžu biomasas vienādojumu izstrādē izmantoto MRM parauglaukumu vidējās vērtības..... | 26 |
| Tabula 5. Spīrmēna rangu korelācijas koeficientu vērtības starp mežaudzes taksācijas rādītājiem un audzes kopējo virszemes (AGB), pazemes biomasu (BGB), stumbra biomasu (SB) un zaru biomasu (BB)..... | 27 |
| Tabula 6. Regresijas vienādojuma Nr. 1. koeficientu vērtības un statistiskie rādītāji..... | 29 |
| Tabula 7 Regresijas vienādojuma Nr. 2 koeficientu vērtības un statistiskie rādītāji..... | 30 |
| Tabula 8. Virszemes biomasas prognozēšanas modeļu precizitāte..... | 39 |
| Tabula 9. Pazemes biomasas prognozēšanas modeļu precizitāte..... | 41 |
| Tabula 10. Stumbra biomasas prognozēšanas modeļu precizitāte..... | 43 |
| Tabula 11. Zaru biomasas prognozēšanas modeļu precizitāte..... | 45 |
| Tabula 12. Celmu un sakņu biomasas prognozēšanas modeļu precizitāte..... | 47 |
| Tabula 13. Nemainīgās zemes kategorijas..... | 51 |
| Tabula 14. Zemes kategorijas pielīdzināšana UNFCCC zemes kategorijas veidam..... | 54 |
| Tabula 15. Zemes izmantošanas maiņas matricas piemērs..... | 54 |
| Tabula 16. Atmežoto parauglaukumu skaits un platība, laika posmā no 1990. līdz 2021. gadam..... | 57 |
| Tabula 17. Koku augstuma un skaita vidējo rādītāju raksturojums..... | 59 |
| Tabula 18. Trupes ietekmes izvērtēšanai atlasītās apses un bērza audzes un dominējošās koku sugas taksācijas rādītāji..... | 63 |
| Tabula 19. Trupējušo baltalkšņa un melnalkšņa paraugkoku raksturojums..... | 67 |
| Tabula 20. Trupējušo bērza un apses paraugkoku raksturojums..... | 70 |
| Tabula 21. Koeficientu vērtības krājas kumulatīvā papildus pieauguma aprēķināšanai..... | 81 |
| Tabula 22. Oglekļa satura koeficienti koku biomasā (virszeme/pazeme) dažādām koku sugām Latvijā, g kg ⁻¹ (Bārdule, Liepiņš, u.c., 2021)..... | 82 |
| Tabula 23. Mežaudžu skaits valdošās sugas un meža tipa griezumā..... | 89 |
| Tabula 24. Mežaudžu skaits augsnes tipu griezumā..... | 89 |
| Tabula 25. Koku stāva raksturojums parauglaukumos..... | 90 |
| Tabula 26. Oglekļa uzkrājums koku biomasā..... | 91 |
| Tabula 27. Biomasas un oglekļa uzkrājums meža tipu griezumā..... | 92 |
| Tabula 28. Biomasas un oglekļa uzkrājums valdošo sugu griezumā..... | 92 |
| Tabula 29. Vidējais koku caurmērs, augstums un šķērslaukums..... | 93 |
| Tabula 30. Augsnes ķīmiskās īpašības 0-40 cm dziļā augsnes slānī..... | 93 |
| Tabula 31. Atsevišķu augsnes rādītāju kopsavilkums meža tipu griezumā..... | 95 |
| Tabula 32. Atsevišķu augsnes rādītāju kopsavilkums valdošo sugu griezumā, neskaitot kūdras augsnes..... | 95 |
| Tabula 33. Kopējās oglekļa uzkrājuma izmaiņas koku biomasā un augsnē meža tipu griezumā..... | 96 |
| Tabula 34. Kopējās oglekļa uzkrājuma izmaiņas koku biomasā un augsnē valdošo koku sugu griezumā..... | 96 |
| Tabula 35. Kopējās oglekļa uzkrājuma izmaiņas koku biomasā un augsnē tītāko augsnes tipu griezumā..... | 97 |
| Tabula 36. Ministru kabineta noteikumos Nr. 308 "Meža atjaunošanas, meža ieaudzēšanas un plantāciju | |

Oglekļa aprīte meža ekosistēmā

| | |
|--|-----|
| meža noteikumi" noteiktais koku skaits atbilstoši 2022.gada 21. jūnija veiktajiem grozījumiem..... | 98 |
| Tabula 37. Stādījumi plāni apliem ar dažādu attālumu starp stādītajiem kokiem | 100 |
| Tabula 38. Augsnes analīžu rezultātu kopsavilkums apmežojamajā karjerā..... | 101 |
| Tabula 39. Vidējie gāzu apmaiņas, tajā skaitā kopējās ekosistēmas CO ₂ aprītes rādītāji..... | 103 |
| Tabula 40. Izpētes objekti gāzu apmaiņas raksturošanai..... | 119 |
| Tabula 41. Vidējie gāzu apmaiņas rādītāji izpētes objektos | 119 |
| Tabula 42. Infiltrācijas ātruma rādītāji (Hwang u.c., 2017; Suleiman, 2008)..... | 126 |
| Tabula 43. HYPE modeļa aprēķinu parametri | 126 |
| Tabula 44. Pētījuma objektu raksturojums | 130 |
| Tabula 1. Dažādu valstu SEG inventarizācijā izmantotie pieņēmumi un vienādojumi biomasas un oglekļa uzkrājuma rēķināšanai..... | 149 |

Pielikumi

1. Pielikums SEG inventarizācijas metožu salīdzinājums
2. Pielikums Klimata pārmaiņu mazināšanas pasākumi mežizstrādē
3. Pielikums Taksācijas rādītāji parauglaukumos, kas izmantoti koku augstuma un skaita noteikšanas algoritma pārbaudei
4. Pielikums Mežaudžu biomasas prognozēšanas modelis

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

IEVADS

2022. gads nozīmīgs ar to, ka šajā gadā beidzās Kioto protokola 2. pārskata periods un ar to saistītā SEG emisiju mazināšanas saistību izpilde meža apsaimniekošanā 2013.-2022. gados. Latvijai sākotnēji noteiktais meža apsaimniekošanas references līmenis (turpmāk – MARL) bija -16302 gigagrami (Gg) CO₂ ekvivalenti (ekv.) gadā. Līdz ar to Kioto protokola otrā saistību periodā Latvijai meža apsaimniekošanā bija jānodrošina kopējā CO₂ piesaiste 130416 Gg CO₂ ekv. apmērā, neskaitot atmežošanas radīto SEG emisiju kompensēšanu. Sākotnējo MARL noteica Eiropas Komisijas Vienotais pētniecības centrs 2011. gadā (UNFCCC, 2011). Kioto protokola otrajā saistību periodā veikti būtiski uzlabojumi SEG emisiju un CO₂ piesaistes aprēķinu metodikā, tāpēc LVMI Silava veica MARL tehnisko korekciju, lai mežu apsaimniekošanai izveidotajā uzskaitē tiktu ņemta vērā arī pārrēķinu ietekme saskaņā ar ZIZIMM lēmuma 6. panta 6. punktu (European Parliament, 2013).

MARL tehnisko korekciju veica Latvijas Valsts mežzinātnes institūts “Silava”, izmantojot Meža resursu monitoringa (MRM) datus. Meža resursu izmaiņas modelētas meža elementu līmenī. Detāls modelēšanā izmantotā risinājuma struktūras, aprēķinu principu, izveides un verificēšanas apraksts ir pievienots 2022. gada SEG inventarizācijas ziņojuma pielikumā Nr. 5¹, kā arī aprakstīts ziņojumos un zinātniskās publikācijas, piemēram, Lazdiņš, Lupiķis u.c. (2019); Lazdiņš, Šņepsts u.c. (2019); Šņepsts, Bārdule u.c. (2018); Šņepsts, Kārklīņa u.c. (2018). MARL pārrēķinam izmantoti dati par vēsturisko periodu no 2000. līdz 2008. gadam.

AGM modeļa validēšana veikta Meža references līmeņa izstādes laikā, salīdzinot modelēto CO₂ emisiju un piesaistes dzīvajā biomasā līdzsvaru ar MRM lauka mērījumu datiem (2000.-2009. gads), iekļaujot datus par 2000. līdz 2003. gadu, kas ekstrapolēti, izmantojot MRM un nogabalu inventarizācijas datus. Vidējā modeļa precizitāte pārsniedza 95% un tikai 2008. gadā, kad saasinājās ekonomikas krīze, aktuālās neto SEG emisijas bija ārpus modelēto datu neprecizitātes intervāla. Modelēto datu precizitāte ievērojami pārsniedza Vienotā pētniecības centra izmantoto EFISCEN un G4M modeļu sniegumu.

Koriģētais meža apsaimniekošanas references līmenis ir -1472,89 Gg CO₂ ekv. gadā. MARL oficiālais pārrēķins, piemērojot tehniskās korekcijas, ir saskaņots 2022. gada SEG inventarizācijas ietvaros.

Klimata konvencijas Kioto protokola 3. panta 3. punktā noteiktais nosacījums, ka jānodrošina, lai atmežošanas rezultātā radušās CO₂ emisijas nepārsniedz apmežošanas un atkārtotas apmežošanas rezultātā radušos CO₂ piesaisti, faktiski netiek nodrošināts nevienā no gadiem laika posmā no 2013. līdz 2020. gadam. Saskaņā ar 2022. gada SEG inventarizācijas rezultātiem Kioto protokola 3. panta 3. punktā uzskaitītajās darbībās SEG emisijas pārsniedz CO₂ piesaisti par 5873,03 Gg CO₂ ekv.

Piemērojot tehnisko korekciju 14829,11 Gg CO₂ ekv., pārrēķinātais meža apsaimniekošanas CO₂ bilances mērķis (-1472,89 Gg CO₂ ekv. gadā un -11783,12 Gg CO₂ ekv. visā periodā) tiek sasniegts visos perioda gados, izņemot 2014. gadu. Attiecīgi, saskaņā ar 2022. gada SEG inventarizācijas pārbaudes provizoriskiem rezultātiem MARL izpilde Latvijā ir nodrošināta.

Kopumā Latvija visā periodā no 2013. līdz 2020. gadam, skaitot kopā gan Kioto protokola 3. panta 3. punkta Apmežošana/atmežošana, gan Kioto protokola 3. panta 4. punkta Meža apsaimniekošana (MARL) kategorijās, piemērojot tehnisko korekciju, MARL mērķim sasniedz **-4444,26 Gg CO₂ ekv.** Kopā ar Kioto protokola 1. pārskata periodā uzkrātajām piesaistes vienībām (28250 Gg CO₂ ekv.), saistību pārpilde līdz 2020. gadam Kioto protokola 3. panta 3. un 4. punktos uzskaitītajām darbībām ir 32694,26 Gg CO₂ ekv.

¹ Pieejams: <https://unfccc.int/ghg-inventories-annex-i-parties/2022>

Saskaņā ar Eiropas Parlamenta un Padomes regulu (ES) 2018/841 par zemes izmantošanā, zemes izmantošanas maiņā un mežsaimniecībā (ZIZIMM) radušos siltumnīcefekta gāzu emisiju un piesaistes iekļaušanu klimata un enerģētikas politikas satvarā laikposmam līdz 2030. gadam, meža apsaimniekošanā 2021.-2025. gadā ir jāsasniedz meža references līmenis, kā arī jākompensē visas ar atmežošanu saistītās SEG emisijas, neatkarīgi no atmežošanas iemesla. Paredzams, ka meža apsaimniekošanai būs jākompensē arī SEG emisijas aramzemēs un zālajos, ja tās pārsniedz noteikto references līmeni (vidējās ikgadējās SEG emisijas 2005.-2009. gados).

Sākot ar 2021. gadu, Latvijai ir jānodrošina SEG emisiju un CO₂ piesaistes uzskaitē atbilstoši EK Īstenošanas regulā (ES) 2020/1208, Padomes Regulā (ES) 2018/1999 un Eiropas Parlamenta un Padomes regulā (ES) 2018/841 par zemes izmantošanā, zemes izmantošanas maiņā un mežsaimniecībā radušos SEG emisiju un piesaistes iekļaušanu klimata un enerģētikas politikas satvarā laikposmam līdz 2030. gadam² noteiktajām prasībām šādās uzskaites kategorijās:

- apmežota zeme;
- atmežota zeme;
- meža zeme;
- zālāji;
- aramzeme;
- no 2026. gada arī apsaimniekoti mitrāji³.

Saskaņā ar 2022. gada ziņojumu EK par politikām, pasākumiem un SEG prognozēm periodā 2021.-2025. gads Latvija izpildīs ZIZIMM sektoram noteikto mērķi – SEG emisijas nepārsniegs prognozējamo bāzes vērtību. Svarīgākais priekšnosacījums saistību izpildei ir references līmeņa pieeja – samazinoties organisko augšņu platībai, samazinājušās arī SEG emisijas aramzemēs un zālajos, kas ļauj prognozēt saistību izpildi šajās zemes izmantošanas kategorijās. Vērtējot katru uzskaites kategoriju atsevišķi, prognozēts, ka SEG emisijas nepārsniegs references līmeni zālāju apsaimniekošanā, bet aramzemes apsaimniekošanā SEG emisijas pārsniegs references līmeni. Tas saistīts ar zālāju transformāciju par aramzemēm. Paredzams, ka apmežošanas radītais SEG emisiju samazinājums nenosegs atmežošanas radītās SEG emisijas. Ja apsaimniekotos mitrājos SEG emisijas uzskaitītu no 2021. gada, arī šajā uzskaites kategorijā emisijas pārsniegtu provizorisko references līmeni. Saskaņā ar 2022. gada ziņojumu par politikām, pasākumiem un SEG prognozēm 2021.-2025. gada periodā ZIZIMM uzskaites kategorijās prognozēta saistību pārpilde par 13611,4 Gg CO₂ vienībām.

Kamēr nav apstiprināti grozījumi Eiropas Parlamenta un Padomes regulā (ES) 2018/841, nevar novērtēt, vai izdosies izpildīt ZIZIMM uzskaites mērķi 2026.-2030. gadam, jo šim periodam bāzes līmeni noteikts pēc 2025. gada. Saskaņā ar regulas (ES) 2018/841 grozījumu projektu no 2026. gada Latvijai noteiktais mērķis (piesaiste ZIZIMM ziņošanas kategorijās – meža zeme, aramzeme, zālājs, mitrāji, apbūve, koksnes produkti) būs -644 Gg CO₂ ekv., kas jāsasniedz 2030. gadā. Paredzams, ka Latvija nevarēs izpildīt šo ZIZIMM sektoram noteikto mērķi, neveicot papildus pasākumus ar nozīmīgu un ātri iegūstamu efektu, jo ZIZIMM sektora neto SEG emisijas 2030. gadā prognozētas 4704 Gg CO₂ ekv., saglabājoties esošajai zemes izmantošanas un saimniekošanas praksei, un 3838 Gg CO₂ ekv. ar pasākumiem, kas paredzēti Kopīgās lauksaimniecības politikas

² Eiropas Parlamenta un Padomes Regula (Es) 2018/841 <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/LV/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018R0841&from=LV>

³ Vajadzības gadījumā, ņemot vērā pieredzi, kas gūta, piemērojot IPCC precizējumu IPCC vadlīnijās, Komisija var nākt klajā ar priekšlikumu atlikt apsaimniekotu mitrāju obligāto uzskaiti uz vēl vienu piecu gadu laikposmu (Regulas Nr. 2018/841. 2. panta 4. punkts).

projektā, attiecīgi, šiem pasākumiem būs nenozīmīga ietekme uz mērķu sasniegšanu un būs nepieciešami daudz vērienīgāki pasākumi emisiju mazināšanai un piesaistes palielināšanai.

Ikgadējo neto SEG emisiju svārstību galvenais iemesls ir mežizstrādes apjoma izmaiņas, bet konstanta CO₂ piesaistes samazinājuma iemesls CO₂ piesaistes samazinājums koksnes produktos un nedzīvajā koksņē, stabilizējoties mežizstrādes apjomam un līdzsvarojoties pieauguma, atmiruma un koksnes ieguves rādītājiem, t.i., neskatoties uz to, ka mežā krājas pieaugums vēl arvien pārsniedz dabisko atmirumu un mežizstrādi, tas vairs nespēj kompensēt SEG emisijas no kūdras augsnēm, it īpaši aramzemēs un zālajos, un kūdras ieguves lauksaimnieciskai izmantošanai radītās SEG emisijas.

Lielāko daļu SEG emisiju ZIZIMM sektorā rada organiskās augsnes ārpus meža zemēm, līdz ar to pasākums, bez kura nav iespējama klimata neitralitātes mērķu sasniegšana, ir **SEG emisiju samazināšana no organiskajām augsnēm**. Saskaņā ar LIFE REstore un citu pētījuma rezultātiem, vienīgais lauksaimniecībā izmantojamās zemēs īstenojams pasākums, kas var būtiski samazināt SEG emisijas no organiskajām augsnēm, pārvēršot tās par CO₂ piesaistes avotu, ir to apmežošana (Bārdule u.c., 2022; Butlers, Lazdiņš, u.c., 2022; Butlers, Spalva, u.c., 2022; Lazdins u.c., 2022; Lazdiņa u.c., 2019; Lazdiņš u.c., 2022). Vidējais ikgadējais SEG emisiju samazinājums, apmežojot visas organiskās augsnes, 30 gadu laikā sasniegtu 3 milj. tonnas CO₂ ekv. gadā, lai arī lielākā daļa emisiju samazinājuma attiektos uz laiku, kad mežaudžu vecums apmežotajās platībās pārsniedz 20 gadus. Tomēr būtisks SEG emisiju samazinājums no augsnes aramzemēs sagaidāms tūlīt pēc apmežošanas. Organisko augšņu apmežošana būtiski samazinātu SEG emisijas ne tikai aramzemēs un zālajos, bet arī radītu emisiju samazinājumu (par vismaz 30%) arī lauksaimniecības sektorā, pateicoties N₂O emisiju samazinājumam (LSFR Silava, 2022).

Meža zemēs var īstenot arī citus pasākumus, kas var nodrošināt ātru CO₂ piesaistes palielināšanas efektu, piemēram, augsnes ielabošana ar minerālmēslojumu vai koksnes pelniem, taču šo pasākumu ietekme, lai arī ir tūlītēja, tomēr ir mazāka nekā apmežošanai. Minerālmēslojuma pielietošana mežā var nodrošināt papildus līdz 0,5 milj. tonnas CO₂ piesaisti gadā līdz 2030. gadam. Arī hidroloģiskā režīma uzlabošana var dot būtisku un ātru efektu (Lazdiņš, 2022; Lazdiņš u.c., 2022; Līcīte u.c., 2022).

Sākot ar 2026. gadu, jaunus izaicinājumu SEG emisiju mazināšanas saistību izpildei radīs kūdras ieguve. Kūdras ieguves radītās SEG emisijas jākompensē ar papildus CO₂ piesaisti meža zemēs, jo citās zemes izmantošanas kategorijās papildus piesaistes potenciāls ir neliels, ja neskaita kokaugu joslu stādījumus. SEG emisiju samazināšanas pasākumi prasa lielus finansiālus ieguldījumus, tāpēc efektīvai līdzekļu izmantošanai jāpildinveido metodes SEG emisiju samazinājuma uzskaitē, kā arī zināšanas par klimata pārmaiņu samazināšanas efektu un kritērijiem pasākumu ieviešanai piemērotu platību atlasei, kā arī jāizstrādā praktiskas rekomendācijas.

Pētījuma ietvaros risināti jautājumi, kas saistīti ar inventarizācijas un prognožu sistēmas pilnveidošanu, izstrādājot un integrējot jauniegūtās zināšanas par dažādu meža apsaimniekošanas paņēmienu ietekmi uz SEG emisijām un CO₂ piesaisti oglekļa uzkrājuma izmaiņu monitoringa un prognožu aprēķinos.

Pētījuma 2. etapa īstenošanas gaitā nav konstatēti papildus riski iepriekš noteikto darba uzdevumu īstenošanā. Pētījumu programmas sagaidāmais rezultāts un galvenie pētījumu virzieni apkopoti tab. 1, bet izpildes progress un rezultātu kopsavilkums 2022. gadā – tab. 2.

Tabula 1. Pētījumu programmas virzieni un sagaidāmais rezultāts

| Nr. | Pētījumu virziens | Sagaidāmais rezultāts 2021.-2025. gados |
|-----|--|---|
| 1. | Mežaudžu oglekļa piesaistes un uzkrājuma | Zinātniskās literatūras analīze par biomasas aprēķina metodēm un oglekļa satura izmaiņām dzīvo koku biomasā. Nacionālā meža |

Oglekļa aprite meža ekosistēmā

| Nr. | Pētījumu virziens | Sagaidāmais rezultāts 2021.-2025. gados |
|-----|--|--|
| | aprēķina metodika AS "Latvijas valsts meži" apsaimniekotajiem mežiem | resursu monitoringa (MRM) parauglaukumu datu apstrāde un dzīvo koku biomasas aprēķini, balstoties uz Latvijai piemērotiem individuālu koku biomasas vienādojumiem izplatītākajām koku sugām. Kokaudžu līmeņa biomasas aprēķina metodikas izstrāde un testēšana valsts mežos. Izstrādāta metodika kokaudžu biomasas pārrēķināšanai oglekļa vienībās. |
| 2. | SEG inventarizācijas un prognožu datu modelēšanas rīku pilnveidošana | Būtisks SEG inventarizācijas nenoteiktības samazinājums un datu interpolācijas precizitātes palielinājums, modeļējot mežizstrādes, atmežošanas un citu zemes izmantošanas veidu maiņas ietekmi uz SEG emisijām, kā arī klimata izmaiņu mazināšanas pasākumu ietekmes novērtēšanas un prognozēšanas precizitātes pieaugumu. Pētījumā izmantoti Copernicus, MRM, augstas izšķirtspējas LiDAR dati un valsts uzturētās LPIS (Land parcel information system) datu bāzes, mašīnmācības metodes. |
| 3. | Trupes ietekmes uz oglekļa uzkrājumu dzīvo koku biomasā modelēšana | Metode stumbra trupes ietekmes uz dzīvu koku biomasas raksturošanai, kā arī trupes ietekme uz kokaudžu oglekļa uzkrājumu vienādojumos. 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. |
| 4. | SEG emisiju samazināšana meža apsaimniekošanā klimata pārmaiņu mazināšanas kontekstā | Pamatojums klimata izmaiņu mazināšanas pasākumu īstenošanai meža apsaimniekošanā nacionālo neitralitātes mērķu sasniegšanai. Klimata pārmaiņu mazināšanas pasākumu- SEG emisiju samazināšanas un CO ₂ piesaistes palielināšanas potenciāla un sociāli ekonomiskais novērtējums. Klimata pārmaiņu mazināšanas darbību katalogs. |
| 5. | Meža ieaudzēšanas un kokaugu stādījumu ierīkošanas meliorācijas sistēmu buferjoslās ietekmes uz SEG emisijām un CO ₂ piesaisti izpēte | 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. |
| 6. | Meža resursu izmantošanas efektivitātes palielināšana klimata pārmaiņu mazināšanai | Mašīnmācības metodes un harvesteru produkcijas failu analīzes rīki kokmateriālu iznākuma algoritmu precizēšanai. Saudzīgu mežizstrādes metožu ietekmes modelēšana bojājumu mazināšanai un vērtīgo sortimentu iznākuma palielināšanai. Kompaktklases tehnikas un citu risinājumu pielietošana atstājamo koku bojājumu samazināšanai kopšanas cirtēs. Pilna dzīves cikla analīze dažādos ražošanas etapos patērētās enerģijas un radīto SEG emisiju griezumā. Metode koksnes produktu un padziļinātas koksnes pārstrādes tehnoloģiju iespējamās ietekmes uz SEG emisijām analīzei. |
| 7. | Meliorācijas sistēmu apsaimniekošanas plānošanas sistēma | Izstrādāts un integrēts SEG emisiju modelēšanas rīkos meliorācijas sistēmu ietekmes uz SEG emisijām un CO ₂ piesaisti prognožu modelis un lēmuma pieņemšanas atbalsta rīks nogabalu un meliorācijas sistēmu līmenim, kas ņem vērā |

| Nr. | Pētījumu virziens | Sagaidāmais rezultāts 2021.-2025. gados |
|-----|---------------------------------|---|
| | | teritorijas reljefu, augsnes īpašības, meteoroloģiskās prognozes, meliorācijas sistēmu nolietojumu un mežaudžu augšanas gaitu. |
| 8. | Oglekļa bilance vecās mežaudzēs | Raksturots oglekļa uzkrājums 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. CO ₂ piesaistes dinamika laikā un atšķirības audzēs ar dažādām augsnēm, detalizētākas rekomendācijas mežsaimniecībai. |

Tabula 2. Pētījumu programmas uzdevumi 2022. gadā

| Nr. | Pētījumi, uzdevumi | Darbības, nodevumi | Īstenošanas progress |
|------|---|---|---|
| 1. | Mežaudžu oglekļa piesaistes un uzkrājuma aprēķina metodika AS “Latvijas valsts meži” (LVM) apsaimniekotajiem mežiem | | |
| 1.1. | Biomases un oglekļa uzkrājuma novērtēšanas metodes izstrādāšana | Darba nolūks: Kokaudžu līmeņa biomasas aprēķina metodikas izstrāde un testēšana, balstoties uz 2021. gadā veikto MRM parauglaukumu atlasu un publicētajiem atsevišķu koku biomasas vienādojumiem un oglekļa satura datiem. Lauka darbi: nav plānoti. Kamerālie darbi: biomasas vienādojumu izstrādāšana un validēšana, izmantojot MRM datus. Nodevums: 2022. gada padarītā apraksts starpziņojumā un etapa pārskatā. | Pabeigts, izstrādāta biomasas aprēķinu metode |
| 1.2. | Izstrādātās metodes aprobēšana LVM plānošanas sistēmās | Darba nolūks: Pagaidu vienādojumu integrēšana LVM plānošanas sistēmā, datu kvalitātes pārbaude. Lauka darbi: nav plānoti. Kamerālie darbi: vienādojumu sagatavošana izmantošanai LVM, aprēķinu vienādojumu publicēšana. Nodevums: 2022. gada padarītā apraksts starpziņojumā un etapa pārskatā. | Pabeigts, sagatavota publikācija un vienādojumi Excel formātā. |
| 2. | SEG inventarizācijas un prognožu datu modelēšanas rīku pilnveidošana | | |
| 2.1. | Metodikas izstrādāšana koku sugu sastāva telpiskās izplatības novērtēšanai Latvijas teritorijā un oglekļa uzkrājuma dinamikas | Darba nolūks: Mežaudžu biomasas un oglekļa daudzuma modeļu izstrāde nogabala / MRM parauglaukuma līmenim. Lauka darbi: nav plānoti. Kamerālie darbi: izmantojot MRM, LiDAR un Copernicus datus, kā arī, izmantojot 2022. | Pabeigts, izstrādāts modelis un tā apraksts iekļauts etapa pārskatā |

| Nr. | Pētījumi, uzdevumi | Darbības, nodevumi | Īstenošanas progress |
|------|--|---|--|
| | modelēšanai, izmantojot attālās izpētes datus un mašīnmācības metodes | gadā gūtās atziņas par LiDAR (ALS) datu izmantošanu koku augstuma modeļu izstrādē, novērtēt iespējas veikt biomasas modelēšanu telpiskā griezumā. Nodevums: 2022. gada padarītā apraksts starpziņojumā un etapa pārskatā. | |
| 2.2. | Metodikas koku sugu sastāva telpiskās izplatības novērtēšanai integrēšana SEG inventarizācijas un prognožu sistēmā | Darba nolūks: Attālās izpētes metožu kvalitātes kontrole 2021. gadā izstrādāto koku augstuma vienādojumu un MRM lauka mērījumos, kā arī Sentinel 2 un Landsat satelītattēlu analīzē balstītu zemes izmantošanas maiņas vienādojumu pārbaude valsts līmeņa aprēķinos. Lauka darbi: lāzerskenēšana un parauglaukumu uzmērījumi pilotteritorijās Valgundes apkārtnē koku augstuma vienādojumu pārbaudei. Kamerālie darbi: zemes izmantošanas maiņas analīze MRM parauglaukumos kontroles datu iegūšanai Sentinel 2 datos balstītā analīzē, veģetācijas indeksu noteikšana Sentinel 2 uzņēmumu sērijās, zemes izmantošanas maiņas analīze, izmantojot Sentinel 2 satelītattēlus. Nodevums: 2022. gada padarītā apraksts starpziņojumā un etapa pārskatā. | Pabeigta lāzerskenēšana 102 ha platībā, atbilstoši MRM metodikai ierīkoti 98 parauglaukumi koku augstuma un biomasas modeļu pārbaudei. Izstrādāta metodika MRM punktu, kuros mainīts zemes izmantošanas veids pēc 2015. gada un veikta parauglaukumu atlase. |
| 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 | Darba nolūks: Novērtēt trupes ietekmi uz oglekļa uzkrājumu dzīvajā biomasā Lauka darbi: Trupes izplatības un sastopamības datu un trupes paraugu ievākšana, baltalkšņa, melnalkšņa, bērza un apses audzēs. Kamerālie darbi: Ievāktu koksnes paraugu analīzes laboratorijā (nosakāmie parametri C, N saturs un koksnes blīvums); iegūto datu analīze. Nodevums: 2022. gada padarītā apraksts starpziņojumā un etapa pārskatā. | Ievākti paraugi no 120 kokiem; veiktas no paraugkokiem izzāģēto paraugu laboratorijas analīzes, sagatavots pārskats par rezultātiem. |
| 3.2. | Izstrādāt oglekļa uzkrājuma izmaiņu prognozes trupes ietekmē pie dažādiem meža apsaimniekošanas scenārijiem | Darba nolūks: Oglekļa uzkrājuma izmaiņu prognozes pie dažādiem meža apsaimniekošanas scenārijiem. Lauka darbi: nav plānoti. Kamerālie darbi: Iegūto datu un metožu kvalitātes kontrole un atbilstība SEG inventarizācijas prasībām novērtēšana (nacionālo metožu atbilstība IPCC 2006 un 2019 vadlīnijām), tajā skaitā metodikas | Veikta Eiropas valstu SEG inventarizācijas ziņojumu analīze. Saskaņota metodika datu ieguvei 3.1 darbībā. Oglekļa zudumi no dzīvās biomasas iekļauti |

| Nr. | Pētījumi, uzdevumi | Darbības, nodevumi | Īstenošanas progress |
|------|---|---|---|
| | | izstrādāšana trapes ietekmes uz CO ₂ emisijām iekļaušanai koku augšanas gaitas modelī AGM sadarbībā ar modeļa izstrādātājiem, lai nodrošinātu harmonizētu pieeju vēsturisko, kārtējā gada un prognožu aprēķinos. Nodevums: 2022. gada padarītā apraksts starpziņojumā un etapa pārskatā. | meža elementa līmeņa aprēķinos. |
| 3.3. | Novērtēt trapes ierobežošanas pasākumu ietekmi uz SEG emisijām un CO ₂ piesaisti meža zemēs | Darba nolūks: Jaunāko pētījumu atziņu integrēšana ietekmes uz SEG emisijām mazināšanas pasākumu aprakstos un metodikā. Lauka darbi: nav plānoti. Kamerālie darbi: Literatūras analīze par klimata pārmaiņu mazināšanas pasākumiem un to skaitlisku novērtēšanu un atspoguļošanu inventarizācijas un prognožu ziņojumos. Nodevums: 2022. gada padarītā apraksts starpziņojumā un etapa pārskatā. | Literatūras analīze, raksturojot dažādu pasākumu ietekmi uz trapes izplatību nākošajā meža aprītē, iekļauta etapa pārskatā. |
| 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 | Darba nolūks: Līdz šim īstenoto pētījumu, kuros demonstrēti klimata pārmaiņu mazināšanas pasākumi, apzināšana un īstenoto pasākumu ietekmes uz oglekļa uzkrājumu un SEG emisijām novērtēšana. Lauka darbi: 2011.-2013. gadā ierīkoto dažādas intensitātes kopšanas ciršu parauglaukumu uzskaitēšana; parauglaukumu marķējuma atjaunošana, taksācijas rādītāju noteikšana visos kopšanas ciršu izmēģinājumu objektos. Kamerālie darbi: taksācijas rādītāju analīze un kopšanas ciršu ietekmes uz oglekļa uzkrājuma izmaiņām raksturošana. Nodevums: 2022. gada padarītā apraksts starpziņojumā un etapa pārskatā. | Uzmērījumi pabeigti 132 parcelēs (par 28% vairāk nekā plānots 2022. gadā), novērtēts oglekļa papildpieaugums krājas kopšanas ciršu un apmežošanas ietekmē |
| 4.2. | Jaunu izpētes objektu ierīkošana klimata pārmaiņu mazināšanas darbību īstermiņa un ilgtermiņa ietekmes novērtēšanai | Darba nolūks: Empīrisku datu ieguve un demonstrējumu objektu ierīkošana klimata pārmaiņu mazināšanas darbību īstermiņa un ilgtermiņa ietekmes novērtēšanai. Lauka darbi: Izmēģinājumu objektu atlase un darbību ieviešanas plāna saskaņošana ar MPS, tajā skaitā meliorācijas sistēmu ietekmes demonstrējumu objektu ierīkošana kūdreņos un āreņos, vispirms nosakot mežaudžu taksācijas rādītājus, raksturojot mitruma režīmu izmēģinājumu objektos un | Ierīkoti izmēģinājumu objekti SEG emisiju monitoringam āreņos un slapjainos, uzsākta empīrisku datu ieguve. |

| Nr. | Pētījumi, uzdevumi | Darbības, nodevumi | Īstenošanas progress |
|------|---|---|---|
| | | <p>ievācot augsnes paraugus nodrošinājuma ar barības vielām raksturošanai, tad veicot dziļvagu tīkla plānošanu. Izpētes objekti ierīkojami pieaugušas P audzes Km vai Ks un Am vai As meža tipos un pieaugušas B audzes Kp un Ap meža tipos. 2022. gadā visos 4 izmēģinājumu objektos ierīkojami augsnes heterotrofās elpošanas un SEG emisiju monitoringa parauglaukumi, kuros jāveic novērojumi (SEG, heterotrofā elpošana, gruntsūdens līmenis, augsnes temperatūra).</p> <p>Kamerālie darbi: metodikas izstrādāšana, sākotnējā datu kvalitātes kontrole.</p> <p>Nodevums: 2022. gada padarītā apraksts starpziņojumā un etapa pārskatā.</p> | |
| 5. | Meža ieaudzēšanas un kokaugu stādījumu ierīkošanas meliorācijas sistēmu buferjoslās ietekmes uz SEG emisijām un CO ₂ piesaisti izpēte | | |
| 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 | <p>Darba nolūks: Meža ieaudzēšanas un kokaugu stādījumu ietekmes uz SEG emisijām raksturošana un vienādojumu izstrādāšana zemes izmantošanas maiņas ietekmes uz SEG emisijām īstermiņa ietekmes prognozēšanai.</p> <p>Lauka darbi: Augsnes gatavošana un stādījumu ierīkošana MPS sadarbībā ar LIFE OrgBalt pētījumu. Augsnes paraugu ievākšana augsnes paraugus un veiksim. Izmēģinājumu objektu atlase apmežošanas demonstrējumu ierīkošanai. Izpētes objektu un parauglaukumu robežu marķēšana izraudzītajos izpētes objektos.</p> <p>Kamerālie darbi: Metodikas izstrādāšana un eksperimenta dizaina izveidošana, augsnes analīzes. Pirms 2020. gada ierīkotajos apmežojumos iegūto datu analīze oglekļa piesaistes raksturošanai P, E un B audzēs 10-12 gadu laikā pēc stādīšanas. Četru saimnieciski nozīmīgāko koku (P, E, B, Ma) sugu mozaīkveida stādījumus ar dažādu koku blīvumu (2000 – kontrole, 1500, 1000, 500 koki uz ha), tajā skaitā 2022.-2023. gadā apmežojamo platību izvēle sadarbībā ar MPS un LVM, raksturosim augsnes īpašības.</p> <p>Nodevums: 2022. gada padarītā apraksts starpziņojumā un etapa pārskatā.</p> | Pabeigta 2011.-2013. gadā ierīkoto izpētes objektu pārmērīšana, lai raksturotu oglekļa uzkrājumu. Izraudzīts mozaīkveida stādījumu objekts MPS, uzsākta meža ieaudzēšanas izmēģinājumu plānošana. |
| 5.2. | Eksperimentālu kokaugu stādījumu ierīkošanas meliorācijas sistēmu buferjoslās LIZ ar | Darba nolūks: Kokaugu stādījumu ietekmes uz SEG emisijām raksturošanas vienādojumu un rekomendāciju kokaugu stādījumu ierīkošanai izstrādāšana. | Izraudzīts demonstrējumu objekts MPS Kalsnavas mežu |

| Nr. | Pētījumi, uzdevumi | Darbības, nodevumi | Īstenošanas progress |
|------|---|---|---|
| | organiskam augsnēm un minerālaugsnēm | <p>Lauka darbi: Buferjoslu stādījumu vietu izvēle sadarbībā ar MPS. SEG monitoringa uzsākšana pirms stādījumu ierīkošanas 2022. gada beigās.</p> <p>Kamerālie darbi: Stādījuma ierīkošanas organizēšana sadarbībā ar MPS. Aizsargjoslu stādījuma dizaina pielāgošana pētījuma vajadzībām. Stādījuma ierīkošana pabeidzama sadarbībā ar MPS līdz 2023. gadā.</p> <p>Nodevums: 2022. gada padarītā apraksts starpziņojumā un etapa pārskatā.</p> | novadā, uzsākta izmēģinājumu objekta ierīkošanas plānošana un augsnes izpēte, uzsākts gāzu apmaiņas monitorings. |
| 5.3. | Sabiedrības informēšanas materiālu sagatavošana par meža ieaudzēšanas un citu darba uzdevumā iekļauto darbību ietekmi uz SEG emisijām | <p>Darba nolūks: Sabiedrības informēšana par klimata pārmaiņu mazināšanas iespējām un priekšnosacījumiem meža apsaimniekošanā.</p> <p>Lauka darbi: video materiālu iegūšana pētījuma publicitātes materiālu veidošanai.</p> <p>Kamerālie darbi: Sagatavot vienu populārzinātnisku rakstu, informāciju radio un TV un LVMI Silava Youtube vietnē (kopā 2 sižeti), vismaz 4 raidierakstus par kokaugu stādījumiem nemeža zemēs un to potenciālo lomu SEG emisiju mazināšanā. Informēt LVM informācijas speciālistus par pētījuma aktivitātēm.</p> <p>Nodevums: 2022. gada padarītā apraksts starpziņojumā un etapa pārskatā; publicējamā informācija.</p> | Sagatavots atbilstoši plānam, papildus izmantojot piedāvājumus sniegt prezentācijas par SEG emisiju mazināšanas pasākumiem ZIZIMM sektorā |
| 6. | Meža resursu izmantošanas efektivitātes palielināšana klimata pārmaiņu mazināšanai | | |
| 6.1. | Mežizstrādes metožu ietekmes uz SEG emisijām ietekmes novērtēšana modelēšana | <p>Darba nolūks: Risināju izstrādāšana un pārbaude SEG emisiju mežizstrādes procesā samazināšanai.</p> <p>Lauka darbi: Darbību datu ieguve risu veidošanās ietekmes uz SEG emisijām raksturošanai, tajā skaitā risu dziļuma lāzerskenēšana vienlaidus atjaunošanas cirtēs.</p> <p>Kamerālie darbi: Pētījumā ietverti mežizstrādes risinājumu SEG emisiju samazināšanai saraksta aktualizēšana un metodikas papildināšana. Fotogrammetrijas metodes izstrādāšana un aprobēšana risu dziļuma raksturošanai vienlaidus atjaunošanas cirtēs. Risu dziļuma, tajā skaitā ar ūdeni piepildīto risu noteikšanas, izmantojot LiDAR datus, metodes izstrādāšana kopšanas un atjaunošanas cirtēm.</p> <p>Nodevums: 2022. gada padarītā apraksts starpziņojumā un etapa pārskatā.</p> | Izstrādāta metodes risu dziļuma noteikšanai, aktualizētas mežizstrādes metodes, kas var sniegt ieguldījumu emisiju mazināšanā, uzsākta SEG emisiju mērīšana risēs |

| Nr. | Pētījumi, uzdevumi | Darbības, nodevumi | Īstenošanas progress |
|------|---|---|---|
| 6.2. | Metodes izstrādāšana koksnes produktu un padziļinātas koksnes pārstrādes ietekmes uz SEG emisijām analīzei | <p>Darba nolūks: Metodes izstrādāšana koksnes produktu un padziļinātas koksnes pārstrādes ietekmes uz SEG emisijām analīzei.</p> <p>Lauka darbi: nav plānoti.</p> <p>Kamerālie darbi: Metodes izstrādāšana koksnes produktu un padziļinātas koksnes pārstrādes ietekmes uz SEG emisijām analīzei, izmantojot IPCC 2019 izmantojamo pieeju koksnes produktu raksturošanai. Nosacījumu definēšana koksnes produktu salīdzināšanai ar alternatīviem produktiem, raksturojot starptautisko ietekmi, kas nav ietverta SEG inventarizācijas ziņojumā.</p> <p>Nodevums: 2022. gada padarītā apraksts starpziņojumā un etapa pārskatā.</p> | Veikta IPCC 2019 vadlīniju prasību analīze. Izstrādāta metodika kokmateriālu struktūras analīzei, izmantojot mašīnmācības metodes. |
| 7. | Meliorācijas sistēmu apsaimniekošanas plānošanas sistēma | | |
| 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. | <p>Darba nolūks: Meliorācijas sistēmu ietekmes uz SEG emisijām raksturošana un rekomendāciju izstrādāšana SEG emisiju mazināšanai.</p> <p>Lauka darbi: Gāzu apmaiņas mērījumu objektu ierīkošana vidēja vecuma āreņos un slapjainos priedes audzēs meliorācijas sistēmu ietekmes uz augsnes heterotrofo elpošanu un SEG emisijām raksturošanai (kopā 4 objekti vidēja vecuma P (Am, Mrs) un B (Ap, Vrs) audzēs).</p> <p>Kamerālie darbi: eksperimentu dizaina izstrādāšana, sākotnējā datu kvalitātes kontrole un datu apkopošana.</p> <p>Nodevums: 2022. gada padarītā apraksts starpziņojumā un etapa pārskatā</p> | Ierīkoti izmēģinājumu objekti un uzsākta gāzu apmaiņas mērīšana. Visos parauglaukumos ievākti augsnes paraugi un noteikti mežaudžu taksācijas rādītāji. |
| 7.2. | Lēmuma pieņemšanas atbalsta rīka izstrādāšana meliorācijas sistēmu uzturēšanai un modernizēšanai. | <p>Darba nolūks: Izstrādāt lēmuma pieņemšanas atbalsta rīku meliorācijas sistēmu uzturēšanai un modernizēšanai.</p> <p>Lauka darbi: Empīrisku datu ieguve meliorācijas sistēmu raksturošanai ar lāzerskenēšanas metodi, izmantojot bezpilota lidaparātu.</p> <p>Kamerālie darbi: Metodes meliorācijas sistēmu stāvokļa analīzes pielāgošana meža zemēm un SEG emisiju raksturošanai kūdreņos, balstoties uz pētījumā “Aramzemes un ilggadīgo zālāju apsaimniekošanas radīto siltumnīcefekta gāzu (SEG) emisiju un oglekļa dioksīda (CO₂) piesaistes uzskaites sistēmas pilnveidošana un atbilstošu metodisko risinājumu izstrādāšana” izstrādāto metodiku</p> | Veikta 80 grāvju trašu lāzerskenēšana, veikta 60 objektu veģetācijas uzmērīšanai uz lauka, uzsākta metodikas pielāgošana meža zemēm. |

Oglekļa aprite meža ekosistēmā

| Nr. | Pētījumi, uzdevumi | Darbības, nodevumi | Īstenošanas progress |
|------|---|---|---|
| | | lauksaimniecībā izmantojamās zemes raksturošanai. Nodevums: 2022. gada padarītā apraksts starpziņojumā un etapa pārskatā | |
| 7.3. | Izstrādāt modelēšanas instrumentus Hg, SEG emisiju un biogēno elementu izneses aprēķiniem | Darba nolūks: Izstrādāt metodi un darbību datus izšķīdušā organiskā oglekļa (DOC), Hg un biogēno elementu izneses modelēšanai no kūdras augsnēm un minerālaugsnēm. Lauka darbi: grāvju trašu apsekošana modelēšanas rezultātu empiriskai pārbaudei. Kamerālie darbi: Pētījuma metodikas izstrādāšana HYPE vai ekvivalenta modeļa adaptēšanai meža zemēm. Darbību datu kvalitātes pārbaude un uzlabojumu plāna izstrādāšana. Alternatīva modeļa izvēle var būt saistīta ar telpisko datu analīzes rīku attīstību un nepieciešamību vienkāršot nepieciešamo darbību datu kopas. Nodevums: 2022. gada padarītā apraksts starpziņojumā un etapa pārskatā. | Apkopota informācija par dažādiem ūdens plūsmas modeļiem nepieciešamajiem darbību datiem un to iegūšanas iespējām Latvijā. Izveidota koncepcija evapotranspirācijas, ūdens plūsmas un ūdens ķīmiskā sastāva datu sasaistīšanai. |
| 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 | Darba nolūks: Raksturot mežaudžu vecumstruktūras izmaiņu ietekmi uz SEG emisijām. Lauka darbi: Izpētes objektu apsekošana un pētījuma objektu izvēle, parauglaukumu ierīkošana un uzmērīšana. Kopumā 25 audzes ar mērķi pētījuma ietvaros (esošais un nākamie 4 etapi) ievākt datus no kūdreņiem un purvaiņiem. Augsnes un zemsegas paraugu ievākšana (3 punkti 2 atkārtojumos 4 dziļumos, katrai audzei) un analīze (blīvums, slāpekļis, ogleklis) Meža vides laboratorijā. Audžu skaits: 35, jo atsevišķi papildus paraugi jāvēc arī tajās, kur iepriekš nav iegūti izmantojami rezultāti. Kamerālie darbi: Audžu (vecās audzes, kūdreņi un kontrolei purvaiņi) atlase, kartogrāfiskā un attālās izpētes materiāla sagatavošana,. Datu par pieaugušām audzēm iegūšana no Meža resursu monitoringa. Nodevums: 2022. gada padarītā apraksts starpziņojumā un etapa pārskatā. | Ierīkoti izmēģinājumu objektu un uzsākta datu ieguve. |
| 8.2. | Rekomendāciju sagatavošana mežkopības praksei | Darba nolūks: Sagatavot rekomendācijas mežkopības praksei SEG emisiju samazināšanai un CO ₂ piesaistes palielināšanai, regulējot mežaudžu vecumstruktūru. Lauka darbi: Nav plānoti. | Uzsākta rekomendāciju sagatavošana, paredzot, ka tās papildināsim, iegūstot jaunus |

Oglekļa aprite meža ekosistēmā

| Nr. | Pētījumi, uzdevumi | Darbības, nodevumi | Īstenošanas progress |
|------------|---------------------------|---|-----------------------------|
| | | Kamerālie darbi: Rekomendāciju sagatavošana meža politikai un mežkopības praksei, ņemot vērā iegūtos datus par oglekļa uzkrājumu un to analīzi kontekstā ar līdzīgu informāciju sausieņu mežos un jaunākās (pieaugušās) audzēs Nodevums: 2022. gada padarītā apraksts starpziņojumā un etapa pārskatā. | pētījumu rezultātus. |

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

Pētījuma ietvaros veikta zinātniskās literatūras analīze par biomasas aprēķina metodēm un oglekļa satura izmaiņām dzīvo koku biomasā, kā arī Nacionālā meža resursu monitoringa (MRM) parauglūkumu datu apstrāde un dzīvo koku biomasas aprēķini, balstoties uz Latvijai piemērotiem individuālu koku biomasas vienādojumiem izplatītākajām koku sugām (Liepiņš, Lazdiņš, u.c., 2017; Liepiņš, Liepiņš, u.c., 2021). Kokaudžu biomasas struktūras un to ietekmējošo faktoru analīze veikta, pamatojoties uz MRM parauglūkumu datiem LVM apsaimniekotajos mežos, tajā skaitā salīdzinot paraugkopas, kas raksturo visus mežus un LVM apsaimniekotos mežus, lai pārlicinātos, vai izstrādātā metode izmantojama visu Latvijas mežu raksturošanai. Izmantojot iegūtos datus, veikta kokaudžu līmeņa biomasas aprēķina metodikas izstrāde un testēšana LVM apsaimniekotajos mežos. Oglekļa aprītes raksturošanai, balstoties uz Latvijā iegūtiem datiem (Bārdule, Liepiņš, u.c., 2021), izstrādāta metodika kokaudžu biomasas pārrēķināšanai oglekļa vienībās.

1.1. Izzinātības apskats

Pieaugoša interese par oglekļa uzkrāšanos kokaugu biomasā un mērķtiecīgu mežu apsaimniekošanu klimata pārmaiņu mazināšanas nolūkā, pamato nepieciešamību nepārtraukti atjaunot informāciju par Latvijas mežaudžu stāvokli un to augšanas gaitu. Kokiem augot, atmosfērā esošais oglekļa dioksīds (CO₂) tiek absorbēts koksne, mizā, zaros un lapās, tāpēc mežiem ir nozīmīga loma kopējā oglekļa bilancē. Vadoties pēc Klimata pārmaiņu starpvaldību padomes klasifikācijas, meža ekosistēmā piecas galvenās oglekļa krātuves ir stumbra un zaru biomasas, sakņu biomasas, nobiras, kritālas un organiskās vielas augsnē (Eggleston u.c., 2006). Fotosintēzes procesā augos uzņemtais ogleklis nepārtraukti pārvietojas starp šīm oglekļa krātuvēm. Vislielākais piesaistītā oglekļa apjoms ir akumulēts kokaugu virszemes biomasā, kas ir vissvarīgākā un redzamākā no sauszemes oglekļa krātuvēm (Ravindranath & Ostwald, 2008). Sakņu biomasas jeb visu dzīvo sakņu galvenā funkcija globālajā oglekļa aprītes ciklā ir tā nogādāšana un uzglabāšana augsnē. Nobiru un kritālu kopējā masa sastāda vien nelielu īpatsvaru no kopējā, mežaudzēs akumulētā oglekļa apjoma, tāpēc tai ir neliels īpatsvars kopējā oglekļa bilancē. Arī organiskā augsne ir nozīmīga oglekļa krātuve mežā, bet oglekļa piesaiste augsnē, tāpat kā nobirās un kritālās akumulētais ogleklis ir tiešā mērā atkarīgs no augu virszemes un sakņu daļas biomasas (Kumar u.c., 2006; Lal, 2005). Šī iemesla dēļ kokaudžu biomasas novērtēšana ir priekšnoteikums, lai pēc tam varētu apzināt nobirās, kritālās un augsnē akumulēto oglekļa apjomus.

Koka virszemes biomasas ietver vairākas biomasas frakcijas, kuras nepieciešams izdalīt un noteikt atsevišķi: stumbra koksne, stumbra miza, sausie zari, dzīvie zari, lapas vai skuju. Novērtējot mežaudzēs uzkrāto oglekļa apjomu, vairumā gadījumos zinātnieki biomasas frakciju skaitu samazina, piemēram, stumbra koksnes masa tiek noteikta kopā ar mizu, iegūstot uzreiz visa stumbra biomasu. Arī skujkoku dzīvajiem zariem ļoti bieži pieskaita klāt skuju un čiekuru masu. Nedaudz citādāk ir ar lapkokiem, jo, mērot zaru biomasu koku bezlapu periodā, lapu masa netiek iekļauta aprēķinos.

Diezgan liels oglekļa īpatsvars, ko kokaugi asimilē fotosintēzes laikā, tiek novadīts uz koka daļu, kas atrodas augsnē jeb koka saknēs (Litton u.c., 2007). Dažkārt, sakņu biomasā uzkrātais oglekļa apjoms, var pat pārsniegt koka virszemes biomasā akumulētā oglekļa apjomu (Moser u.c., 2010) tomēr sakņu biomasas īpatsvars kokiem visbiežāk sastāda apmēram 20–26% no kopējās biomasas (N. Ravindranath & Ostwald, 2008a). Koka saknes boreālās un mērenās joslas mežos visblīvāk ir izvietotas augsnes virskārtā; pirmajos 30 cm no augsnes virskārtas ir izvietots 80–90%

no visām saknēm (Jackson u.c., 1996). Neskatoties uz to, ka koku sakņu biomasai ir būtiska loma augsnes veidošanās procesos un mežaudžu oglekļa bilancē, tā joprojām ir ļoti maz pētīta, salīdzinot ar koku virszemes daļu. Lielākā daļa publicēto biomasas vienādojumu izstrādāti, lai noteiktu virszemes biomasu, jo reprezentatīvu sakņu biomasas datu iegūšana ir daudz dārgāka un laikietilpīgāka.

Līdzīgi kā koku virszemes biomasu, arī sakņu biomasu sastāv no vairākām biomasas frakcijām. Koku resnākās saknes jeb balstsaknes un uzsūcošās saknes (saknes ar diametru mazāku par 2 mm) veido galveno sakņu biomasas daļu un tām ir svarīga nozīme kopējā oglekļa un barības vielu aprītes ciklā (Clark u.c., 2001; Malhi u.c., 2009; Smyth u.c., 2013). Uzsūcošās saknes visbiežāk tiek izslēgtas no sakņu biomasas aprēķiniem, jo tās praktiski nevar empīriski atdalīt no organiskās augsnes (Ravindranath & Ostwald, 2008). Koka celms, kurš sastāv no virszemes un augsnē esošās monolītās, atsevišķās saknēs nediferencētās daļas, parasti tiek pieskaitīts pie sakņu biomasas, tomēr celma daļa dažādos pētījumos var tikt definēta atšķirīgi. Diskutabls ir jautājums par vietu, kur beidzas koka virszemes un sākas sakņu biomasu. Teorētiski uzskata, ka koka virszemes biomasu sākas līdz ar augsnes virsmu, bet praktiski šādā augstumā koka stumbru biomasas mērījumiem sagatavot ir ļoti grūti, īpaši, ja koks sasniedz lielas dimensijas. Praksē kā vietu, kur sadalās virszemes un celma/sakņu biomasas, visbiežāk izmanto noteiktu celma augstumu, kuru vai nu nosaka zināmā attālumā no zemes virsmas vai proporcionāli koka augstumam, kā tas parasti tiek darīts Latvijā veiktajos pētījumos.

Koku vai kokaudžu biomasas novērtēšanas paņēmienus pamatā var grupēt divās metodēs. Pirmā metode, kas saukta arī par tiešo biomasas novērtēšanu vai destruktīvo metodi, ir izvēlēto paraugkoku vai pilnīgi visu koku nozāģēšana noteiktā platībā. No visām koku biomasas aprēķina metodēm destruktīvā metode ir visprecīzākā, tomēr arī dārgākā un darbietilpīgākā (Gibbs u.c., 2007). Metodes pamatprincips ir atsevišķu koku frakciju - stumbra un zaru atdalīšana, svēršana vai tilpuma aprēķināšana un reprezentatīvu paraugu ievākšana absolūti sausas biomasas aprēķināšanai. Metodes ierobežojumi ir tādi, ka tā ir piemērojama tikai nelielām platībām, vai atsevišķu koku biomasas noteikšanai. Minēto metodi galvenokārt pielieto izstrādājot alometriskos vienādojumus, kurus, savukārt piemēro biomasas novērtēšanai jau plašākā mērogā. Arī Latvijai, balstoties uz šo metodi, ir izstrādāti individuālu koku biomasas vienādojumi saimnieciski nozīmīgākajām sugām (Liepiņš, Lazdiņš, u.c., 2017; Liepiņš, Bleive, u.c., 2021).

Pretēji iepriekšējai, netiešās biomasas novērtēšanas metodes paredz biomasas aprēķināšanu kokus nenozāģējot. Metode piemērojama meža ekosistēmām, kurās aug retas vai aizsargājamas koku sugas, un šādu koku nozāģēšana nav iespējama vai pieļaujama, vai arī, novērtējot biomasu jau plašākā mērogā. Piemēram, Montès u.c. (2000) izstrādāja metodi *Juniperus thurifera* L. biomasas novērtēšanai. Pētījumā individuālu koku biomasu novērtēja datorizēti rekonstruējot koka formu un vainagu (pēc divām uzņemtām fotogrāfijām noteiktos leņķos), tad, izmantojot katra koka frakciju (stumbrs, zari, lapas) tilpuma un blīvuma datus, aprēķināja koka biomasu. Cits veids kā netieši novērtēt virszemes biomasu, ir kāpt kokos un mērīt zaru vai stumbra diametrus noteiktās vietās un augstumos (Djomo u.c., 2016), vai arī vienkārši nomērīt krūšaugstuma caurmēru, koka augstumu, koka tilpumu, blīvumu un, pielietojot alometriskos vienādojumus, aprēķināt biomasu (Ravindranath & Ostwald, 2008). Lai gan šīs metodes raksturojamas kā saudzīgākas, lai pārbaudītu to precizitāti, ir nepieciešama atsevišķu koku nozāģēšana un nosvēršana, kas atbilst destruktīvai metodei.

No visām koku biomasas novērtēšanas metodēm alometrisko vienādojumu pielietošana ir visizplatītākā, kamēr kokaudžu biomasas novērtēšanai ar tālīzpētes tehnoloģijām pēdējo trīsdesmit gadu laikā velta arvien lielāku uzmanību un ir izdarīts apjomīgs darbs, attīstot un pilnveidojot tās. Tālīzpētes galvenā priekšrocība ir īsā laikā un ar salīdzinoši zemām izmaksām iegūstama kokaudžu biomasas informācija par plašām teritorijām un grūti pieejamām platībām. Lielākā daļa prognožu par biomasu un oglekļa uzkrājumiem mežaudzēs visā pasaulē ir ļoti aptuvenas, tāpēc tālīzpētes metožu

attīstība ir vienīgais reālais risinājums, kā samazināt biomasas aprēķinu nenoteiktību. Šajā kontekstā LIDAR izmantošana ir kļuvusi par dzīvotspējīgāko tālīzpētes metodi (Stovall u.c., 2018), jo biomasas datu ievākšana ar destruktīvu metodi, nozāģējot kokus vai koku grupas un tādā veidā raksturotu liela mēroga biomasas izmaiņas, nav iespējama.

Biomasas vienādojumus var izstrādāt gan atsevišķu koku, gan visas kokaudzes līmenī. AS „Latvijas valsts meži” (LVM) un citu īpašnieku apsaimniekotajos mežos CO₂ piesaistes prognozēšanā un ilgtermiņa plānošanā nevar izmantot iepriekš Latvijai izstrādātos individuālu koku biomasas aprēķina vienādojumus, jo to apsaimniekotajos mežos galvenokārt ir pieejama informācija tikai par mežaudžu vidējiem taksācijas rādītājiem. Latvijai izstrādātajiem individuālu koku biomasas vienādojumiem ir nepieciešami dati par katra mežaudzē vai parauglaukumā augošā koka augstumu un caurmēru, kas apgrūtina to praktisku pielietojumu. Lai LVM vienkāršoti varētu noskaidrot dažādu meža apsaimniekošanas darbību ietekmi uz CO₂ piesaisti, pētījumā izstrādāta praktiski pielietojama mežaudžu biomasas un oglekļa uzkrājuma aprēķina metodika. Izmantojot pētījumā izstrādātos vienādojumus, pēc audzes vidējiem taksācijas rādītājiem varēs aprēķināt dažādu mežaudžu virszemes, pazemes, stumbra un zaru biomasu.

Latvijā informāciju par meža resursiem un to dinamiku kopš 2003. gada iegūst no meža resursu monitoringa (MRM). Kopumā visā Latvijas teritorijā izvietoti 16157 MRM parauglaukumi, un katrs parauglaukums tiek uzmērīts reizi 5 gados. Atbilstoši pētījuma kalendārajam plānam, 2021. gada IV. ceturksnī uzsākta individuālu koku biomasas vienādojumu (priedei, eglei, bērzam, apsei, baltalksnim un melnalksnim) sasaiste ar Latvijas MRM ievāktajiem koku mērījumu datiem. Izveidotā datu kopa izmantota, lai pielāgotu biomasas un oglekļa uzkrājuma aprēķina metodiku “Latvijas valsts mežu” un citu meža īpašnieku vajadzībām, izstrādājot praktiski lietojamus “vienkāršotus” mežaudžu biomasas aprēķina vienādojumus atbilstoši valdošajai koku sugai. Lai meža ekosistēmā palielinātu oglekļa piesaisti, nepieciešamas precīzas zināšanas par dažādās biomasas frakcijās akumulēto oglekli, kā arī vajadzīga izpratne par faktoriem, kas šo uzkrājumu ietekmē. Tāpēc pirmajā pētījuma īstenošanas gadā aprēķinātas un izstrādātas oglekļa satura biomasā vērtības saimnieciski nozīmīgāko koku sugu dominējošās audzēs (Bārdule, Liepiņš, u.c., 2021). Publicētās oglekļa satura vērtības ir izstrādātas un piemērotas mežaudžu oglekļa uzkrājuma aprēķiniem Latvijā. Detalizēts apraksts par oglekļa satura vērtībām un to lietošanu iekļauts 2021. gada etapa pārskatā.

Kokaudžu biomasas raksturošanai un izstrādāto vienādojumu validācijai LVM apsaimniekotajiem mežiem izmanto MRM 2016.-2020. gada rezultātus, ietverot III cikla pēdējo triju gadu uzmērījumus un IV cikla pirmo divu gadu uzmērījumus, kopā tie ir 3258 MRM parauglaukumi. Savukārt biomasas vienādojumu izstrādei izmanto visus Latvijas MRM parauglaukumu datus, kuri atbilst atlases kritērijiem. Audžu biomasas aprēķina vienādojumu izstrādei un validācijai atlasa tos parauglaukumus un to sektorus, kuru platība ir vismaz 400 m², jo pieņemts, ka šādas platības sektoros ir pieejams adekvāts koku sadalījums, kas nav mazākos sektoros. MRM ierīkotajos pastāvīgajos parauglaukumos uzmērītas visas koku sugas, sākot no 2,1 cm diametra. Saskaņā ar MRM klasifikāciju kokaudžu biomasas vienādojumu izstrādei izmantoti tikai tie parauglaukumu dati, kuri atbilst zemes kategorijām: 10 (mežs) un 62 (mežs lauksaimniecības zemē). Tā kā individuālu koku biomasas vienādojumi Latvijā izstrādāti tikai sešām saimnieciski nozīmīgākajām koku sugām, pārējām parauglaukumos sastopamajām koku un krūmu sugām, vienādojumus piemēros atbilstoši 3. tabulai. Galarezultātā, 6530 MRM parauglaukumi atbilst izvirzītajiem atlases kritērijiem, un ir izmantoti Latvijas mežaudžu biomasas vienādojumu izstrādei (4. tabula).

Tabula 3. Mežu resursu monitoringa (MRM) datubāzē koku sugām piemērotie aprēķina vienādojumi kokaudžu biomasas aprēķiniem

| Suga | Sugu grupa | Sugas kods | Piemērotais vienādojums |
|---------------------------|------------|------------|-------------------------|
| priede | skujkoks | 1 | priede |
| egle | skujkoks | 3 | egle |
| bērzs | lapkoks | 4 | bērzs |
| melnalksnis | lapkoks | 6 | melnalksnis |
| apse | lapkoks | 8 | apse |
| baltalksnis | lapkoks | 9 | baltalksnis |
| ozols | lapkoks | 10 | bērzs |
| osis | lapkoks | 11 | bērzs |
| liepa | lapkoks | 12 | bērzs |
| lapegle | skujkoks | 13 | egles |
| citas priedes | skujkoks | 14 | priede |
| citas egles | skujkoks | 15 | egle |
| goba, vīksna | lapkoks | 16 | bērzs |
| dižskabārdis | lapkoks | 17 | bērzs |
| skābārdis | lapkoks | 18 | bērzs |
| papele | lapkoks | 19 | apse |
| vītols | lapkoks | 20 | apse |
| blīgzna | lapkoks | 21 | bērzs |
| ciedru priede | skujkoks | 22 | priede |
| baltegle | skujkoks | 23 | egle |
| kļava | lapkoks | 24 | bērzs |
| mežābele | lapkoks | 51 | bērzs |
| ķirsis | lapkoks | 56 | bērzs |
| citas koku un krūmu sugas | lapkoks | – | bērzs |

Tabula 4. Mežaudžu biomasas vienādojumu izstrādē izmantoto MRM parauglaukumu vidējās vērtības

| Dominējošā suga | MRM Parauglaukumu skaits | Krāja, m ³ ha ⁻¹ | AGB ⁴ , t ha ⁻¹ | BGB, t ha ⁻¹ | SB, t ha ⁻¹ | BB, t ha ⁻¹ |
|-----------------|--------------------------|--|---------------------------------------|-------------------------|------------------------|------------------------|
| Priede | 1838 | 265,8 | 143,7 | 35,2 | 112,4 | 28 |
| Egle | 1231 | 224,4 | 128 | 35,5 | 89,9 | 34,2 |

⁴ AGB – kopējā virszemes biomasas, BGB – kopējā sakņu un celma biomasas, SB – stumbra biomasas, BB – zaru biomasas.

| Dominējošā suga | MRM Parauglaukumu skaits | Krāja, m ³ ha ⁻¹ | AGB ⁴ , t ha ⁻¹ | BGB, t ha ⁻¹ | SB, t ha ⁻¹ | BB, t ha ⁻¹ |
|-----------------|--------------------------|--|---------------------------------------|-------------------------|------------------------|------------------------|
| Bērzs | 1800 | 182,9 | 105,5 | 28,6 | 84,3 | 21 |
| Apse | 513 | 231,1 | 114,6 | 28 | 90,8 | 21,3 |
| Baltalksnis | 582 | 123,6 | 61,7 | 16,5 | 50,4 | 11,8 |
| Melnalksnis | 396 | 210,3 | 108,9 | 28,1 | 91,7 | 17,2 |
| Citas | 170 | 173,4 | 90,9 | 30,3 | 68,1 | 32,4 |

1.2. Rezultāti un to analīze

Korelācijas analīze norādīja uz statistiski būtisku ($p < 0,001$) pozitīvu korelāciju starp analizētajām biomasas frakcijām un pārbaudītajiem mežaudzes taksācijas rādītājiem, kuri iegūti no MRM parauglaukuma līmeņa datiem (5. tabula). Mežaudzes krājai un mežaudzes šķērslaukumam konstatēta ciešākā korelācija ar mežaudzes biomasu, savukārt mežaudzes vidējais vecums un vidējais krūšaugstuma caurmērs bija mazāk informatīvi rādītāji, īpaši platībās, kurās dominēja parastā priede. Vājākā korelācija pētījumā (0,53-0,96) konstatēta starp audzes taksācijas rādītājiem un audzes kopējo zaru biomasu. Daudz izteiktāka zaru biomasas datu izkliede, kas ievērojami pārsniedz izkliedi citās biomasas frakcijās, ir izskaidrojama ar lielāku citu faktoru ietekmi uz zaru biomasas aprēķinu nenoteiktību. Ņemot vērā salīdzinoši lielo korelāciju starp audzes krāju un mežaudzes biomasu, izstrādātajos vienādojumos krāja izmantota kā vienīgais mainīgais, lai izvairītos no kolinearitātes problēmām starp prognozējošajiem mainīgajiem.

Tabula 5. Spīrmena rangu korelācijas koeficientu vērtības starp mežaudzes taksācijas rādītājiem un audzes kopējo virszemes (AGB), pazemes biomasu (BGB), stumbra biomasu (SB) un zaru biomasu (BB)

| Dominējošā suga | Biomasas frakcija | Audzes vecums | Vidējais caurmērs | Vidējais augstums | Šķērslaukums | Krāja |
|-----------------|-------------------|---------------|-------------------|-------------------|--------------|-------|
| Priede | AGB | 0,56 | 0,75 | 0,86 | 0,94 | 0,99 |
| | BGB | 0,55 | 0,76 | 0,86 | 0,93 | 0,99 |
| | SB | 0,55 | 0,75 | 0,89 | 0,93 | 0,99 |
| | BB | 0,53 | 0,64 | 0,62 | 0,82 | 0,82 |
| Egle | AGB | 0,75 | 0,77 | 0,86 | 0,96 | 0,99 |
| | BGB | 0,75 | 0,78 | 0,85 | 0,96 | 0,99 |
| | SB | 0,79 | 0,80 | 0,89 | 0,94 | 0,99 |
| | BB | 0,62 | 0,66 | 0,70 | 0,92 | 0,90 |
| Bērzs | AGB | 0,82 | 0,83 | 0,91 | 0,95 | 0,99 |
| | BGB | 0,83 | 0,85 | 0,90 | 0,94 | 0,99 |
| | SB | 0,81 | 0,82 | 0,91 | 0,95 | 0,99 |
| | BB | 0,83 | 0,84 | 0,84 | 0,86 | 0,93 |

| Dominējošā suga | Biomasa frakcija | Audzes vecums | Vidējais caurmērs | Vidējais augstums | Šķerslaukums | Krāja |
|-----------------|------------------|---------------|-------------------|-------------------|--------------|-------|
| Apse | AGB | 0,93 | 0,90 | 0,94 | 0,96 | 0,99 |
| | BGB | 0,92 | 0,90 | 0,93 | 0,95 | 0,99 |
| | SB | 0,92 | 0,89 | 0,94 | 0,96 | 0,99 |
| | BB | 0,92 | 0,91 | 0,91 | 0,91 | 0,96 |
| Baltalksnis | AGB | 0,86 | 0,85 | 0,92 | 0,96 | 0,99 |
| | BGB | 0,83 | 0,81 | 0,88 | 0,97 | 0,99 |
| | SB | 0,86 | 0,85 | 0,92 | 0,97 | 0,99 |
| | BB | 0,86 | 0,85 | 0,85 | 0,88 | 0,92 |
| Melnalksnis | AGB | 0,83 | 0,78 | 0,89 | 0,96 | 0,99 |
| | BGB | 0,79 | 0,73 | 0,84 | 0,96 | 0,98 |
| | SB | 0,82 | 0,77 | 0,90 | 0,96 | 0,99 |
| | BB | 0,77 | 0,77 | 0,74 | 0,81 | 0,85 |

Vispirms mežaudžu biomasas dati analizēti ar vienfaktora nelineāru jaukta tipa modeli “nlmer” no pakotnes “lme4” datorprogrammā R, kurš dod iespēju analizēt biomasas datus ne vien atkarībā no pētītajiem argumentiem, bet arī starp atlasītajiem MRM parauglaukumiem. Jaukta tipa modelī mežaudzes biomasas prognozēta no audzes krājas, kurš iekļauts modelī kā fiksētais faktors, savukārt reģions, meža tips un sugu sastāvs nogabalā iekļauti modelī katrs atsevišķi kā randomizētie faktori. Tas darīts ar nolūku pārbaudīt iespējamās biomasas atšķirības dažādos Latvijas novados, meža tipos un atbilstoši valdošās koku sugas krājas īpatsvaram meža nogabalā. Veiktā procedūra apstiprināja, ka mežaudzes biomasas prognozes neietekmē reģions un meža tips, turpretī sugu sastāva ietekme uz mežaudzes krājas – biomasas attiecību mainījās atkarībā no biomasas frakcijas (virszemes, pazemes, stumbra vai zaru biomasas) un dominējošās koku sugas nogabalā. Mežaudzes sugu sastāvu un mistrojumu praksē raksturo ar audzes sastāva formulu. Papildus vienkāršotai biomasas aprēķina metodikas izstrādei, pētījumā pārbaudīta arī dominējošās sugas koeficienta vērtības audzes sastāva vienādojums ietekme uz izstrādāto vienādojumu precizitāti.

Galarezultātā izvēlētas divas matemātiskās izteiksmes (1. un 2. vienādojums), aprēķinot mežaudzes stumbra biomasu (SB), dzīvo un sauso zaru biomasu (BB), kopējo virszemes biomasu (AGB) un kopējo celma daļas un sakņu biomasu (BGB). AGB aprēķināta saskaitot SB un BB (skujas un čiekuri ir iekļauti skujkokiem, bet lapas nav iekļautas lapkokiem), kamēr kopējā BGB ir aprēķināta, saskaitot celma, balstsakņu un sīko sakņu biomasu. Vienādojumu Nr. 1. un 2. koeficienti aprēķināti, izmantojot nelineāro funkciju “nls” datorprogrammā R.

$$B_{sc} = a * M_s^{b_1} \quad (1)$$

$$B_{sc} = a * M_s^{b_1} * CI_s^{b_2} \quad (2)$$

kur:

B_{sc} – audzes s biomasas frakcijai c , t ;

M_s – audzes krāja, $m^3 \text{ ha}^{-1}$;

CI_s – dominējošās sugas koeficienta vērtība audzes sastāva vienādojums;

a , b_1 un b_2 – regresijas koeficienti.

Izstrādāto regresijas vienādojumu novērtēšana veikta ar determinācijas koeficientu (R^2), vidējās vērtības vidējo kvadrātisko kļūdu (RMSE) un vidējo absolūto kļūdu (MAPE). MAPE vienādojumos raksturo kļūdas procentuālo novirzi no vidējās vērtības. R^2 norāda, kāda atkarīgās pazīmes variācijas daļa tieši atkarīga no faktoriālo pazīmju (argumentu) variācijas, bet RMSE atspoguļo regresijas vienādojuma atlikumu vidējo izkliedi ap vidējo vērtību. Lai aprēķinātu varbūtību, kurš no salīdzinātajiem vienādojumiem ir labāks, izmantots Akaike informācijas kritērijs (AIC). Informācijas kritēriji palīdz modeļu salīdzināšanā un klasificēšanā no vislabākā uz sliktāko (Burnham & Anderson, 2004) un tiek plaši izmantoti bioloģijā un citās zinātnēs (Akaike, 1974).

Alometriskie vienādojumi pētījumā izstrādāti Latvijā izplatītāko koku sugu mežaudzēm un virszemes un pazemes biomasas frakcijām. Regresijas vienādojumu koeficientu vērtības “bāzes” vienādojumam (1. vienādojums) apkopotas 6. tabulā. Kopumā visas koeficientu vērtības bija statistiski būtiskas ($p < 0,001$) un izskaidroja no 64% līdz 99% mežaudzes biomasas vērtību variēšanas. Nevienu koku sugai un biomasas frakcijai nebija nevēlamu tendenču, kas norādītu uz sistemātiskām vienādojuma atlikumu novirzēm no vidējās vērtības.

Mežaudzes līmeņa biomasas vienādojumi sešu izplatītāko koku sugu audzēm izstrādāti, izmantojot funkcijas ar vienu un diviem argumentiem. Arī paplašinātajā vienādojumā (2. formula) audzes krāja un dominējošās sugas koeficienta vērtība bija statistiski būtiski argumenti vairumā gadījumos uzlabojot “bāzes” vienādojumu (1. vienādojums) attiecībā uz statistiskajiem rādītājiem AIC, RMSE, MAPE un R^2 . Izņemot bērza BGB un melnalkšņa SB frakcijas, visām pārējām koku sugām un to frakcijām, 2. vienādojums uzrāda zemākas AIC vērtības, tādējādi minētajā kontekstā pārspējot vienkāršāko vienādojumu (1. vienādojums). Tomēr jāatzīmē, ka bērza BGB un melnalkšņa SB frakcijām, abu vienādojumu AIC vērtību starpība ir tikai -1, un ar tik mazu starpību nevar droši apgalvot, ka labākais modelis ir piemērotāks; dati ir vienkārši neviennozīmīgi. Kopumā statistiskie rādītāji 2. vienādojumam bija nedaudz labāki, norādot uz sliktāku 1. vienādojuma veikspēju, tāpēc ja vien ir pieejama informācija par dominējošās koku sugas īpatsvaru audzē, ieteicams lietot 2. vienādojumu.

Tabula 6. Regresijas vienādojuma Nr. 1. koeficientu vērtības un statistiskie rādītāji

| Dominējošā suga | Biomasas frakcija ⁵ | Koeficientu vērtības | | AIC | RMSE | MAPE | R^2 |
|-----------------|--------------------------------|----------------------|-------|----------|------|------|-------|
| | | a | b_1 | | | | |
| Priede | AGB | 1,036 | 0,889 | 12 837,5 | 8,2 | 6,0 | 0,992 |
| | BGB | 0,248 | 0,893 | 9473,8 | 3,2 | 8,0 | 0,981 |
| | SB | 0,375 | 1,021 | 13 022,5 | 8,3 | 9,0 | 0,989 |
| | BB | 1,685 | 0,517 | 12 837,5 | 7,9 | 29,7 | 0,703 |
| Egle | AGB | 1,428 | 0,840 | 8791,9 | 8,6 | 9,48 | 0,991 |
| | BGB | 0,553 | 0,782 | 6766,5 | 3,8 | 17,4 | 0,976 |
| | SB | 0,293 | 1,054 | 7709,9 | 5,5 | 8,4 | 0,994 |
| | BB | 2,895 | 0,480 | 8505,2 | 7,6 | 26,7 | 0,845 |
| Bērzs | AGB | 0,787 | 0,945 | 11 816,1 | 6,4 | 10,3 | 0,995 |
| | BGB | 0,322 | 0,871 | 9537,3 | 3,4 | 19,9 | 0,977 |

⁵ AGB – kopējā virszemes biomasas, BGB – kopējā sakņu un celma biomasas, SB – stumbra biomasas, BB – zaru biomasas.

Oglekļa aprite meža ekosistēmā

| Dominējošā suga | Biomasa frakcija ⁵ | Koeficientu vērtības | | AIC | RMSE | MAPE | R ² |
|-----------------|-------------------------------|----------------------|----------------|----------|------|------|----------------|
| | | a | b ₁ | | | | |
| | SB | 0,522 | 0,978 | 12 135,7 | 7,0 | 10,2 | 0,990 |
| | BB | 0,503 | 0,734 | 12 283,0 | 7,3 | 35,9 | 0,802 |
| Apse | AGB | 0,644 | 0,957 | 3850,2 | 10,3 | 18,6 | 0,992 |
| | BGB | 0,354 | 0,821 | 2984,8 | 4,4 | 21,8 | 0,955 |
| | SB | 0,489 | 0,964 | 3823,7 | 10,0 | 16,1 | 0,988 |
| | BB | 0,396 | 0,758 | 3473,3 | 7,1 | 39,8 | 0,878 |
| Baltalksnis | AGB | 0,502 | 0,999 | 3754,8 | 6,1 | 17,0 | 0,989 |
| | BGB | 0,351 | 0,816 | 2966,3 | 3,1 | 15,4 | 0,971 |
| | SB | 0,334 | 1,037 | 3161,1 | 3,6 | 16,8 | 0,994 |
| | BB | 0,299 | 0,782 | 3769,6 | 6,1 | 45,8 | 0,709 |
| Melnalksnis | AGB | 0,701 | 0,947 | 2663,4 | 6,9 | 9,7 | 0,993 |
| | BGB | 0,675 | 0,715 | 2247,7 | 4,1 | 24,0 | 0,952 |
| | SB | 0,322 | 1,053 | 2411,7 | 5,0 | 11,1 | 0,996 |
| | BB | 1,081 | 0,543 | 2741,8 | 7,7 | 58,4 | 0,643 |

Tabula 7 Regresijas vienādojuma Nr. 2 koeficientu vērtības un statistiskie rādītāji

| Dominējošā suga | Biomasa frakcija ⁶ | Koeficientu vērtības | | | AIC | RMSE | MAPE | R ² |
|-----------------|-------------------------------|----------------------|----------------|----------------|----------|------|------|----------------|
| | | a | b ₁ | b ₂ | | | | |
| Priede | AGB | 1,187 | 0,882 | -0,048 | 12 802,2 | 7,9 | 6,0 | 0,993 |
| | BGB | 0,392 | 0,870 | -0,161 | 8578,1 | 2,5 | 7,0 | 0,988 |
| | SB | 0,344 | 1,025 | 0,030 | 12 986,7 | 8,3 | 8,9 | 0,989 |
| | BB | 4,330 | 0,477 | -0,352 | 12 477,5 | 7,2 | 30,1 | 0,756 |
| Egle | AGB | 1,364 | 0,841 | 0,019 | 8783,7 | 8,5 | 9,4 | 0,991 |
| | BGB | 0,477 | 0,786 | 0,062 | 6727,1 | 3,7 | 17,1 | 0,977 |
| | SB | 0,356 | 1,048 | -0,078 | 7476,3 | 5,0 | 7,8 | 0,995 |
| | BB | 1,583 | 0,491 | 0,268 | 8352,5 | 7,2 | 25,1 | 0,863 |
| Bērzs | AGB | 0,677 | 0,956 | 0,049 | 11 640,5 | 6,1 | 10,3 | 0,995 |
| | BGB | 0,314 | 0,873 | 0,009 | 9537,9 | 3,4 | 19,7 | 0,977 |
| | SB | 0,339 | 1,010 | 0,141 | 11 147,9 | 5,3 | 8,9 | 0,994 |
| | BB | 1,132 | 0,679 | -0,276 | 12 114,8 | 7,0 | 36,9 | 0,820 |
| Apse | AGB | 0,710 | 0,971 | -0,104 | 3692,3 | 8,8 | 18,2 | 0,996 |
| | BGB | 0,475 | 0,848 | -0,261 | 2587,5 | 3,0 | 19,8 | 0,987 |
| | SB | 0,512 | 0,971 | -0,050 | 3803,7 | 9,8 | 16,2 | 0,988 |

⁶ AGB – kopējā virszemes biomasa, BGB – kopējā sakņu un celma biomasa, SB – stumbra biomasa, BB – zaru biomasa.

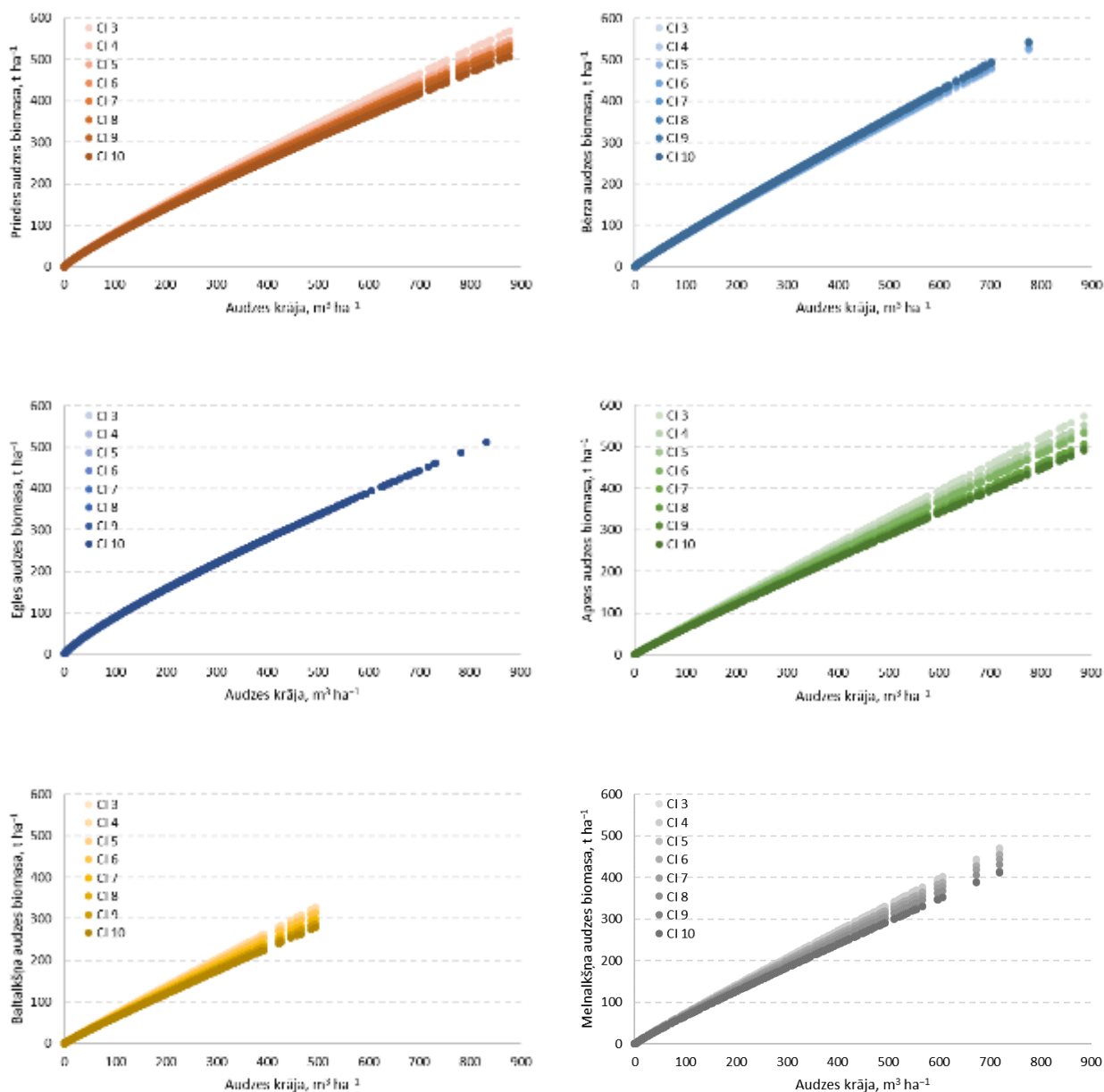
| Dominējošā suga | Biomasa frakcija ⁶ | Koeficientu vērtības | | | AIC | RMSE | MAPE | R ² |
|-----------------|-------------------------------|----------------------|----------------|----------------|--------|------|------|----------------|
| | | a | b ₁ | b ₂ | | | | |
| | BB | 0,634 | 0,780 | -0,344 | 3351,7 | 6,3 | 32,5 | 0,904 |
| Baltalksnis | AGB | 0,693 | 0,986 | -0,131 | 3512,9 | 4,9 | 16,0 | 0,994 |
| | BGB | 0,641 | 0,798 | -0,262 | 2718,7 | 2,5 | 15,4 | 0,969 |
| | SB | 0,355 | 1,035 | -0,025 | 3150,1 | 3,6 | 16,6 | 0,994 |
| | BB | 1,175 | 0,738 | -0,588 | 3611,8 | 5,3 | 43,2 | 0,778 |
| Melnalksnis | AGB | 0,748 | 0,972 | -0,111 | 2460,6 | 5,4 | 9,7 | 0,993 |
| | BGB | 0,811 | 0,746 | -0,194 | 2146,4 | 3,6 | 16,4 | 0,965 |
| | SB | 0,323 | 1,054 | -0,007 | 2412,2 | 5,0 | 11,3 | 0,996 |
| | BB | 2,226 | 0,605 | -0,580 | 2639,9 | 6,7 | 39,0 | 0,725 |

Pētījumā konstatēts, ka pastāv cieša pozitīva sakarība starp biomasas frakcijām un audzes krāju visu pētīto koku sugu audzēs. Modelējot noskaidrots, ka pie konstantas audzes krājas priedes, apses un alkšņu mistraudzēs kopējā biomasā būs lielāka salīdzinot ar šo pašu sugu tīraudzēm. Savukārt bērzu mežaudzēs ir pretēji, jo lielāka sugas sastāva koeficienta CI vērtība (tīraudzes), jo lielāka ir sagaidāmā kokaudzes biomasā. Attēlā 1 ir parādīts piemērs tam, cik liela biomasas variācija eksistē dažādu sugu mežaudzēs, starp visām dominējošās sugas sastāva koeficienta vērtībām, modelējot ar vienfaktora nelineāru jaukta tipa modeli. Kopējā biomasā egles audzēs pie dažādām sugas sastāva koeficienta vērtībām būtiski neatšķiras, biomasā atšķiras tikai atsevišķi zaru un stumbra frakcijām. Pie konstantas krājas egles audzēs, zaru biomasas frakcija vienmēr lielāka būs tīraudzēs, bet stumbra biomasā mistraudzēs. Biomasas – krājas tendences līkni atkarībā no dominējošās sugas koeficienta vērtības raksturo b_2 koeficients 7. tabulā. Lielākas b^2 koeficienta vērtības norāda uz lielāku sagaidāmās biomasas variāciju, un, ja regresijas koeficienta zīme ir negatīva, tad palielinoties dominējošās sugas sastāva koeficienta vērtībai (tīraudzēs), sagaidāmajai biomasai ir tendence samazināties.

No Latvijā izplatītākajām koku sugām blīvākā koksne ir bērzam, savukārt, skujkoku sugām priedei un eglei, un lapkoku sugām apsei, baltalksnim un melnalksnim koksnes blīvums ir mazāks (Liepiņš, Ivanovs, u.c., 2017; Liepiņš & Liepiņš, 2017; Rytter & Rytter, 2016). Iepriekšminētais norāda uz to, ka, salīdzinot ar iepriekšminētajām koku sugām, bērza stumbra biomasā būs lielāka pie vienāda stumbra tilpuma. Tāpēc bērza piejaukums audzēs, kurās dominējošā koku suga ir cita, palielina audzes biomasu pie nemainīgas krājas. Arī egles piejaukums mežaudzēs palielina kopējo audzes biomasu, galvenokārt pateicoties zaru masai, kuras īpatsvars egļu kopējā biomasā ir lielāks, salīdzinot ar citām pētītajām koku sugām.

Mežaudžu biomasas modelēšanai un oglekļa krājumu novērtēšanai valsts mērogā, MRM parauglūkumu datu izmantošana ir sevišķi ieteicama, jo šādi dati vienmēr tiek ievākti no visas populācijas statistiski pamatotā un pārbaudītā veidā. Visu MRM parauglūkumu izmantošana modelēšanas vajadzībām pētījumā nodrošina to, ka izstrādātie vienādojumi būs reprezentatīvi izmantošanai visā Latvijas teritorijā. Tas nav liels pārsteigums, ka tieši krāja ir visbiežāk izmantotais audzes parametrs biomasas apjoma noteikšanai, jo arī zinātniskajā literatūrā krāja visbiežāk minēta kā viens no svarīgākajiem mežaudzes raksturlielumiem, ko izmanto ne tikai koksnes apjoma, bet arī biomasas un oglekļa uzkrājuma noteikšanai (Gschwantner u.c., 2022). Dažādās valstīs audzes krājas aprēķināšanas metodes un tās definīcija atšķiras, pamatojot nepieciešamību pēc nacionāla līmeņa vienādojumiem.

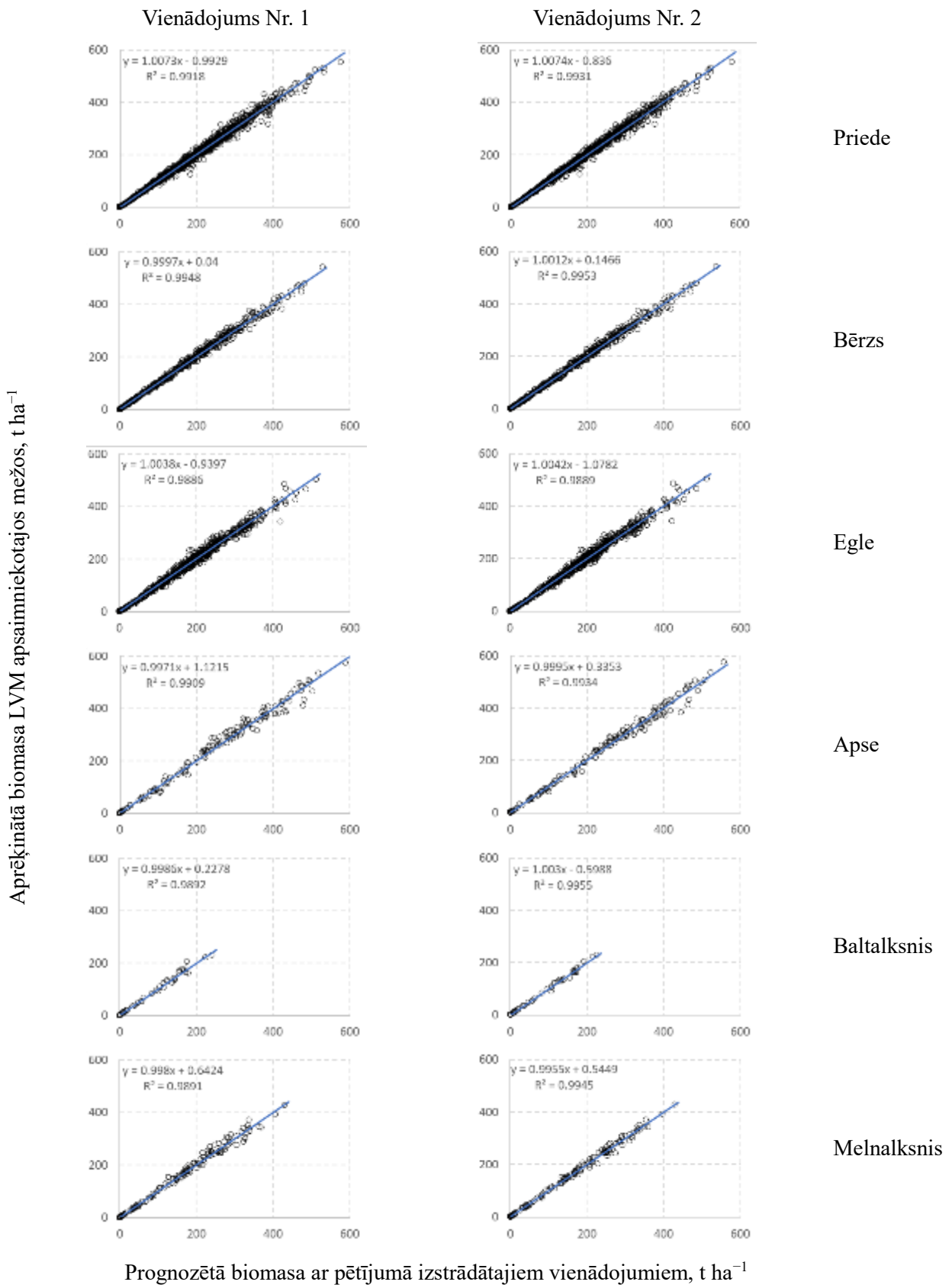
Oglekļa aprite meža ekosistēmā



Attēls 1. Audzes kopējās biomasas izmaiņas atkarībā no dominējošās sugas koeficienta (CI) vērtības sastāva vienādojums.

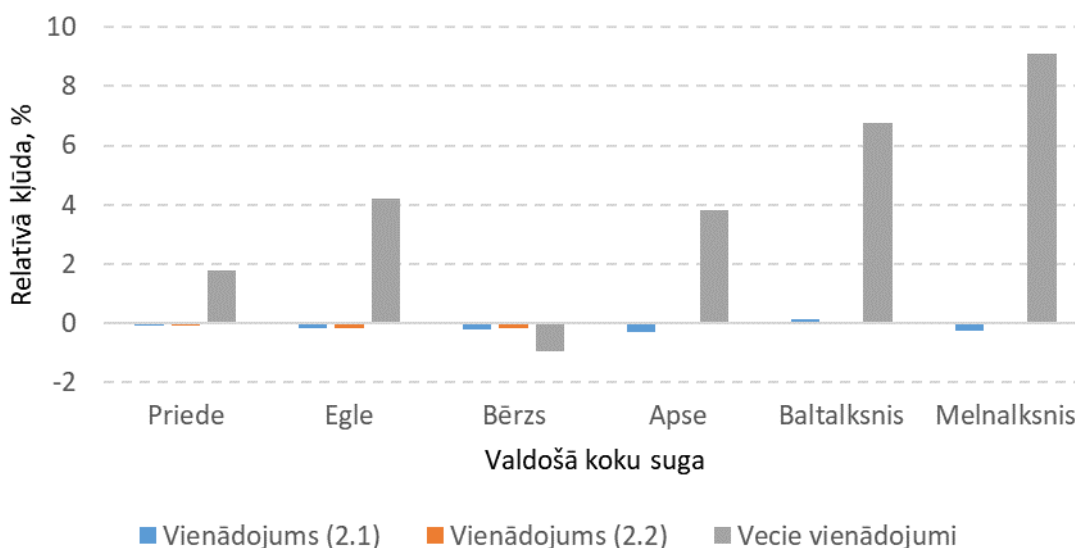
Tā kā mežaudžu biomasas vienādojumu izstrādē izmantoti visi kritērijiem atbilstošie MRM parauglaukumi, iegūtie vienādojumi atsevišķi pārbaudīti, novērtējot izstrādāto modeļu atbilstību tikai LVM apsaimniekoto mežaudžu biomasas prognozēšanai. Aprēķināto un prognozēto biomasas vērtību attēlu izpēte un regresijas koeficientu vērtību analīze neuzrādīja statistiski būtisku regresijas taisnes novirzi no 1:1 iedomātās līnijas (2. attēls), kas apstiprina izstrādāto biomasas vienādojumu piemērotību LVM apsaimniekotajiem mežiem. Lineārās regresijas a un b koeficientu atbilstība izvirzītajiem kritērijiem veikta, analizējot koeficientu 95% ticamības intervālus. Aprēķinot biomasu LVM apsaimniekotajos mežos, nedaudz precīzāks ir 2. vienādojums un ko arī norāda nedaudz lielākas R^2 vērtības visu koku sugu dominējošās audzēs.

Oglekļa aprite meža ekosistēmā



Attēls 2. Aprēķināto un prognozēto biomasas vērtību izkliedes diagramma un regresijas taisne LVM apsaimniekotajiem mežiem.

Sagaidāms, ka pētījuma ietvaros izstrādātie kokaudzes biomasas aprēķina 1. un 2. vienādojumi būs precīzāki, salīdzinot ar iepriekš 2016. gadā izstrādātajiem vienādojumiem. Iepriekš izstrādātie biomasas vienādojumi izveidoti, analizējot ievērojami mazāku datu kopu. Turklāt, nākot klāt jauniem datiem par biomasas uzkrāšanās dinamiku baltalksnim un melnalksnim, kuri iepriekš nebija pieejami, iespējams korektāk modelēt biomasas uzkrāšanos visu koku sugu audzēs. Analizējot MRM datus par LVM apsaimniekotajiem mežiem, secināms, ka iepriekš izstrādātie vienādojumi, saskaitot kopā virszemes un sakņu biomasu, gandrīz visu koku sugu audzēs, izņemot bērzu, nepietiekamā apmērā novērtēja to biomasu (3. attēls). Vislielākā kļūda biomasas aprēķinos ir baltalkšņa (6,8%) un melnalkšņa (9,1%) audzēs, jo iepriekš izstrādātie vienādojumi, aprēķinot biomasu alkšņu audzēs, izmanto apses audzēm paredzēto vienādojumu. Vienādojuma Nr. 1 absolūtā kļūda bija robežās no 0,09% priedes audzēs līdz 0,3% apses audzēs, bet 2. vienādojuma kļūda bija robežās no 0,01% apses un melnalkšņa audzēs līdz 0,17% bērza audzēs, ievērojami samazinot atsevišķu kokaudžu biomasas aprēķinu nenoteiktību, salīdzinot ar iepriekš izstrādāto metodiku.



Attēls 3. Dažādu izstrādāto vienādojumu kļūda, prognozējot mežaudžu biomasu LVM apsaimniekotajos mežos⁷.

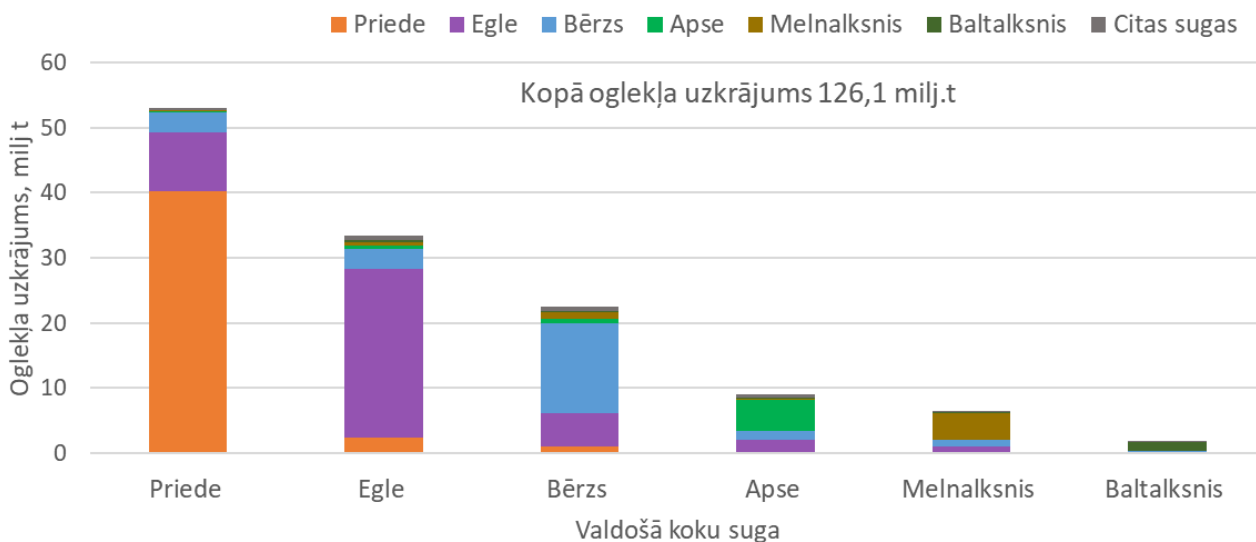
Atbilstoši MRM 2016.-2020. gadu datiem kopējais oglekļa uzkrājums LVM apsaimniekotajās teritorijās ir 126,1 milj. t (4. attēls). Jāatzīmē, ka aprēķinos izmantoti visi MRM parauglaukumi, kuros aug koki un pieņemts, ka visi koki ir bez bojājumu pazīmēm. Reālajā situācijā, īpaši pāraugušās mežaudzēs, ir sastopami trupējuši un dobumaini koki, kas samazina to biomasu. Uz doto brīdi serdes trupes ietekme uz audzes biomasu netiek vērtēta nevienas valsts SEG inventarizācijas ziņojumos un pārskatos, jo šādu datu iegūšana ir ļoti laikietilpīga, un pagaidām vēl tiek diskutēts par dažādu trupes ietekmes izvērtēšanas metožu precizitāti un piemērotību šim mērķim. Visvairāk ogleklis LVM mežos ir uzkrāts skujkoku mežaudzēs, kurās dominējošās sugas ir priede (52,9 milj. t) un egle (33,3 milj. t). Tas izskaidrojams ar to, ka priede un egle LVM teritorijās aizņem vislielākās meža platības. Pētījumā aprēķināts, ka lapkoku audzēs ir akumulēts aptuveni 32,1% no kopējā oglekļa uzkrājuma, lielākā daļa no tā jeb 22,4 milj. t ir uzkrāts bērzu audzēs, pēc tam apses audzēs – 8,9 milj. t un melnalkšņa audzēs – 6,4 milj. t.

Sugu sastāvs meža nogabalā ietekmē oglekļa uzkrāšanās dinamiku, norādot uz to, ka audzēs ar līdzīgu krāju var būt atšķirīgs oglekļa uzkrājums. Valdošā suga vienmēr veido lielāko oglekļa

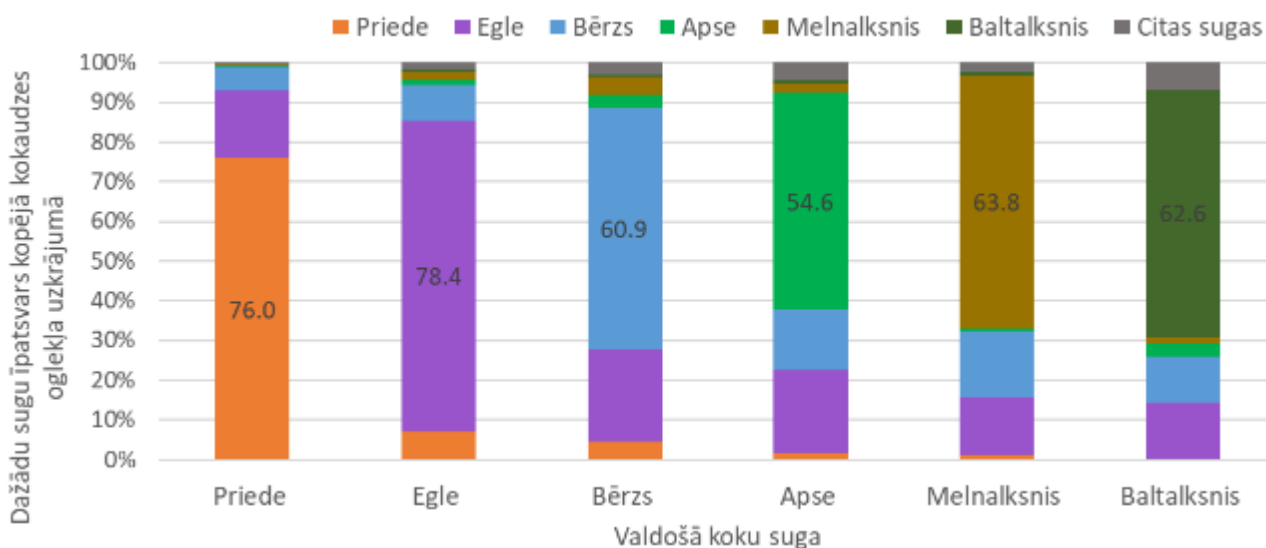
⁷ Negatīva kļūda norāda uz kopējās biomasas pārvērtēšanu, salīdzinot ar aprēķiniem kuri balstīti uz individuālu koku biomasas vienādojumiem.

Oglekļa aprīte meža ekosistēmā

uzkrājumu, un atkarībā no audzes vecuma ogleklis tiek uzglabāts atšķirīgās proporcijās koku virszemes (stumbrs, zari, lapotne) un pazemes frakcijās. Salīdzinot ar bērza, apses un alkšņu audzēm, kurās parasti ir lielāka piemistrojuma sugu klātbūtne, skujkoku meži ir vairāk homogēni un citu sugu ietekme uz šo audžu oglekļa uzkrājumu nav tik liela (5. attēls). Priedes un egles audzēs dominējošās sugas īpatsvars kopējā audzes oglekļa uzkrājumā vidēji ir, attiecīgi, 76% un 78,4%, bet lapu koku audzēs no 54,6% apses audzēs līdz 63,8% melnalkšņa audzēs.



Attēls 4. Kokaudžu oglekļa uzkrājums LVM apsaimniekotajās teritorijās dalījumā pa valdošajām koku sugām un piemistrojumu veidojošajām sugām.

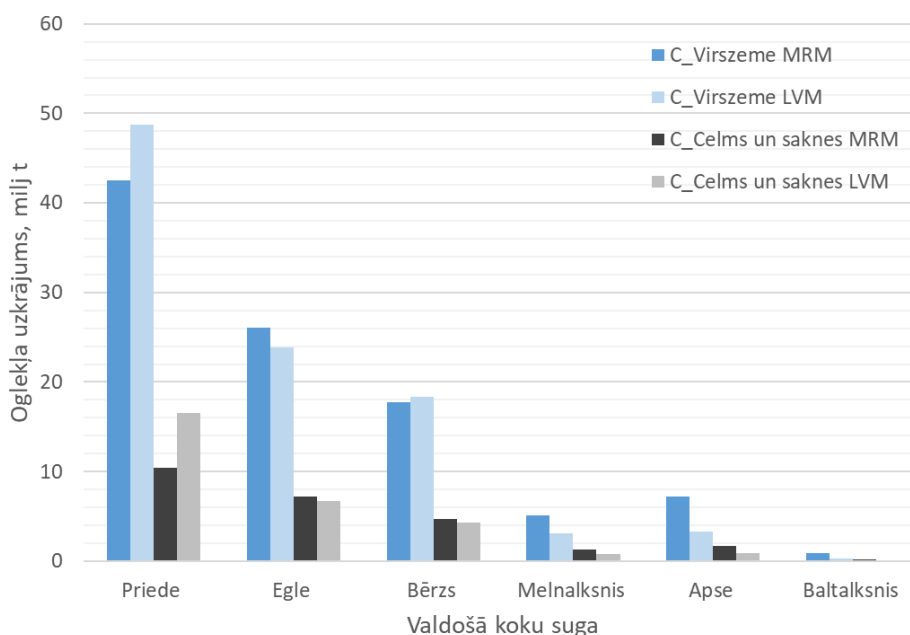


Attēls 5. Piemistrojuma sugu oglekļa uzkrājuma īpatsvars izplatītāko sugu dominējošās audzēs.

Izstrādātie audzes līmeņa biomasas vienādojumi pēc 2. etapa starpziņojuma iesniegšanas ir integrēti LVM plānošanas sistēmā un veikta to kvalitātes pārbaude, salīdzinot rezultātus ar Latvijas Valsts mežzinātnes institūta "Silava" veiktajiem MRM aprēķiniem (6. attēls). Noskaidrots, ka kopējais oglekļa uzkrājumu LVM apsaimniekotajos mežos pēc abām aprēķina metodēm būtiski neatšķiras, tomēr ir nelielas atšķirības atsevišķu sugu dominējošās audzēs. LVM aprēķinos kopējais oglekļa uzkrājums ir tikai par 1,2% lielāks, salīdzinot ar monitoringa aprēķina metodiku, kas ir ļoti

Oglekļa aprite meža ekosistēmā

labs rādītājs. LVM ilgtermiņa modelēšanas programma par 12,3 milj. t. lielāku aprēķina priedes un par 0,3 milj. t. bērza mežaudžu oglekļa uzkrājumu, un, attiecīgi, par 4,8 milj. t. mazāku apses, 2,5 milj. t. melnalkšņa, 0,7 milj. t. baltalkšņa un 2,6 milj. t. egles audžu oglekļa uzkrājumu.



Attēls 6. Mežaudžu oglekļa uzkrājuma datu kvalitātes pārbaude LVM apsaimniekotajās teritorijās.

MRM informāciju iegūst piecu gadu ciklā visā valsts teritorijā no vienmērīgi četru kilometru attālumā izvietotu parauglaukumu traktu tīkla, katru gadu apsekojot vienu piekto daļu no kopējā parauglaukumu skaita, bet LVM plānošanas sistēmā ir ietverti pilnīgi visu apsaimniekoto mežaudžu dati. Analizējot un aprakstot oglekļa uzkrājumu LVM apsaimniekotajos mežos, šīs atšķirības starp abām aprakstītajām metodēm jāņem vērā.

2. SEG INVENTARIZĀCIJAS UN PROGNOŽU DATU MODELĒŠANAS RĪKU PILNVEIDOŠANA

2.1. Metodika koku sugu sastāva telpiskās izplatības novērtēšanai Latvijas teritorijā un oglekļa uzkrājuma dinamikas modelēšanai

2.1.1. Izzinātības apskats

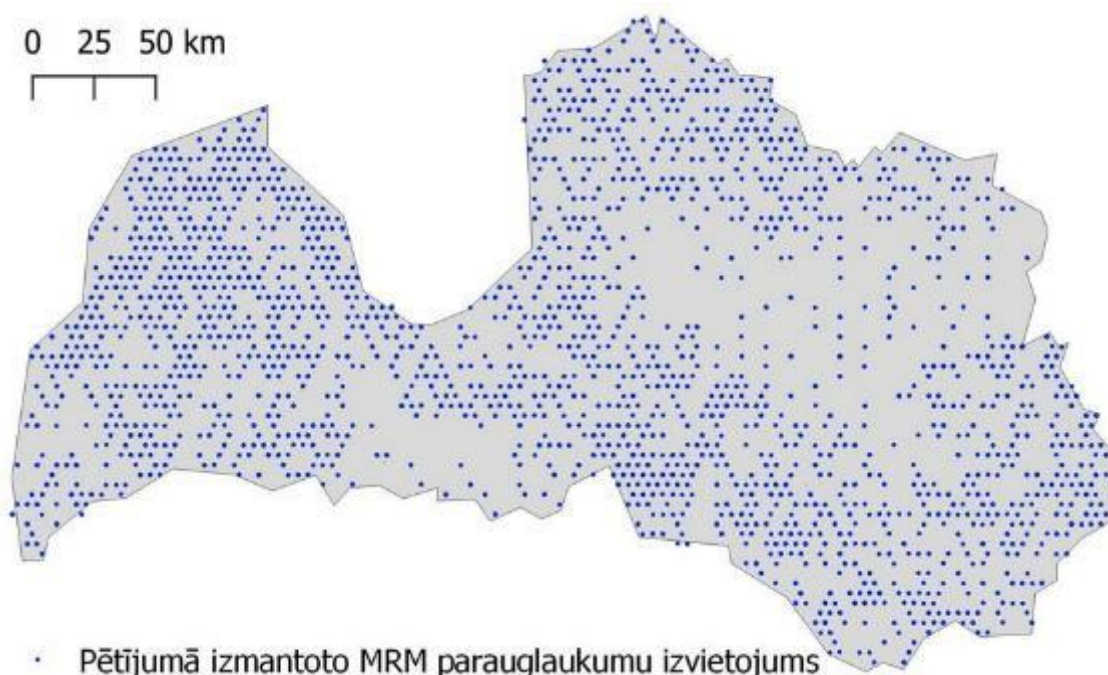
Mežs ir galvenais oglekļa piesaistītājs sauszemes ekosistēmā, kas veido gandrīz 72% no sauszemes oglekļa uzglabāšanas koksnes biomasā un augsnē (Malhi u.c., 2002). Biomasas apjoma noteikšana mežaudzē ir nepieciešama, lai īpašumu apsaimniekotāji varētu pieņemt pārdomātus lēmumus par savas meža zemes vērtību un izmantošanu. Lauka datus balstīti meža biomasas aprēķini, lai gan parasti ir ļoti precīzi, ir dārgi un var sniegt kvalitatīvu informāciju tikai ierobežotam skaitam audžu ainavas mērogā (Song u.c., 2007). Biomasas kvantitatīvās noteikšanas procedūras, kas izstrādātas balstoties uz attālās izpētes datiem, kā piemēram ALS (aerolāzerskenēšana) vai multispektrālajām satelītainām ir sevi pierādījušas kā efektīvu risinājumu plašu teritoriju uzmērīšanai (Gleason & Im, 2011). ALS dati ir labi piemēroti biomasas novērtēšanai, jo punktu mākoņi, kas rodas no meža vainagiem, var precīzi attēlot to virsmas fiziskās īpašības. Šīs fizikālās īpašības ir saistītas ar biomasu, un tās var regresēt pret citiem meža inventarizācijas parametriem, kā piemēram – diametru krūšu augstumā (DBH) vai biomasu (Salas u.c., 2010; Zhao u.c., 2009).

Parametriskos modeļus, piemēram, daudzkārtējo regresiju, parasti izmanto, lai izstrādātu attiecības starp meža inventarizācijas parametriem un attālās izpētes datiem (Kulawardhana u.c., 2014; Sheridan u.c., 2014). Iepriekšējos gados ir kļuvuši izplatīti neparametriskie mašīnmācīšanās modeļi. Pretēji lineārās regresijas modelim daudzas mašīnmācīšanās metodes (piemēram, Random Forest (RF), atbalsta vektora regresija (SVR), K-tuvākais kaimiņš (KNN) un dziļā mācīšanās (DL)) spēj atklāt sarežģītas nelineāras likumsakarības. Turklāt mašīnmācīšanās modeļi spēj risināt problēmas, kas saistītas ar datu dimensiju (Durbha u.c., 2007; Hudak u.c., 2008), pielāgojot modeļus ar lielu skaitu prognozētāju.

Šī pētījuma mērķis ir izveidot mašīnmācīšanās modeļus meža biomasas noteikšanai, balstoties uz MRM parauglūkumu datiem, ALS datiem un citiem brīvi pieejamiem kartogrāfiskajiem materiāliem. Mežaudžu biomasas modeļi izstrādāti tādiem parametriem kā virszemes biomasā (AGB), apakšzemes biomasā (BGB), stumbra biomasā (SB), zaru biomasā (BB) un celmu-sakņu biomasā (BGB).

2.1.2. Metodika

Pētījums apņēma visu Latvijas teritoriju MRM parauglūkumu ietvaros. Pētījuma vajadzībām atlasīti visi nedalītie (500 m² lielie) MRM parauglūkumi meža un lauksaimniecības zemēs, kur dominējošās koku suga ir priede (*Pinus sylvestris* L.), egle (*Picea abies*), bērzs (*Betula pendula* Roth), melnalksnis (*Alnus glutinosa*), apse (*Populus tremula* L.) vai baltalksnis (*Alnus incana*). Pētījumā izmantoti tikai tie MRM parauglūkumi, kuru lokācija precizēta, izmantojot augstas precizitātes GPS aparātu. Koordinātu mērīšanai izmantots Topcon GRS-1 uztvērējs ar Trimble R1 ārējo antenu. Datu pēcapstrāde veikta GPS Pathfinder Office programmā, izmantojot LatPos bāzes staciju tīklu, tādējādi iegūstot precizitāti, kas ir 1 metra robežās. Kopā pētījuma teritoriju veido 4644 MRM parauglūkumi. Pētījumā izmantoto MRM parauglūkumu telpiskais izvietojums atainots 7. attēls.



Attēls 7. Pētījumā izmantoto MRM parauglaukumu telpiskais izvietojums.

Pētījumam nepieciešamie ALS dati un to metadatu slānis iegūti no Latvijas Ģeotelpiskās Informācijas aģentūras (LĢIA). Izmantojot FUSION/LDV programmatūru, veikta ALS punktu mākoņu izgriešana pa MRM parauglaukumu robežām ar apļa rādiusu 12,62 m. ALS punktu mākoņa izgriešanas laikā punktu mākonis normalizēts pret digitālo reljefa modeli. Nākamajā solī, izmantojot CloudMetrics rīku, iegūta statistiskā informācija par ALS punktu mākoņa punktu izvietojumu vertikālā griezumā.

Pirmais pilnais ALS datu pārklājums Latvijā iegūts laika periodā no 2013 līdz 2019. gadam, savukārt, MRM parauglaukumu apsekošanu veic cikliski ar parauglaukumu apsekojuma intervālu 5 gadi. Tā kā abas datu kopas ir iegūtas neatkarīgi viena no otras, pētījumā izmantoti tikai tie MRM parauglaukumi, kuri apsekoti ± 2 gadu robežās no ALS uzmērījumiem, tādējādi iegūstot pēc iespējas temporāli līdzīgas savstarpēji savienojamas datu kopas.

MRM parauglaukumu informācijai pievienoti dati par ALS punktu mākoņa vertikālā sadalījuma augstumu pa 50, 60, 70, 75, 80, 90, 95 un 99. percentili, kā arī vidējais punktu augstums un punktu augstuma sadalījuma vidējā kvadrātiskā vērtība. Pievienots arī ALS datu uzmērīšanas laiks (gada nedēļa), par pamatu ņemot LĢIA uzturēto ALS metadatu slāni. Datu slānim pievienota arī informācija no gruntsūdens dziļuma kartēm, mitro augšņu kartēm un digitālā reljefa modeļa. Aprēķināti arī tādi parametri kā kontinentalitāte un ģeogrāfiskais novietojums (X un Y koordinātas).

Mašīnmācīšanas modeļu izstrāde veikta R programmatūrā (R Core Team, 2022), un tai izmantoti dažādi mašīnmācīšanās algoritmi, kas pieejami Caret (Kuhn, 2008) bibliotēkā. Izmantotie algoritmi ir:

1. Linear Regression (lm);
2. Ridge Regression (ridge);
3. The lasso (lasso);
4. Bagged CART (treebag);
5. eXtreme Gradient Boosting (xgbTree).

Izmantojot augstāk uzskaitītos mašīnmācīšanās algoritmus, izveidoti prognozēšanas modeļi virszemes, pazemes, stumbra, zaru un celma/sakņu biomasai. Datu apstrādes gaita un izstrādātais kods pieejams pielikumā. Izveidotā datu kopa pēc nejaušības principa sadalīta divās daļās, kur pirmā ir treniņdatu kopa ar 80% no kopējiem MRM parauglūkumiem, savukārt 20% MRM parauglūkumu datu atstāti modeļu pārbaudei jeb validācijai. Modeļu precizitāte pārbaudīta ar RMSE, R^2 un MAE koeficientiem, kur RMSE un MAE izteiktas kā biomasas tonnas uz hektāru.

2.1.3. Rezultāti

Virszemes biomasas

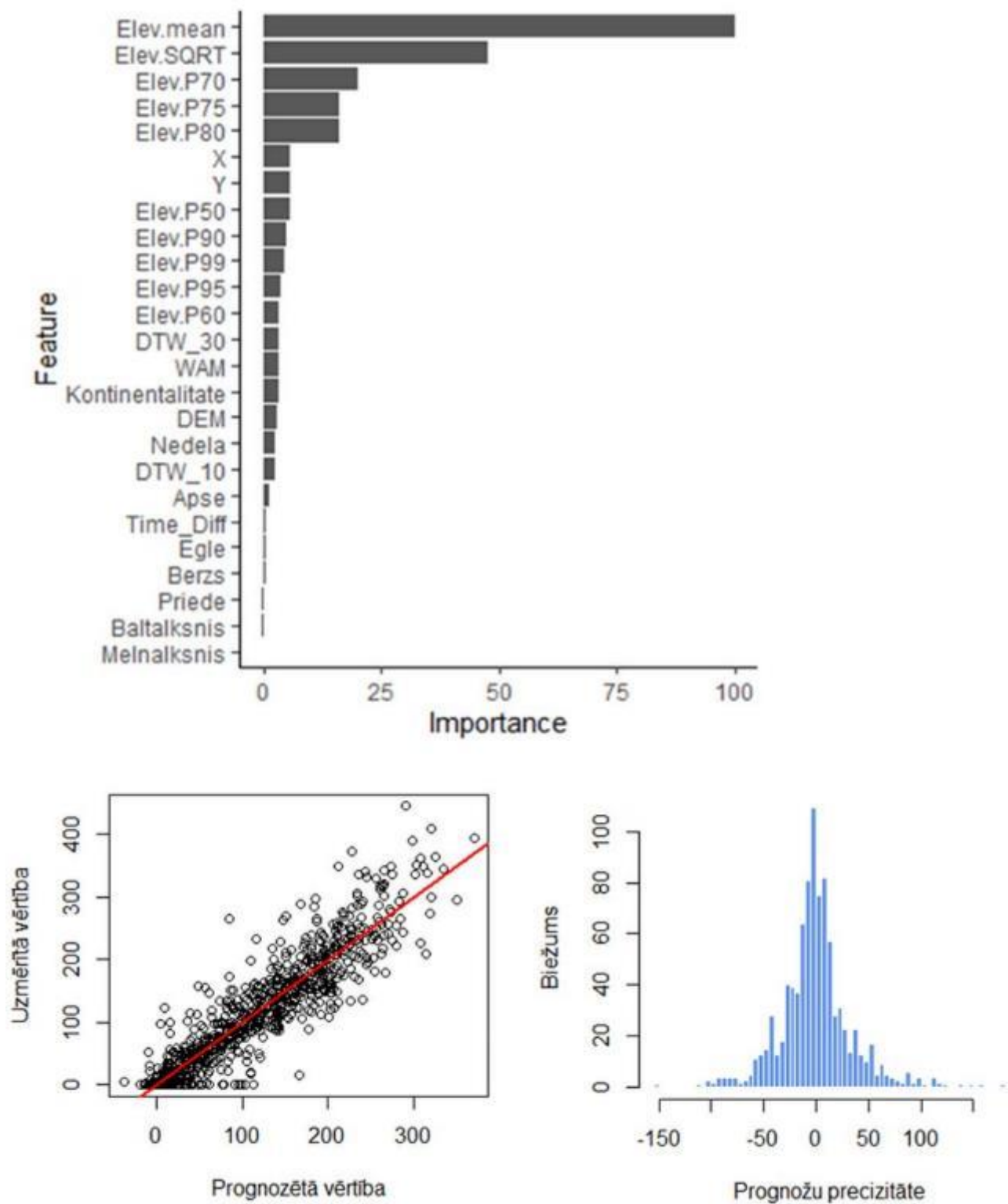
Izveidoto mašīnmācīšanās modeļu precizitāte virszemes biomasas apjoma noteikšanai atainota 8. tabulā. Labākos rezultātus uzrāda *xgbTree* algoritms ar maksimālo koka dziļumu (*max_depth*) 10 un 25 iterācijām (*nrounds*), kur RMSE sasniedz 35,5 tonnas uz hektāru, R^2 ir 0,85 un vidējā absolūtā kļūda (MAE) ir 24,07 tonnas uz hektāru.

Tabula 8. Virszemes biomasas prognozēšanas modeļu precizitāte

| Modelis | RMSE | R^2 | MAE |
|-----------------|-------|-------|-------|
| Lm | 41,84 | 0,78 | 28,49 |
| Ridge | 41,98 | 0,78 | 28,38 |
| Lasso | 42,27 | 0,78 | 28,57 |
| TreeBag | 42,79 | 0,77 | 30,26 |
| xgbTree (100-5) | 35,05 | 0,85 | 24,07 |

Būtiskākie parametri, kas ietekmē virszemes biomasas modeļa veiktspēju ir ALS punktu vertikālā sadalījuma vidējais augstums un ALS punktu augstuma kvadrātiskā vidējā vērtība, kam seko 70, 75 un 80 augstuma percentile. Pārējiem modeļa parametriem ir mazāka ietekme.

Oglekļa aprite meža ekosistēmā



Attēls 8. Virszemes biomasas prognozēšanas būtiskākie parametri un prognožu rezultāti.

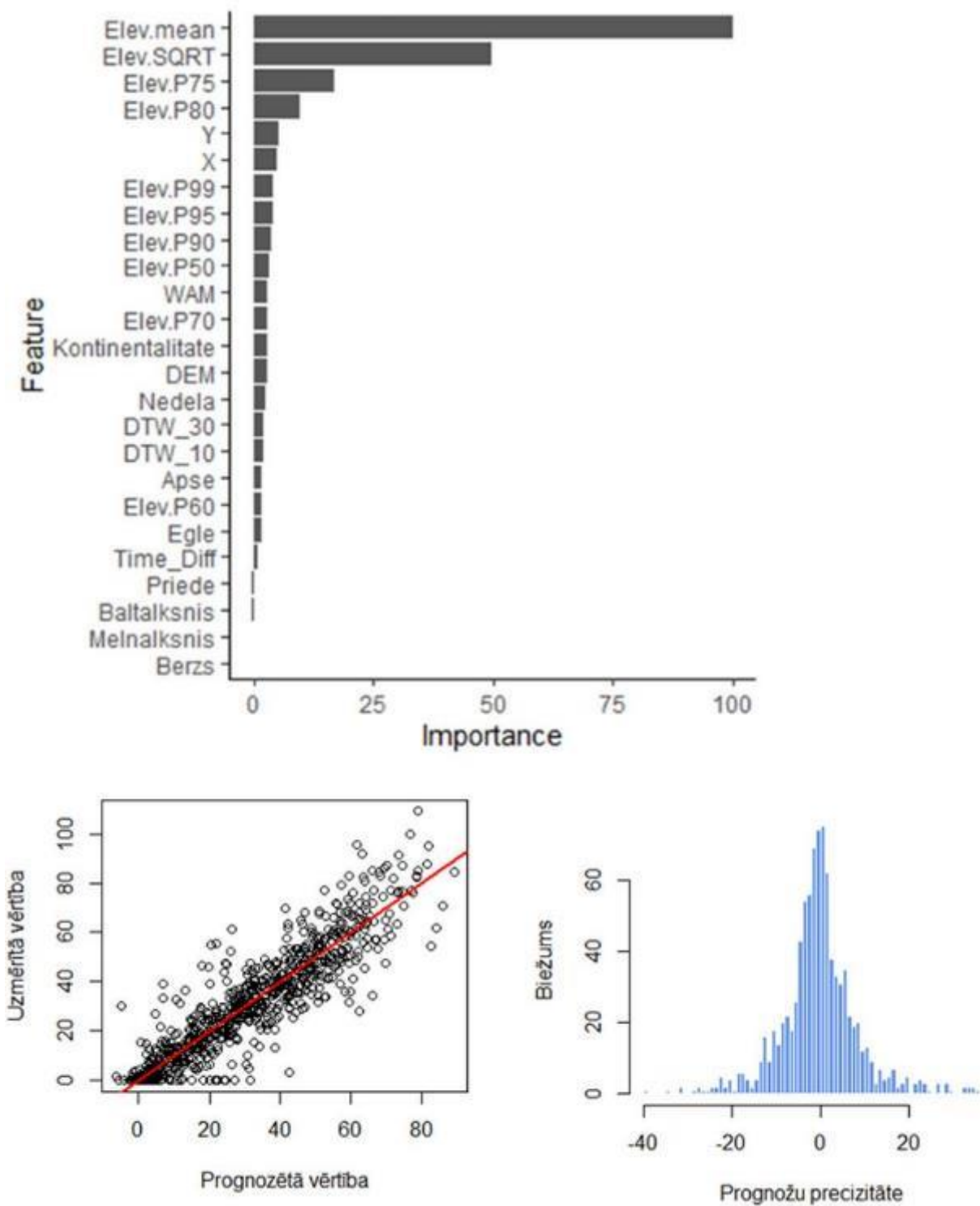
Pazemes biomasas

Pazemes biomasas mašīnmācīšanās modeļu precizitāte atainota 9. tabulā. Labākos rezultātus uzrāda *xgbTree* algoritms ar *Max_depth* vērtību 5 un iterāciju skaitu – 50 reizes. Pazemes biomasas modeļa precizitāte R^2 sasniedz 0,84, savukārt vidējā kvadrātiskā kļūda – 9,01 tonnas uz hektāru, bet vidējā absolūtā kļūda – 6,18 tonnas uz hektāru.

Tabula 9. Pazemes biomasas prognozēšanas modeļu precizitāte

| Modelis | RMSE | R^2 | MAE |
|----------------|-------|-------|------|
| Lm | 10,53 | 0,79 | 7,25 |
| Ridge | 10,57 | 0,78 | 7,27 |
| Lasso | 10,46 | 0,79 | 7,21 |
| TreeBag | 11,07 | 0,76 | 7,86 |
| xgbTree (50-5) | 9,01 | 0,84 | 6,18 |

Arī pazemes biomasas prognozēšanā būtiskākais parametrs ir ALS punktu vertikālā sadalījuma vidējais augstums, kam seko ALS punktu augstuma kvadrātiskā vidējā vērtība (9. attēls). Pārējiem prognozēšanas parametriem ir mazāka nozīme. Lai gan neviens no prognozēšanas parametriem tiešā veidā neraksturo pazemes biomasas apjomu, tomēr izstrādātie mašīnmācīšanās modeļi ar salīdzinoši augstu precizitāti nosaka tās apjomu.



Attēls 9. Pazemes biomasas prognozēšanas būtiskākie parametri un prognožu rezultāti

Stumbra biomasas

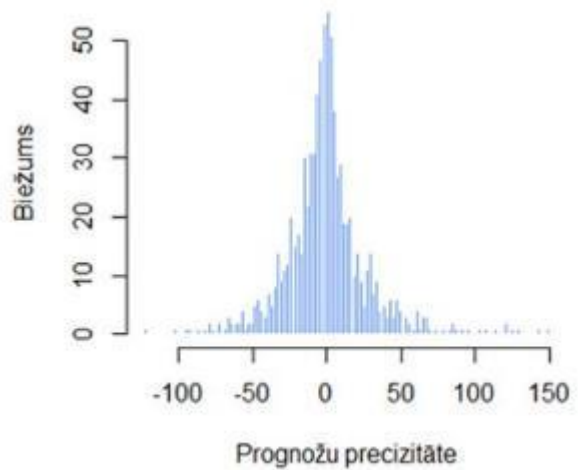
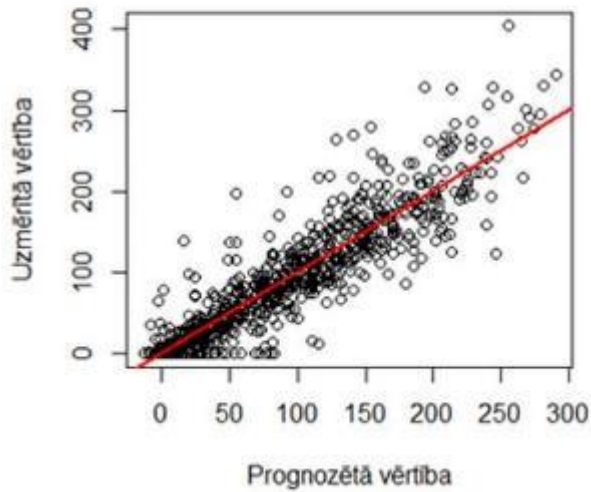
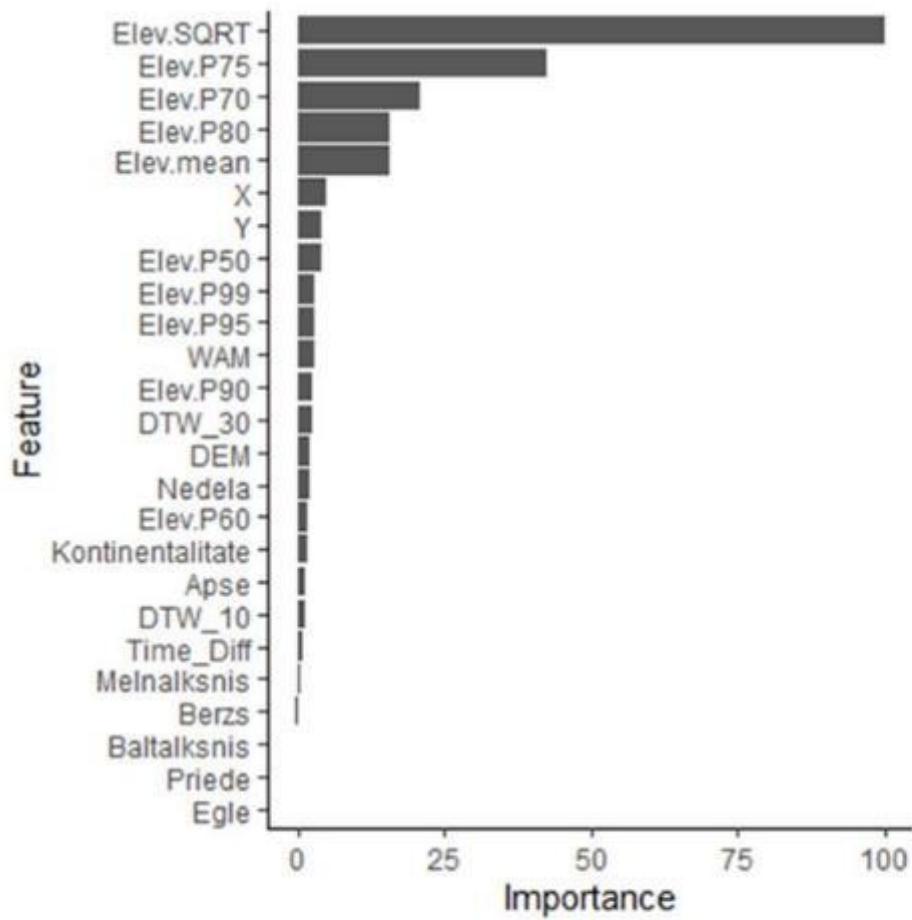
Stumbra biomasas mašīnmācīšanās modeļu precizitāte atainota 10. tabula. Labākos rezultātus uzrāda *xgbTree* algoritms ar *Max depth* vērtību 5 un iterāciju skaitu – 75 reizes. Stumbra biomasas modeļa precizitāte R^2 sasniedz 0,85, savukārt vidējā kvadrātiskā kļūda – 29,35 tonnas uz hektāru, bet vidējā absolūtā kļūda – 19,4 tonnas uz hektāru.

Tabula 10. Stumbra biomasas prognozēšanas modeļu precizitāte

| Modelis | RMSE | R^2 | MAE |
|----------------|-------|-------|-------|
| Lm | 33,87 | 0,79 | 22,75 |
| Ridge | 33,97 | 0,79 | 22,81 |
| Lasso | 33,58 | 0,79 | 22,69 |
| TreeBag | 33,58 | 0,79 | 22,83 |
| xgbTree (75-5) | 29,35 | 0,85 | 19,40 |

Stumbra biomasas prognozēšanā būtiskākais parametrs ir ALS punktu augstuma kvadrātiskā vidējā vērtība, kam seko 75, 70 un 80 augstuma percentile (10. attēls). Pārējiem modeļa parametriem ir mazāka ietekme uz rezultātu.

Oglekļa aprite meža ekosistēmā



Attēls 10. Stumbra biomasas prognozēšanas būtiskākie parametri un prognožu rezultāti.

Zaru biomasa

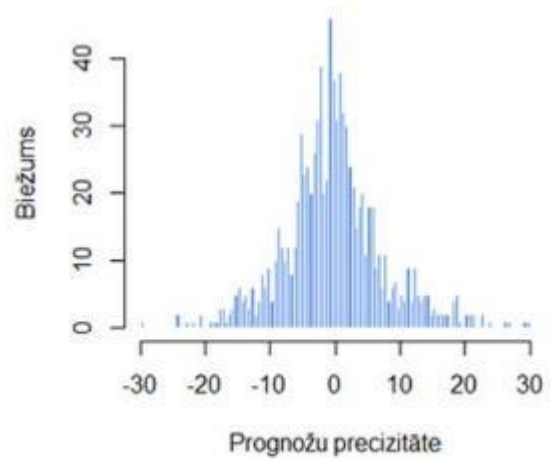
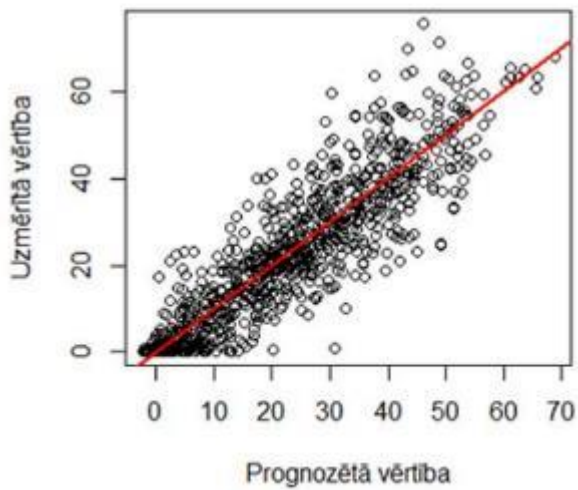
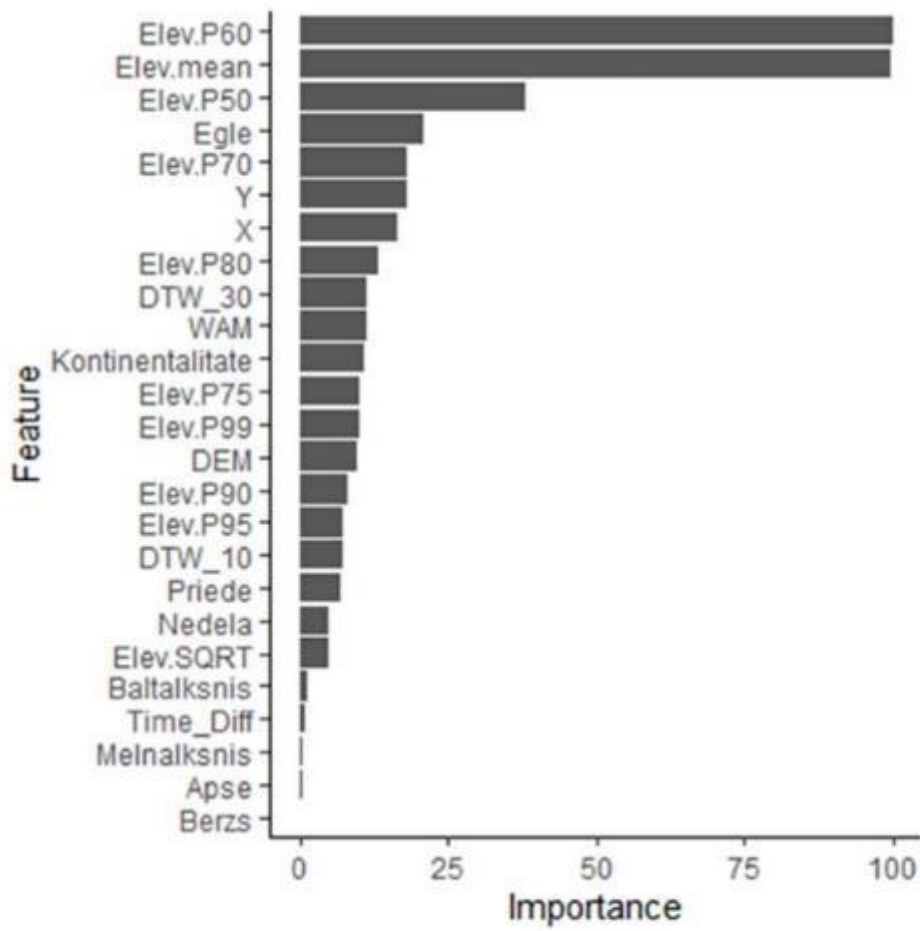
Zaru biomasas mašīnmācīšanās modeļu precizitāte atainota 11. tabulā. Labākos rezultātus uzrāda *xgbTree* algoritms ar *Max_depth* vērtību 5 un iterāciju skaitu – 100 reizes. Zaru biomasas modeļa precizitāte R^2 sasniedz 0,79, savukārt vidējā kvadrātiskā kļūda – 27,67 tonnas uz hektāru, bet vidējā absolūtā kļūda – 5,61 tonnas uz hektāru.

Tabula 11. Zaru biomasas prognozēšanas modeļu precizitāte

| Model | RMSE | R^2 | MAE |
|-----------------|-------|-------|------|
| Lm | 10,10 | 0,66 | 7,33 |
| Ridge | 10,20 | 0,66 | 7,37 |
| Lasso | 10,10 | 0,66 | 7,33 |
| TreeBag | 10,61 | 0,63 | 7,86 |
| xgbTree (100-5) | 7,67 | 0,79 | 5,61 |

Zaru biomasas prognozēšanā būtiskākie parametri ir atšķirīgi kā citām grupām. Būtiskākie parametri ir vidējais ALS punktu augstums un 60. augstuma percentile. Šiem parametriem seko 50. augstuma percentile un ir novērojama arī koku sugu ietekme. Attēls 11 liecina, ka mašīnmācīšanās algoritms ir uztvēris, ka parauglaukumos, kuros dominējošā koku suga ir egle zaru biomasas apjoms ir atšķirīgs kā parauglaukumos, kuros dominē citas koku sugas.

Oglekļa aprite meža ekosistēmā



Attēls 11. Zaru biomasas prognozēšanas būtiskākie parametri un prognožu rezultāti.

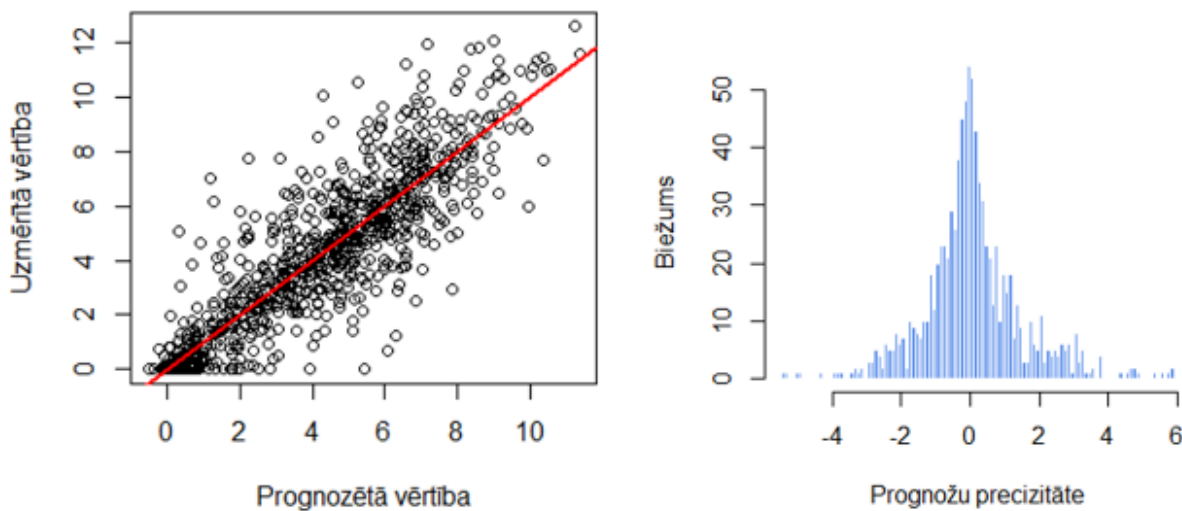
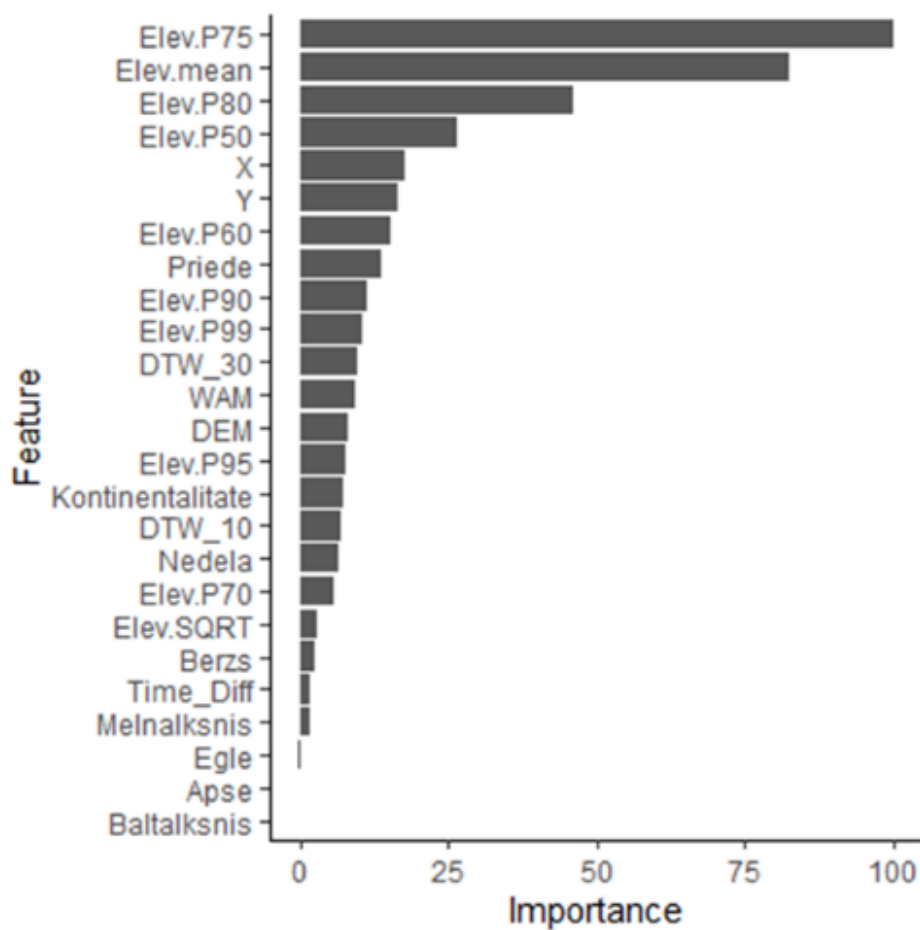
Celmu un sakņu biomasa

Celma un sakņu biomasas mašīnmācīšanās modeļu precizitāte atainota 12. tabula. Labākos rezultātus uzrāda *xgbTree* algoritms ar *Max_depth* vērtību 10 un iterāciju skaitu – 25 reizes. Celma un sakņu biomasas modeļa precizitāte R^2 sasniedz 0,76, savukārt vidējā kvadrātiskā kļūda – 1,44 tonnas uz hektāru, bet vidējā absolūtā kļūda – 1 tonnas uz hektāru.

Tabula 12. Celmu un sakņu biomasas prognozēšanas modeļu precizitāte

| Model | RMSE | R^2 | MAE |
|-----------------|------|-------|------|
| Lm | 1,75 | 0,64 | 1,29 |
| Ridge | 1,75 | 0,64 | 1,30 |
| Lasso | 1,74 | 0,64 | 1,29 |
| TreeBag | 1,75 | 0,64 | 1,30 |
| xgbTree (25-10) | 1,44 | 0,76 | 1,00 |

Celmu un sakņu biomasas prognozēšanā būtiskākais parametrs ir ALS punktu 75. augstuma percentile, kam seko Punktu vertikālā sadalījuma vidējā vērtība un 80. augstuma percentile (12. attēls). Pārējiem modeļa parametriem uz rezultātu ir mazāka ietekme.



Attēls 12. Celmu un sakņu biomasas prognozēšanas būtiskākie parametri un prognožu rezultāti.

Detalizēts modeļa apraksts pievienots 4. pielikumā. Modelis digitālā formātā pieejams LVMI Silava.

2.1.4. Secinājumi

Pētījumā salīdzinātie mašīnmācīšanās algoritmi uzrādīja dažādu sniegumu biomasas modeļu veidošanā. Vienkāršākie – Lm, Ridge, Lasso un TreeBag algoritmi dažādu biomasas kategoriju prognozēšanā sasniedza R^2 vērtības robežās no 0,64 līdz 0,79. Tomēr visu biomasas veidu prognozēšanā pārākais izrādījās *xgbTree* algoritms (R^2 vērtības no 0,76 līdz 0,85), kurš ir sarežģītākais un reizē vispielāgojamais, jo tā parametri (*max_depth*, *nrounds* u.c.) ir maināmi.

Viscaur dažādām biomasas kategorijām (virszemes, pazemes, stumbru u.c.) vissvarīgākie mašīnmācīšanās modeļa veidošanas parametri bija vidējais ALS punktu augstums, ALS punktu augstuma kvadrātiskā vidējā vērtība un 70, 75 un 80. augstuma percentile. Zaru biomasas prognozēšanā nozīmīgs mainīgais bija arī atšķirīgu koku sugu ietekme.

Izmantojot izmantotos mašīnmācīšanās treniņdatus, visprecīzāk prognozējama virszemes, pazemes un stumbru biomasa (R^2 vērtības no 0,84 līdz 0,85), kamēr zaru un celma/sakņu biomasa prognozējama ar nedaudz zemāku precizitāti (R^2 vērtība, attiecīgi, 0,79 un 0,76).

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

Pētījuma ietvaros 2022. gadā veicām attālās izpētes metožu kvalitātes kontroli, tajā skaitā 2021. gadā izstrādāto koku augstuma un skaita vienādojumu pārbaudi ar lauka mērījumiem, uzmērot 72 parauglaukumus Meža pētīšanas stacijas (MPS) Jelgavas meža iecirkņa 1. kvartālā (98 ha). Pētījuma ietvaros uzsākām metodikas izstrādāšanu Sentinel 2 un Landsat satelītattēlu izmantošanai zemes izmantošanas maiņas (atmežošanas un apmežošanas) aprēķiniem valsts līmeņa uzskaitē. Salīdzinot dažādus risinājumus Sentinel II un Landsat datu analīzei, izvēlējāmies Google Earth Engine, kas, saskaņā ar sākotnējo vērtējumu, nodrošina lielāko datu atlases automatizācijas līmeni.

2.2.1. Zemes izmantošanas maiņas metodikas pilnveidošana

Pētījuma 2. etapā atlasīti visi MRM parauglaukumi, kuros veikta zemes izmantošanas veida maiņa. 2022. gada pirmajā pusē veikta MRM parauglaukumos iegūto zemes izmantošanas maiņas datu apkopošanas un izstrādāta zemes izmantošanas maiņas matrica, kas raksturo situāciju no 2015. gada līdz šodienai. Analīzei izmantota Latvijā izstrādātā “atliktās” zemes izmantošanas veida maiņas metodika, kas pielāgota MRM datu analīzei (Krumšteds u.c., 2019).

Visas darbības veiktas LKS92/Latvia TM (EPSG:3059) koordinātu sistēmā, izmantotas ArcMap un QGIS datorprogrammas. Datu apstrādē izmantoti ArcGIS geodatabase formāta faili. Datu analīzei izmanto MRM parauglaukumu telpiskos datus ar iedalījumu sektoros. Zemes izmantošanas veida maiņas vienība, ņemot vērā nelielo satelītattēlu izšķirtspēju, ir vesels parauglaukums, attiecīgi, mazākā zemes izmantošanas veida maiņas vienība ir aptuveni 400 ha.

Darba gaita:

1. izmantojot funkciju “*Intersection*” tiek intersektēti 3 nepieciešamo periodu slāņi, sākot, ar vecāko;
2. datu slāņi kurš izveidojies funkcijas “*Intersection*” rezultātā, atribūtu tabulā izveidotas 3 jaunas kolonas, “ZKAT1” – vecākais cikls, “ZKAT2” – vidējais cikls, “ZKAT3” – jaunākais cikls. Ar funkciju “*Field calculator*” katrā kolonnā norāda katra attiecīgā cikla zemes kategorijas ID, kurš tiek kopēts jau no esošām datu kolonnām;
3. izveido 3 jaunas kolonnas “Svars1” – vecākais cikls, “Svars2” - vidējais cikls, “Svars3” – jaunākais cikls. Izmantojot funkciju “*Field calculator*” un vienādojumu kopā 3 atrodamo formulu kolonnās noteikts katra attiecīgā cikla zemes kategoriju ID kurām ir pastāvīgas

īpašības, un ir zināms, ka tās laika gaitā nemainīsies un paliks konstantas (13. tabula). Tām piešķirta vērtība 1, lai tās varētu identificēt tālākajos aprēķinos;

4. izmanto “*Field calculator*” un vienādojumu kopā 4 doto formulu pievieno papildus vērtības/svarus, lai tālākajos aprēķinos noteiktu cikla nozīmīgumu un ietekmi uz aprēķiniem gala zemes kategorijai. Uz zemes kategorijas aprēķiniem “Svars1” vērtības veido vismazāko ietekmi, “Svars2” veido vidēju ietekmi, “Svars3” veido vislielāko ietekmi. Tāpēc šīm kolonnām attiecīgi tiek piešķirtas šādas vērtības/svari: “Svars1” – 20, “Svars2” – 30, “Svars3” – 50;
5. lauciņos (kolonnās “Svars1”, “Svars2”, “Svars3”) kuros 3. soļa darbības rezultātā izpildījusies 2. pielikumā norādītā vienādojums, vērtības būs par 1 augstākas veidojot lielāku vērtību/svaru, nekā tām kurām papildus vērtība nav tikusi dota. Attiecīgi – ja vienādojums noteiktie nosacījumi izpildās, “Svars1” vērtība būs 21, “Svars2” – 31, “Svars3” – 51;
6. izveido 3 jaunas kolonnas “Aprekini1” – vecākais cikls, “Aprekini2” – vidējais cikls, “Aprekini3” – jaunākais cikls;
7. izmantojot funkciju “*Field calculator*” un vienādojumu kopā 5 norādītās formulas veic aprēķinus, lai noteiktu kura cikla zemes kategorija tiks izmantota kā galējā zemes kategorija visu trīs ciklu ietvaros. Katrā kolonnā izmantota sava aprēķinu vienādojums, lai tiktu ņemts vērā vecāko aprēķināto ciklu rezultāti (vienādojumu kopa 5);
8. izveido kolonnu “Final_ZKAT”, kurā izmanto funkciju “*Field calculator*”, kopā saskaita aprēķinu kolonnu – “Aprekini1”, “Aprekini2”, “Aprekini3” vērtības. Pēc aprēķinu veikšanas kolonna “Final_ZKAT” norāda galīgo zemes izmantošanas veida kategorijas ID visu 3 intersektēto ciklu ietvaros;
9. veic atribūtu tabulas sakārtošanu, kuras laikā tiek dzēstas kolonnas kas dublējas vai nav nepieciešamas tālākā datu apstrādē;
10. izmantojot funkciju “*Joins and relates*” → “*Join*” 3 ciklu intersektētajam slānim, kurā veikti iepriekš minētie aprēķini, tiek pievienota papildus informācija par augsnes tipu, granulometrisku sastāvu un citu nepieciešamo informāciju.

Zemes kategorijas maiņas matricas izveidošanai izmantotas datorprogrammas ArcMap un jebkuru elektronisko tabulu apstrādes programmu (Libreoffice Calc vai Microsoft Excel). Darba gaita:

1. izmantojot funkciju “*Intersection*” tiek intersektēti visi iepriekš izveidotie 3 ciklu periodi, sākot ar vecāko;
2. atribūtu tabulā tiek dzēstas visas nevajadzīgās datu kolonnas, atstājot informāciju par zemes izmantošanas veida fināl kategorijām no visiem iepriekš veidotajiem 3 ciklu periodiem, parauglaukuma identifikācijas kodu, sektora identifikācijas kodu, karšu lapas kodu, parauglaukuma vietas atrašanās nosaukumu, parauglaukumu perimetra garumu un platību;
3. izveido kolonnu “Represent” kurā, ar funkciju “*Field calculator*” piešķir tādas pašas platību vērtības kā parauglaukuma platības kolonnai “Shape Area”;
4. funkcijā “*Field calculator*” kolonnas “Represent” datiem tiek pievienots koeficients, ar kura palīdzību platības attiecina uz Latvijas teritoriju (vienādojums 6);
5. MRM parauglaukumu ar funkciju “*Intersection*” intersektē ar LAD lauku datiem (Ilggadīgie zālāji 2013-2021), tiem MRM parauglaukumiem kuri intersektējas, piešķir parametru 1;
6. izmantojot funkciju “*Data*” → “*Export data*”, eksportē datus shapefile formātā;

Oglekļa aprite meža ekosistēmā

7. ar elektronisko tabulu rediģēšanas programmu atver eksportētā slāņa DBF failu, kurā norādīti visi slāņa atribūti;
8. dzēš nevajadzīgās datu kolonnas, atstājot tikai objekta ID numuru, parauglaukuma identifikācijas numuru, visas 3 ciklu periodu izrēķinātās *final* kategorijas, parauglaukumu platību, kas attiecinātas uz Latvijas teritoriju, ilggadīgo zālāju piešķirto parametru;
9. izmantojot funkciju “*Find and Replace*” *final* kategorijas pielīdzina UNFCCC zemes izmantošanas veida kategorijām (14. tabula);
10. parauglaukumiem, kuru zemes kategorija, norādīta kā pļava, un kuriem ilggadīgo zālāju kolonnā piešķirts parametrs 1, nomaina FZKAT no pļavas uz aramzemes;
11. izmanto funkciju “*Insert*” → “*PivotTable*” norāda 2 kolonnas ar nepieciešamajām 3 ciklu periodu UNFCCC zemes kategorijām un parauglaukumu platības kolonnu. Funkcijas tabulas lodziņā “*Values*” norāda parauglaukuma platības kolonnu, lauciņā “*Rows*” vecākā cikla kolonnu, bet lauciņā “*Columns*” jaunākā cikla kolonu;
12. rezultātā iegūst datu matricu par zemes platību izmaiņām, UNFCCC zemes izmantošanas kategoriju ietvaros, starp diviem cikliem (15. tabula).

Zemes platību izmaiņu datu interpolācijas un ekstrapolācijas pa gadiem pēc zemes izmantošanas kategorijām darba gaita:

1. Izveido datu tabulu kurā norāda nepieciešamos gadus un UNFCCC zemes izmantošanas kategorijas (apbūve, aramzeme, citas zemes, mežs, mitrājs, pļava).
2. No iepriekš izveidotajām datu matricēm iegūst datus par katra cikla attiecīgajām zemes platībām pēc UNFCCC zemes kategorijām. Jaunākā cikla datus iegūst no kolonnas “Kopā gada sākumā”, bet vecākā cikla datus no kolonnas “Kopā gada beigās” (14. tabula).
3. Dati kas iegūti par kādu no cikliem tiek attēloti kā šī cikla pēdējais gads, jo tad notikusi pēdējā reprezentatīvo datu ieguve.
4. Zemes platības izmaiņu datus pa gadiem iegūst veicot lineāro interpolāciju starp diviem iegūtajiem 3 ciklu periodu platību datiem (vienādojumu kopa 7).
5. Aprēķinos ņem vērā vērtības par pēdējiem 5 gadiem. Tabulā 15 attiecīgās kolonnas attēlotas zaļā krāsā.

Tabula 13. Nemainīgās zemes kategorijas

| ID | MRM | UNFCCC | NEMAINĪGA |
|-----|---------------------|---------|-----------|
| 10 | Mežs | Mežs | - |
| 11 | Degums | Mežs | - |
| 12 | Iznīkusi audze | Mežs | - |
| 13 | Vējgāze | Mežs | - |
| 14 | Izcirtums | Mežs | - |
| 141 | Izcirtums (zkat 62) | Mežs | |
| 21 | Sūnu purvs | Mitrājs | - |
| 22 | Zāļu purvs | Mitrājs | - |
| 23 | Pārejas purvs | Mitrājs | - |
| 31 | Lauce | Pļava | - |

Oglekļa aprite meža ekosistēmā

| ID | MRM | UNFCCC | NEMAINĪGA |
|------|---|--------------|-----------|
| 32 | Meža dz.baroš.lauce | Aramzeme | - |
| 33 | viršājs | Pļava | - |
| 34 | smiltājs | Citas zemes | - |
| 35 | Krūmājs | Pļava | - |
| 36 | Augļu dārzs | Aramzeme | - |
| 37 | Plantācijas | Aramzeme | - |
| 40 | Pārplūstošs klajums | Mitrājs | - |
| 41 | Bebu applūdinājums | Mitrājs | - |
| 51 | Meža ceļš | Apbūve | - |
| 52 | Meža stiga | Apbūve | - |
| 53 | Meža grāvis | Apbūve | - |
| 60 | Aramzeme | Aramzeme | - |
| 61 | Zālājs | Pļava | - |
| 62 | Mežs LS zemē | Mežs | - |
| 63 | Upe | Mitrājs | - |
| 64 | Aizaugusi LS zeme | Pļava | - |
| 65 | Ezers, dīķis | Mitrājs | - |
| 66 | LS grāvis | Apbūve | - |
| 67 | Autoceļš ar joslu | Apbūve | - |
| 68 | Dzelzceļš ar joslu | Apbūve | - |
| 69 | Karjers aizaudzis | Aps. mitrājs | - |
| 6901 | Aizaudzis karjers ir mežs | Mežs | - |
| 6902 | Aizaudzis karjers nav mežs | Zālājs | - |
| 691 | Aizaudzis izstrādes purvs | Mitrājs | - |
| 6911 | Aizaudzis izstrādes purvs ir mežs | Mežs | - |
| 6912 | Aizaudzis izstrādes purvs nav mežs | Mitrājs | - |
| 70 | Karjers svaigs | Aps. mitrājs | - |
| 71 | Upes paliene | Pļava | - |
| 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 | Kvartālstīga | Apbūve | - |
| 522 | Mineralizēta josla | Apbūve | - |

Oglekļa aprite meža ekosistēmā

| ID | MRM | UNFCCC | NEMAINĪGA |
|-----|-------------------------------------|--------------|-----------|
| 523 | Kokmateriālu krautuves vieta | Apbūve | - |
| 531 | Kanāls | Apbūve | - |
| 532 | Grāvju trase | Apbūve | - |
| 541 | Sēklu plantācija | Apbūve | - |
| 542 | Rekultivēta zeme | Pļava | - |
| 544 | Atpūtas vieta | Apbūve | - |
| 545 | Citas spec. nozīmes zemes | Aps. mitrājs | - |
| 547 | Ceļu un dzelzceļu nodalījumu joslas | Apbūve | - |
| 548 | Kokmateriālu krautuves vieta | Mežs | - |
| 691 | Karjers aizaudzis (ārpus meža) | Aps. mitrājs | - |
| 701 | Karjers sveigs (ārpus meža) | Aps. mitrājs | - |
| 776 | Kapsētas | Apbūve | NEMAINĪGA |

APRĒĶINU FORMULA KOLONNAI "Svars1"

"ZKAT1" = 36 or "ZKAT1" = 51 or "ZKAT1" = 52 or "ZKAT1" = 53 or "ZKAT1" = 63 or "ZKAT1" = 65 or "ZKAT1" = 66 or "ZKAT1" = 67 or "ZKAT1" = 68 or "ZKAT1" = 73 or "ZKAT1" = 74 or "ZKAT1" = 75 or "ZKAT1" = 78 or "ZKAT1" = 511 or "ZKAT1" = 521 or "ZKAT1" = 522 or "ZKAT1" = 531 or "ZKAT1" = 532 or "ZKAT1" = 547

APRĒĶINU FORMULA KOLONNAI "Svars2"

"ZKAT2" = 36 or "ZKAT2" = 51 or "ZKAT2" = 52 or "ZKAT2" = 53 or "ZKAT2" = 63 or "ZKAT2" = 65 or "ZKAT2" = 66 or "ZKAT2" = 67 or "ZKAT2" = 68 or "ZKAT2" = 73 or "ZKAT2" = 74 or "ZKAT2" = 75 or "ZKAT2" = 78 or "ZKAT2" = 511 or "ZKAT2" = 521 or "ZKAT2" = 522 or "ZKAT2" = 531 or "ZKAT2" = 532 or "ZKAT2" = 547

APRĒĶINU FORMULA KOLONNAI "Svars3"

"ZKAT3" = 36 or "ZKAT3" = 51 or "ZKAT3" = 52 or "ZKAT3" = 53 or "ZKAT3" = 63 or "ZKAT3" = 65 or "ZKAT3" = 66 or "ZKAT3" = 67 or "ZKAT3" = 68 or "ZKAT3" = 73 or "ZKAT3" = 74 or "ZKAT3" = 75 or "ZKAT3" = 78 or "ZKAT3" = 511 or "ZKAT3" = 521 or "ZKAT3" = 522 or "ZKAT3" = 531 or "ZKAT3" = 532 or "ZKAT3" = 547

Vienādojumu kopa 3. Pastāvīgo zemes kategoriju noteikšanas formulas kolonnām Svars1, Svars2, Svars3.

APRĒĶINU FORMULA KOLONNAI "Svars1"

"Svars1" + 20

APRĒĶINU FORMULA KOLONNAI "Svars2"

"Svars2" + 30

APRĒĶINU FORMULA KOLONNAI "Svars3"

"Svars3" + 50

Vienādojumu kopa 4. Ietekmes vērtības piešķiršanas formulas kolonnām Svars1, Svars2, Svars3.

APRĒĶINU FORMULA KOLONNAI "Aprekini1"

if(("Svars3" > "Svars2" + "Svars1") and ("Svars3" = 51), "ZKAT3", 0)

Oglekļa aprite meža ekosistēmā

APRĒĶINU FORMULA KOLONNAI “Aprekini2”

if(("Svars3" = "Svars2" + "Svars1") and ("Svars3" = 50) and ("ZKAT1" = "ZKAT2") and ("ZKAT3" <> "ZKAT1") ,
"ZKAT2" ,if("Svars1" + "Svars2" + "Svars3" =100, "ZKAT3" ,0))

APRĒĶINU FORMULA KOLONNAI “Aprekini3”

if(("Svars1" + "Svars2" + "Svars3" >100) and ("Svars2" +20> "Svars3") and ("Svars1" + "Svars2" <>50), "ZKAT2" ,
if(("Svars1" + "Svars2" + "Svars3" >100) and ("Svars2" +20 <= "Svars3") and ("Svars1" + "Svars2" <>50),
"ZKAT3" ,0))

Vienādojumu kopa 5. Aprēķinu formulas kolonnām Aprekini1, Aprekini2, Aprekini3.

$$\text{Pārveides koeficients} = \frac{\text{Visuparauglukumkopējaisizmērs}}{\text{Valstsplatība}}$$

Piemērs:

$$\text{Pārveides koeficients} = \frac{8084032}{6458900}$$

$$\text{Pārveides koeficients} = 1,2516112$$

KOEFICIENTA IZMANTOŠANA PLATĪBAS PĀRVEIDĒ FUNKCIJĀ“FIELD CALCULATOR”

[Represent]/1.2516112

Vienādojumu kopa 6. Aprēķinu formulas kolonnai Represent.

Tabula 14. Zemes kategorijas pielīdzināšana UNFCCC zemes kategorijas veidam

| | UNFCCC zemes kategorijas veids | | | | | |
|--|--|--------------------|-----------------------------------|---|--|-------------|
| | Mežs | Aramzeme | Pļava | Mitrājs | Apbūve | Citas zemes |
| Datu slāņa zemes izmantošanas veida kategorija | 10, 11, 12, 13, 14, 62, 141, 548, 6901, 6911 | 32, 36, 37, 60, 72 | 31, 33, 35, 61, 64, 71, 542, 6902 | 21, 22, 23, 40, 41, 63, 65, 69, 70, 545, 691, 701, 6912 | 51, 52, 53, 66, 67, 68, 73, 74, 75, 78, 511, 521, 522, 523, 531, 532, 541, 544, 547, 776 | 34 |

Tabula 15. Zemes izmantošanas maiņas matricas piemērs

| Zemes izmantošanas maiņa | | Zemes izmantošanas veids gada beigās | | | | | | Kopā gada sākumā |
|--------------------------------------|-------------|--------------------------------------|----------|-------------|------|---------|-------|------------------|
| | | Apbūve | Aramzeme | Citas zemes | Mežs | Mitrājs | Pļava | |
| Zemes izmantošanas veids gada sākumā | Apbūve | | | | | | | |
| | Aramzeme | | | | | | | |
| | Citas zemes | | | | | | | |
| | Mežs | | | | | | | |
| | Mitrājs | | | | | | | |
| | Pļava | | | | | | | |

Oglekļa aprīte meža ekosistēmā

| Zemes izmantošanas maiņa | Zemes izmantošanas veids gada beigās | | | | | | Kopā gada sākumā |
|--------------------------|--------------------------------------|----------|-------------|------|---------|------|------------------|
| | Apbūve | Aramzeme | Citas zemes | Mežs | Mitrājs | Ļava | |
| Kopā gada beigās | | | | | | | |

$$\text{iepriekšējā gada platība} + \left(\frac{\text{jaunākā cikla platība} - \text{vecākā cikla platība}}{\text{gaduskaits no vecākā līdz jaunākajam ciklam}} \right)$$

Piemērs izmantojot gada skaitļus:

$$2005 + \left(\frac{2008 - 2013}{5} \right)$$

Excel funkcija:

=iepriekšējā gada platība+(jaunākā cikla platība-vecākā cikla platība)/gadu skaits no vecākā līdz jaunākajam ciklam

Piemērs:

| =X3+(AB3-W3)/W3:AA3 | | | | | |
|---------------------|------|-----------|------|------|------|
| W | X | Y | Z | AA | AB |
| 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 |
| | | | | | |
| | | =X3+(AB3- | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |

Vienādojumu kopa 7. Lineārās interpolācijas aprēķinu vienādojums.

Lai pārbaudītu izstrādāto satelītattēlu analīzes metodi, vienlaicīgi aktualizējot arī SEG inventarizācijās izmantojamās darbības datus, pētījuma otrajā posmā veikta zemes izmantošanas maiņas datu un NDVI izmaiņu analīze bijušajās kūdras ieguves vietās, kas identificētas LIFE REstore pētījuma ietvaros (Pētersons u.c., 2019), lai konstatētu apmežoto platību īpatsvara pieaugumu. Analīzei izmantoti 2021. gada veģetācijas sezonas (no maija līdz septembrim) laikā iegūtie dati. Iepriekšējā analīzē izmantoti 2016. gada dati. Tāpat kā iepriekšējā reizē aprēķinos pieņemts, ka mežam raksturīgā NDVI robežvērtība ir 0,5 (Ya'acob u.c., 2014).

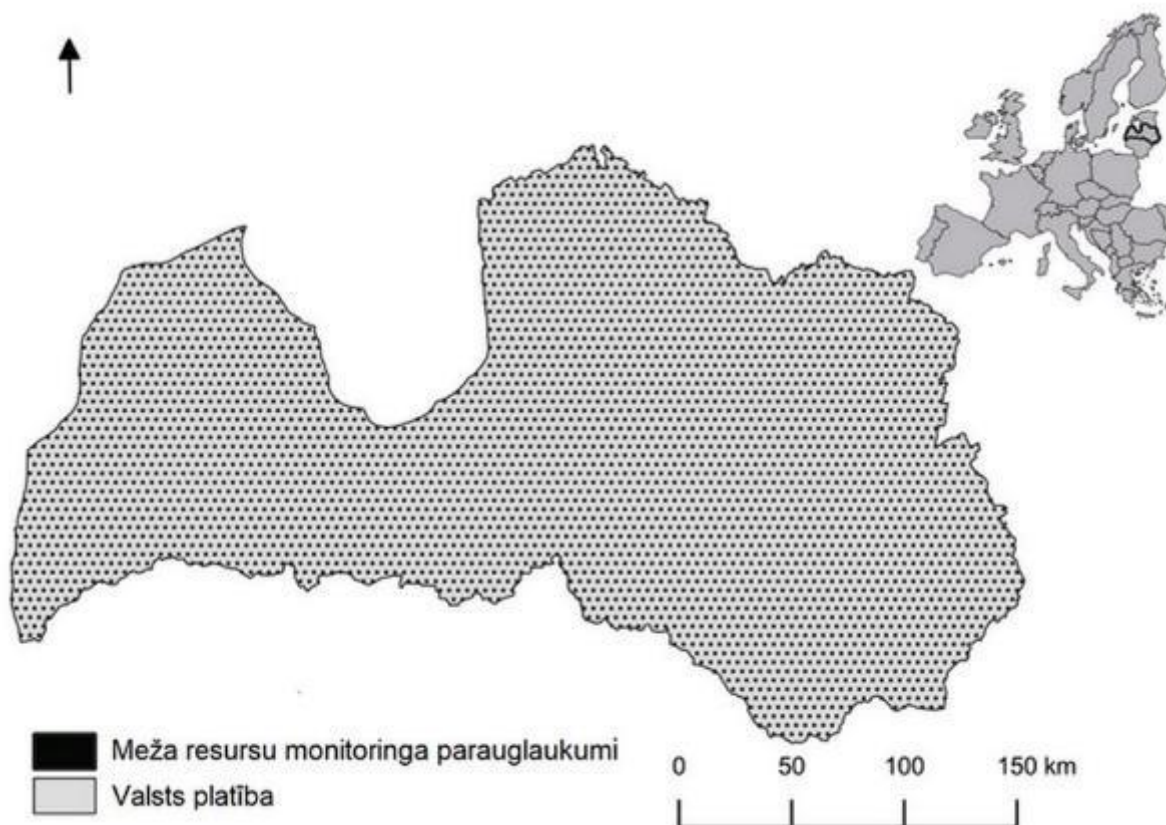
Kopējā izstrādāto un šobrīd izstrādājamo kūdras lauku platība saskaņā ar LIFE REstore rezultātiem ir 54,9 tūkst. ha. Saskaņā ar 2021. gada satelītattēlu datiem mežam atbilstošs veģetācijas indekss ir 12,8 tūkst. ha platībā. 2016. gadā šī platība bija 9,6 tūkst. ha (Butlers & Ivanovs, 2018), attiecīgi apmežotā platība pieaugusi par 3,2 tūkst. ha, sasniedzot 23% no kopējās izstrādāto un šobrīd izstrādājamo kūdras lauku platības. Apmežotā platība, salīdzinot ar platību, kurā vairs nenotiek kūdras ieguve, ir 30%.

2.2.2. Metodika Sentinel 2 un citu satelītattēlu izmantošanai zemes izmantošanas maiņas uzskaites pilnveidošanai

Meža resursu monitorings (MRM) ir daļa no Latvijas mežu monitoringa programmas, kas sagatavo statistisko informāciju par meža resursu pašreizējo stāvokli, kā arī izmaiņām tajā attiecībā pret iepriekšējiem periodiem. Monitorings Latvijā ieviests 2004. gadā, un tā norisi īsteno Latvijas Valsts

mežzinātnes institūts “Silava” (LVMI Silava). MRM ir galvenais datu avots zemes izmantošanas un zemes izmantošanas maiņas raksturošanai Latvijā un lielākajā daļā pārējo Eiropas valstu. Divas galvenās problēmas, kas saistītas ar MRM datu izmantošanu zemes izmantošanas maiņas ziņošanai, ir neliels parauglaukumu skaits, kuros notiek izmaiņas, un novērojumu periodiskums (Latvijā atmežošanu raksturo mazāk kā viens MRM parauglaukums gadā), kā rezultātā zemes izmantošanas maiņas datiem raksturīga liela nenoteiktība. Pētījuma uzdevums ir izmantot Sentinel 2 vai lielākas izšķirtspējas datus, lai noteiktu, kurā gadā notikusi zemes izmantošanas maiņa, aizstājot lineāru zemes izmantošanas maiņas interpolāciju ar reālu zemes izmantošanas maiņas novērtējumu.

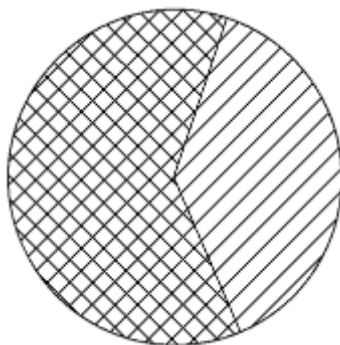
MRM parauglaukumi ir izkaisīti visā Latvijas teritorijā, kuru kopējais skaits sastāda 16156 pastāvīgos parauglaukumus (13. attēls). Katrs parauglaukums reprezentē 400 ha lielu valsts teritorijas daļu, lai arī tā faktiskais apļveida izmērs diametrā ir 12,64 m. Katru no parauglaukumiem uzmēra vienu reizi 5 gadu periodā jeb ciklā un tas iekļauj informāciju par tā zemes izmantošanas veidu un kokaudzes inventarizācijas informāciju, ja norādītajā parauglaukumā atrodas koki. Principi, kas izmantoti MRM datu pielietošanai zemes izmantošanas maiņas raksturošanai, izskaidroti iepriekšējā nodaļā.



Attēls 13. Meža resursu monitoringa izvietojums valsts teritorijā.

Veidojot zemes izmantošanas un zemes izmantošanas maiņas datus, izmanto MRM ģeotelpisko datubāzi. Zemes izmantošanas maiņas raksturošanu veic periodam no 1990. līdz 2021. gadam. No MRM datiem iegūst zemes izmantošanas maiņas datus, tajā skaitā informāciju par atmežošanu, kas ir viens no lielākajiem emisiju avotiem Latvijā un citās valstīs ar lielu meža zemju īpatsvaru. Atmežošanas datu apkopojums (par apbūvi, aramzemi, mitrāju, zālāju un citām zemēm) piecgažu griezumā dots 16. tabulā. Pateicoties MRM datiem, var uzrādīt precīzu lokāciju teritorijām, kurās notikusi zemes izmantošanas maiņa. Tā ir obligāta prasība SEG inventarizācijas sistēmai. Kopumā no 1990. gada atmežošana pilnībā vai daļēji notikusi 1013 parauglaukumos. Daļēja

atmežošana nozīmē to, ka MRM parauglaukumu, kurā pārstāvēti vairāki zemes izmantošanas veidi, sadala sektoros, sašķeļot apļveida parauglaukumu vairākās daļās (14. attēls).



Attēls 14. Sektoros sadalīta MRM parauglaukuma piemērs.

Visaktīvāk atmežošanās notikusi 2. MRM ciklā (2008.-2013. gads), kad atmežota 40878 ha atbilstoša platība 334 parauglaukumos. Visvairāk uz meža zemju rēķina palielinājušās zālājus platības. Izmaiņas 5 gadu laikā konstatētas 123 parauglaukumos, kuru kopējā platība pielīdzināma 19355 ha.

Trešajā ciklā, laika posmā no 2013. līdz 2018. gadam, kad kopumā atmežošana notikusi 444 parauglaukumos, kopumā 39457 hektāru platībā. Visvairāk meža zemes transformētas par zālājiem (izmaiņas 125 parauglaukumos), kuru kopējā platība pielīdzināma 15093 ha. Tāpat meža zemju transformācija lielā apjomā norisinājusies par apbūves teritorijām, kas skaidrojams galvenokārt ar meža ceļu infrastruktūras izbūvi, kura atbilstoši zemes izmantošanas klasifikācijai SEG inventarizācijā iekrīt apbūves teritoriju iedalījumā. Kopumā par apbūves teritorijām transformētas platības 13718 hektāru platībā, un šīs izmaiņas konstatētas 233 parauglaukumos.

Vismazākās zemes izmantošanas izmaiņas konstatētas 1995. un 2000. gados, kas skaidrojams ar zemes izmantošanas maiņas iegūšanas metodes maiņu – dati iegūti manuāli, veicot satelītattēlu salīdzināšanu, kas samazina iespējamo datu precizitāti (Bādērs u.c., 2016). 2000. gadā konstatēti tikai 3 atmežošanās gadījumi, bet 1995. gadā – 49 atmežoti parauglaukumi, kuru kopējā platība pārstāv 9892 ha.

Mazais atmežošanās novērojumu skaits un kopplatība 4. ciklā skaidrojama ar to, ka tas vēl nav noslēdzies un nav pieejama pilnīga informācija par patieso atmežošanās apjomu valstī. Ceturtā cikla noslēgums gaidāms 2023. gadā, bet dati par to būs pieejami ne ātrāk kā 2024. gada 1. aprīlī. Ņemot vērā datu ievākšanas un parauglaukumu izvietojuma specifiku, var izveidoties situācija, kad starp 5 dažādiem cikla gadiem atmežošanās apjoms var ievērojami atšķirties, tādēļ patieso atmežošanās apjomu šobrīd visprecīzāk var noteikt tikai katra monitoringa cikla beigās.

Tabula 16. Atmežoto parauglaukumu skaits un platība, laika posmā no 1990. līdz 2021. gadam

| Rādītājs | Apbūve | Aramzeme | Mitrājs | Zālājs | Kopā |
|----------------------|--------|----------|---------|--------|------|
| 1995. gads | | | | | |
| Parauglaukumu skaits | - | 8 | 6 | 35 | 49 |
| Platība, ha | - | 1669 | 2201 | 6023 | 9892 |
| 2000. gads | | | | | |

Oglekļa aprīte meža ekosistēmā

| Rādītājs | Apbūve | Aramzeme | Mitrājs | Zālājs | Kopā |
|--------------------------------------|--------------|-------------|--------------|--------------|---------------|
| Parauglaukumu skaits | 2 | - | 1 | - | 3 |
| Platība, ha | 432 | - | 400 | - | 832 |
| Cikls 1 | | | | | |
| Parauglaukumu skaits | 58 | 1 | 28 | 41 | 128 |
| Platība, ha | 4184 | 187 | 5064 | 8543 | 17978 |
| Cikls 2 | | | | | |
| Parauglaukumu skaits | 149 | 12 | 50 | 123 | 334 |
| Platība, ha | 9236 | 1369 | 10918 | 19355 | 40878 |
| Cikls 3 | | | | | |
| Parauglaukumu skaits | 233 | 41 | 45 | 125 | 444 |
| Platība, ha | 13718 | 3799 | 6847 | 15093 | 39457 |
| Cikls 4 | | | | | |
| Parauglaukumu skaits | 30 | 5 | 8 | 12 | 55 |
| Platība, ha | 1833 | 178 | 1944 | 1229 | 5183 |
| Kopējais parauglaukumu skaits | 472 | 67 | 138 | 336 | 1013 |
| Kopējā platība, ha | 29403 | 7202 | 27373 | 50242 | 114220 |

Programmas kods zemes izmantošanas maiņas datu precizēšanai, nosakot faktisko izmaiņu gadu, izveidots, lai darbotos mākoņservisa platformā Google Earth Engine (GEE). Platforma izmantota attāļajai izpētei un ģeotropiskajai analīzei, lai apstrādātu un vizualizētu datus no Landsat 8 satelīta NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) datu kopas, paredzot iespēju izmantot arī agrāk iegūtu Landsat un jaunāko Sentinel 2 uzņēmumus. NDVI ir plaši izmantots veģetācijas indekss, kas ļauj novērtēt augu veselību un biomasu, netieši raksturojot augu lapās esošā hlorofila daudzumu. Uzsākot programmas izpildi, notiek NDVI datu kopas importēšanu no Landsat 8 uz GEE kā attēlu kopu, izmantojot funkciju “ee.ImageCollection()”. Izmantojot citus satelītattēlus, papildus veidojami risinājumi NDVI aprēķināšanai, kā arī datu filtrēšanai nepieciešamības gadījumā. Šo funkciju izmanto datu kopas ar nosaukumu ('LANDSAT/LC08/C01/T1_32DAY_NDVI') izveidošanai. Tad seko datu filtrēšana, iekļaujot tikai attēlus, kas uzņemti maijā, jūnijā, jūlijā, augustā un septembrī, lai nodrošinātu fotosintētiski aktīvā laika posma pārklājumu. Nākamais solis ir atlasīt NDVI joslu no attēlu kolekcijas, izmantojot funkciju “select()”, un saglabāt to jaunā slānī ar nosaukumu “colorized”. NDVI josla ir attēlā esošās zaļās veģetācijas relatīvā daudzuma mērs, un to aprēķina, izmantojot atstaroto gaismu sarkanā un tuvā infrasarkanā viļņa garumā. Pēc tam NDVI datu vizualizācijas parametri tiek definēti objektā ar nosaukumu “colorizedVis”. Šis objekts ietver NDVI skalas minimālo un maksimālo vērtību, kas tiek izmantota, lai izstieptu NDVI datus, lai tie ietilptu norādītās krāsu paletes diapazonā. Paleta sastāv no 16 krāsām, sākot no baltas (zemas NDVI vērtības) līdz tumši zaļai (augstas NDVI vērtības), ar dzeltenās, oranžās un sarkanās vidējās nokrāsas, kas apzīmē vidējas NDVI vērtības. “Krāsotos” NDVI datus un “colorizedVis” vizualizācijas parametrus pēc tam nodod kā ievades informāciju funkcijai “Map.addLayer()”, kas pievieno NDVI datus kartei ar norādīto vizualizāciju. Tas ļauj lietotājam vizualizēt un analizēt veģetācijas telpiskos modeļus un tendences visā pētījuma apgabalā noteiktā laika periodā. Ap importēto parauglaukumu datu punktiem izveido buferi, ko saglabā mainīgajā “MRM” datu slānī. Bufera lielums izvēlēts kā

12,64 m, kas reprezentē pilnu Meža resursu monitoringa parauglaukuma izmēru. Šajā gadījumā bufera izveides mērķis ir parādīt MRM parauglaukuma telpisko novietojumu, ko izmantot, lai analizētu NDVI pikseļu vērtības no iepriekš pievienotā LANDSAT vai no Sentinel 2 ģenerētā datu slāņa. Funkciju "MRM.map()" izmanto, lai ar funkciju "buffer()" katram datu kopas individuālajām parauglaukumam izveidotu jaunu buferizēto ģeotelpisko datu kopu. Funkcijai 'buffer()' kā ievadi izmanto bufera lielumu (12,64 m) un izvēles parametru, kas norāda izveidojamā bufera veidu (0 apaļa forma). Nākamais solis ir apgriezt NDVI datus buferizētajos slāņos, izmantojot funkciju "clip()" un funkciju "clipToBounds()", pielietojot funkciju "clip()" katram attēlam NDVI kolekcijā. Funkcija "clip()" izmanto kā ievadi buferizētos ROI un no NDVI attēliem noņem visus ārpus tiem esošos datus. Iegūtos izgrieztos NDVI datus saglabā jaunā mainīgā slānī ar nosaukumu "clippedNDVI". Tas ļauj analizēt un vizualizēt NDVI datus tikai buferu telpiskajās robežās. Pēc tam "clippedNDVI" datus pievieno kartei, izmantojot funkciju "Map.addLayer()" un "colorizedVis" vizualizācijas parametrus. Tas ļauj lietotājam redzēt telpiskos modeļus un tendences veģetācijā buferos. Visbeidzot, ir definēta funkcija "imageToPoints()", kas pārvērš attēlu par punktu kolekciju. Šī funkcija tiek lietota katram attēlam kolekcijā "clippedNDVI", izmantojot funkciju "map()", un iegūtos punktus pievieno kartei, izmantojot funkciju "Map.addLayer()". Funkcija "imageToPoints()" izmanto funkciju "reduceToVectors()", lai iegūtu attēla pikseļu telpiskās koordinātas un pārvērstu tās punktos. Tos izmanto kā ievadi objektu ar izvēles parametriem, kas norāda interesējošo reģionu (šajā gadījumā buferizētos parauglaukumus), izvades punktu koordinātu atskaites sistēmu, mērogu, kādā apstrādāt attēlu, un izvades punktu ģeometrijas veidu. (šajā gadījumā "punkts"). Tas ļauj lietotājam redzēt NDVI datu punktu atrašanās vietas kartē un potenciāli izmantot tos turpmākai analīzei vai vizualizācijai. Tālāk apvieno visus iekrītošos punktus katra parauglaukuma robežās, lai iegūtu vidējo veģetācijas indeksa vērtību, kuru būtu iespējams attiecināt uz visu parauglaukumu. Iegūtās vidējās vērtības eksportē CSV formātā un piesaista MRM parauglaukumu datubāzei. CSV formātā iegūtā informācija kolonnu veidā attēlo veģetācijas laika perioda ikmēneša NDVI vērtības, ja attiecīgajā laika periodā ir pieejami satelīta dati un nav novēroti mākoņu traucējumi datu iegūšanai. Pateicoties datu sniegtajai atribūtu informācijai, iespējams noteikt precīzu veģetācijas indeksa samazinājuma brīdi laika skalā, kas, attiecīgi, dos ieskatu par daudz precīzāku laika brīdi, kurā noticis atmežošanās process, nekā tas ir, iespējams, izmantojot MRM periodiski iegūstamos datus. Pētījuma rezultātus plānots integrēt SEG inventarizācijas sistēmā no 2024. gada.

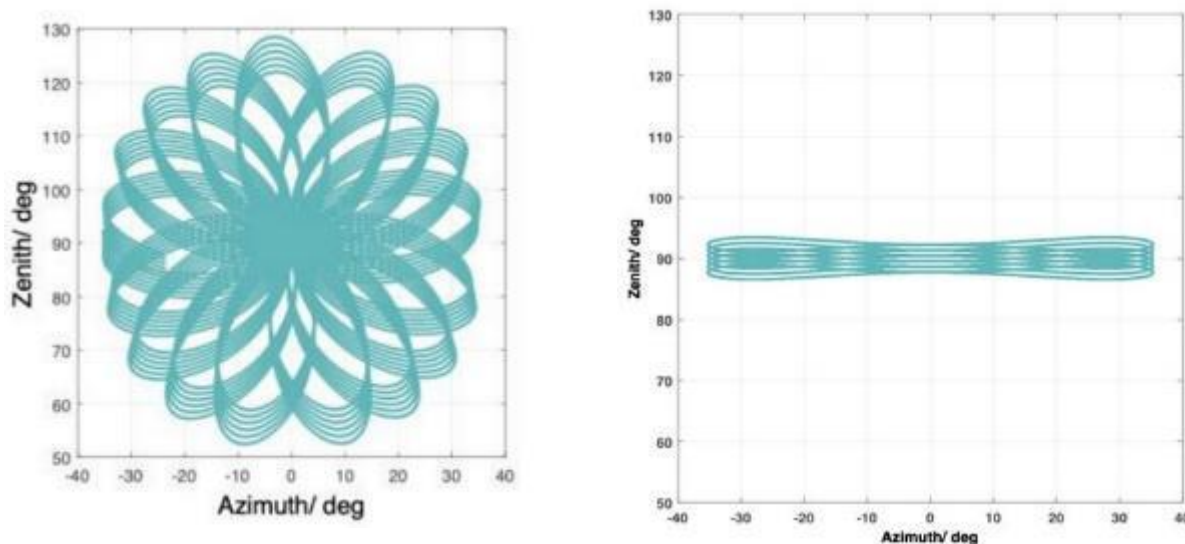
2.2.3. Koku augstuma un skaita attālinātas noteikšanas metodes pārbaude

Koku skaita un augstuma modeļa pārbaudei izmantoti 2022. gadā veiktu mērījumu dati. Izmantojot meža resursu monitoringa metodi, iegūti parauglaukumu taksācijas rādītāji un ar centimetru precizitāti fiksētas parauglaukuma centra koordinātes, kā arī koku atrašanās attālums un azimuts no centra. Visiem kokiem izrēķinātas koordinātes un izveidots telpisko datu slānis. Parauglaukumu taksācijas rādītāji pievienoti 3. pielikumā. Salīdzināšanai izmantotie rādītāji ir vidējā koka augstums un koku skaits parauglaukumā (17. tabula).

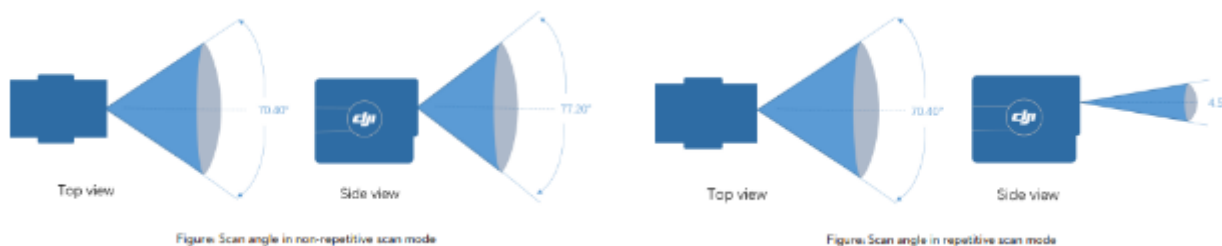
Tabula 17. Koku augstuma un skaita vidējo rādītāju raksturojums

| Rādītājs | H, m | Dzīvo koku skaits, gab. ha ⁻¹ | Sausokņu skaits, gab. ha ⁻¹ |
|--------------------|------|---|---|
| Vidējais rādītājs | 23,9 | 1 017 | 65 |
| Novērojumu skaits | 72 | 72 | 72 |
| Mazākais rādītājs | 16,9 | 360 | - |
| Lielākais rādītājs | 29,3 | 2 000 | 300 |
| Standartnovirze | 2,8 | 334 | 76 |

LiDAR dati iegūti mēneša laikā pēc parauglaukumu uzmērīšanas (2022. gada septembrī). Izmantotais sensors Livox Avia, punktu blīvums vienam atstarojumam – maks. 240000 pt. s⁻¹; vairākiem atstarojumiem – maks. 480000 pt. s⁻¹. Horizontālā precizitāte – 10 cm uz 50 m, vertikālā precizitāte – 5 cm uz 50 m. Skenēšanas režīms – neatkārtojošās skenēšanas shēma (15. un 16 attēls).



Attēls 15. Skenēšanas shēma.



Attēls 16. Atkārtotas skenēšanas shēma.

GNSS pozicionēšanas metode – RTK reālā laika GNSS korekcija, PPK pēcapstrādes korekcija. Punktu mākoņa formāts: PNTS/LAS/PLY/PCD/S3MB. Punktu mākoņa pēcapstrādei izmantotas datorprogrammas Agisoft Metashape un GlobalMapper. Turpmākajos aprēķinos izmantotā zemes virsmas augstuma modeļa izšķirtspēja ir 20 cm, bet virsmas modeļa izšķirtspēja – 10 cm.

Rezultātā, izmantojot pētījumā adaptēto rīku koku skaita prognozēšanai, izveidoti telpisko datu slāņi – rastrs *canopy height model* (CHM) un vektordatu slānis ar individuālu koku mērījumiem. No CHM rastra, izmantojot funkciju *zonal statistics*, parauglaukumu datu slānim piešķirtas vidējās vainaga augstuma vērtības. Izmantojot funkciju *extract by location*, atlasīti koki, kas atrodas parauglaukuma robežās (ņemot vērā iespējamo centra koordināšu nenoteiktību, koku atlasē izveidotas buferis ar 15 m rādiusu, bet koki mērīti parauglaukumā ar 12,62 m rādiusu). Izmantojot funkciju *join attributes by location*, kokiem piešķirtas visas parauglaukumu pazīmes. Iegūto datu kopu eksportē kā izklājlapu un aprēķina vidējā koka augstumu un koku skaitu uz ha.

Salīdzinot parauglaukumu uzmērījumu datus ar modelētajiem datiem, konstatēts, ka koku skaits būtiski neatšķiras ($p = 0,09$), mērītajos datos – 1017 gab. ha⁻¹, bet modelētajos datos –

940 gab. ha⁻¹ (atšķirība 7%), bet koku augstuma dati atšķiras būtiski ($p < 0,05$), mērītajos datos – 23,9 m, bet modelētajos datos – 27,2 m (atšķirība starp vidējiem rādītājiem 12%). Vidēji lielāks koku augstums modelētajos datos saistīts ar to, ka netiek identificēti zemākie 2. stāva koki, tādējādi mākslīgi palielinoties vidējā koka augstumu. Salīdzinot virsaugstuma koku augstumu, atšķirības starp mērītajiem un modelētajiem datiem vairs nav būtiskas. Atšķirības nav konstatētas arī, salīdzinot CHM un mērīto koku vidējo augstumu.

Koku augstuma modeļa testēšanai izmantoti dati ar vairākas reizes lielāku izšķirtspēju nekā datiem, kas izmantoti metodes izstrādāšanai, kas var ietekmēt rezultātu. Dažādu parametru izvēle arī ietekmē rezultātu – samazinot loga izmēru, strauji pieaug identificēto koku skaits, kas saistīts ar lielas izšķirtspējas datu izmantošanu. Turpmākajos pētījuma etapos apvienosim aprobēto metodiku ar pētījumā izstrādāto biomasas noteikšanas metodi (darba uzdevums “Metodika koku sugu sastāva telpiskās izplatības novērtēšanai Latvijas teritorijā un oglekļa uzkrājuma dinamikas modelēšanai”) un sagatavosim rekomendācijas darbību datu uzlabošanai, lai nodrošinātu oglekļa uzkrājuma izmaiņu ziņošanu visai Latvijas teritorijai, izmantojot lielas izšķirtspējas attālās izpētes datus.

Pētījuma rezultāti, kas attiecas uz koku augstuma prognozēšanu, iesniegti publicēšanai žurnālā *Baltic Forestry*, manuskripta nosaukums “The influence of forest tree species composition on the forest height predicted from airborne laser scanning data - A case study in Latvia”. Izstrādāto kūdras lauku apmežotās platības pārrēķinu plānots iekļaut nacionālajā SEG inventarizācijas ziņojumā 2023. gadā.

3. TRUPES IETEKME UZ OGLEKĻA UZKRĀJUMU DZĪVO KOKU BIOMASĀ

3.1. Trupes ietekmes uz oglekļa uzkrājumu dzīvajā biomasā LVM apsaimniekotajos mežos novērtējums

3.1.1. Izzinātības apskats

Trupes sastopamība un izplatība ir svarīgi faktori, kas ietekmē koksnes kvalitāti un vērtību, tomēr trupes izplatība dažādu koku sugu dominējošās audzēs parasti tiek reti novērtēta un modelēta atkarībā no trupes sadalīšanās pakāpes. Trupe ir koksnes audu galveno sastāvdaļu (celulozes un lignīna) noārdīšanās sēņu izdalīto fermentu ietekmē, kā rezultātā tiek traucēti koka fizioloģiskie procesi, noārdās koksnes šūnu apvalki, mainās koksnes anatomiskā struktūra, fizikālās un ķīmiskās īpašības, kā arī koksnes krāsa. Trupējušu koksni pamatā var iedalīt divās galvenajās grupās: 1) iekrāsojums – koksne sāk parādīties citas krāsas plankumi vai tā jau pilnībā mainījusi savu sākotnējo krāsu un 2) mīkstā trupe – ir novērojams koksnes blīvuma un masas samazinājums. Kad koksnes trupēšana beigusies, izveidojas dobums.

Trupe vispirms negatīvi ietekmē stingrību jeb koksnes spēju izturēt triecienus. Parasti tam seko stiprības samazināšanās, kas saistīta ar lieces izturību. Pētījumos noskaidrots, ka koksnes blīvuma samazinājums par vienu līdz deviņiem procentiem izraisa koksnes triecienizturības samazināšanos attiecīgi par 20% līdz 80%, vai lieces izturības samazināšanos pat līdz 75%, atkarībā no trupes veida un koku sugas (Wilcox, 1978). Tāpat blīvuma samazinājums negatīvi ietekmē arī citas koksnes īpašības. No dažādu koka izstrādājumu ražošanas perspektīvas ir svarīgi prognozēt trupes sastopamību audzē, bojāto sortimentu īpatsvaru un trupes izplatību stumbros, jo koksnes mehānisko īpašību (piemēram, lieces stiprības) pasliktināšanās rezultātā potenciālo zāģmateriālu kvalitāte tiek pazemināta līdz papīrmalkai vai malkai. Turklāt trupējušas koksnes apjoma noteikšana ir svarīga valsts biomasas uzskaitē, jo trupējuši koksne samazina patieso mežaudzes oglekļa uzkrājumu.

Dažādos pētījumos aprakstīts, ka pret trupi izturīgāku koku koksne ir blīvāka (Saranpää, 2003). Daudzos gadījumos izturība pret trupi ir saistīta arī ar lielāku ātraudzību, jo ātrāk augošiem kokiem ātrāk aizaug zaru rētas un dažādi ievainojumi, pa kuriem notiek koku inficēšanās. Lai mazinātu serdes trupes nelabvēlīgo ietekmi un izplatību lapu koku audzēs, ir svarīgi laicīgi veikt sastāva kopšanu un retināšanas cirtes, lai kokiem nesamazinātos radiālā pieauguma veidošanās. Praksē trupes infekciju izplatīšanos var mazināt, retināšanas laikā nocērtot bojātos kokus un nepieļaujot palikušo koku mehānisku traumēšanu.

Trupes un dobumu klātbūtne koku stumbros izraisa koksne uzkrātā oglekļa emitēšanu atpakaļ atmosfērā. Lielākā daļa pieejamās informācijas par stumbra trupes izplatību nāk no pētījumiem, kuros pētīta tās ietekme uz kokmateriālu apjomu un kvalitāti. Pagaidām nevienā no Eiropas valstīm serdes trupe nav vērtēta kā SEG emisijas ietekmējošs faktors un nav arī skaidrots, vai trupes ietekme ir ietverta kokaudzes biomasas aprēķinos. Arī aprēķinot Latvijas kokaudžu biomasu un oglekļa uzkrājumu, tiek pieņemts, ka visi koki ir veseli, bez bojājumu pazīmēm. Realitātē, jo īpaši vecās un dzīvnieku bojātās mežaudzēs, ir trupējuši un dobumaini koki, kas var nozīmēt, ka oglekļa uzkrājums tiek sistemātiski pārvērtēts.

Pirmajā pētījuma īstenošanas gadā, stumbra biomasas un oglekļa uzkrājuma samazinājuma novērtēšanai atlasītas 9 baltalkšņa un 7 melnalkšņa audzes un izstrādāta metodika stumbra trupes ietekmes uz dzīvu koku biomasu izvērtēšanai. Galvenās 2022. gadā plānotās pētījuma darbības bija trupējušo alkšņu stumbra šķērsriezuma ripu attēlu analīze, precīzi aprēķinot serdes trupes ietekmēto

laukumu, un jaunu parauglaukumu ierīkošana pieaugušās bērza un apses audzēs (18. tabula). Ierīkotajās audzēs, sekojot iepriekš izstrādātajai metodikai, ierīkoti 16 parauglaukumi un tajos kopā divu gadu laikā plānots analizēt apmēram 120 trupējušu paraugkoku datus (60 apses un 60 bērzi). Laboratorijā noteiks iegūto trapes paraugu blīvumu un oglekļa saturu atkarībā no trapes sadalīšanās pakāpes, kā arī katram nozāģētajam kokam precīzi tiks aprēķināts trapes kolonnas tilpums katrai trapes attīstības stadijai. Latvijā apses un bērzu audzēs veikti pētījumi par trapes izplatību un ietekmi uz kokmateriālu iznākumu, taču trūkst empīrisko datu par koksnes blīvuma un oglekļa satura izmaiņām, kā arī nav izstrādāta metode trapes radīto oglekļa zudumu modelēšanai.

Trapes sastopamība atlasītajās bērza un apses audzēs noteikta, urbjot kokus celma daļā ar mehāniskās pretestības mērīšanas ierīci (Rezistogrāfu) un kontrolei atsevišķiem kokiem paralēli arī ar Preslera pieauguma svārpstu. Secināts, ka ar Rezistogrāfu nav iespējams izmērīt bērza un apses koksnes iekrāsojuma izplatību (cietā trape), bet savukārt ar Preslera svārpstu nav iespējams iegūt mīkstās trapes paraugus un noteikt dobuma diametru (17. attēls).



Attēls 17. Rezistogrāfa mērījums uzrāda blīvuma samazinājumu, kas norāda uz mīkstās trapes klātbūtni stumbrā.

Tabula 18. Trapes ietekmes izvērtēšanai atlasītās apses un bērza audzes un dominējošās koku sugas taksācijas rādītāji

| N.p.k. | Valdošā suga | Audzės vecums | D, cm | G, ha ⁻¹ | H, m | Krāja, m ³ ha ⁻¹ | Trupējušo koku īpatsvars ⁸ parauglaukumā, % |
|--------|--------------|---------------|-------|---------------------|------|--|--|
| 1 | Apse | 79 | 30,1 | 15,7 | 31,7 | 238,5 | 90,9 |
| 2 | Apse | 89 | 33,8 | 28,6 | 31,8 | 434,2 | 68,8 |
| 3 | Apse | 74 | 36,8 | 19,1 | 32,2 | 293,5 | 11,1 |
| 4 | Apse | 74 | 42,4 | 39,6 | 33,1 | 625,4 | 50,0 |
| 5 | Apse | 69 | 35,2 | 27,2 | 27,8 | 367,5 | 57,1 |

⁸ Trupējušo koku īpatsvars noteikts pēc Rezistogrāfa mērījumu datiem.

Oglekļa aprite meža ekosistēmā

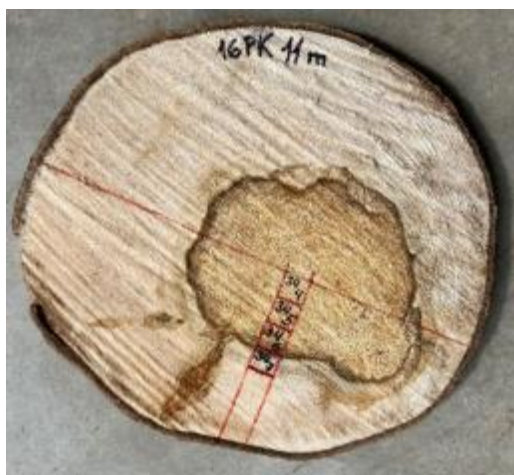
| N.p.k. | Valdošā suga | Audzės vecums | D, cm | G, ha ⁻¹ | H, m | Krāja, m ³ ha ⁻¹ | Trupējušo koku īpatsvars ⁸ parauglaukumā, % |
|--------|--------------|---------------|-------|---------------------|------|--|--|
| 6 | Apse | 69 | 38,7 | 16,4 | 30,7 | 241,9 | 0,0 ⁹ |
| 7 | Apse | 110 | 55,2 | 38,3 | 37,3 | 672,3 | 50,0 |
| 8 | Apse | 90 | 41,2 | 34,6 | 38,1 | 623,9 | 76,9 |
| 9 | Bērzs | 74 | 23,5 | 21,6 | 19,9 | 197,7 | 28,0 |
| 10 | Bērzs | 99 | 26,0 | 15,9 | 23,7 | 172,2 | 26,7 |
| 11 | Bērzs | 109 | 29,6 | 23,3 | 24,3 | 258,0 | 11,8 |
| 12 | Bērzs | 69 | 20,9 | 21,2 | 21,8 | 215,2 | 16,1 |
| 13 | Bērzs | 74 | 23,9 | 27,0 | 24,0 | 303,8 | 13,3 |
| 14 | Bērzs | 74 | 26,4 | 24,1 | 22,4 | 253,9 | 9,1 |
| 15 | Bērzs | 90 | 24,0 | 22,7 | 28,4 | 293,9 | 32,0 |
| 16 | Bērzs | 95 | 29,9 | 23,8 | 27,7 | 300,4 | 94,1 |

Trupes izplatības un ietekmes uz stumbra biomasu raksturošanai, katrā atlasītajā audzē ierīkots 500 m² parauglaukums un nozāģēti vismaz pieci trupējuši paraugkoki. Lai izmērītu stumbra trupējušās daļas tilpumu un iegūtu bojātās koksnes paraugus, nozāģēto koku stumbri sadalīti 1 m garos nogriežņos un iegūtas stumbra šķērsriezuma ripas. Paraleli šķērsriezuma ripu iegūšanai, tiek noteikts trupes izplatības augstums stumbrā. Visas iegūtās stumbra šķērsriezuma ripas ieskenētas datorā, lai vēlāk tajās aprēķinātu trupes aizņemto laukumu atbilstoši trupes klasifikācijai. Pēc līdzīgas metodikas iepriekšējos pētījumos sagatavoti arī netrupējušu koku šķērsriezuma ripu paraugi. Katrai šķērsriezuma ripai sākumā ar lineālu, bet pēc tam precīzi ar datorprogrammu, tiks mērīts trupes diametrs un laukums atkarībā no trupējušās koksnes pakāpes. Pētījumā, atbilstoši Arhipova u.c. (2011, 2012) izveidotajai klasifikācijai, izdalīti sekojošas trupējušās koksnes pakāpes:

1. iekrāsojums – raksturīgas nelielas koksnes mehānisko īpašību izmaiņas;
2. mīkstā trupe – sadalījusies koksne, kura ir saspiežama ar pirkstiem;
3. dobums.

Iepriekšminētā trupējušās koksnes klasifikācija izvēlēta, lai būtu iespējams pētījumā iegūtos datus sinhronizēt un papildināt ar iepriekš veikto pētījumu datiem. No stumbra šķērsriezuma ripām laboratorijā, sekojot iepriekš izstrādātai metodikai, iegūti nelieli koksnes paraugi, tie sasaldēti un nākamgad tiem tiks noteikts blīvums un oglekļa saturs (18. attēls).

⁹ Visi trupējušie koki nozāģēti ārpus uzmērītā parauglaukuma.



Attēls 18. No bērza un apses šķērsriezuma ripām iegūtie trupējušas koksnes paraugi.

Blīvuma paraugu platums virzienā no ripas centra uz mizu ir 2 cm. Parauga biezums ir vienāds ar ripas biezumu, bet tā garums nepārsniedz 3 cm. Pirms koksnes paraugu blīvuma mērīšanas tie tiek atsaldēti un uz 24 stundām iemērkti ūdenī, lai to neuzsūktu mērīšanas procesā (Ilic u.c., 2000). Paraugu blīvumu mērīs ar Precisa XB 220A laboratorijas svariem, kas aprīkoti ar Precisa blīvuma mērīšanas komplektu. Pirms katra atkārtojuma paraugs nosusinās ar mīkstu papīru. Laboratorijā trupes paraugus žāvē 103-105 °C temperatūrā, līdz tiks sasniegta nemainīga parauga masa. Pēc žāvēšanas katru paraugu atkārtoti nosver ar laboratorijas svariem un aprēķina tā blīvumu. Oglekļa satura mērījumiem katru paraugu sagriež mazos gabaliņos un samal viendabīgā pulverī. Samaltajam paraugam analizē negaistošā oglekļa un slāpekļa saturu, izmantojot Elementar EL Cube analizatoru. Katrai trupes attīstības stadijai un koku sugai blīvumu paredzēts noteikt vismaz 200 paraugiem, bet oglekļa saturu plānots noteikt vismaz 100 koksnes paraugiem.

Tā kā āra bērzs (*Betula pendula* Roth.) un purva bērzs (*Betula pubescens* Ehrh.) ir divas Latvijā visizplatītākās bērzu sugas, kuru mežaudžu produktivitāte atšķiras un kurām, iespējams, nepieciešami dažādi apsaimniekošanas režīmi, trupes sastopamības un izplatības kontekstā svarīgi abas šīs sugas identificēt. Pēc koku morfoloģiskajām pazīmēm veikta abu bērzu sugu noteikšana, kas 20% līdz 30% gadījumos var būt kļūdaina. Tāpēc pētījumā visiem nozāģētajiem bērza paraugkociem ar ķīmisko metodi (2,4-dinitrofenilhidrazīna šķīdumā ievietotie bērza mizu paraugi iekrāsojas atšķirīgos toņos) precīzi noteikta suga (19. attēls).



Attēls 19. Āra un purva bērza sugu noteikšana ar ķīmisko metodi. Purva bērza paraugs paliek dzidrs, bet āra bērza paraugs kļūst duļķains.

Ar bērza audžu vecumu saistīto bioloģisko procesu pavājināšanās purva bērziem sākas, sasniedzot 60-70 gadu vecumu, āra bērziem 10-20 gadus vēlāk. Sasniedzot bioloģisko vecumu, pieaugums augstumā apstājas gandrīz pilnībā, diametra pieaugums palēninās, kā arī biežāk parādās trupe un pieaug atmirušo zaru daudzums. Ja bērzu savstarpējā konkurence nav pārmērīga, un kokus neskar nopietni sēnīšu bojājumi, tas, neraugoties uz koku bioloģisko novecošanu, īpaši āra bērzs saglabā veselīgu izskatu vēl vairākus gadu desmitus. Turpretī biežā kokaudzē, bērza augšana pavājinās jau ilgi pirms bioloģiskās novecošanās sākuma.

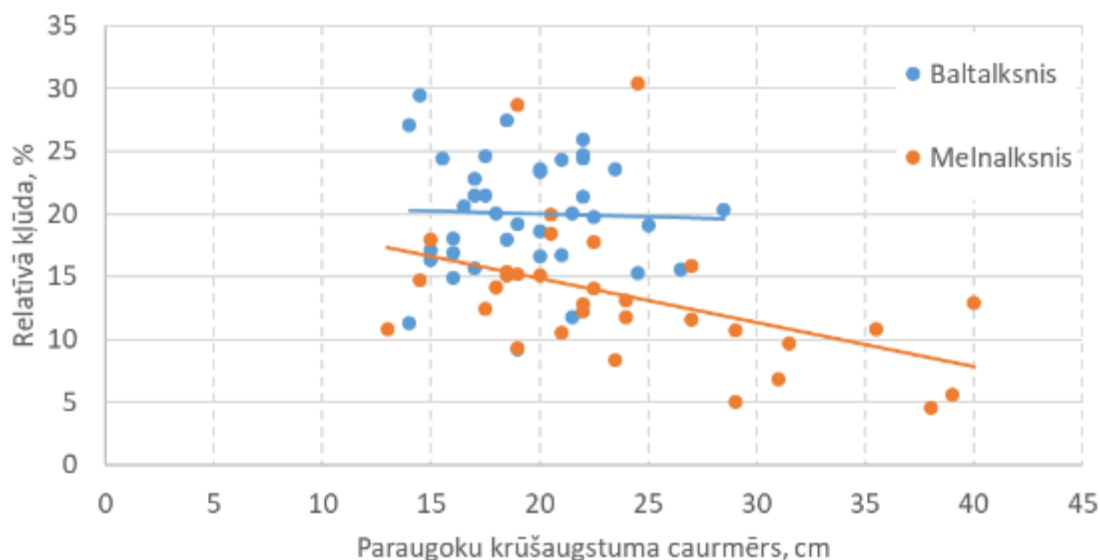
Apsei apmēram jau pēc 40-50 gadiem pastāv ievērojami lielāks trupes izraisītu defektu rašanās risks. Bieži vien pāraugušās apses audzēs, meklējot veselās apses, vieglāk vienmēr saskaitīt saslimušos kokus. Piepes, resni zari, dobja skaņa, kas rodas stumbam piesitot ar koku, liecina, ka apse varētu būt trupes bojāta. Ja kādam kokam nav iepriekšminēto pazīmju, tas vēl nenozīmē, ka tā stumbrs ir pilnīgi vesels. Trupe var būt sākusies stumbra vidējā daļā, kuru grūtāk novērot, vai tā vēl nav pietiekami attīstījusies. Pret trupi izturīgākas apses pazīme ir tievi zari. Pēc to atmiršanas paliek maza rēta, kas ātri aizaug nedodot iespēju tur attīstīties sēnei, kas izraisa serdes trupi. Tāpēc netrupējušu apšu stumbri parasti ir gludi un labi atzarojušies apakšējā daļā.

3.1.2. Rezultāti un to analīze

Serdes trupes ietekmes uz baltalkšņa un melnalkšņa kokaudžu biomasu izvērtēšana

2022. gadā padziļināti analizēti iepriekšējā gadā ievāktu trupējušo alkšņu dati. Vispirms ar datorprogrammu "Image J" katram stumbra šķērsriezuma attēlam (kopā analizēti 801 attēli) precīzi aprēķināts serdes trupes ietekmētais laukums, atbilstoši trupes attīstības stadijai. Sākotnējos aprēķinos stumbra šķērsriezuma ripās trupes ietekmētā platība novērtēta pēc elipses laukuma aprēķina formulas, katrai ripai uz lauka izmērot trupes diametru divos savstarpēji perpendikulāros virzienos. Tomēr datu apstrādes laikā novērots, ka pēc diametra mērījumiem aprēķināts laukums samazina patieso trupes ietekmēto tilpumu atsevišķiem kokiem pat līdz 30% (20. attēls), kā rezultātā trupes kolonnas tilpuma aprēķini koriģēti. Precizējot aprēķinus noskaidrots, ka alkšņiem trupes kolonnas tilpums vidēji bija par 15% lielāks, salīdzinot ar sākotnēji izstrādāto metodiku. Koksnes iekrāsojuma ietekmētais stumbra tilpums palielinājās vidēji par 16,3%, mīkstās trupes tilpums par 14%, bet kļūda, aprēķinot dobuma tilpumu, bija vismazākā, tikai 5,7%. Salīdzinoši lielāka kļūda novērota baltalksnim, kas varētu būt izskaidrojams ar to, ka melnalkšņa stumbros serdes trupe veido aplveida formu, kuru ir vieglāk izmērīt ar lineālu. Turpretī baltalkšņu stumbru šķērsriezuma ripās trupe ir ļoti bieži ir neregulāra forma, veidojot dažādas krāsas un formas plankumus.

Secināts, ka lauka apstākļos precīzi iegūt serdes trupes ietekmēto laukumu no diametra mērījumiem ir sarežģīti, jo dažādām trupes attīstības pakāpēm ir nevienmērīga robeža. Arī uzsākot pētījumu, darba izpildītājiem nebija lielas pieredzes dažādu trupes attīstības pakāpju identificēšanā, kas arī varētu būt viens no kļūdas rašanās iemesliem. Stumbra šķērsriezuma ripu attēlos identificējot trupes attīstības stadijas pēc pētījumā iegūtajiem blīvuma datiem, noteikti varētu būt daudz precīzāka metode, nosakot trupes aizņemto laukumu, un pēc tam aprēķinot ietekmēto stumbra tilpumu.



Attēls 20. Atsevišķu koku trupes kolonnas tilpuma matemātiskā aprēķina kļūda, pētījumā stumbra šķērsriezuma ripās ar lineālu mērot trupes diametru divos perpendikulāros virzienos.

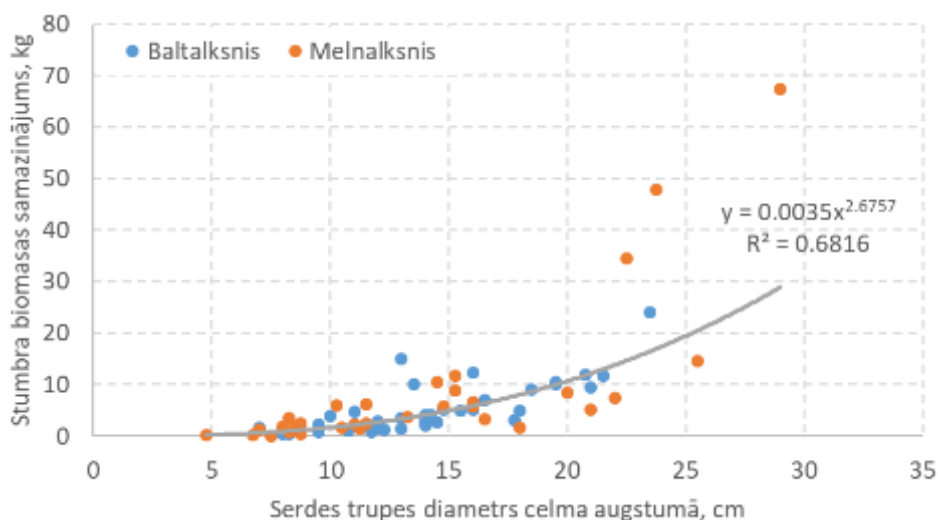
Lielākoties paraugkokos bija sastopama mīkstā trupe, tikai diviem baltalkšņiem un vienam melnalkšņim mīkstā trupe netika reģistrēta (19. tabula). Turpretī dobums reģistrēts tikai 8 baltalkšņiem un 9 melnalkšņiem. Nedaudz lielāks trupējušas koksnes apjoms novērtēts baltalkšņim, vidēji 28,3% no stumbra tilpuma. Ņemot vērā to, ka trupes kolonnas vidējais augstums un diametrs celma augstumā abām sugām ir ļoti līdzīgs, melnalkšņim trupējušas koksnes apjoms bija nedaudz mazāks, vidēji 20,1%. Tas izskaidrojams ar to, ka pieaugušās audzēs melnalkšņis sasniedz lielākas koku dimensijas, salīdzinot ar baltalkšņi, tāpēc trupējušas koksnes īpatsvars ir relatīvi mazāks. Lai gan mīkstā trupe koku stumbros bija sastopama bieži, tomēr tās vidējais īpatsvars no kopējā stumbra tilpuma bija salīdzinoši neliels, vien 5,7% baltalkšņim un 6,1% melnalkšņim. Dobums alkšņiem visbiežāk nesniedzas augstāk par krūšaugstumu, tāpēc tā īpatsvars no stumbra tilpuma bija vidēji 0,3% un 0,4%, attiecīgi baltalkšņim un melnalkšņim.

Tabula 19. Trupējušo baltalkšņa un melnalkšņa paraugkoku raksturojums

| Vērtība | Baltalkšņi (N=38) | | Melnalkšņi (N=32) | |
|----------------------------------|-------------------|------------|-------------------|-------------|
| | vidēji | min.-maks. | vidēji | min.-maks. |
| Vecums, gadi | 49,4 | 37 - 70 | 90 | 65 - 122 |
| Koka augstums, m | 20,8 | 16,3 - 26 | 23,3 | 11,9 - 28,5 |
| Koka krūšaugstuma caurmērs, cm | 19,3 | 14 - 28,5 | 23,9 | 13 - 40 |
| Stumbra tilpums, m ³ | 0,3 | 0,1 - 0,7 | 0,6 | 0,1 - 1,7 |
| Iekrāsojuma kolonnas augstums, m | 10,7 | 2,2 - 18,2 | 11,5 | 1,4 - 18,8 |

| Vērtība | Baltalksnis (N=38) | | Melnalksnis (N=32) | |
|---|--------------------|------------|--------------------|------------|
| | vidēji | min.-maks. | vidēji | min.-maks. |
| Mīkstās trupes kolonnas augstums, m | 1,1 | 0,3 - 5,5 | 2,7 | 0,4 - 13,2 |
| Dobuma kolonnas augstums, m | 0,7 | 0,5 - 1,2 | 1,3 | 0,4 - 2,8 |
| Iekrāsojuma diametrs uz celma, cm | 13,0 | 8,0 - 19,5 | 13,6 | 4,8 - 25,5 |
| Mīkstās trupes diametrs uz celma, cm | 12,4 | 3,5 - 23,5 | 13,3 | 3,8 - 29,0 |
| Dobuma diametrs uz celma, cm | 8,8 | 5,3 - 14,5 | 10,3 | 3,8 - 23,8 |
| Trupes kopējais īpatsvars no stumbra tilpuma, % | 28,3 | 3,7 - 57,6 | 20,1 | 0,8 - 46,1 |
| Mīkstās trupes īpatsvars no stumbra tilpuma, % | 5,7 (N=36) | 0,2 - 40,8 | 6,1 (N=31) | 0,2 - 31,6 |
| Dobuma īpatsvars no stumbra tilpuma, % | 0,3 (N=8) | 0,2 - 5,8 | 0,4 (N=9) | 0,1 - 4,4 |

Serdes trupes ietekmes rezultātā, analizētajiem paraugkiem stumbra biomasas samazinājās par 0,6-18,1% (0,4-24,1kg) baltalksnim, bet melnalksnim par 0,1-9,4% (0,1-67,3 kg), salīdzinot ar nebojātu koku. Vidējais stumbra biomasas samazinājums baltalksnim ir 4,5% jeb 5,4 kg, bet melnalksnim – 2,8% jeb 8,6 kg. Pētījumā modelēšanas vajadzībām izveidots vienādojums, ar kura palīdzību var prognozēt stumbra biomasas samazinājumu kilogramos, izmērot serdes trupes diametru celma augstumā (21. attēls). Vienādojums izmantojams, lai pēc koku nociršanas, izmērot serdes trupes diametru, aprēķinātu biomasas samazinājumu un līdz ar to trupes ietekmi uz oglekļa uzkrājumu. Par cik melnalksnim un baltalksnis stumbra biomasas samazinājums atkarībā no trupes diametra celma augstumā neatšķiras, tad abām koku sugām var izmantot vienu un to pašu vienādojumu. Melnalksnim un baltalksnim oglekļa saturs serdes trupes bojātā koksne būtiski neatšķiras atkarībā no trupes sadalīšanās pakāpes. Tāpēc stumbru oglekļa uzkrājuma aprēķināšanai izmantojamas pētījumā iegūtās vidējās vērtības 503,4 g kg⁻¹ baltalksnim un 508,4 g kg⁻¹ melnalksnim, pieņemot, ka arī nebojātā koksne tas būtiski nemainīsies.



Attēls 21. Stumbra biomasas samazinājums, atkarībā no serdes trupes diametra celma augstumā.

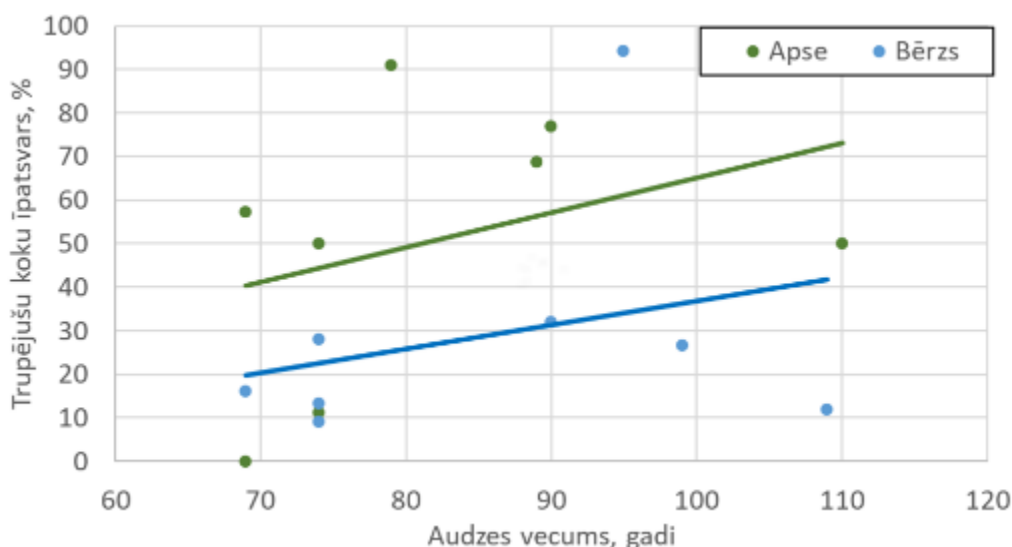
Pētījuma noslēgumā paredzēts izmantot citos pētījumos iegūtos baltalkšņa un melnalkšņa cirsmu apsekošanas datus, lai modelētu trupes ietekmi uz alkšņu audžu oglekļa uzkrājumu plašākā mērogā. Līdz šim pētījumā ar rezistogrāfu analizētas 18 alkšņu audzes, nosakot tajās mīkstās trupes

sastopamību, kas ir ļoti neliela paraugkopa. Turklāt pēc Rezistogrāfa urbumu datiem aprēķināts mīkstās trupes un dobuma diametrs var būt ļoti neprecīzs.

Serdes trupes ietekmes izvērtēšana uz bērza un apses kokaudžu biomasu

Serdes trupes ietekmes izvērtēšanai atlasītas 16 pieaugušas bērza un apses audzes. Paredzams, ka pieaugušās vai pāraugušās audzēs trupējušu koku sastopamība būs lielāka nekā vidēja vecuma audzēs vai jaunaudzēs. Trupējušo koku īpatsvars atlasītajās audzēs noteikts pēc Rezistogrāfa mērījumu datiem (22. attēls). Katrs 500 m² lielā parauglaukumā augošais koks celma daļā urbts ar Rezistogrāfu no trijām pusēm, veidojot iedomātu vienādmalu trīsstūri. Ja kaut vienā no urbšanas piegājieniem konstatēta trupes klātbūtne, tad koks klasificēts kā trupējis. Analizētajās apses audzēs mīkstās trupes klātbūtne konstatēta vidēji 50,6% augušo koku, atsevišķos parauglaukumos trupējušo koku skaits bija robežās no 0% līdz 91%. No trupējušajiem kokiem apmēram 32% bija jau izveidojies mazāks vai lielāks dobums. Salīdzinot ar apses audzēm, bērza parauglaukumos mīkstās trupes sastopamība novērota nedaudz retāk, vidēji 28,9% koku bija trupējuši (9,1% – 94,1%). Ierīkotajos parauglaukumos starp visiem trupējušajiem bērziem, dobumu rezistogrāfs uzrādīja vairāk kā 40% koku.

Apsēkotajās bērza un apses audzēs konstatēts, ka, palielinoties audzes vecumam, palielinās arī trupējušo koku īpatsvars (22. attēls). Lineārā regresija apstiprina, ka pie nemainīga audzes vecuma, apses audzēs trupējušo koku īpatsvars varētu būt gandrīz divas reizes lielāks, salīdzinot ar bērza audzēm. Piemēram, 70 gadus vecās bērza audzēs trupējušo koku īpatsvars vidēji ir 20%, bet apses audzēs apmēram 40% no visiem kokiem var būt trupējuši. Tas var būt izskaidrojams ar to, ka apsei bioloģiskais vecums iestājas ātrāk nekā bērzam. Apsēkoto audžu dati norāda uz to, ka trupe apses un bērza audzēs varētu attīstīties ievērojami ātrāk par 70 gadiem. Literatūrā minēts, ka pat 20 gadus vecas apšu audzes un 50 gadus vecas bērzu audzes var būt inficētas ar serdes trupi. Ja apšu jaunaudzēs pārnadžu barošanās rezultātā bojātā koku miza, tas ir viens no potenciālajiem trupes infekcijas avotiem, un pārbiezinātas purva bērza audzēs pastāv lielāks trupes defektu rašanās risks, salīdzinot ar koptām āra bērza audzēm.



Attēls 22. Trupējušu koku īpatsvars parauglaukumā atkarībā no bērza un apses audzes vecuma.

Trupes kolonnas garuma un caurmēra mērījumi veikti 60 bērza un 60 apses stumbros (20. tabula). Trupes kolonna bērzam sasniedza vidēji 10,3 m augstumu, bet apsei – 19,4 m. Visiem nozāgētajiem kokiem reģistrēta mīkstās trupes klātbūtne. Savukārt, dobums reģistrēts 28 bērziem un

23 apsēm. Lai gan mīkstā trupe koku stumbros ir sastopama bieži, tās vidējais augstums bērzam ir vien 2,9 m. Savukārt, apsēs mīkstās trupes kolonnas augstums bija ievērojami lielāks un vidēji sniedzās līdz 16 m. Atsevišķām apsēm mīkstās trupes klātbūtne novērota pat 27 m augstumā. Dobuma kolonnas vidējais augstums bija vēl mazāks, tikai 1 m bērzam un vidēji 6 m apsei, mērot no celma virsmas. Tomēr jāatzīmē, ka ne vienmēr koku stumbros dobums sākas no celma daļas, dažkārt bērziem un apsēm dobums var izveidoties arī augstāk un pat vairākās vietās, atkarībā no infekcijas avota. Mīkstās trupes un dobuma augstuma mērījumi apstiprina to, ka trupes sastopamības datu ievākšana noteikti ir jāveic celma daļā nevis 1,3 m augstumā, jo daudziem paraugkokiem trupes kolonna nesniedzās tik augstu.

Tabula 20. Trupējušo bērza un apses paraugkoku raksturojums

| Vērtība | Bērzs (N=60) | | Apse (N=60) | |
|---|--------------|------------|-------------|------------|
| | vidēji | min.-maks. | vidēji | min.-maks. |
| Audzės vecums, gadi | 86 | 69-109 | 81 | 69-110 |
| Koka augstums, m | 24,0 | 13,1-31,8 | 32,0 | 18,7-39,3 |
| Koka krūšaugstuma caurmērs, cm | 25,1 | 9,5-44,75 | 35,8 | 16,25-65 |
| Stumbra tilpums, m ³ | 0,6 | 0,05-2,10 | 1,7 | 0,19-5,73 |
| Iekrāsojušās koksnes kolonnas augstums, m | 10,3 | 1,4-23,6 | 19,4 | 5,2-27,9 |
| Mīkstās trupes kolonnas augstums, m | 2,9 | 0,2-17,5 | 16 | 3,5-27,2 |
| Dobuma kolonnas augstums, m | 1,0 | 0,2-3,9 | 6,4 | 0,1-20,3 |
| Iekrāsojuma diametrs uz celma, cm | 14,4 | 2,8-31 | 20,7 | 4,25-58 |
| Mīkstās trupes diametrs uz celma, cm | 11,7 | 1,25-27,5 | 13,8 | 1,25-39,7 |
| Dobuma diametrs uz celma, cm | 11,4 | 3,25-25 | 12,1 | 1-30,5 |

Atlasot trupējušus apses paraugkokus secināts, ka ne vienmēr ar urbšanu celma daļā ir iespējams pārliecināties par trupes klātbūtni koku stumbros (23. attēls), jo dažkārt trupes infekcija apses stumbros nonāk pa nolūzušu zaru vietām vai citām brūcēm. Trupe var būt sākusies stumbra vidējā daļā, kur to grūtāk augošiem kokiem konstatēt. Trupējušām apsēm stumbru ārpusē bieži izaug piepes, kas saražo sporas un turpina inficēt citus kokus. Piepju klātbūtne pavisam droši liecina par to, ka stumbrs būs trupējis. Pētījumā nozāģējot vairākus kokus, kuriem celma daļas urbumos netika konstatēta trupes klātbūtne, bet uz stumbra bija redzamas piepes, novērots, ka nozāģētajiem kokiem neliels trupes izraisīts iekrāsojums bija redzams arī uz celma. Iepriekšminētais fakts norāda uz to, ka apses izcirtumos, novērtējot trupes sastopamību, šādus kokus, kuriem trupe sākas stumbra vidusdaļā ir iespējams diagnosticēt un uzskaitīt.

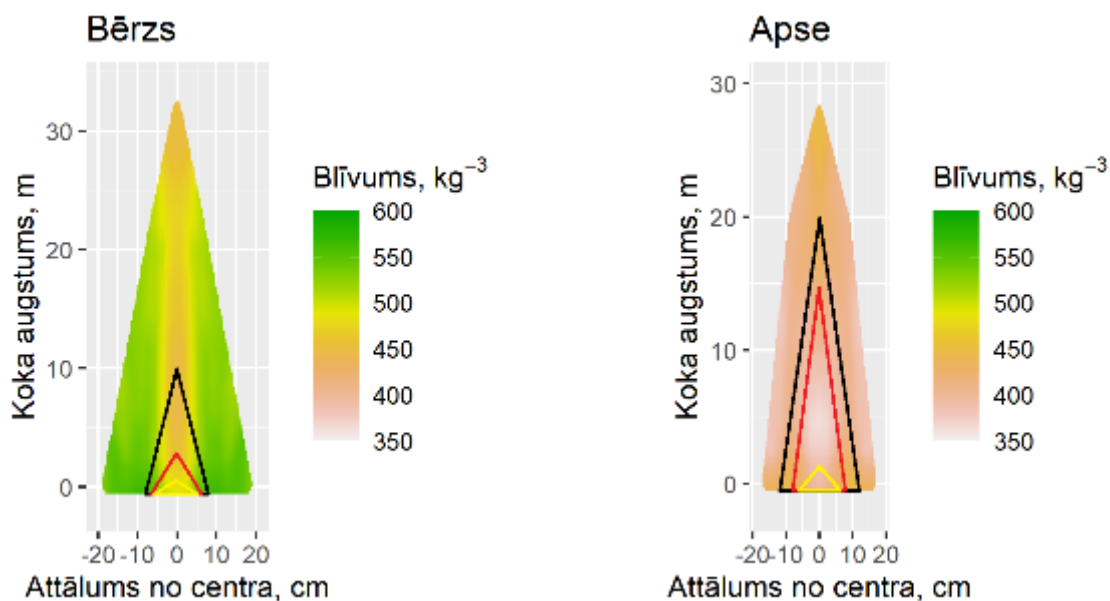
Katram nozāģētajam bērza paraugkokam pētījumā precīzi noteikta suga ar ķīmikāliju palīdzību. Secināts, ka no visiem paraugkokiem, tikai 11 koki bija āra bērzi, bet pārējie 49 – purva bērzi. Tas varētu nozīmēt to, ka trupes sastopamība purva bērza audzēs varētu būt ievērojami lielāka, salīdzinot ar āra bērzu. Attiecībā uz bērzu, bieži literatūrā min, ka tieši uz augšanā atpalikušiem kokiem veidojas piepes, sākas koksnes trupēšana. Lai gan purva bērzs pirmajos dzīves gados ir pat ātraudzīgāks par āra bērzu, tomēr vēlāk tas augšanā atpaliek un iespējams tāpēc trupes izraisīti bojājumi purva bērzam novērojami biežāk.



Attēls 23. Trupes izplatības noteikšana pēc stumbra šķērsriezuma ripām (a) bērzam un (b) apsei.

Reducētais blīvums ir nozīmīgs koksnes parametrs, lai aprēķinātu biomasu koku stumbros un atspoguļotu biomasas izmaiņas dažādās koka frakcijās. Stumbra blīvuma izmaiņas garenvirzienā (no celma uz galotni) un šķērsriezumā (no serdes uz mizu) sniedz priekšstatu par to, kā dažādas paraugu ievākšanas metodes var ietekmēt stumbra biomasas un līdz ar to kopējos oglekļa uzkrājuma aprēķinus. Tāpat blīvuma izmaiņas sniedz priekšstatu par to, kurā stumbra daļā ir uzkrāts visvairāk oglekļa. Lielāks koksnes blīvums vienmēr norāda uz lielāku oglekļa uzkrājumu. Saskaņā ar Smilga (1988), pret trupi izturīgo apšu koksne ir blīvāka. Blīvākā koksne ir mazāk gaisa, tāpēc tā ir mazāk piemērota vide trupes attīstībai. Apšu izturība pret trupi daudzos gadījumos var būt saistīta arī ar lielāku ātraudzību, jo ātrāk augošiem kokiem ātrāk aizaug zaru rētas un dažādi ievainojumi, pa kuriem notiek koku inficēšanās.

Stumbra reducētā blīvuma datu analīze apstiprināja, ka bērzam ir izteikta stumbra koksnes blīvuma samazināšanās virzienā uz galotni, bet radiālajā virzienā blīvumam ir tendence palielināties mizas virzienā (24. attēls). Palielinoties koka augstumam, blīvuma izmaiņu amplitūda stumbra šķērsriezumā ievērojami samazinās. Zīmīgi, ka apsei blīvuma izmaiņas stumbra garenvirzienā nav tik izteiktas kā bērzam. Pieaugot koka relatīvajam augstumam, vidējais blīvums apmēram līdz stumbra vidusdaļai nedaudz samazinās vai saglabājas konstants, bet pēc tam virzienā uz galotni tas pieaug. Vismazākais blīvums bērzam un apsei ir stumbra lejasdaļā pie serdes. Tieši šajā stumbra daļā visbiežāk primāri attīstās arī stumbra trupe. Lai precīzi novērtētu blīvuma un oglekļa uzkrājuma samazinājumu stumbra trupes ietekmē, kontroles paraugi no veselas koksnes jāgatavo stumbra vidusdaļā atbilstoši trupes izplatīšanās augstumam un diametram, lai trupējušas un netrupējušas koksnes paraugi būtu savstarpēji salīdzināmi.



Attēls 24. Reducētā blīvuma izmaiņas un trapes kolonnas vidējie parametri bērza un apses stumbros¹⁰.

Pētījumā sagatavoti kopā 1506 trupējušas koksnes blīvuma paraugi, kas ir gandrīz divas reizes vairāk nekā sākotnēji plānots. Tikai pusei no sagatavotajiem paraugiem uz atskaites gatavošanas brīdi ir izmērīts blīvums un sākotnējie dati liecina par to, ka mīkstās trapes blīvums apsei ir gandrīz divas reizes mazāks, bet bērzam apmēram par 30% mazāks, salīdzinot ar iekrāsojušās koksnes blīvumu. Tā kā apsei mīkstā trupe aizņem salīdzinoši lielu īpatsvaru no stumbra tilpuma, tad sagaidāms, ka trapes ietekme uz apses stumbra biomasu būs lielāka, salīdzinot ar citām lapkoku sugām. Trupējušo koksnes paraugu oglekļa satura analīzes norāda uz to, ka trupējušas koksnes vidējās oglekļa satura vērtības ir apmēram 1,5-3,5% zemākas, salīdzinot ar visa stumbra vidējām oglekļa satura vērtībām (Bārdule, Liepiņš, u.c., 2021). Oglekļa satura mērīšana trupējušas koksnes paraugiem turpināsies pētījuma nākošajā etapā, un pēc visu datu apkopošanas tiks noskaidrots vai oglekļa satura vērtību atšķirības ir radušās trapes ietekmes rezultātā vai tās ir izskaidrojamas ar pētījumu metodiskajām atšķirībām. Slāpekļa koncentrācija trapes ietekmētajos paraugos stipri korelēja ar paraugu blīvumu visām analizētajām lapkoku sugām. Jo vairāk bija sadalījusies koksne (mazāks blīvums) trapes ietekmē, jo novērota lielāka slāpekļa koncentrācija paraugā. Slāpekļa koncentrācija mīkstās trapes paraugos vidēji bija gandrīz divas reizes lielāka, salīdzinot ar iekrāsojušos koksni.

Pētījuma turpinājumā ir plānota padziļināta bērza un apses trupējušo stumbra šķērsriezuma ripu analīze (24. attēls) un precīzi trapes kolonnas tilpuma aprēķini, atbilstoši trapes attīstības stadijai. Pieredze ar trupējušiem alkšņiem apliecināja, ka pēc diametra mērījumiem noteikts trapes kolonnas tilpums var būt būtiski mazāks par reālo trapes ietekmēto tilpumu. Tāpat nākamgad ir paredzēts pabeigt paraugu oglekļa un slāpekļa satura analīzes, kā arī visu trupējušo koksnes paraugu blīvuma analīzes.

¹⁰ Ar dzeltenu krāsu stumbrā ir attēlots vidējais dobuma augstums un diametrs, ar sarkanu – mīkstā trupe un ar melnu krāsu – iekrāsojušies koksne.

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

Darbības ietvaros 2022. gadā uzsākta iegūto datu un metožu kvalitātes kontrole un atbilstība SEG inventarizācijas prasībām novērtēšana (nacionālo metožu atbilstība IPCC 2006 un 2019 vadlīnijām), tajā skaitā uzsākta metodikas izstrādāšana trapes ietekmes uz CO₂ emisijām iekļaušanai koku augšanas gaitas modeļi AGM sadarbībā ar modeļa izstrādātājiem, lai nodrošinātu harmonizētu pieeju vēsturisko, kārtējā gada un prognožu aprēķinos. Trapes ietekmes uz SEG emisijām un CO₂ piesaisti vērtējums notiek 3 virzienos – koksnes kvalitātes pasliktināšanās un koksnes produkta iznākuma samazināšanās, oglekļa zudumi no dzīvās biomasas koksnes trupēšanas rezultātā, samazinoties koksnes blīvumam, un papildus CH₄ un N₂O emisijas no trapes bojāto koku stumbru virsmas (Schindler u.c., 2021; Wen u.c., 2021). Pētījuma rezultātu integrēšanu aprēķinu vienādojumos varēs pabeigt pēc trapes ietekmes uz oglekļa uzkrājumu dzīvajā biomasā LVM apsaimniekotajos mežos novērtējuma pabeigšanas.

Pētījumu apgrūtina datu trūkums par dažādu trapes veidu ietekmi uz sortimentu struktūru. Vidējo rādītāju pielietošana raksturo kopējo situāciju, bet nesniedz priekšstatu par trapes ietekmes mazināšanas pasākumu sagaidāmo ietekmi. Ukrainā veikta pētījumā konstatēts, ka priežu audzēs sakņu trapes epicentros atjaunošanas cirtē zāģbaļķu un papīrmalkas iznākums var samazināties par 42%, salīdzinot ar bojājumu relatīvi neskartām vietām audzē (Musienko u.c., 2018), taču gan šajā, gan citās publikācijās, piemēram, Profft u.c. (2009) zinātnieki operē ar vidējiem rādītājiem. Pētījuma turpmākajos etapos izmantosim darba uzdevumā “Izstrādāt metodi un novērtēt trapes ietekmi uz oglekļa uzkrājumu dzīvajā biomasā LVM apsaimniekotajos mežos” izstrādājamus vienādojumus. kā arī sortimentu iznākuma datu kopas, kas saņemtas darba uzdevuma “Metodes izstrādāšana koksnes produktu un padziļinātas koksnes pārstrādes ietekmes uz SEG emisijām analīzei” īstenošanai, pievienojot papildus parametru – prognozējamā trapes izplatība cīsmā. Trapes izplatības raksturošanai salīdzināsim dažādus faktoros, lai noteiktu tos, kas korelē ar sortimentu struktūras izmaiņām visciešāk. Prognozējamo trapes izplatības rādītāju integrēsim sortimentu iznākuma prognozēšanas vienādojumos. Detalizētāks aprēķinu metodes raksturojums dots nodaļā “Metode koksnes produktu un padziļinātas koksnes pārstrādes ietekmes uz SEG emisijām analīzei”.

Pētījuma ietvaros veikta 30 Eiropas valstu dzīvās un nedzīvās kokaugu biomasas aprēķinu metožu izvērtēšana, lai noskaidrotu, vai ir valstis, kas ņem vērā vai var ņemt vērā mežaudžu vecumstruktūras izmaiņas un ar to saistītos oglekļa zudumus no dzīvās un nedzīvās biomasas. Vērtējuma apkopojums dots 1. pielikuma 1. tabulā. Dzīvās biomasas aprēķinos 8 valstis izmanto noklusētos (T1) biomasas pārrēķinu koeficientus (Eggleston u.c., 2006), attiecīgi, aprēķinos neņem vērā nevienu no iespējamajiem trapes ietekmes uz SEG emisijām faktoriem. Vēl 9 valstis izmanto fiksētus biomasas pārrēķinu koeficientus (T2), kas raksturo vidējo situāciju noteiktā laika spīdī. Izpētot informācijas avotus, uz kuriem valstis atsaucas, aprakstot biomasas noteikšanas metodes, nevienā no vienādojumiem nav atrastas atsauces uz trapes ietekmes analīzi. Arī šajās valstīs trapes ietekme uz oglekļa uzkrājumu dzīvajā biomasā nav ņemta vērā vai arī ietverta netieši, kā vidējais rādītājs konkrētā situācijā, un neraksturo oglekļa uzkrājuma izmaiņas, mainoties situācijai, piemēram, mežaudžu vecumstruktūrai. Trīsdesmit valstis izmanto modeļus (T3) biomasas aprēķiniem, taču nereti šie modeļi ir pārņemti no kaimiņvalstīm un nav validēti vietējos apstākļos. Arī šajās valstīs, vērtējot informācijas avotus, uz kuriem atsaukušies nacionālo inventarizāciju autori, nav konstatētas atsauces uz trapes vai citu bojājumu ietekmi. Var pieņemt, ka tajās valstīs, kur vienādojumi izstrādāti, izmantojot lielas empīrisku datu kopas (Somija, Zviedrija), oglekļa uzkrājuma aprēķini var reaģēt uz mežaudžu vecumstruktūras izmaiņām un trapes radītajiem bojājumiem, lai gan inventarizācijas ziņojumos un tajos minētajās publikācijās nav atsauces uz korekcijām, kas būtu saistītas ar trapes ietekmi. Kopumā tas nozīmē būtisku iespējamu oglekļa uzkrājuma pārvērtējumu dzīvajā biomasā un pārāk optimistiskas prognozes attiecībā uz oglekļa

uzkrājumu nākotnē, ņemot vērā mežaudžu novecošanas prognozi visā Eiropā (European Commission, 2021).

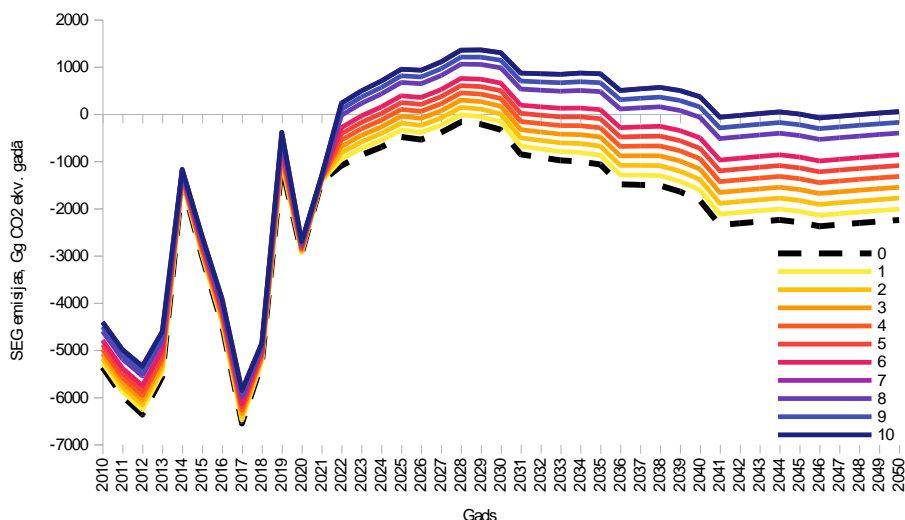
Neviena no valstīm neziņo par CH₄ un N₂O emisijām no koku stumbriem, attiecīgi, SEG inventarizācijas ziņojumos nav informācijas par trapes ietekmi uz CH₄ un N₂O emisijām no koku stumbriem. Tas skaidrojams ar pieejamo vienādojumu nenoteiktību un grūtībām, kas saistītas ar aprēķiniem nepieciešamo darbību datu iegūšanu nacionālā mērogā (Butlers u.c., 2021; Schindler u.c., 2020; Vargas & Barba, 2019). Arī Latvijā ir veikti pētījumi par SEG emisijām no koku stumbriem, vērtējot mitruma režīma ietekmi, taču līdz šim nav skatīta trapes ietekme uz emisijām no koku stumbriem.

Lielākā daļa valstu izmanto Vienotā pētniecības centra rekomendēto metodiku koksnes produktu radīto SEG emisiju aprēķiniem, kas balstās uz koksnes produktu ražošanu (Rüter, 2011). Šī metodika nodrošina maksimālu objektivitāti (atbilstoši darbību datu kvalitātei), raksturojot trapes ietekmi uz oglekļa aprīti koksnes produktos, taču, iespējams, ka tiek pārvērtēti oglekļa zudumi no dzīvās biomasas mežizstrādes rezultātā, pielietojot šai kategorijai vidējos biomasas aprēķinu koeficientus.

Nedzīvās biomasas oglekļa aprēķinos 15 valstis izmanto noklusēto pieņēmumu (nedzīvā koksne mežā ir līdzsvara stāvoklī) un nerēķina SEG emisijas un CO₂ piesaisti, attiecīgi, vecumstrukturā vai sugu sastāva izmaiņas nekā neietekmē oglekļa uzkrājumu nedzīvajā koksnē, tajā skaitā 7 valstis, kuras dzīvo biomasu uzskaita ar augstāka līmeņa (T2 vai T3) metodēm. Desmit valstis, tajā skaitā Latvija, izmanto modeļus, kas ietver dzīvo un nedzīvo biomasu, taču neviena no valstīm nenorāda, vai oglekļa zudumi dzīvajā biomasā trapes ietekmē ir ņemti vērā, raksturojot oglekļa ienesi nedzīvajā koksnē. Tas norāda uz iespējamu oglekļa ieneses un uzkrājuma pārvērtējumu nedzīvajā koksnē un sistemātiskām nobīdēm modeļos, ko izmanto oglekļa aprītes nedzīvajā koksnē prognozēšanai, pārvērtējot oglekļa zudumus un oglekļa ienesi augsnē ilgtermiņā.

Pētījuma ietvaros veiktā analīze norāda uz to, ka Latvija būs pirmā Eiropas valsts, kas iekļaus SEG emisiju aprēķinos oglekļa zudumus trapes ietekmē, koriģējot oglekļa uzkrājuma izmaiņas dzīvajā un nedzīvajā koksnē un oglekļa ienesi augsnē ar kritalām. Lai izpildītu šo uzdevumu, ir jāizstrādā gan vienādojumi, gan aprēķinu rezultātu validācijas mehānismi, īpašu uzmanību pievēršot pētījumu rezultātu izmantošanai ārpus Latvijas teritorijas, lai paralēli vietējiem validācijas mehānismiem iegūtu iespēju atsaukties uz kaimiņvalstīm, kurās izmantota tāda pati pieeja. Kaimiņvalstu biomasas vienādojumu un modeļu izmantošana ir ierasta prakse SEG inventarizācijā, piemēram, Norvēģijā, izmanto biomasas vienādojumus, kas izstrādāti Zviedrijā.

Lai novērtētu trapes radīto oglekļa zudumu iespējamo ietekmi uz SEG emisijām, izmantots 2023. gada SEG inventarizācijas ZIZIMM sektoram modelis. Aprēķinā pieņemts, ka ikgadējie oglekļa zudumi atbilst 1-10% no ikgadējās CO₂ piesaistes dzīvajā biomasā, proporcionāli samazinoties oglekļa zudumiem ar nozāģēto koksni un oglekļa ienei nedzīvās koksnes oglekļa krātuvē. Aprēķins veikts līdz 2050. gadam. Oglekļa zudumi ietverti aprēķinā no 1990. gada un vērtēta to ietekme uz prognozējamo SEG bilanci pēc 2020. gada. Simulācijas rezultāti atspoguļoti 25. attēlā. Bāzes scenārijā meža zemes līdz pat 2050. gadam saglabājas kā CO₂ piesaistes avots, bet ikgadējiem oglekļa zudumiem pārsniedzot 9% no pieauguma (ap 2 milj. m³), meža zemes no 2021. gada pastāvīgi ir emisiju avots. Pat relatīvi nelieli zudumi (2% no pieauguma) īslaicīgi pārvērš meža zemes par emisiju avotu un, jo lielāki ir zudumi, jo lielāks emisiju avots ir meža zemes.



Attēls 25. Trupes radītu oglekļa zudumu simulācija meža zemēs.

Simulācijas rezultāti apstiprina to, ka trupe var būt nozīmīgs SEG emisijas ietekmējošs faktors, kas, mainoties mežu vecumstrukturai, var apgrūtināt vai atvieglot klimatneitralitātes mērķu sasniegšanu. Tomēr šis aprēķins parāda tikai tendenci – trupes radītie oglekļa zudumi būtiski palielina neto emisijas, bet kvantitatīvu oglekļa zudumu rādītāju iegūšanai pētījumi ir jāturpina. Oglekļa zudumu raksturošanai izmantojami meža resursu monitoringa dati, salīdzinot modelētā oglekļa uzkrājuma izmaiņas mērījumu starplaikā.

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

Pasaules meži absorbē apmēram 30% no cilvēku radītajām SEG emisijām, no kurām lielāko īpatsvaru veido CO₂ (Pan u.c., 2011). Latvijā izplatītāko koku sugu 1m³ priedes, bērza un egles koksnes, ņemot vērā to vidējās reducētā blīvuma un oglekļa satura vērtības, ir piesaistīts attiecīgi 0,74 tCO₂, 0,92 t CO₂ un 0,65 t CO₂. Trupi izraisošās sēnes ir vienīgie organismi, kas spēj pilnībā mineralizēt visas koksnes sastāvdaļas, sadalot tās līdz ūdenim un CO₂, tādējādi būtiski ietekmējot oglekļa apriti meža ekosistēmā. Norvēģijā veikts pētījums liecina, ka *Heterobasidion* izraisīta sakņu un serdes trupe egles audzēs var radīt būtiskus oglekļa zudumus, palielinot CO₂ emisijas no mežiem (Hietala u.c., 2015). Trupes sēņu elpošanas rezultātā CO₂ emisijas no koku stumbriem ir vairāk nekā divas reizes lielākas, salīdzinot ar veselīgiem kokiem. Citā pētījumā Laboratorijas apstākļos inficēti egles koksnes paraugi 3 un 6 mēnešu laikā zaudēja attiecīgi 13,6% un 22,1% no to sākotnējās masas (Sierota u.c., 2018), emitētais CO₂ attiecīgi bija 65,14 un 105,86 kg m³. Pēc Polijas zinātnieku aprēķiniem no hektāra 80 gadus vecas priedes audzes gada laikā emitē apmēram 60 tonnas CO₂. Palielinoties atmosfēras un augsnes temperatūrai, trupi izraisošo sēņu augšana paātrinās, veicinot koksnes ātrāku sadalīšanos un radot lielākas CO₂ emisijas. Nepieciešamā temperatūra trupes attīstībai un koksnes sadalīšanās procesam ir 5–30 °C (Wilcox, 1978). Pasaulē aptuveni 85 miljardi tonnu koksne piesaistītā oglekļa gada laikā emitē atpakaļ uz atmosfēru koksnes sadalīšanās procesā, ko veic mikroorganismi (Hietala u.c., 2015), tāpēc ir ļoti svarīgi plānot dažādus trupi ierobežojošos pasākumus.

Meža apsaimniekošanas pasākumi, par kuriem ir vispārliciecināmie pierādījumi, ka tie palielina meža noturību pret dažādiem serdes un sakņu trupi izraisošiem patogēniem, ir retu mežaudžu veidošana, nozāģēto celmu izstrāde vai to apstrāde ar bioloģiskiem un ķīmiskiem preparātiem un mistraudžu veidošana palielinot koku sugu daudzveidību (Roberts u.c., 2020). Veicamo pasākumu ietekme uz infekcijas izplatības dinamiku atšķiras atkarībā no kokaudzes un

patogēna sugas mijiedarbības, kā arī starp dažādiem meža augšanas apstākļiem. Ja inficētajās audzēs trupējušos kokus vairs nav iespējams glābt, tad savlaicīga trapes ierobežošanas pasākumu plānošana, ar mērķi ierobežot trapes izplatību, var samazināt tās sastopamību nākotnē (Pitkänen u.c., 2021).

Koka inficēšanās parasti sākas tad, kad patogēns ar to izveido bioloģisku saikni. Primārā inficēšanās parasti notiek sākoties veģetācijas sezonai, infekcijai ienākot audzē no ārpusēs (Roberts u.c., 2020). Piemēram, veselīgās mežaudzēs infekcija visbiežāk tiek ienesta ar trupi izraisīto sēņu sporām. Sēņu sporām, izplatīties palīdz vējš vai ūdens, kā arī pats cilvēks pārvietojoties pa mežu. Primārās infekcijas ierobežošanas pasākumu uzdevums ir novērst ceļus pa kuriem patogēns iekļūst audzē, kuru vēlamies pasargāt. Savukārt sekundārā inficēšanās notiek pēc primārās inficēšanās, slimībai izplatoties no slimajiem uz veselajiem kokiem kontaktu ceļā. Dažādi trapes ierobežošanas pasākumi var samazināt primāro vai sekundāro koku inficēšanos, tādā veidā ierobežojot trapes sastopamību un palielinot kokaudzes vērtību un oglekļa uzkrājumu.

Augošiem kokiem stumbra un sakņu trupi galvenokārt izraisa parazitiskās sēnes, kuru sēņotne izplatās un attīstās koksnē. Daudzi patogēni, jo īpaši sakņu trupi izraisītie, var saglabāties augsnē arī pēc mežaudzes nociršanas. **Celmu izstrāde** ir viens no sakņu trupi ierobežojošajiem pasākumiem, kuru rekomendē veikt skujkoku izcirtumos, lai ierobežotu trapes infekcijas izplatību pēc platības atjaunošanas. Inficēto celmu izstrādāšana samazina atjaunotās mežaudzes inficēšanās risku ar sakņu trupi, tomēr pilnīgi to neizslēdz, jo augsnē palikušās saknes un to fragmenti joprojām saglabā spēju inficēt jaunus kokus (Hodges, 1999). Vissekmīgāk inficēšanās notiek, ja platības atjauno ar to pašu dominējošo koku sugu (Piri & Hamberg, 2015). Sēnes micēlijs spēj saglabāties celmos un saknēs pat 40 gadus pēc inficēta koka nociršanas, tāpēc bojāto koku celmu izstrāde un to izvešana no audzes ir efektīvs infekcijas izplatību ierobežojošais pasākums (Piri, 1996). Zinātniskajā literatūrā viedokļi par celmu izstrādi kā trupi ierobežojošā pasākuma efektivitāti ir pretrunīgi, jo pēc celmu izstrādes infekcija joprojām saglabājas koku saknēs. Zviedrijā novērots, ka parastās egles un priedes mežaudzēs, kuras iepriekš bija inficētas ar *Heterobasidion spp.* un kurās veikta celmu izstrāde, jauno stādījumu inficēšanās pirmajos gados pēc to ierīkošanas saglabājas maza, tomēr, mežaudzes vecumam pieaugot, inficēto koku skaits palielinās (Cleary u.c., 2013). Somijas dienvidos, pēc celmu izstrādes stipri inficētās parastās egles audzēs, 6 līdz 8 gadus pēc stādīšanas uzskaitīti tikai 8% inficētu koku (Piri & Hamberg, 2015). Turpretī līdzīgā pētījumā Igaunijā inficēto jauno koku īpatsvars novērots daudz lielāks no 30% līdz 100% (Aosaar u.c., 2020). Tas, cik liela bijusi trapes sastopamība un izplatība nozāģētajā audzē, noteikti ietekmēs patogēna spēju inficēt nākamo audzi.

Celmu izstrādi iespējams efektīvi apvienot ar augsnes sagatavošanu, kā arī dziļvagu un ievalku veidošanu virsūdens novadīšanai. Papildus ieguvums no izstrādātajiem celmiem ir iegūtā biomasa, kas līdz šim Latvijā ir maz izmantots resurss, daļēji tāpēc, ka nav viennozīmīgu rezultātu par celmu izstrādes iespējamo negatīvo ietekmi uz vidi un augsnes oglekļa uzkrājumu (Aosaar u.c., 2020). Lai gan celmu izstrāde ierobežo sakņu trapes izplatību, tomēr dažkārt literatūrā minēts, ka šādās platībās samazinās oglekļa uzkrājums, jo notiek augsnes slāņu sajaukšana. Īstermiņa novērojumos gan ir apstiprinājies, ka celmu izstrāde nerada būtisku CO₂ emisiju pieaugumu no augsnes, taču joprojām pastāv liela nenoteiktība, jo trūkst ilgtermiņa novērojumu (Vestin u.c., 2022).

Diemžēl arī koku celmi pēc audzes retināšanas vai izlases cirtes var būt infekcijas avots palikušajiem kokiem. Audzēs ar paaugstinātu trapes izplatības risku rūpīgi jāizvērtē kopšanas cirtes izpildes laiks un intensitāte. Vairākos pētījumos ir apstiprināts, ka pēc audzes retināšanas novērots lielākais pirmreizēji trapes inficēto koku skaita pieaugums, jo īpaši skujkoku audzēs (Lygis u.c., 2004a). Lai samazinātu patogēna iespēju nonākt uz svaigi zāģēta celma, ieteicams retināšanu veikt periodā, kad vidējā diennakts gaisa temperatūra ir tuvu nullei. Ja tas nav iespējams, jāveic **celmu apstrāde ar ķīmiskajiem vai bioloģiskajiem līdzekļiem**, kas mūsdienās ir plaši pielietota metode, lai ierobežotu sakņu trapes izplatību galvenokārt kopšanas cirtēs, bet arī pēc galvenās cirtes.

Celmu apstrādes līdzekļu izmantošanas efektivitāte ir atkarīga no pareizas to pielietošanas, meteoroloģiskajiem apstākļiem, kā arī trupi izraisīto sporu koncentrācijas gaisā. Veicot retināšanu skuju koku audzēs, rekomendē veikt celmu apstrādi, ja diennakts vidējā gaisa temperatūra pārsniedz 5 °C. Trupes ierobežojošo suspensiju izsmidzināšana vai uzklāšana jāveic uzreiz pēc koka nozāģēšanas, jo pēc pāris nedēļām, izžūstot to virsmai, celmi vairs nav tik uzņēmīgi pret primāro trupes infekciju (Kärhä u.c., 2018). Ja celmu apstrāde veikta pareizi, ievērojot preparāta izstrādātāju rekomendācijas, iespējams sasniegt līdz pat 100% efektivitāti (Thor & Stenlid, 2005), praksē gan tas ir reti iespējams.

Viens no plašāk pielietotajiem celmu apstrādes ķīmiskajiem preparātiem ir urīnviela, kurš pēc izsmidzināšanas aizsargā celmu, jo amonjaks, kas atrodas preparāta sastāvā, uz celma virsmas būtiski paaugstina pH līmeni ($\text{pH} > 7$), kas trupi izraisītajām sporām rada attīstībai nelabvēlīgus apstākļus (Johansson u.c., 2002). Pavirši izsmidzinot urīnvielu, tā ietekmē ne tikai celma virsmu, bet arī tam apkārt esošo augsni un veģetāciju aptuveni vienu līdz divus gadus pēc preparāta lietošanas, un tikai pēc tam pH līmenis pakāpeniski sāk stabilizēties. Šī iemesla dēļ celmu aizsardzībai biežāk ieteicams izmantot bioloģiskos līdzekļus, piemēram, "Rotstop". Pētījumā Zviedrijā secināts, ka audzēs, kurās pirms 15 gadiem koku celmi retināšanas laikā apstrādāti ar urīnvielu, bija par 3% mazāka kopējā trupes sastopamība, salīdzinājumā ar kontroli (Oliva u.c., 2008).

Valdošās **koku sugas nomaina**, atjaunojot audzi, arī samazina trupes sastopamību un izplatību. Ar sakņu trupi stipri inficētās skujkoku audzes iesaka atjaunot ne tikai ar citu skujkoku sugu, bet pat to vietā ieteicams veidot lapu koku audzes vai arī mistrojumu. Līdzīgu principu rekomendē pielietot, atjaunojot inficētas lapu koku audzes. Inficētajos celmos trupi izraisītie patogēni spēj saglabāties ilgu laiku un pastāv liela varbūtība, ka tie inficēs tās pašas koku sugas jaunaudzi. Valdošās koku sugas nomaina pakāpeniski ietekmē vielu apriti augsnē, radot nelabvēlīgus apstākļus tur esošajiem patogēniem (Piri, 2003). Salīdzinot ar egli, piemēram, priedes celmi ir mazāk uzņēmīgi pret *Heterobasidion spp.* izraisīto trupi, tāpēc ar priedi var veiksmīgi atjaunot sakņu trupes inficētās egļu mežaudzes, ja to atļauj meža tips. Egles audzēs galvenajā cirtē konstatējot vairāk nekā 20% sakņu piepes bojātus kokus, ieteicams veikt atjaunojamās koku sugas maiņu. Mūsu platuma grādos rekomendējams šādās vietās stādīt bērzu. Pie bērza ietekmes faktoriem uz augsnes kvalitāti var minēt arī to, ka tas attīra augsni no infekcijām, jo inficēto egļu celmi sadalās, pirms sāk augt nākamā skujkoku paaudze. Bērzu var uzskatīt par koku pioniersugu, kas sagatavo un uzlabo augsni nākamajai skujkoku paaudzei.

Trupes sastopamību kokaudzē var samazināt, sastāva retināšanas laikā mērķtiecīgi **veidojot mistrotas audzes un audzes ar zemu biežību**. Tīraudzēs ar lielu biežību, vienas sugas īpatņi ir ļoti tuvu viena otram, līdz ar to dažādu slimību transmisija notiek ievērojami ātrāk (Lindén & Vollbrecht, 2002). Atjaunojot ar trupi inficētu audzi, ieteicams veidot vismaz 50% citu koku sugas piemistrojumu, piemēram veidot egles – priedes mistraudzi. Lai gan sakņu trupe ietekmē arī parastās priedes audzes, tomēr, salīdzinot ar egli, tai ir lielāka izturība pret šo infekciju. Lapu koku piemistrojums skujkoku tīraudzēs ir faktors kas samazina sakņu trupes izplatību (Lindén & Vollbrecht, 2002). Eksperimentā Lietuvā ir apstiprinājies, ka priedes mistraudzē lauksaimniecības augsnē, 25. gadu vecumā lietkoksnas apjoms ir vismaz par 10-27% lielāks, salīdzinot ar tīraudzi. Tāpat mistraudzē augušajām priedēm novērota labāka izturība pret sakņu trupi izraisītajiem patogēniem (Lygis u.c., 2004b).

Piemistrojuma ietekme samazina trupes izplatību arī alkšņu audzēs. Pētījumā Latvijā ir novērots, ka melnalkšņa tīraudzē var būt bojāti pat 98% koku, savukārt mistrojumā ar divām vai trīs citām sugām, serdes trupes sastopamība bija mazāka (Arhipova u.c., 2012). Citā pētījumā Latvijā secināts, ka mistrotās egļu-baltalkšņu audzēs, kur baltalkšņu piemistrojums pārsniedz 30%, ir būtiski mazāk trupējušo egļu nekā tīraudzēs vai audzēs ar nelielu lapu koku piemistrojumu (Arhipova et al., 2010). Analizējot citu lapu koku sugu piemistrojuma ietekmi uz trupes sastopamību egļu audzēs,

Oglekļa aprite meža ekosistēmā

konstatēts, ka trupējušo celmu īpatsvars egļu tīraudzēs un mistraudzēs ar lapu koku piemistrojumu (<50%) būtiski neatšķiras. Izvēloties piemērotāko koku sugu piemistrojuma veidošanai, jāņem vērā ne tikai konkrētās sugas ietekme uz apdraudošā patogēna izplatību, bet arī citi faktori. Svarīga nozīme jāpievērš arī audzes produktivitātei. Nepiemērota mistrojuma veidošana var samazināt valdošās sugas pieaugumu un pat pastiprināt to uzņēmību pret sakņu trupi, kā arī citām slimībām.

Lielākā daļa pētījumu par trapes ierobežošanas pasākumu ietekmi uz tās sastopamību veikti vienā audzē, savukārt plašāka mēroga pētījumi bieži vien demonstrē pretrunīgus rezultātus. Tas lielā mērā traucē izdarīt galīgos secinājumus par meža apsaimniekošanas ietekmes līdzībām un atšķirībām uz noteiktu koku sugu noturību pret dažādiem trupi izraisošiem patogēniem, kā arī izstrādāt kvantitatīvas metodes trapes ierobežošanas pasākumu ietekmes prognozēšanai.

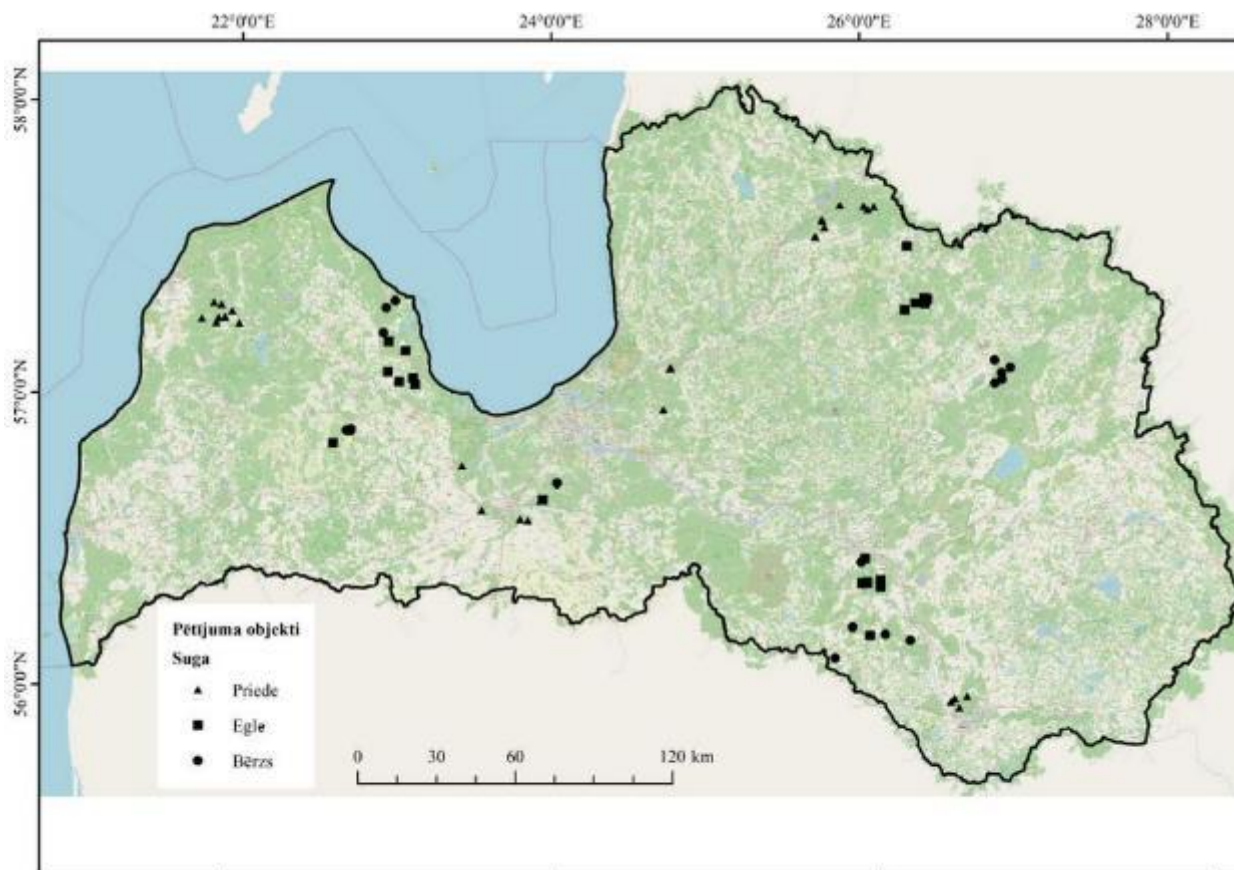
4. SEG EMISIJU SAMAZINĀŠANA MEŽA APSAIMNIEKOŠANĀ KLIMATA PĀRMAIŅU MAZINĀŠANAS KONTEKSTĀ

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

Darbības ietvaros veikta 2011.-2013. gadā ierīkoto dažādas intensitātes kopšanas ciršu parauglaukumu uzmērīšana. Darba uzdevuma izpilde uzsākta 2021. gadā, identificējot kopumā 84 jaunaudzus un krājas kopšanas ciršu objektu. 2022. gadā atjaunots uzmērāmo parauglaukumu marķējums un noteikti taksācijas rādītāji visos kopšanas ciršu izmēģinājumu objektos. Iegūtie dati izmantoti kopšanas ciršu ietekmes uz CO₂ piesaisti kvantitatīvai novērtēšanai.

4.1.1. Kopšanas ciršu efekta novērtēšanas metodika

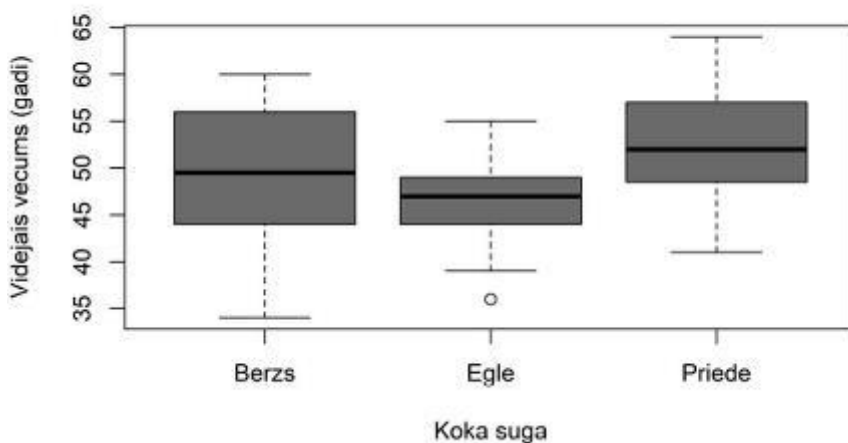
Vidējās retināšanas ietekmes uz oglekļa uzkrājumu vērtēšanai izvēlētas 18 āra bērza (*Betula pendula*), 20 parastās egles (*Picea abies*) un 30 parastās priedes (*Pinus sylvestris*) audzes mezotrofos un oligotrofos apstākļos sausieņos visā Latvijas teritorijā (26. attēls).



Attēls 26. Pētījuma objektu atrašanās vietas Latvijā

Analizēto audžu vecums bērza audzēs variē no 34 līdz 60 gadiem (vidēji 49±4 (±95% ticamības intervāls) gadi), egles audzēs no 36 līdz 55 gadiem (vidēji 46±2 gadi) un priedes audzēs no 41 līdz 64 (vidēji 53±2 gadi, 27. attēls). Retināšana audzes veikta pirms 5-10 gadiem. Katrā audzē dati (koku augstums, caurmērs) ievākti 3 parauglaukumos (R=12,62 m). Katrā parauglaukumā

ievākti 5 koku pieauguma urbumi. Neretinātu audžu pieauguma raksturošanai (papildpieauguma aprēķiniem) izmantoti citos LVMI Silava pētījumos ievākti dati.



Attēls 27. Vidējais vecums analizētajām koku sugām.

Pieauguma urbumi pielīmēti plāksnītēm un noslīpēti. Gadskārtu platumi mērīti, izmantojot gadskārtu platumu mērīšanas ierīci LINTAB-IV un datorprogrammu TSAP-Win™ Scientific. Krājas papildus pieaugums aprēķināts katrā nogabalā.

Krājas papildus pieaugumu aprēķina pēc profesora Liepas (1996) izstrādātās metodikas:

$$Z_M^{kp} = 1.2732.4\psi \left(GH^\alpha D^{\beta lgH - \varphi - 2} - G_t H_t^\alpha D_t^{\beta lgH - \varphi - 2} \right) \quad (8)$$

kur

Z_M^{kp} - krājas kumulatīvais papildus pieaugums, $m^3 ha^{-1}$;

$\Psi, \alpha, \beta, \varphi$ - koeficienti (1. tab.);

t – vērtēšanas intervāls, gadi;

G, G_t – audzes krūšaugstuma šķērslaukums un tā prognostiskā vērtība intervāla t beigās, $m^2 ha^{-1}$;

$$G_t = \frac{D_t^2 G}{D^2} \quad (9)$$

D, D_t – audzes vidējais krūšaugstuma caurmērs un tā prognostiskā vērtība intervāla t beigās, cm:

$$D_t = D - 0,1Z_D^{kp} \quad (10)$$

Z_D^{kp} - audzes vidējā caurmēra kumulatīvais papildus pieaugums, mm:

$$Z_D^{kp} = 2u \left(\sum_j^t i_j + \sum_j^t i_j' \right) \quad (11)$$

u – mizas biezuma koeficients (1. tab.);

i_j – audzes gadskārtu vidējo vērtību rinda, mm. Tā satur $t+t'$ locekļus, kas ir aprēķināti no vērtējamās audzes uzskaites koku urbumu datiem.

t' – retrospekcijas periods, gadi;

i_j' – vērtējamās audzes gadskārtu korigēto platumu rinda, mm. Korekcijas vienādojums:

$$i_j' = \eta i_{k;j}^{\wedge \rho} \quad (12)$$

η, ρ – koeficienti

i_k – kontroles koku gadskārtu platumu vidējās vērtības, mm.

Gadskārtu platumu rindas pakļauj statistiskai pārbaudei. No datu kopas audzēs bez retināšanas atlasa tos kokus, kuri ar vērtējamās audzes gadskārtu platumu vidējo vērtību rindu retrospekcijas intervāla laikā uzrāda līdzīgu augšanas gaitu. Divas vērtību rindas uzskata par līdzīgām, ja to svārstības ir paralēlas, t.i., līdzīgi vides apstākļi izsauc relatīvi vienādu gadskārtu paplašināšanos vai sašaurināšanos (Liepa, 1996). Par līdzības kritēriju izmanto korelācijas koeficientu r . Pieņem, ka vērtējamā un pārbaudāmā uzskaites koka augšanas gaita ir līdzīga, ja r , kas aprēķināts pēc retrospekcijas perioda gadskārtu platumiem, ir statistiski būtisks ($r > r_{\alpha,t}$; $\alpha=0,05$, bet, ja adekvātās kontroles koku (k) skaits mazāks par 10, tad būtiskuma līmeni samazina līdz 0,2; $t'=5-10$). No atlasītajiem k derīgajiem kontroles kokiem sastāda gadskārtu platumu vidējo vērtību rindu. Tālāk pēc vērtējamās audzes un kontroles koku intervāla t' gadskārtu platumu vidējo vērtību rindām ar mazāko kvadrātu metodi izskaitļo koeficientus η un ρ un aprēķina visas i' vērtības (Liepa, 1996).

H, H_t – audzes vidējais augstums un tā prognostiskā vērtība intervāla t beigās, m:

$$H_t = H - Z_H^{kp} \tag{13}$$

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

$$Z_H^{kp} = \frac{HZ_D^{kp}(aD+b)}{u(cD+100)} \tag{14}$$

a, b, c, u – koeficienti (21. tabula).

Pēc aprakstītā algoritma tiek aprēķināts krājas kumulatīvais papildus pieaugums ar mizu. Šī rādītāja vērtība bez mizas, $m^3 ha^{-1}$:

$$Z_{M;bm}^{kp} = \frac{Z_M^{kp}}{s} \tag{15}$$

s – mizas tilpuma koeficients, kas aprēķināms pēc formulas:

$$s = \frac{pD + q}{wD + 100} \tag{16}$$

kur p, q, w – koeficienti (21. tabula).

Tabula 21. Koeficientu vērtības krājas kumulatīvā papildus pieauguma aprēķināšanai

| 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 |

Audzēs koku skaits aprēķināts kā aritmētiskais vidējais koku skaits no parauglaukumiem, kuriem koku skaitu aprēķina sekojoši:

$$N = \frac{10000}{L^2 K^2} \tag{17}$$

kur N – koku skaits uz hektāra;

L – attālums no centra līdz 3. tuvākajam kokam + puse no centra koka diametra, m;

K – korekcijas koeficients:

$$K = 0.0034L^3 - 0.0184L^2 - 0.0456L + 1.2173 \tag{18}$$

Uzkrātais oglekļa daudzums dzīvajā koksnes biomasā aprēķināts no individuāla koka biomasas (tilpums \times blīvums), izmantojot Latvijas apstākļiem izstrādātus biomasas modeļus

saimnieciski nozīmīgākajām koku sugām (Liepiņš, Lazdiņš, u.c., 2017). Izmantojot Latvijā veiktā pētījuma oglekļa satura koksne koeficienta vērtības saimnieciski nozīmīgākajām koku sugām – parasto priedi, parasto egli, bērzu, apsi (Bārdule, Liepiņš, u.c., 2021), aprēķināts oglekļa uzkrājums koka virszemes un pazemes biomasā (22. tabula).

Tabula 22. Oglekļa satura koeficienti koku biomasā (virszeme/pazeme) dažādām koku sugām Latvijā, g kg⁻¹ (Bārdule, Liepiņš, u.c., 2021)

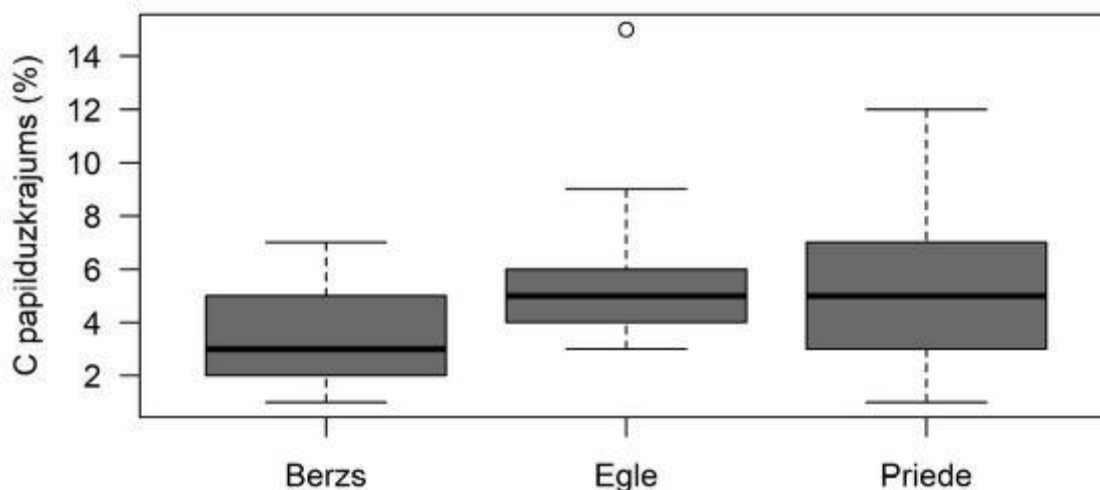
| Koka daļa | Parastā egle | Parastā priede | Bērzs | Parastā apse |
|----------------|--------------|----------------|-------|--------------|
| Virszemes daļa | 524,4 | 530,4 | 520,6 | 510,2 |
| Pazemes daļa | 529,9 | 531,5 | 527,9 | 507,4 |
| Koks | 526,5 | 533,2 | 521,4 | 509,0 |

Ņemot vērā koku dimensiju un audzes biežuma izmaiņas retināšanas rezultātā un iegūto krājas kumulatīvo papildus pieaugumu, aprēķināts procentuālais krājas pieaugums. Krājas procentuālais pieaugums izmantots, lai aprēķinātu oglekļa papildus pieaugumu retināšanas rezultātā.

4.1.2. Krājas papildpieauguma novērtēšanas rezultāti

Retināšanas ietekme uz oglekļa uzkrājumu 5 gadu periodā

Valdošā suga būtiski ietekmē oglekļa papildus uzkrājumu 5 gadus pēc retināšanas (28. attēls). Papildus uzkrātais C apjoms bērza audzēs ir 3% no kopējā uzkrājuma koku biomasā, egles audzēs 6%, bet priedes audzēs 5%. Novērotas statistiski būtiskas atšķirības ($p < 0,05$) starp oglekļa papilduzkrājumu bērza audzēs salīdzinājumā ar pārējām analizētajām koku sugām.

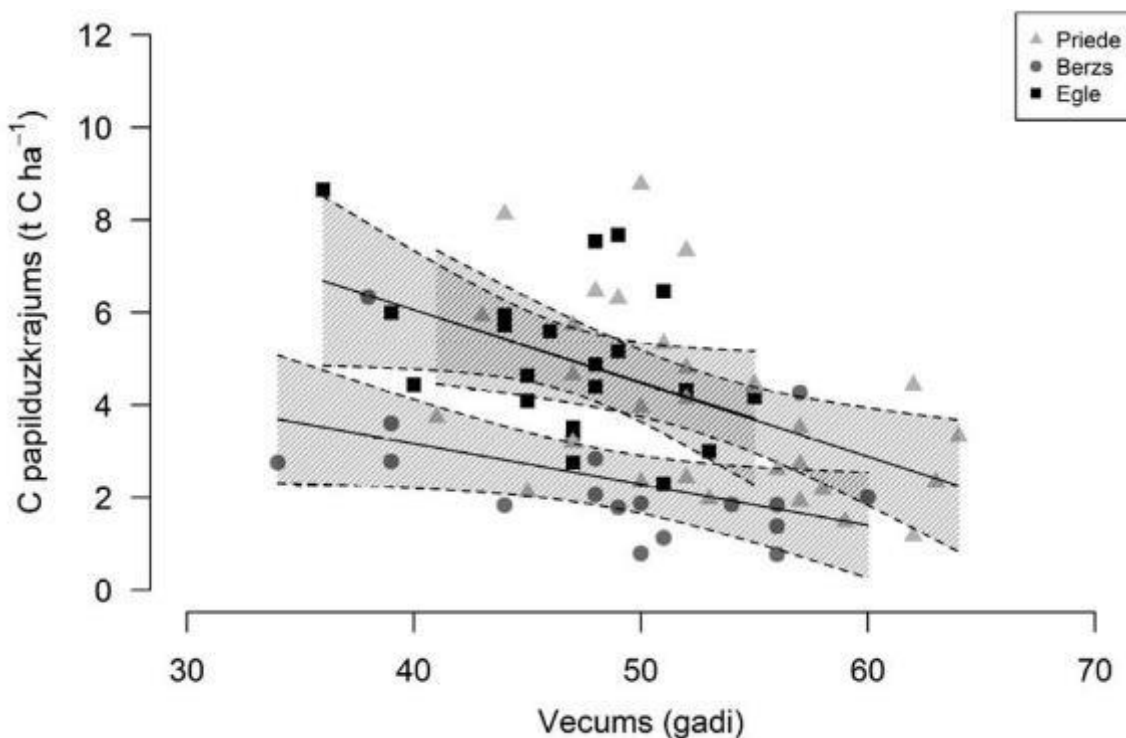


Attēls 28. Papildus oglekļa uzkrājums 5 gadu periodā, % .

Kopējais oglekļa uzkrājums koku biomasā bērza audzēs ir $80,7 \pm 11,77$ t C ha⁻¹, egles audzēs $95,1 \pm 14,1$ t C ha⁻¹, priedes audzēs $86,4 \pm 7,68$ t C ha⁻¹. Statistiski būtiskas atšķirības kopēja C uzkrājumā dažādām koku sugām nav novērotas.

Vērtējot C uzkrājuma izmaiņas atkarībā no valdaudzes vecuma, novērojama negatīva tendence. Palielinoties audzes vidējam vecumam, novērojams oglekļa papilduzkrājuma

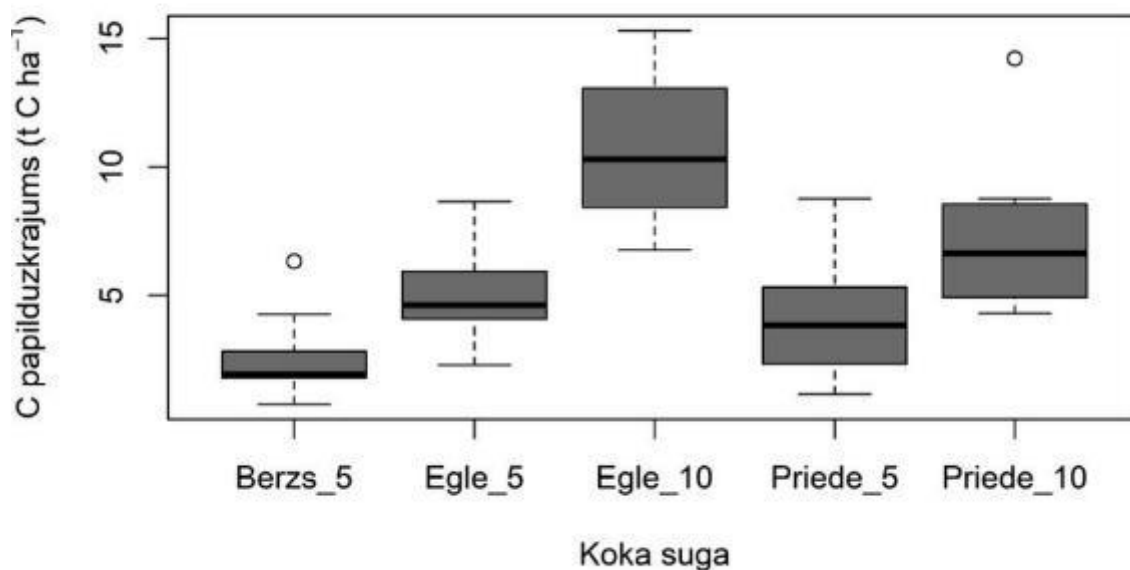
samazināšanās visām koku sugām (29. attēls). Atšķirības starp egles un priedes audzēm nav izteiktas, t.i. reakcija ir līdzīga, taču bērza audzēs novērojams mazāks oglekļa papilduzkrājums 5 gadus pēc retināšanas.



Attēls 29. Oglekļa papilduzkrājums (t C ha⁻¹) atkarībā no valdošās koka sugas un vecuma.

Retināšanas ietekme uz oglekļa uzkrājumu līdz 10 gadu periodā

Vidēji C papilduzkrājums 5 gadus pēc retināšanas bērza audzēs ir $2,4 \pm 0,68$ t C ha⁻¹, egles audzēs $5,0 \pm 0,76$ t C ha⁻¹, priedes audzēs $4,1 \pm 0,74$ t C ha⁻¹. Statistiski būtiskas atšķirības ($p < 0,001$) 5 gadus pēc retināšanas novērotas starp C papilduzkrājumu bērza audzēm un pārējām koku sugām (30. attēls). Vērtētā retināšanas ietekme ir relatīvi īsā termiņā (5 gadi), taču vērtējot ilgāka termiņa ietekmi (10 gadi) retināšanas efektam var būt vēl lielāka ietekme uz C papilduzkrājumu. Salīdzinājumam, analizē iekļauti dati par C papilduzkrājumu 10 gadus pēc retināšanas egles un priedes audzēs, kur tas bija iespējams (attiecīgi 7 un 8 audzes). Retināšanas ietekmē 10 gadus vēlāk papildus uzkrātais C daudzums egles audzēs ir $10,7 \pm 2,08$ t C ha⁻¹, bet priedes audzēs $-7,2 \pm 2,12$ t C ha⁻¹.



Attēls 30. Oglekļa papilduzkrājums ($t C ha^{-1}$) 5 un 10 gadus pēc retināšanas dažādām koka sugām.

4.1.3. Kopsavilkums par krājas papildpieauguma novērtējumu

Visām analizētajām koku sugām retināšanas rezultātā novērots oglekļa papilduzkrājums, kas svārstās no 3-6% atkarībā no koka sugas, turklāt savlaicīga audzes retināšana nodrošina lielāku C papilduzkrājumu. Audzes vidējais vecums būtiski ietekmē papildus C uzkrājumu retināšanas rezultātā, jo samazinās koku atsaucē reakcija. Vislielākais ieguvums C uzkrājumā novērojams skujkokiem (eglei un priedei). Pētījuma noslēguma etapā šie rezultāti papildināmi ar aprēķiniem par oglekļa uzkrājumu ar dažādu intensitāti (palikušā audzes biezumu) koptās jaunaudzēs.

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

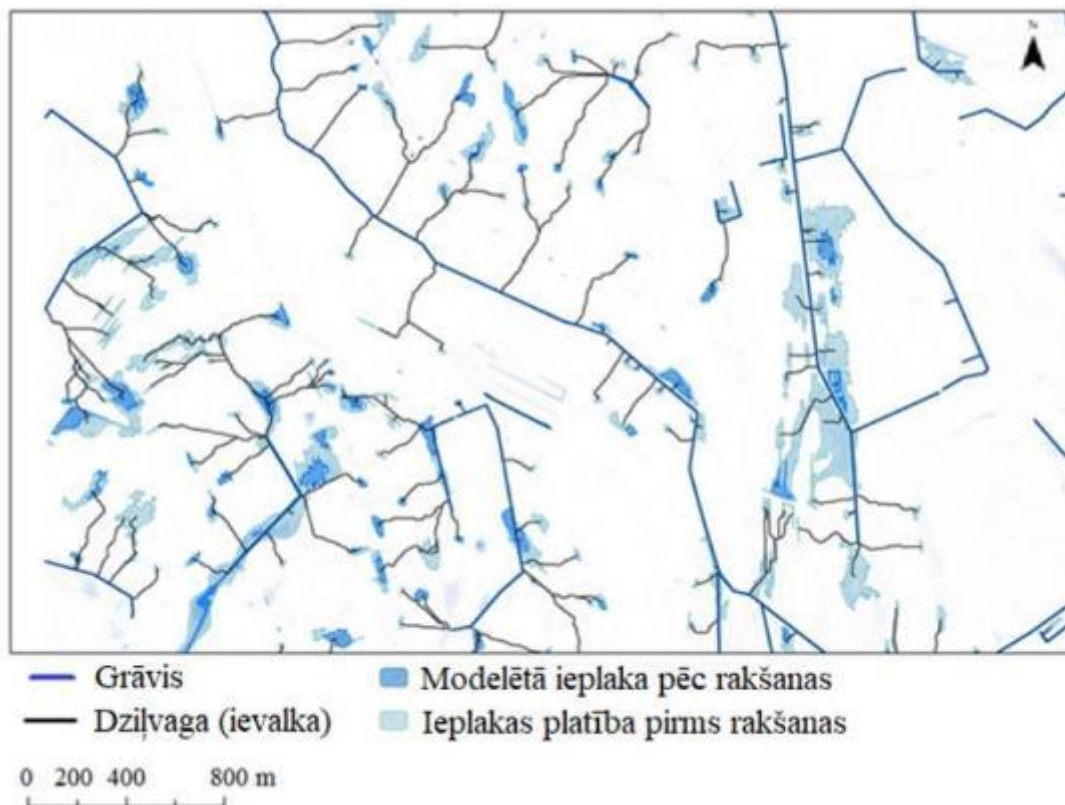
Lokālo meliorācijas sistēmu (dziļvagu) un grāvju atjaunošanas plānošana mežizstrādes objektos ir viens no iepriekš identificētajiem risinājumiem SEG emisiju mazināšanai. Vairāki pētījumi norāda uz klimatisko apstākļu radīto ekonomisko zaudējumu pieaugumu, turklāt prognozēts, ka turpmākas klimata pārmaiņas šīs negatīvās ietekmes uz dažādiem sociāli-ekonomiskajiem faktoriem palielinās vēl vairāk (Field u.c., 2014; Field & Intergovernmental Panel on Climate Change, 2012). Viens no piemēriem ir mežsaimniecība, kur mitri augsnes apstākļi ierobežo koku augšanu un mežizstrādes tehnikas pārvietošanos, un palielina tās ietekmi negatīvo uz augsni. Būtiski ir atjaunot vai izveidot meliorācijas sistēmas, kas uzlabo koku augšanas apstākļus vietās, kur virszemes notece ir traucēta (Skaggs u.c., 2016). Līdz ar to, precīzi zināma pārmitro augsņu telpiskā izplatība ir nozīmīga gan ilgtspējīgai mežu apsaimniekošanai, gan pētniecībai (Moore u.c., 1991). Šāda veida informācija palīdz pilnveidot zemes apsaimniekošanas praksi, palīdz izvairīties no finansiāliem zaudējumiem, kā arī mazina saimnieciskās darbības riskus (Christensen u.c., 1996).

Virszemes ūdens novadīšana ir vajadzīga reģionos, kur nokrišņi pārsniedz iztvaikošanu, un vietās, kur augsnes drenētība un nogulumu īpašības nenodrošina lieko virszemes ūdeņu novadīšanu (Kozłowski & Pallardy, 2002). Liekā ūdens novadīšanas galvenie mērķi ir panākt labāku un lielāku koksnes ražību un uzlabot augšanas apstākļus, nodrošināt piekļuvi mežaudzēm un radīt tajās meža atjaunošanai un mežizstrādei piemērotus apstākļus. Īpaši liela uzmanība ir jāpievērš kūdras augsnēm, kurās gruntsūdens līmenis ir augsts (Peltomaa, 2007). Koksnes krājas pieauguma palielināšanos pēc teritorijas nosusināšanas bieži saista ar augšanas laika pagarināšanos. Pēc meliorācijas tiek pagarināts laika posms, kurā var veikt meža izstrādi un veicināta dažādu darbu izpilde nebojājot augsni - neatstājot tajā dziļas rīses (Skaggs u.c., 2016). Aizvien populārāka kļūst ievalku veidošana, nevis lielo meliorācijas grāvju rakšana (Haapalehto u.c., 2011). Ievalku rakšana ir nelielu grāvīšu veidošana, lai pazeminātu gruntsūdens līmeni mežaudzēs (Piirainen u.c., 2017). Tiek novadīts liekais virsūdens no mežaudzēm pirms vai pēc tam, kad tajās veikta mežizstrāde (Löhmus u.c., 2015).

Optimālās dziļvagu izvietošanas vietas nogabalā modelētas balstoties uz iepriekšējos pētījumos (Melniks u.c., 2019) izstrādātās metodikas iestrādēm. Metode izstrādāta izmantojot dažādas DEM (Digital Elevation Model) un CHM (Canopy height model) transformācijas, kā arī klasificējot multispektrālos satelītattēlus, ko izmanto "izmaksu" virsmas veidošanai (angl. *cost surface*). LiDAR datu apstrāde veikta izmantojot GRASS GIS un QGIS rīkus, bet satelītainas klasificētas izmantojot ArcMap pārraudzītās klasifikācijas rīkus.

Lai izveidotu izmaksu virsmu tālākai ūdens virszemes noteces vāgu automātiskai ģenerēšanai, vispirms ar rastra kalkulatora palīdzību saskaitīti 3 iepriekš izveidotie modeļi – virszemes noteces kanālu, veģētācijas augstuma un mežaudžu koku tipa modelis. Rezultātā iegūts virszemes noteces vāgu ierīkošanu izmaksu un efektivitāti ietekmējošu 3 faktoru modelis ar vērtībām 3-33, kur mazākās darba izmaksas ir pie mazākās vērtības.

Virszemes noteces vāgu ģenerēšana veikta ar GRASS GIS algoritmu *r.drain*, izmantojot izmaksu virsmu un kā sākuma punktus norādot iepriekš veidotos punktus, kuri apzīmē beznoteces ieplaku novietojumu. Ar šo darbību iegūti zemāko izmaksu noteces kanālu rastra un vektoru dati no dotajiem sākuma punktiem beznoteces ieplakās līdz tuvākajam grāvim. Sagaidāmā rezultāta piemērs redzams attēlā 31. attēls.



Attēls 31. Modelētā sagaidāmā beznoteces ieplaku platība pirms un pēc dziļvagu rakšanas paraugteritorijā.

Izmantojot šo metodiku, kā arī OrgBalt pētījumā izstrādātās augsnes mitruma (Ivanovs & Lupikis, 2018) un gruntsūdens dziļuma kartes pārmitro vietu identificēšanai, veikta dziļvagu tīkla modelēšana divās paraugteritorijās Mežoles MPS 108. un 218. kvartālā. Šajās teritorijās balstoties uz modeļa rezultātiem 2022. gada vasarā izveidotas dziļvagas, lai uzlabotu traucēto virszemes ūdens novadīšanu uz meliorācijas grāvjiem, un uzsākts SEG emisiju monitorings, ierīkojot kopā 6 gāzu mērījumu vietas. Kontrolei izmantosim kailcirtēs purvainos ierīkotos gāzu mērīšanas parauglaukumus, kur pirms tam LIFE OrgBalt pētījuma ietvaros veikts gāzu apmaiņas monitorings (audžu identifikatori 012-218-8, 031-108-4, 031-1-1, 012-218-4).

Egles stādīšanai paredzētā platība (pirms izstrādes 32. attēlā) pēc mežizstrādes, augsnes sagatavošanas un dziļvagu ierīkošanas redzama 33. attēlā. Neapstrādātie laukumi fotogrāfijā ir platības, kur notiek gāzu apmaiņas mērīšana neskartā platībā. Ar sarkanu 32. attēlā iezīmēta platība, kurā 2022. gadā iestādīts melnalksnis, bet pārējā platībā stādīta egle. 2022. gada rudenī platībā uzsākta gāzu apmaiņas un to ietekmējošo parametru mērīšana.

LIFE OrgBalt pētījuma ietvaros šajās platībās veikts gāzu apmaiņas monitorings pirms mežizstrādes un augsnes gatavošanas, nodrošinot informāciju par gāzu apmaiņu pieaugušā audzē.



Attēls 32. Platība, kur ierīkots E stādījums Mežoles mežu novadā.



Attēls 33. E stādīšanai sagatavota platība ar dziļvagām Mežoles mežu novadā.

Jauni izpētes objekti SEG emisiju no augsnes raksturošana kūdreņos un purvaiņos ierīkoti LVM apsaimniekotā pieaugušā P audzē Ks meža tipā (609-175-5¹¹), MPS apsaimniekotā platībā P audzē Am meža tipā (011-247-8), pieaugušā B audzē Kp meža tipā LVM apsaimniekotā platībā (502-457-2) un MPS apsaimniekotā B audzē Ap meža tipā (011-141-1). 2022. gadā visos 4 izmēģinājumu objektos ierīkoti augsnes heterotrofās elpošanas un SEG emisiju monitoringa parauglaukumi, kuros

¹¹ Kvartālu apgabals – kvartāls – nogabals.

Oglekļa aprīte meža ekosistēmā

uzsākti gāzu apmaiņas novērojumi (SEG emisijas, heterotrofā elpošana, gruntsūdens līmenis, augsnes temperatūra). Paralēli MPS apsaimniekotās platībās uzsākām novērojumus 4 B un P audzēs, kur 2023. gada ziemā plānota atjaunošanas cirte (012-101-10; 012-129-11; 012-67-21; 012-187-10), lai references periodā pirms mežizstrādes novērtētu SEG emisijas šajās platībās. Detāla informācija par sākotnējiem rezultātiem šajos izpētes objektos dota nodaļā “Empīrisku datu ieguve un metodikas izstrādāšana meliorācijas sistēmu ietekmes uz SEG emisijām no augsnes un CO₂ piesaisti modelēšanai minerālaugsnēs un organiskās augsnēs”.

Gāzu apmaiņas novērojumus paredzēts turpināt 24 mēnešus, raksturojot mežizstrādes un dziļvagu ierīkošanas ietekmi uz SEG emisijām no kūdras augsnēm purvaiņos.

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

5.1.1. Meža ieaudzēšanas ietekmes uz oglekļa apriti novērtējums 2012. gadā ierīkotajos izpētes objektos

Pētījuma ietvaros veicām 2021. un 2022. gadā iegūto datu analīzi oglekļa piesaistes raksturošanai P, E un B audzēs 10-12 gadu laikā pēc stādīšanas 2011.-2013. gada apmežojumos. Pētījumā ietvertas 27 audzes (23. un 24. tabula), lielākoties vērī un damaksnī, izņemot pa vienam kūdrenim katrai sugai. Izplatītākā augšņu grupa ir velēnu podzolaugsne (eutric podzoluisols) un tipisks podzols (duric podzols). Iepriekšējais zemes izmantošanas veids lielākajā daļā platību ir ganības. Izmēģinājumu ierīkošanas laikā platības izvēlētas nejauši, lai raksturotu vidējo meža ieaudzēšanas ietekmi uz SEG emisijām.

Tabula 23. Mežaudžu skaits valdošās sugas un meža tipa griezumā

| Meža tips | Bērzs | Egle | Priede | Kopā |
|-------------------------|-------|------|--------|------|
| Damaksnis (Dm) | 2 | 1 | 6 | 9 |
| Šaurlapju ārenis (As) | - | - | 2 | 2 |
| Vēris (Vr) | 5 | 7 | 1 | 13 |
| Platlapju kūdrenis (Kp) | 1 | 1 | 1 | 3 |
| Kopā | 8 | 9 | 10 | 27 |

Tabula 24. Mežaudžu skaits augsnes tipu griezumā

| Augsnes tips atbilstoši WRB klasifikācijai | Bērzs | Egle | Priede | Kopā |
|--|-------|------|--------|------|
| Calcic luvisols | - | - | 1 | 1 |
| Duric podzols | 2 | 1 | 4 | 7 |
| Eutric podzoluisols | 5 | 6 | 2 | 13 |
| Haplic podzoluisols | - | - | 1 | 1 |
| Mollic/Eutric gleysols | - | 1 | 1 | 2 |
| Terric histosols | 1 | 1 | 1 | 3 |

Taksācijas rādītāju kopsavilkums atkārtoti uzņēmētajos parauglaukumos dots 25. tabulā. Audžu vecums saskaņā ar Meža valsts reģistru ir 11-15 gadi, taču realitātē ir gan vecākas audzes (607-152-4), kas veidojušās dabiskās apmežošanās rezultātā, piestādot atsevišķās vietās kokus, gan jaunākas audzes, kur stādītie koki ir iznīkuši un to vietā izveidojies dabisks kokaugu apaugums. Vidējais koku caurmērs apmežotajās platībās ir 9,1 cm, koku augstums – 7,6 m, vidējais koku skaits – 1307 gab. ha⁻¹, šķērslaukums – 9,2 m² ha⁻¹ un krāja – 42,8 m³ ha⁻¹. Vidējais krājas pieaugums apmežotajās platībās pirmajos 12-15 gados pēc stādīšanas ir 3,4 m³ ha⁻¹ gadā.

Tabula 25. Koku stāva raksturojums parauglaukumos

| Audze | Valdošā suga | Audzes vecums, gados | Meža tips | D, cm | H, m | Koku skaits, gab. ha ⁻¹ | G, m ² ha ⁻¹ | Krāja, m ³ ha ⁻¹ | Iepriekšējā zemes izmantošana |
|------------|--------------|----------------------|-----------|-------|------|------------------------------------|------------------------------------|--|-------------------------------|
| 206-191-51 | B | 12 | Dm | 10,1 | 9,9 | 940 | 7,2 | 38,3 | Ganības |
| 206-493-51 | P | 12 | Dm | 10,1 | 6,6 | 1700 | 14,2 | 56,8 | Aramzeme |
| 208-144-21 | E | 14 | Vr | 8,9 | 5,0 | 1200 | 7,7 | 24,5 | Ganības |
| 208-149-9 | B | 12 | Vr | 7,1 | 7,5 | 1300 | 4,6 | 20,3 | Ganības |
| 208-17-6 | E | 13 | Vr | 9,9 | 6,6 | 1020 | 7,5 | 29,2 | Ganības |
| 208-8-17 | E | 12 | Vr | 3,7 | 3,4 | 200 | 0,2 | 0,7 | Ganības |
| 208-8-19 | B | 14 | Vr | 14,7 | 14,7 | 1740 | 19,1 | 132,2 | Ganības |
| 209-164-10 | P | 14 | As | 14,9 | 9,6 | 1240 | 17,6 | 88,5 | Krūmājs |
| 209-165-17 | P | 13 | Dm | 9,8 | 6,3 | 1100 | 8,4 | 32,4 | Krūmājs |
| 503-379-14 | B | 13 | Vr | 6,2 | 7,1 | 800 | 2,8 | 11,8 | Krūmājs |
| 503-431-1 | B | 12 | Vr | 5,6 | 6,9 | 1100 | 3,1 | 13,6 | Ganības |
| 503-530-27 | B | 12 | Vr | 10,9 | 11,5 | 1220 | 11,1 | 63,9 | Ganības |
| 506-92-34 | B | 12 | Vr | 8,9 | 10,7 | 1500 | 10,0 | 56,8 | Krūmājs |
| 507-324-40 | P | 13 | Dm | 11,1 | 6,8 | 1420 | 13,7 | 54,0 | Ganības |
| 508-220-22 | B | 12 | Dm | 9,2 | 10,9 | 2020 | 13,1 | 71,3 | Aramzeme |
| 508-455-2 | B | 13 | Vr | 12,8 | 14,2 | 540 | 6,4 | 43,5 | Sētais zālājs |
| 605-169-51 | E | 12 | Vr | 4,0 | 3,5 | 600 | 0,8 | 2,6 | Ganības |
| 605-201-51 | E | 12 | Vr | 9,3 | 7,0 | 1300 | 9,1 | 39,0 | Aramzeme |
| 607-113-51 | E | 12 | Vr | 5,1 | 4,7 | 3700 | 7,2 | 26,9 | Aramzeme |
| 607-152-4 | P | 13 | Dm | 11,8 | 8,1 | 3520 | 36,9 | 168,5 | Dabiski apmežojusies platība |
| 608-227-27 | P | 12 | As | 8,4 | 4,8 | 200 | 1,1 | 3,4 | Aramzeme |
| 611-40-20 | P | 11 | As | 6,7 | 5,0 | 300 | 1,1 | 3,5 | Ganības |
| 802-194-22 | E | 13 | Vr | 10,2 | 8,7 | 1040 | 7,4 | 39,2 | Ganības |
| 803-237-35 | E | 12 | Vr | 6,8 | 5,1 | 600 | 2,2 | 7,6 | Aramzeme |

Oglekļa aprīte meža ekosistēmā

| Audze | Valdošā suga | Audzē vecums, gados | Meža tips | D, cm | H, m | Koku skaits, gab. ha ⁻¹ | G, m ² ha ⁻¹ | Krāja, m ³ ha ⁻¹ | Iepriekšējā zemes izmantošana |
|------------|--------------|---------------------|-----------|-------|------|------------------------------------|------------------------------------|--|-------------------------------|
| 808-201-27 | P | 12 | Dm | 9,2 | 6,3 | 1900 | 12,8 | 48,9 | Sētais zālājs |
| 809-213-8 | P | 13 | Dm | 9,0 | 6,5 | 1900 | 12,2 | 48,7 | Krūmājs |
| 809-253-3 | E | 15 | Vr | 10,5 | 8,2 | 1200 | 10,6 | 50,5 | Krūmājs |

Oglekļa uzkrājums izrēķināts, izmantojot individuālu koku biomasas aprēķinu vienādojumus (Liepiņš, Lazdiņš, u.c., 2017; Liepiņš, Liepiņš, u.c., 2021) un Latvijā izstrādātus oglekļa satura koksne datus (Bārdule, Liepiņš, u.c., 2021). Oglekļa uzkrājuma un kopējās biomasas aprēķins katram parauglaukumam parādīts 26. tabulā. Vidējā koku virszemes un pazemes biomasas ir 42,8 tonnas ha⁻¹, vidējais oglekļa uzkrājums koku biomasā – 21,4 tonnas C ha⁻¹, vidējās ikgadējās oglekļa uzkrājuma izmaiņas gada laikā – 1,7 tonnas C ha⁻¹.

Tabula 26. Oglekļa uzkrājums koku biomasā

| Audze | Biomasa, tonnas ha ⁻¹ | Ogleklis, tonnas ha ⁻¹ | Oglekļa uzkrājums, tonnas C ha ⁻¹ gadā |
|------------|----------------------------------|-----------------------------------|---|
| 206-191-51 | 37,8 | 18,9 | 1,6 |
| 206-493-51 | 60,4 | 30,2 | 2,5 |
| 208-144-21 | 36,1 | 18,1 | 1,3 |
| 208-149-9 | 19,8 | 9,9 | 0,8 |
| 208-17-6 | 35,9 | 18,0 | 1,4 |
| 208-8-17 | 0,8 | 0,4 | 0,0 |
| 208-8-19 | 113,5 | 56,8 | 4,1 |
| 209-164-10 | 83,9 | 42,0 | 3,0 |
| 209-165-17 | 34,6 | 17,3 | 1,3 |
| 503-379-14 | 11,5 | 5,8 | 0,4 |
| 503-431-1 | 12,4 | 6,2 | 0,5 |
| 503-530-27 | 57,9 | 29,0 | 2,4 |
| 506-92-34 | 48,4 | 24,2 | 2,0 |
| 507-324-40 | 59,4 | 29,7 | 2,3 |
| 508-220-22 | 62,2 | 31,1 | 2,6 |
| 508-455-2 | 35,6 | 17,8 | 1,4 |
| 605-169-51 | 3,0 | 1,5 | 0,1 |
| 605-201-51 | 43,5 | 21,7 | 1,8 |
| 607-113-51 | 29,5 | 14,7 | 1,2 |
| 607-152-4 | 164,2 | 82,1 | 6,3 |

Oglekļa aprite meža ekosistēmā

| Audze | Biomasa, tonnas ha ⁻¹ | Ogleklis, tonnas ha ⁻¹ | Oglekļa uzkrājums, tonnas C ha ⁻¹ gadā |
|------------|----------------------------------|-----------------------------------|---|
| 608-227-27 | 4,1 | 2,1 | 0,2 |
| 611-40-20 | 3,7 | 1,9 | 0,2 |
| 802-194-22 | 37,7 | 18,9 | 1,5 |
| 803-237-35 | 9,5 | 4,8 | 0,4 |
| 808-201-27 | 50,7 | 25,3 | 2,1 |
| 809-213-8 | 48,2 | 24,1 | 1,9 |
| 809-253-3 | 51,9 | 26,0 | 1,7 |

Būtiski lielāka krāja, biomasa un oglekļa uzkrājums kokaugos ir damaksnī (Dm) ierīkotajos parauglaukumos, lai gan, ņemot vērā lielo nenoteiktību, oglekļa uzkrājuma ikgadējo izmaiņu atšķirības nav statistiski būtiskas. Vidējās ikgadējās oglekļa uzkrājuma izmaiņas atbilst $1,67 \pm 0,26$ tonnām C ha⁻¹ (27. tabula).

Tabula 27. Biomases un oglekļa uzkrājums meža tipu griezumā¹²

| Meža tips | Krāja, m ³ ha ⁻¹ | Biomasa, tonnas ha ⁻¹ | Ogleklis, tonnas ha ⁻¹ | Oglekļa uzkrājums, tonnas C ha ⁻¹ gadā |
|-----------|--|----------------------------------|-----------------------------------|---|
| As | 31,83 ± 28,34 | 30,58 ± 26,67 | 15,29 ± 13,33 | 1,11 ± 0,94 |
| Dm | 64,86 ± 15,37 | 64,67 ± 14,67 | 32,33 ± 7,33 | 2,57 ± 0,56 |
| Vr | 35,14 ± 8,04 | 34,2 ± 6,89 | 17,1 ± 3,45 | 1,32 ± 0,25 |
| Vidēji | 43,58 ± 7,43 | 42,83 ± 6,87 | 21,41 ± 3,44 | 1,67 ± 0,26 |

Valdošo sugu griezumā lielāks oglekļa uzkrājums un tā pieaugums ir priedes audzēs (28. tabula), un tas korelē ar izdzīvojušo koku skaitu. Bērza parauglaukumos oglekļa uzkrājuma pieaugums koku biomasā nav būtiski mazāks nekā priedes parauglaukumos, bet egles parauglaukumos tas ir būtiski mazāks nekā bērza un priedes parauglaukumos. Vidējais koku vecums visos parauglaukumos saskaņā ar Meža valsts reģistra datiem ir 13 gadi, vidējais koku skaits priedes audzēs ir par 200 gab. ha⁻¹ lielāks. Priedes parauglaukumos ir salīdzinoši lielāks caurmērs, kas kopā ar lielāku koku skaitu nodrošina lielāku šķērslaukumu un augošo koku krāju (29. tabula).

Tabula 28. Biomases un oglekļa uzkrājums valdošo sugu griezumā

| Valdošā suga | Krāja, m ³ ha ⁻¹ | Biomasa, tonnas ha ⁻¹ | Ogleklis, tonnas ha ⁻¹ | Oglekļa uzkrājums, tonnas C ha ⁻¹ gadā |
|--------------|--|----------------------------------|-----------------------------------|---|
| B | 50,17 ± 12,52 | 44,35 ± 10,62 | 22,17 ± 5,31 | 1,76 ± 0,39 |
| E | 24,47 ± 5,84 | 27,56 ± 6,17 | 13,78 ± 3,09 | 1,05 ± 0,23 |
| P | 56,09 ± 16,62 | 56,57 ± 16,02 | 28,29 ± 8,01 | 2,19 ± 0,61 |

¹² Nenoteiktība izteikta kā vidējā aritmētiskā standartklūda.

Tabula 29. Vidējais koku caurmērs, augstums un šķērslaukums

| | Koku skaits, gab. ha ⁻¹ | D, cm | H, m | G, m ² ha ⁻¹ |
|--------|------------------------------------|--------------|--------------|------------------------------------|
| B | 1240 ± 154,7 | 9,47 ± 1 | 10,38 ± 0,96 | 8,59 ± 1,77 |
| E | 1206,67 ± 334,12 | 7,6 ± 0,91 | 5,8 ± 0,65 | 5,86 ± 1,26 |
| P | 1475,56 ± 329,12 | 10,11 ± 0,78 | 6,64 ± 0,49 | 13,12 ± 3,54 |
| Vidēji | 1307,41 ± 159,89 | 9,06 ± 0,54 | 7,6 ± 0,56 | 9,19 ± 1,45 |

Augsnes ķīmisko īpašību rezultāti, pārrēķinot uz masas un tilpuma mērvienībām, apkopoti 30. tabulā. Vidējais oglekļa uzkrājums augsnē līdz 40 cm dziļumā ir 64 tonnas ha⁻¹, C/N attiecība ir vidēji 12,7. Aprēķinā nav iekļautas organiskās augsnes, kur oglekļa uzkrājuma izmaiņas jāvērtē, salīdzinot kūdras slāņa biezumu, oglekļa saturu, augsnes blīvumu un zemes virsmas izmaiņas. Trīs parauglaukumi ir nepietiekošs atkārtojumu skaits, lai veiktu šādu analīzi.

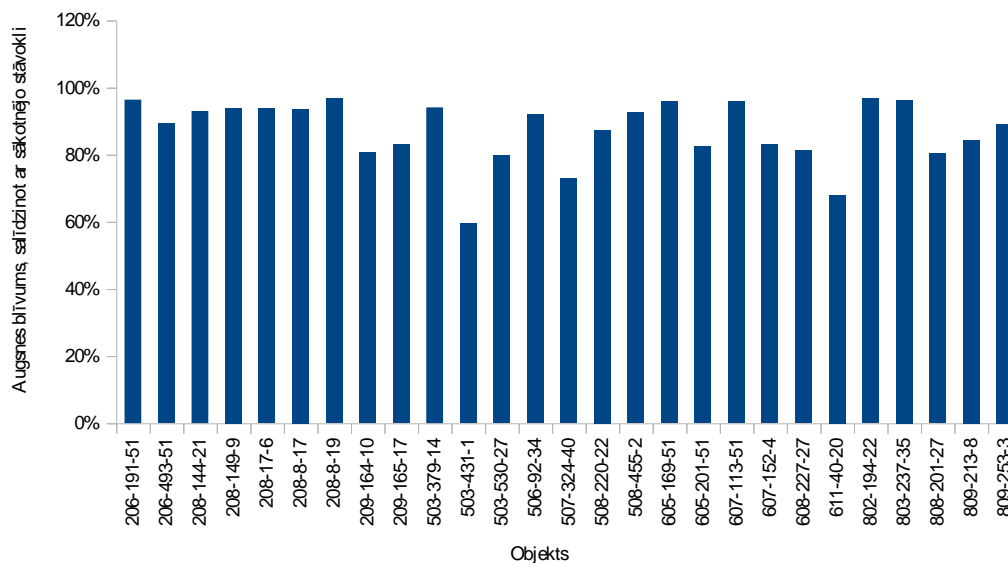
Tabula 30. Augsnes ķīmiskās īpašības 0-40 cm dziļā augsnes slānī

| Kods | Augsnes blīvums, kg m ⁻³ | Ckarb., g kg ⁻¹ | Corg., g kg ⁻¹ | Ckop., g kg ⁻¹ | pHKCl | Nkop., g kg ⁻¹ | C/N | Augsne, tonnas ha ⁻¹ | Ckarb., tonnas ha ⁻¹ | Corg., tonnas ha ⁻¹ | N, tonnas ha ⁻¹ |
|------------|-------------------------------------|----------------------------|---------------------------|---------------------------|-------|---------------------------|-------|---------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|----------------------------|
| 206-191-51 | 144 | 0,00 | 580,19 | 580,19 | 2,47 | 16,15 | 35,93 | 578 | 0,00 | 335,12 | 9,33 |
| 206-493-51 | 1453 | 0,00 | 10,48 | 10,48 | 5,36 | 0,84 | 12,50 | 5814 | 0,00 | 60,95 | 4,88 |
| 208-144-21 | 1359 | 0,00 | 13,12 | 13,12 | 4,66 | 1,09 | 12,01 | 5436 | 0,00 | 71,33 | 5,94 |
| 208-149-9 | 1043 | 0,00 | 29,71 | 29,71 | 4,16 | 2,25 | 13,23 | 4173 | 0,00 | 123,98 | 9,37 |
| 208-17-6 | 1429 | 0,00 | 10,54 | 10,54 | 4,17 | 0,93 | 11,39 | 5718 | 0,00 | 60,25 | 5,29 |
| 208-8-17 | 1317 | 0,00 | 11,45 | 11,45 | 4,69 | 1,20 | 9,52 | 5268 | 0,00 | 60,30 | 6,34 |
| 208-8-19 | 1429 | 0,00 | 8,49 | 8,49 | 3,89 | 0,74 | 11,53 | 5716 | 0,00 | 48,55 | 4,21 |
| 209-164-10 | 1265 | 0,00 | 14,87 | 14,87 | 5,03 | 0,99 | 14,96 | 5059 | 0,00 | 75,21 | 5,03 |
| 209-165-17 | 1210 | 0,00 | 17,95 | 17,95 | 4,92 | 1,12 | 16,07 | 4842 | 0,00 | 86,92 | 5,41 |
| 503-379-14 | 1335 | 0,00 | 9,16 | 9,16 | 4,66 | 0,74 | 12,37 | 5340 | 0,00 | 48,89 | 3,95 |
| 503-431-1 | 162 | 0,00 | 525,47 | 525,47 | 5,34 | 34,07 | 15,42 | 648 | 0,00 | 340,53 | 22,08 |
| 503-530-27 | 1081 | 0,02 | 21,33 | 21,36 | 6,64 | 1,52 | 14,08 | 4323 | 0,10 | 92,21 | 6,55 |
| 506-92-34 | 1430 | 0,00 | 9,03 | 9,03 | 5,71 | 0,83 | 10,82 | 5719 | 0,00 | 51,64 | 4,77 |
| 507-324-40 | 1080 | 0,00 | 13,53 | 13,53 | 6,46 | 1,07 | 12,60 | 4322 | 0,00 | 58,46 | 4,64 |
| 508-220-22 | 1339 | 0,00 | 7,20 | 7,20 | 4,59 | 0,62 | 11,64 | 5354 | 0,00 | 38,56 | 3,31 |
| 508-455-2 | 1315 | 0,00 | 9,42 | 9,42 | 4,31 | 0,87 | 10,85 | 5262 | 0,00 | 49,58 | 4,57 |

Oglekļa aprite meža ekosistēmā

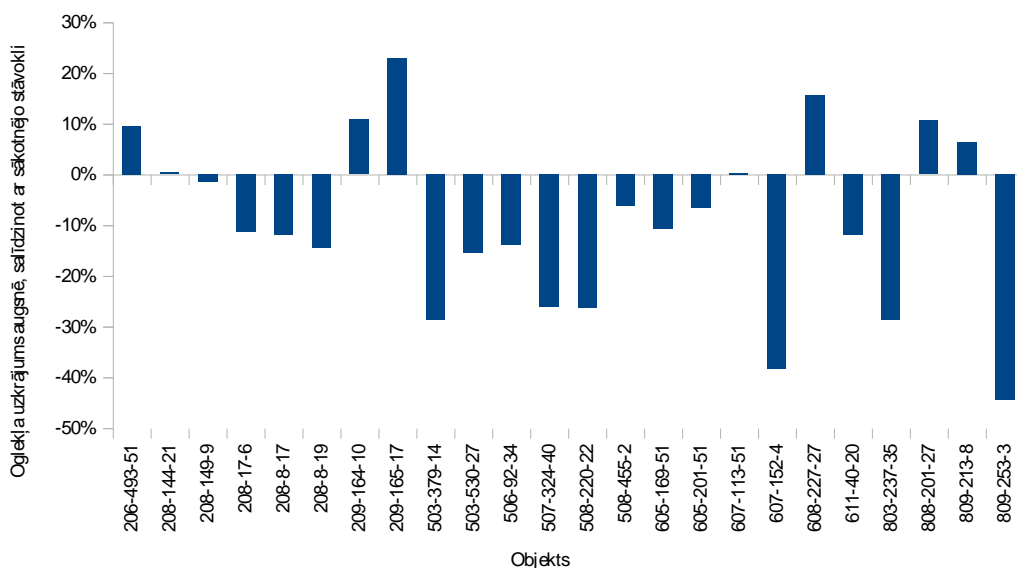
| Kods | Augsnes blīvums, kg m ⁻³ | Ckarb., g kg ⁻¹ | Corg., g kg ⁻¹ | Ckop., g kg ⁻¹ | pHKCl | Nkop., g kg ⁻¹ | C/N | Augsne, tonnas ha ⁻¹ | Ckarb., tonnas ha ⁻¹ | Corg., tonnas ha ⁻¹ | N, tonnas ha ⁻¹ |
|------------|-------------------------------------|----------------------------|---------------------------|---------------------------|-------|---------------------------|-------|---------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|----------------------------|
| 605-169-51 | 1427 | 0,26 | 14,79 | 15,04 | 5,78 | 0,87 | 16,91 | 5709 | 1,47 | 84,42 | 4,99 |
| 605-201-51 | 1339 | 0,00 | 9,59 | 9,59 | 5,36 | 0,90 | 10,67 | 5355 | 0,00 | 51,36 | 4,81 |
| 607-113-51 | 1501 | 0,00 | 10,45 | 10,45 | 6,32 | 1,03 | 10,18 | 6002 | 0,00 | 62,72 | 6,16 |
| 607-152-4 | 1230 | 0,00 | 7,29 | 7,29 | 5,98 | 0,64 | 11,38 | 4922 | 0,00 | 35,88 | 3,15 |
| 608-227-27 | 1288 | 0,01 | 12,50 | 12,51 | 7,11 | 0,87 | 14,29 | 5154 | 0,04 | 64,42 | 4,51 |
| 611-40-20 | 971 | 0,18 | 29,96 | 30,15 | 7,49 | 1,71 | 17,54 | 3883 | 0,71 | 116,33 | 6,63 |
| 802-194-22 | 914 | 0,00 | 32,16 | 32,16 | 5,57 | 2,43 | 13,23 | 3656 | 0,00 | 117,58 | 8,89 |
| 803-237-35 | 1322 | 0,00 | 10,11 | 10,11 | 4,79 | 1,02 | 9,87 | 5290 | 0,00 | 53,48 | 5,42 |
| 808-201-27 | 1272 | 0,00 | 11,13 | 11,13 | 4,48 | 0,85 | 13,15 | 5087 | 0,00 | 56,60 | 4,30 |
| 809-213-8 | 1380 | 0,00 | 8,84 | 8,84 | 4,86 | 0,55 | 15,99 | 5522 | 0,00 | 48,80 | 3,05 |
| 809-253-3 | 1294 | 0,00 | 5,82 | 5,82 | 3,88 | 0,50 | 11,62 | 5177 | 0,00 | 30,12 | 2,59 |

Apmežotajās platībās ir būtiski samazinājies augsnes virskārtas blīvums (vidēji par 12%, salīdzinot ar 2012. gadu, 34. attēls). Augsnes blīvuma samazināšanās saistīta ar augsnes aerācijas uzlabošanu un, iespējams, tāpēc augsnē konstatēta arī oglekļa uzkrājuma samazināšanās lielākajā daļā parauglaukumu (35. attēls).



Attēls 34. Blīvuma izmaiņas 0-40 cm dziļā augsnes slānī.

Oglekļa aprīte meža ekosistēmā



Attēls 35. Oglekļa uzkrājuma atšķirības 0-40 cm augsnes slānī.

Augsnes īpašību un to izmaiņu kopsavilkums meža tipu griezumā dots 31. tabulā, bet valdošo sugu griezumā - 32. tabulā. Meža sugu griezumā no analīzes ir izslēgtas organiskās augsnes āreņos. Kopumā visās augsnēs oglekļa uzkrājuma izmaiņas nav būtiskas – nenoteiktība ir lielāka par izmaiņām, bet minerālaugsnēs oglekļa saturs augsnē ir būtiski samazinājies (vidēji par $4,3 \pm 1,9$ tonnām ha^{-1}). Oglekļa uzkrājuma samazinājums konstatēts bērza un egles audzēs, bet ne priedes audzēs, kur nav notikušas būtiskas izmaiņas. Pie līdzīgiem secinājumiem par augsnes oglekļa uzkrājuma izmaiņām neilgi pēc apmežošanas nonākuši arī citi pētnieki, piemēram, Ahirwal u.c. (2021), Korkanç (2014) un Zhou u.c. (2022), konstatējot, ka īstermiņā oglekļa uzkrājums augsnē paliek nemainīgs vai samazinās, bet augsnes porozitāte (rādītājs, kas pretējs blīvumam) un ūdens saistīšanas spēja pieaug, radot labvēlīgākus apstākļus mikrobioloģiskajiem procesiem. Šie paši autori un arī Latvijā veiktu pētījumu rezultāti (Nikodemus u.c., 2020) apliecina, ka ilgtermiņā augsnes oglekļa uzkrājums apmežotajās platībās pieaug, it īpaši dziļākajos augsnes slāņos.

Tabula 31. Atsevišķu augsnes rādītāju kopsavilkums meža tipu griezumā

| Meža tips | Augsnes blīvums, $kg\ m^{-3}$ | pHKCl | C/N | Corg., $tonnas\ ha^{-1}$ | N, $tonnas\ ha^{-1}$ | Blīvuma izmaiņas | Corg. pieaugums, $tonnas\ ha^{-1}$ |
|-----------|-------------------------------|---------------|----------------|--------------------------|----------------------|------------------|------------------------------------|
| As | 1175 ± 102 | $6,5 \pm 0,8$ | $15,6 \pm 1$ | $85,3 \pm 15,8$ | $5,4 \pm 0,6$ | $77\% \pm 4\%$ | $1,5 \pm 7,7$ |
| Dm | 1139 ± 148 | $4,9 \pm 0,4$ | $16,2 \pm 2,9$ | $90,2 \pm 35,4$ | $4,8 \pm 0,7$ | $85\% \pm 2\%$ | $0,9 \pm 4,5$ |
| Vr | 1231 ± 82 | $5 \pm 0,2$ | $12,1 \pm 0,5$ | $84,2 \pm 18,3$ | $6,6 \pm 1,1$ | $90\% \pm 2\%$ | $-0,7 \pm 4,8$ |
| Vidēji | 1197 ± 65 | $5,1 \pm 0,2$ | $13,7 \pm 1$ | $86,1 \pm 14,7$ | $5,9 \pm 0,7$ | $87\% \pm 2\%$ | $0,0 \pm 3,2$ |

Tabula 32. Atsevišķu augsnes rādītāju kopsavilkums valdošo sugu griezumā, neskaitot kūdras augsnes

| Valdošā suga | Augsnes blīvums, $kg\ m^{-3}$ | pHKCl | C/N | Corg., $tonnas\ ha^{-1}$ | N, $tonnas\ ha^{-1}$ | Blīvuma izmaiņas | Corg. pieaugums, $tonnas\ ha^{-1}$ |
|--------------|-------------------------------|---------------|----------------|--------------------------|----------------------|------------------|------------------------------------|
| B | 1282 ± 59 | $4,8 \pm 0,4$ | $12,1 \pm 0,5$ | $64,8 \pm 11,8$ | $5,2 \pm 0,8$ | $91\% \pm 2\%$ | $-8,2 \pm 1,9$ |

Oglekļa aprite meža ekosistēmā

| Valdošā suga | Augsnes blīvums, kg m ⁻³ | pHKCl | C/N | Corg., tonnas ha ⁻¹ | N, tonnas ha ⁻¹ | Blīvuma izmaiņas | Corg. pieaugums, tonnas ha ⁻¹ |
|--------------|-------------------------------------|-----------|------------|--------------------------------|----------------------------|------------------|--|
| E | 1374 ± 25 | 5 ± 0,3 | 11,5 ± 0,8 | 59,2 ± 5,6 | 5,2 ± 0,4 | 92% ± 2% | -6,8 ± 2 |
| P | 1239 ± 48 | 5,7 ± 0,4 | 14,3 ± 0,7 | 67,1 ± 7,8 | 4,6 ± 0,4 | 80% ± 2% | 1,1 ± 4,2 |
| Vidēji | 1296 ± 28 | 5,2 ± 0,2 | 12,7 ± 0,5 | 63,8 ± 4,7 | 5 ± 0,3 | 87% ± 2% | -4,3 ± 1,9 |

Meža tipu griezumā vidējās oglekļa uzkrājuma izmaiņas koku biomasā un augsnē pirmajos 12-15 gados atbilst vidēji 1,67 ± 0,34 tonnām C ha⁻¹ gadā, kas atbilst 6,12 tonnām CO₂ ha⁻¹ gadā (33. tabula). Lielākais oglekļa uzkrājuma pieaugums konstatēts damaksnī (Dm), šaurlapju ārenī (As) un vērī (Vr) oglekļa uzkrājuma pieaugums ir būtiski mazāks.

Tabula 33. Kopējās oglekļa uzkrājuma izmaiņas koku biomasā un augsnē meža tipu griezumā

| Meža tips | Kopējais ogleklis biomasā, tonnas C ha ⁻¹ | Corg. pieaugums augsnē, tonnas ha ⁻¹ | Kopējais Corg. pieaugums, tonnas ha ⁻¹ | Ikgadējās oglekļa uzkrājuma izmaiņas, tonnas ha ⁻¹ |
|-----------|--|---|---|---|
| As | 15,29 ± 13,33 | 1,48 ± 7,65 | 16,77 ± 18,06 | 1,17 ± 1,35 |
| Dm | 32,33 ± 7,33 | 0,91 ± 4,49 | 33,24 ± 5,68 | 2,65 ± 0,43 |
| Vr | 17,1 ± 3,45 | -0,65 ± 4,84 | 16,45 ± 5,74 | 1,27 ± 0,44 |
| Vidēji | 21,41 ± 3,44 | 0,05 ± 3,18 | 21,46 ± 4,34 | 1,67 ± 0,34 |

Valdošo sugu griezumā lielākais oglekļa uzkrājuma pieaugums konstatēts priedes audzēs (8,32 tonnas CO₂ ha⁻¹ gadā) un salīdzinoši vismazākais – egles audzēs (3,92 tonnas CO₂ ha⁻¹ gadā). Atšķirība ir būtiska. Bērza audzēs oglekļa uzkrājuma izmaiņu aprēķina rezultātus būtiski ietekmē oglekļa uzkrājuma samazinājums augsnē (34. tabula).

Tabula 34. Kopējās oglekļa uzkrājuma izmaiņas koku biomasā un augsnē valdošo koku sugu griezumā

| Valdošā koku suga | Kopējais ogleklis biomasā, tonnas C ha ⁻¹ | Corg. pieaugums augsnē, tonnas ha ⁻¹ | Kopējais Corg. pieaugums, tonnas ha ⁻¹ | Ikgadējās oglekļa uzkrājuma izmaiņas, tonnas ha ⁻¹ |
|-------------------|--|---|---|---|
| B | 22,17 ± 5,31 | -1,38 ± 5,10 | 20,79 ± 5,76 | 1,66 ± 0,44 |
| E | 13,78 ± 3,09 | 0,38 ± 7,43 | 14,15 ± 8,74 | 1,07 ± 0,68 |
| P | 28,29 ± 8,01 | 1,15 ± 4,16 | 29,43 ± 7,72 | 2,27 ± 0,60 |

Izplatītākie augsnes tipi izpētes objektos ir Duric podzols, Eutric podzoluvisols un Mollic/Eutric gleysols (attiecīgi, tipisks podzols, velēnu podzolaugsne un velēnglejotā augsne

atbilstoši Latvijas augsnes klasifikācijai). Vislielākais oglekļa uzkrājuma pieaugums konstatēts tipiskās podzolaugsnēs ieadzētās mežaudzēs (8,14 tonnas CO₂ ha⁻¹ gadā, 35. tabula). Arī pārējās augsnēs konstatēts būtisks CO₂ piesaistes palielinājums.

Tabula 35. Kopējās oglekļa uzkrājuma izmaiņas koku biomasā un augsnē tītāko augsnes tipu griezumā

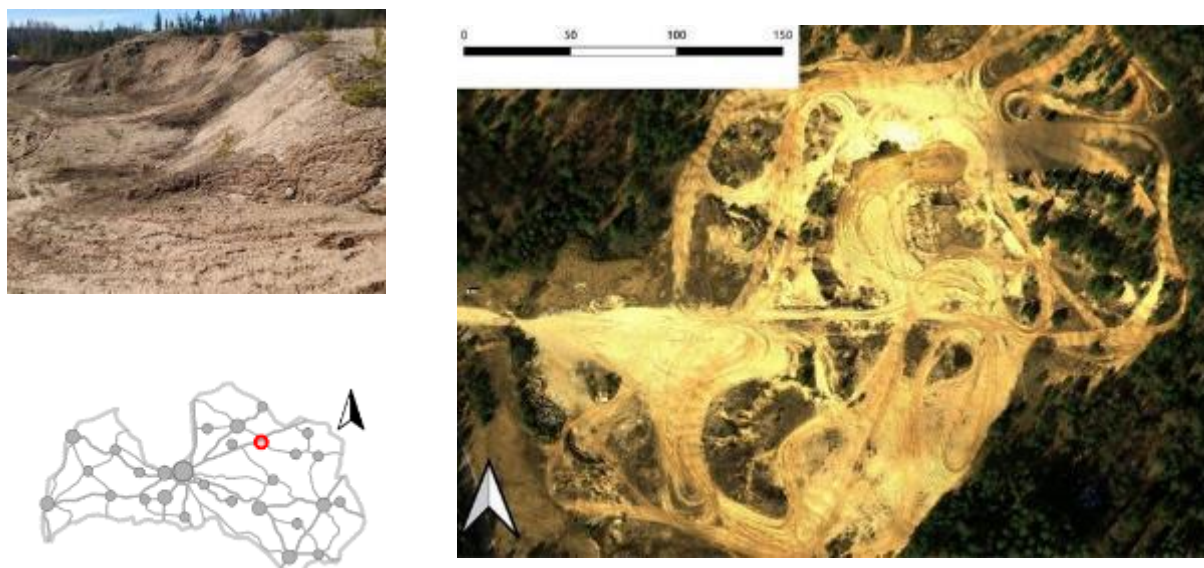
| Augsnes tips atbilstoši WRB klasifikācijai | Kopējais ogleklis biomasā, tonnas C ha ⁻¹ | Corg. pieaugums augsnē, tonnas ha ⁻¹ | Kopējais Corg. pieaugums, tonnas ha ⁻¹ | Ikgadējās oglekļa uzkrājuma izmaiņas, tonnas ha ⁻¹ |
|--|--|---|---|---|
| Duric podzols | 27,83 ± 2,91 | 0,9 ± 4,46 | 28,73 ± 4,98 | 2,22 ± 0,37 |
| Eutric podzoluvisols | 21,35 ± 6,54 | -7,21 ± 1,52 | 14,14 ± 6,39 | 1,07 ± 0,49 |
| Mollic/Eutric gleysols | 15,06 ± 10,29 | -4,68 ± 10,7 | 10,38 ± 20,99 | 0,87 ± 1,75 |

Pētījuma rezultāti apstiprina to, ka apmežotās platības ir būtisks CO₂ piesaistes avots, neskatoties uz to, ka augsnē oglekļa uzkrājums var pat samazināties. Lielākais oglekļa uzkrājuma palielinājums ir nabadzīgās minerālaugsnēs (tipisks podzols), kas apmežotas ar priedi. Šādu platību apmežošana var sniegt būtisku ieguldījumu klimata pārmaiņu mazināšanas mērķu sasniegšanā (saskaņā ar augšņu kartēšanas datiem tipiski podzoli ir 206 tūkst. ha lauksaimniecībā izmantojamo zemju), nodrošinot 12-15 gadu laikā pēc apmežošanas vidēji 1,68 milj. tonnas CO₂ piesaisti katru gadu, pilnībā kompensējot lauksaimniecības sektora emisijas.

5.1.2. Oglekļa aprites monitoringa objektu ierīkošana minerālaugšņu apmežojumos

Uzsākot pētījumu, plānojam sadarbībā ar LVM no jauna apmežojamās platībās ierīkot 4 saimnieciski nozīmīgāko koku (P, E, B, Ma) sugu mozaīkveida stādījumus ar dažādu koku blīvumu (2000 – kontrole, 1500, 1000, 500 koki uz ha), tajā skaitā 2022.-2023. gadā veikt platību izvēli atbilstoši LVM apmežošanai pieejamajām platībām, raksturot augsnes īpašības, marķēt parauglaukumu robežas, un, saskaņojot darba metodiku ar LVM, uzsākt platību ierīkošanu, paredzot, ka visi demonstrējumu objekti ir ierīkoti līdz 2024. gada beigām. Tomēr 2022. gadā radās iespēja ierīkot mozaīkveida stādījumu MPS Mežoles mežu novadā rekultivējamā karjerā, tāpēc esam uzsākuši stādījuma plānošanu šajā objektā. Tas ļaus būtiski palielināt pētījuma apjomu, nepalielinot izmaksas. Izpētes objektus LVM plānosim pēc šī izmēģinājuma ierīkošanas, ierīkojot LVM apsaimniekotajās platībās iztrūkstošos izpētes objektus.

Stādījuma ierīkošanai sadarbībā ar MPS turpinās karjera rekultivācijas plāna izstrāde. Paredzamais izpildes termiņš 2023. gada pavasaris. Stādījuma ierīkošanas vieta apsekota 2022. gada aprīlī. Teritorijas apsekošana ar bezpilota lidaparātu, veicot lāzerskenēšanu, veikta 2022. gada maijā (36. attēls).



Attēls 36. Karjera atrašanās vieta (X: 617606, Y: 355881) un karjera kopskats.

Esošais reljefs ļauj ierīkot izmēģinājuma stādījumus Neldera apļu dizainā (Parrott u.c., 2012), tā ir metode koku augšanas dažādos attālumos izpētei. Jo tālāk no apļa centra, jo lielāks attālums starp kokiem un mazāka savstarpēja konkurence. Stādot apļveidā, ilgākā laika periodā varēs novērot, kā savstarpējais attālums ietekmē vienas vai vairāku sugu mistrojuma stādīto koku augšanu un veģetācijas veidošanos zem tiem.

Papildus stādījuma attāluma ietekmes pētījumiem plānots veikt kokapstrādes atlikumu un koksnes pelnu pielietošanu augsnes ielabošanai – nodrošinot kokaugiem nepieciešamo organisko un minerālvielu ienesi augsnē. Ielabotajās teritorijas daļās stādīs egli, bērzu, melnalksni un priedi attālumos, kas atbilst plantāciju mežu ierīkošanai – 1000 priedes un 800 koki uz ha pārējām koku sugām. Koksnes pelnus var piegādāt no STORA ENSO LATVIJA, kur pieejami gan mizu un koksnes pelni, gan daļēji sadalījušās skuju koku mizas, kas satur gan augu barošanās elementus, gan nodrošina organiskās vielas. Organisko vielu ienese ļaus modelēt augsnes oglekļa apriti pie atšķirīga sākotnējā oglekļa uzkrājuma. Koksnes pelni satur 22% kalcija un 2% magnija, tiem ir augsts neitralizācijas skaitlis, izteikts kā CaCO₃ no sausas masas – 97%.

Pirms koku stādīšanas augsnes virskārtu frēzēs vienlaidus vai joslās. Augsnes sagatavošanu veiks, lai nodrošinātu stādiem vienādus augšanas apstākļus kā apļos, tā ielabotajā teritorijas daļā, pirms koku stādīšanas. 2022. gada vasarā ievākti augsnes paraugi, lai noteiktu pH reakciju, elektrovadītspēju, augsnes ūdens saturspēju un caurlaidību, makroelementu N, P, K saturu un C/N attiecību. Līdz 2022. gada beigām pabeigta barības vielu analīzes.

Stādīšanas attālumi stādījumā izvēlēti atbilstoši spēkā esošajam regulējumam noteikto minimālo koku skaitu atbilstoši mežaudzes un plantāciju mežu statusam (36. tabula) un divtik nekā minimālais.

Tabula 36. Ministru kabineta noteikumos Nr. 308 "Meža atjaunošanas, meža ieaudzēšanas un plantāciju meža noteikumi" noteiktais koku skaits atbilstoši 2022.gada 21. jūnija veiktajiem grozījumiem¹³

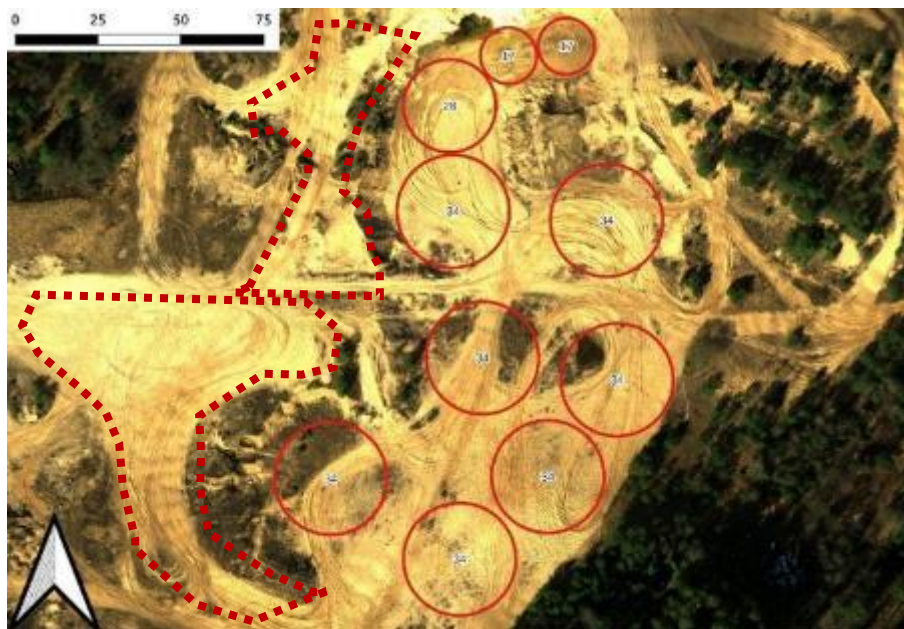
| Mežaudze: | Plantāciju mežs |
|---|--|
| 15. Mežaudzi uzskata par ieaudzētu, ja tā atbilst šādiem kritērijiem: | 27. Ieaudzēto mežaudzi reģistrē par plantāciju mežu, ja tā atbilst šādiem kritērijiem: |

¹³ Ministru kabineta 2012. gada 2. maija noteikumi Nr. 308 "Meža atjaunošanas, meža ieaudzēšanas un plantāciju

Oglekļa aprite meža ekosistēmā

| Mežaudze: | Plantāciju mežs |
|--|--|
| 15.1. minimālais ieadzētās mežaudzes koku augstums skuju kokiem ir 0,10 metru, lapu kokiem – 0,20 metru; 15.2. ieadzētajā platībā minimālais nepieciešamais kopējais ieaugušo koku skaits atkarībā no valdošās koku sugas ir: 15.2.1. priedei – 2000 koku uz hektāru; 15.2.2. pārējām šo noteikumu 1. pielikumā minētajām koku sugām – 1500 koku uz hektāru. (Grozīts ar MK 21.06.2022. noteikumiem Nr. 375) | 27.1. ieadzētā koku suga vai sugas atbilst plantāciju meža audzēšanas mērķim; 27.2. minimālais ieadzētās mežaudzes koku augstums skuju kokiem ir 0,10 metru, lapu kokiem – 0,20 metru; 27.3. minimāli nepieciešamais kopējais ieaugušo koku skaits atkarībā no valdošās koku sugas ir: 27.3.1. priedei – 1000 koku uz hektāru; 27.3.2. ozolam, osim, vīksnai, gobai, kļavai, dižskabārdim un skābardim – 500 koku uz hektāru; 27.3.3. pārējām koku sugām – 800 koku uz hektāru. |

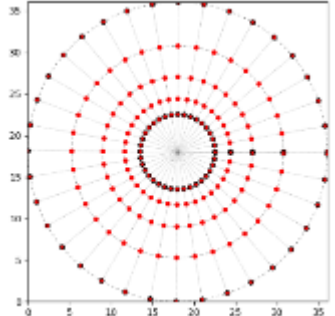
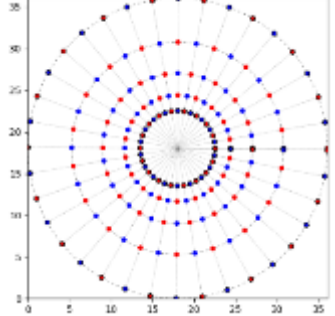
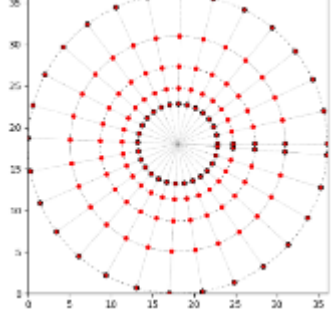
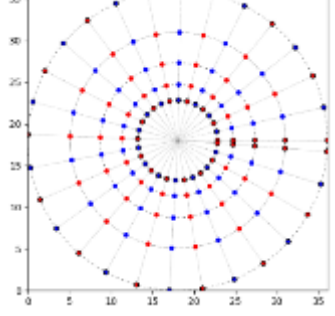
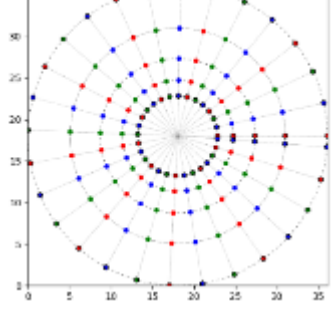
Rekultivējamajā platībā stādīs priedes, egles, baltalkšņa un melnalkšņa stādus, dažādās kombinācijās, apļos ar atbilstošu diametru, kur attālums starp kokiem atbilst 4000/2000/1000 kokiem uz ha (priede un priede /egle) un 3000/1500/800 koki uz ha pārējām sugām un to mistrojumiem (37. attēls).



Attēls 37. Rekultivējamās platība un iespējamais apļu ar koksnes pelniem/mizām ielabojamās daļas izvietojums.

Iecerēts, ka pie mežmalas piekļausies priedes un egles un abu koku sugu mistroti stādījumi, iepretim tiem, būs egles mistrojums ar bērzu un egles mistrojums ar melnalkšni. Laukumā ap vientuļo bišu mītnes vietni ierīkos egles mistrojumu ar abām lapu koku sugām, abu lapu koku sugu mistrojumu un katras sugas stādījumu (37. tabula).

Tabula 37. Stādījumi plāni apliem ar dažādu attālumu starp stādītajiem kokiem

| Koku izvietojums | Sugas | Parametri |
|---|---|---|
|  | priede | apļu rādiuss/ attālums starp apliem (m): 4,506 6,372 / 2,5 9,011 / 5 12,744/ 10 18,023 |
|  | priede/egle | kopējais laukums – 0,129 ha 185 koki laukumā 35/17 atkārtējumi variantam koki ha 4000 2000 1000 *rectangularity – 0.5 |
|  | egle, bērzs, melnalksnis | |
|  | egle/bērzs, egle/ melnalksnis melnalksnis/bērzs | apļu rādiuss/ attālums starp apliem (m): 4,803 6,684 / 3,33 9,301 / 6,45 12,943 / 12,5 18,012 kopējais laukums – 0,130 ha 145 koki laukumā 27/13/9 atkārtējumi variantam koki ha 3000 1549 800 |
|  | egle/bērzs / melnalksnis | *rectangularity - 0.668 |

Karjerā 0-40 cm dziļumā ievākti augsnes paraugi oglekļa un slāpekļa uzkrājuma un nodrošinājuma ar barības vielām raksturošanai. Vidēji no 1 ha ievāktas 2 paraugu sērijas. Paraugos laboratorijā noteikts pH, oglekļa un slāpekļa saturs, brīvo karbonātu klātbūtne, kā arī slāpekļskābē ekstrahējama slāpekļa un fosfora. Analīžu kopsavilkums dots 38. tabulā. Augsne karjerā nav sablīvēta, pH ir neitrāls un piemērots dažādu koku sugu stādījumiem. Kopējais oglekļa uzkrājums augsnē līdz 40 cm dziļumā ir 64 tonnas ha⁻¹, kas ir aptuveni 2 reizes mazāk nekā vidēji minerālaugsnēs. Visā platībā ir niecīgas fosfora un slāpekļa rezerves, kas var apgrūtināt pret nodrošinājumu ar barības vielām prasīgāko koku sugu ieaudzēšanu.

Tabula 38. Augsnes analīžu rezultātu kopsavilkums apmežojamajā karjerā

| Augsnes slānis | 0 – 10 cm | 10 – 20 cm | 20 – 40 cm |
|---|--------------|--------------|-------------|
| Augsnes blīvums, kg m ⁻³ | 1504 ± 104 | 1653 ± 29 | 1576 ± 18 |
| pH CaCl ₂ | 7,60 ± 0,04 | 7,60 ± 0,05 | 7,59 ± 0,05 |
| C _{kop.} , g kg ⁻¹ | 10,74 ± 1,38 | 10,58 ± 0,73 | 9,75 ± 1,23 |
| N _{kop.} , g kg ⁻¹ | 0,08 ± 0,02 | 0,05 ± 0,01 | 0,02 ± 0,00 |
| HNO ₃ ekstr. P, g kg ⁻¹ | 0,2 ± 0,01 | 0,25 ± 0,02 | 0,24 ± 0,01 |
| HNO ₃ ekstr. K, mg g ⁻¹ | 0,44 ± 0,03 | 0,4 ± 0,04 | 0,4 ± 0,03 |

5.1.3. Gāzu apmaiņas monitorings jaunos meža ieaudzēšanas ietekmes uz SEG emisijām monitoringa objektos meliorētās un nemeliorētās organiskās augsnēs

Sadarbībā ar MPS un LIFE OrgBalt pētījuma īstenotājiem Mežoles mežu novadā ierīkots Ma stādījums 1,8 ha platībā (38. attēls), stādot ietvarstādus uz pacilām, kas sagatavotas ar ekskavatoru, vienlaicīgi ierīkojot dziļvagas liekā ūdens novadīšanai. 2022. gada vasarā šajā platībā uzsākta gāzu apmaiņas mērīšana, lai salīdzinātu SEG emisijas no tehnikas neskartas platības, no pacilām un no bedrēm. LIFE OrgBalt pētījuma ietvaros šajā platībā veikts gāzu apmaiņas monitorings pirms augsnes gatavošanas. Izmēģinājums raksturos SEG emisijas un CO₂ piesaisti renaturalizētos (ar atjaunotu gruntsūdens līmeni) un apmežotos zālajos.



Attēls 38. Ma stādījums Mežoles mežu novadā.

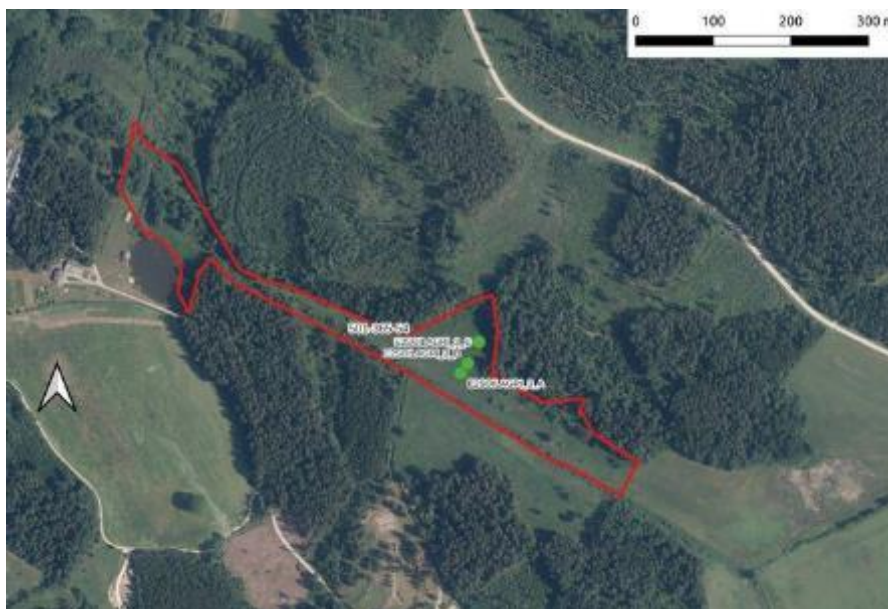
Egles stādīšana uz pacilām meliorētā kūdras augsnē veikta Rucavas mežu novadā (39. attēls). Pētījuma ietvaros ievācām augsnes paraugus un veicām augsnes analīzes visās izmēģinājumu platībās platībās, kā arī uzsākām gāzu apmaiņas monitoringu pēc mežizstrādes, lai raksturotu mežizstrādes, augsnes gatavošanas un dziļvagu ierīkošanas ietekmi uz SEG emisijām no augsnes.



Attēls 39. E stādījums Rucavas mežu novadā.

Pētījuma ietvaros ierīkots arī izmēģinājumu objekts apmežošanas ietekmes uz SEG emisijām raksturošanai organiskās augsnēs. Izmēģinājumu objekts izraudzīts, atlasot LVM apmežojamajās platībās nogabalus ar kūdras augsnēm. Pētījumam izraudzīts 501. kv. apg. 365. kv. 54. nogabals (40. attēls), kas atrodas Ķeguma apkārtnē un kurā pirms tam pētījuma E2SOILAGRI ietvaros veikts gāzu

monitorings, raksturojot SEG emisijas no zālājiem un ganībām ar atšķirīgu kūdras biežumu. Arī šajā nogabalā kūdras biežums ir 10-75 cm, kas ļaus novērtēt apmežošanas, tajā skaitā augsnes sagatavošanas, ietekmi uz SEG emisijām kūdras augsnēs. Pētījuma ietvaros atjaunota gāzu apmaiņas mērīšanas infrastruktūra, ierīkojot 3 parauglaukumus ar 3 gāzu apmaiņas mērījumu punktiem katrā. Visos mērījumu punktos noteiksim augsnes heterotrofo elpošanu un ne-CO₂ SEG emisijas no augsnes, kā arī apmežošanas ietekmi uz zemesaugu augu biomasu.



Attēls 40. Apmežošanas objekts Ķeguma apkārtnē.

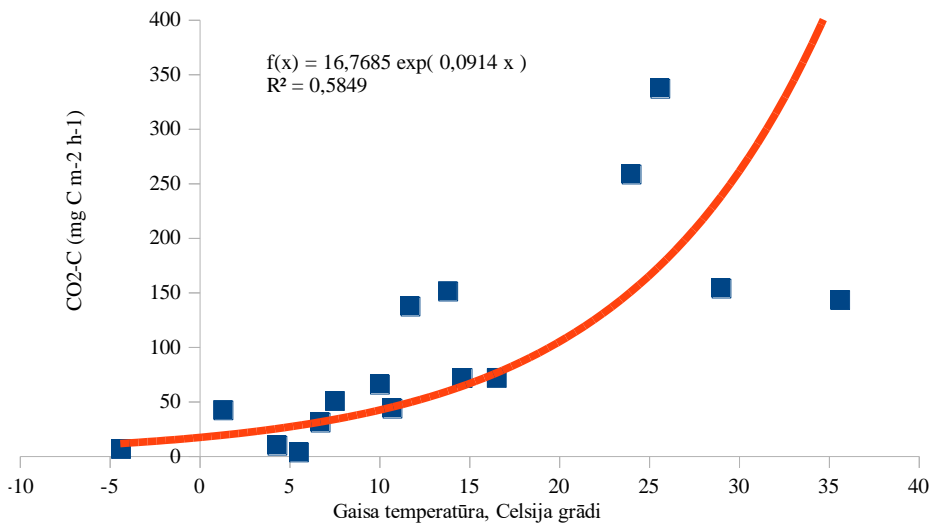
Gāzu apmaiņas mērījumi šajā objektā veikti no 2022. gada jūlija (plus – mērījumi E2SOILAGRI ietvaros no 2021. gada jūlija 12 mēnešu ilgumā). Mērījumus references datu iegūšanai plānots turpināt līdz 2023. gada jūlijam, to ieskaitot, ja augsnes sagatavošana netiks veikta ātrāk. Vidējie no 2022. gada jūlija iegūtie rādītāji visos 3 mērījumu parauglaukumos parādīti 39. tabulā, kur redzams, ka A parauglaukumā, kas atrodas vistuvāk grāvim, CO₂ emisijas ir vislielākās un būtiski atšķiras no pārējiem parauglaukumiem. Augsne ir neliels N₂O emisiju avots, bet tajā neveidojas CH₄ emisijas.

Tabula 39. Vidējie gāzu apmaiņas, tajā skaitā kopējās ekosistēmas CO₂ aprites rādītāji

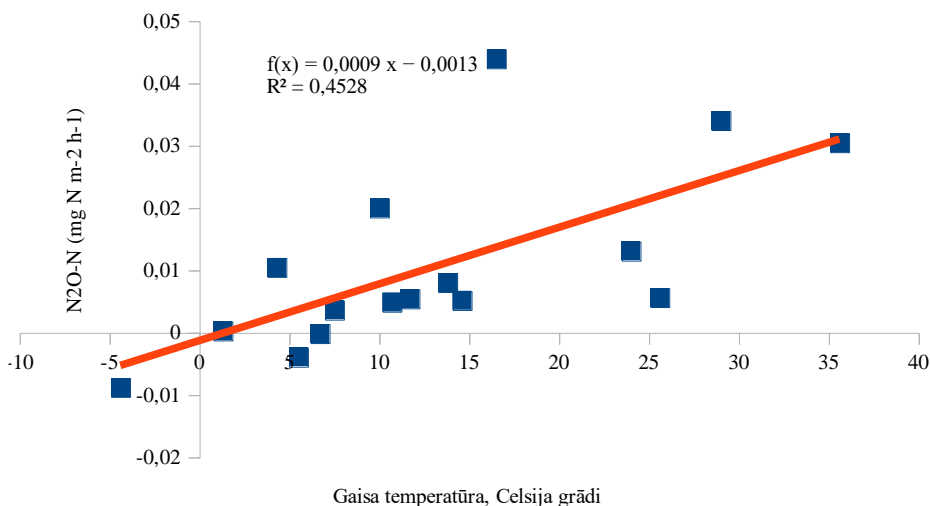
| | CO ₂ -C (mg C m ⁻² h ⁻¹) | N ₂ O-N (mg N m ⁻² h ⁻¹) | CH ₄ -C (mg C m ⁻² h ⁻¹) |
|--------|--|--|--|
| A | 116,99 ± 14,27 | 0,016 ± 0,004 | -0,052 ± 0,006 |
| B | 92,63 ± 12,44 | 0,013 ± 0,002 | -0,053 ± 0,005 |
| C | 88,49 ± 12,5 | 0,002 ± 0,002 | -0,028 ± 0,005 |
| Vidēji | 99,26 ± 7,57 | 0,010 ± 0,002 | -0,044 ± 0,003 |

Sākotnējos datos konstatēta emisiju sakarība ar gaisa temperatūru – pieaugot gaisa temperatūrai, palielinās CO₂ un N₂O emisijas un CH₄ patēriņš (41., 42. un 43. attēls). Gruntsūdens līmeņa izmaiņām konstatēta sakarība ar CO₂ emisijām (44. attēls). Mazāk izteikta sakarība konstatēta N₂O emisijām (45. attēls), bet CH₄ emisijas sāk veidoties tikai tad, ja gruntsūdens līmenis pietuvojas zemes virskārtai vai teritorija applūst (46. attēls).

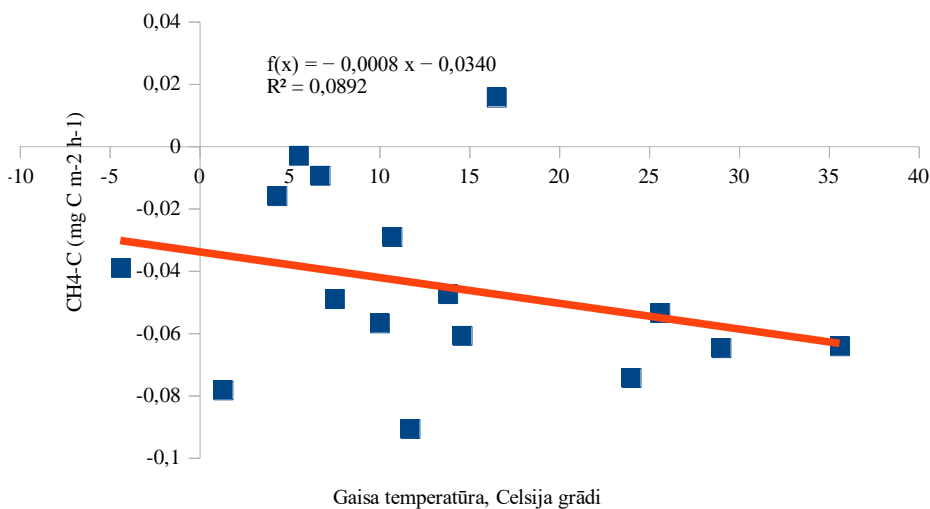
Oglekļa aprite meža ekosistēmā



Attēls 41. Kopējās ekosistēmas CO₂ aprites un gaisa temperatūras sakarība.

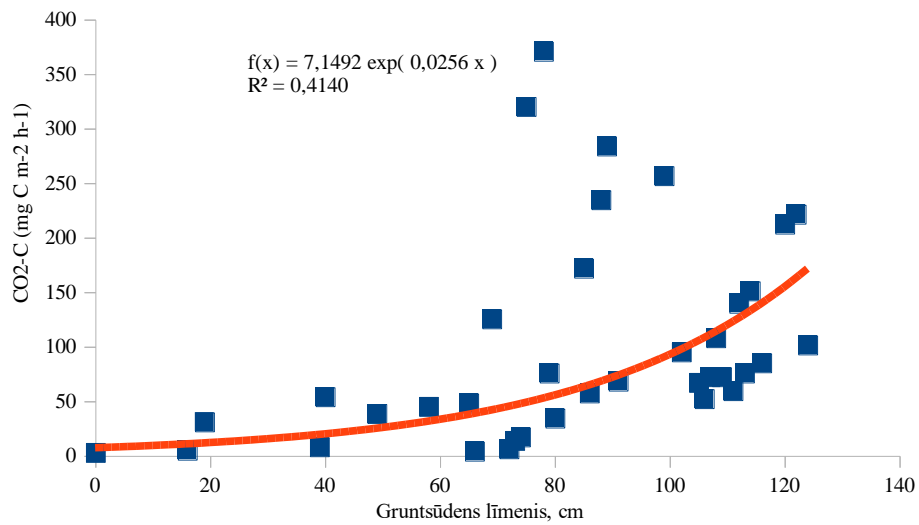


Attēls 42. N₂O emisiju un gaisa temperatūras sakarība.

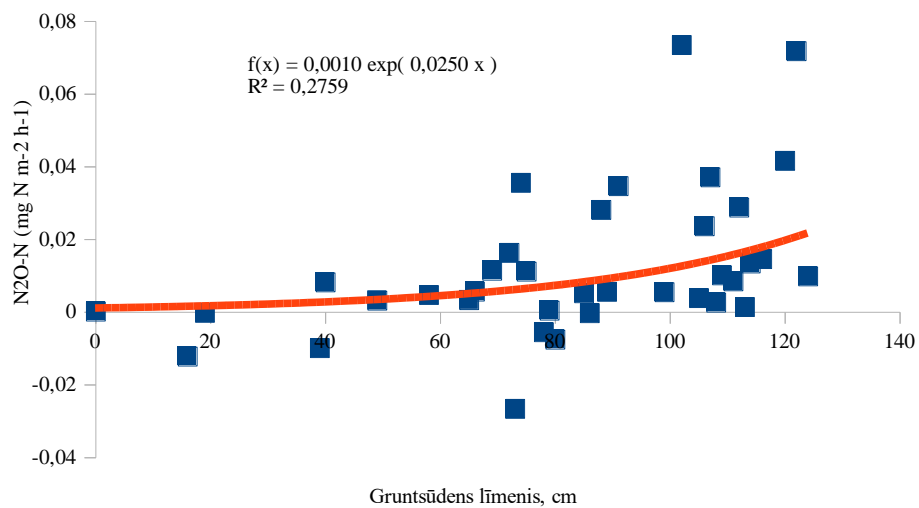


Attēls 43. CH₄ emisiju un gaisa temperatūras sakarība.

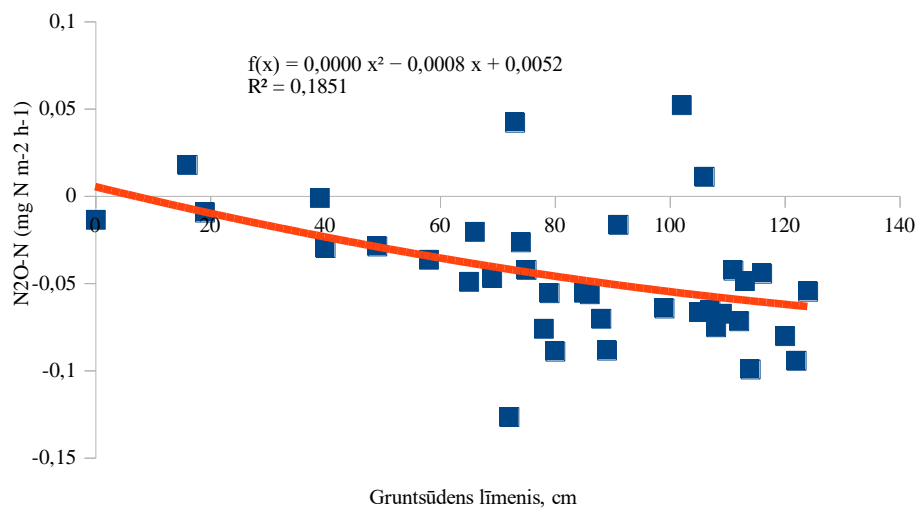
Oglekļa aprite meža ekosistēmā



Attēls 44. Kopējās ekosistēmas CO₂ aprites un gruntsūdens līmeņa sakarība.



Attēls 45. N₂O emisiju un gruntsūdens līmeņa sakarība.



Attēls 46. CH₄ emisiju un gruntsūdens līmeņa sakarība.

2023. gadā ir jāturpina gāzu apmaiņas mērījumi references datu kopas izveidošanai, kā arī jāveic augsnes gatavošana un meža ieaudzēšana, turpinot gāzu apmaiņas mērījumus uz pacilām, bedrēs un neskartajā teritorijā vismaz 2 gadus. Pēc tam emisiju un oglekļa aprites mērījumus lietderīgi atkārtot ik pēc 5 gadiem, iegūstot pilnīgu priekšstatu par apmežošanas ietekmi uz SEG emisijām organiskajās augsnēs ar atšķirīgu kūdras slāņa biežumu. Apmežošanas ilgtermiņa ietekmes novērtēšanai kūdras augsnēs izmantojami LIFE OtgBalt ietvaros iegūtie dati, taču, ņemot vērā lielo gāzu mērījumu datu izkliedi, ir lietderīgi palielināt pētījumu objektu skaitu un iegūt papildus datus par oglekļa ienesi ar zemesaugu atliekām gan meža zemēs, gan apmežotās platībās, jo šobrīd pielietojamie Somijā izstrādātie vienādojumi rada maldīgu priekšstatu par oglekļa apriti pirmajās desmitgadēs pēc meža ieaudzēšanas.

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

Sadarbībā ar MPS izraudzīta buferjoslu stādījumu vieta un uzsākta stādījuma ierīkošana sadarbībā ar MPS. Aizsargjoslu stādījumā izmantojams dizains, kas izstrādāts LIFE OrgBalt pētījuma ietvaros, stādot minerālaugsnēm piemērotu papeles un kārķu klonus. SEG monitorings pirms stādījumu ierīkošanas uzsākts 2022. gada beigās. Stādījuma ierīkošanu sadarbībā ar MPS pabeigsim 2023. gadā, vienlaicīgi ierīkojot agromežsaimniecības stādījumu pārējā platībā. Kokaugu stādījumu plānots ierīkot Meža pētīšanas stacijas Kalsnavas mežu novada 144. kvartāla 4. nogabalā, kas ilgstoši apsaimniekots kā ganības. Kopējā nogabala platība – 5,45 ha (47. attēls). Joslu stādījumu plānots ierīkot gar nogabala R malu, kur atrodas gar nogabala malu uz Vesetu plūstošs grāvis (48. attēls). Pārējā platībā plānots ierīkot dažādus agromežsaimniecības demonstrējumu objektus, ko arī varēs izmantot ietekmes uz SEG emisijām raksturošanai turpmākajos pētījumos. Stādījuma shēma parādīta 49. attēlā.

2022. gadā eksperimentālajā platībā ievākti biomasas paraugi, nosakot oglekļa uzkrājumu zemesaugu virszemes un pazemes biomasā. Paraugi ievākti no 20 x 20 cm laukumiņiem, kas izvietoti 100 x 100 cm kvadrāta stūros. Vien šāds kvadrāts katrā parauglaukumā, kopā 4 parauglaukumi visā platībā. Paraugi ievākti jūlijā, pieņemot, ka šajā periodā zemesaugu biomasā ir sasniegusi maksimumu. Iegūtos datus izmantosim, lai precizētu kokaugu stādījumu ietekmes uz oglekļa uzkrājumu zemesaugu biomasā aprēķinu vienādojumus, aizstājot šobrīd izmantojamos boreālās klimata joslas mežos izstrādātos vienādojumus.

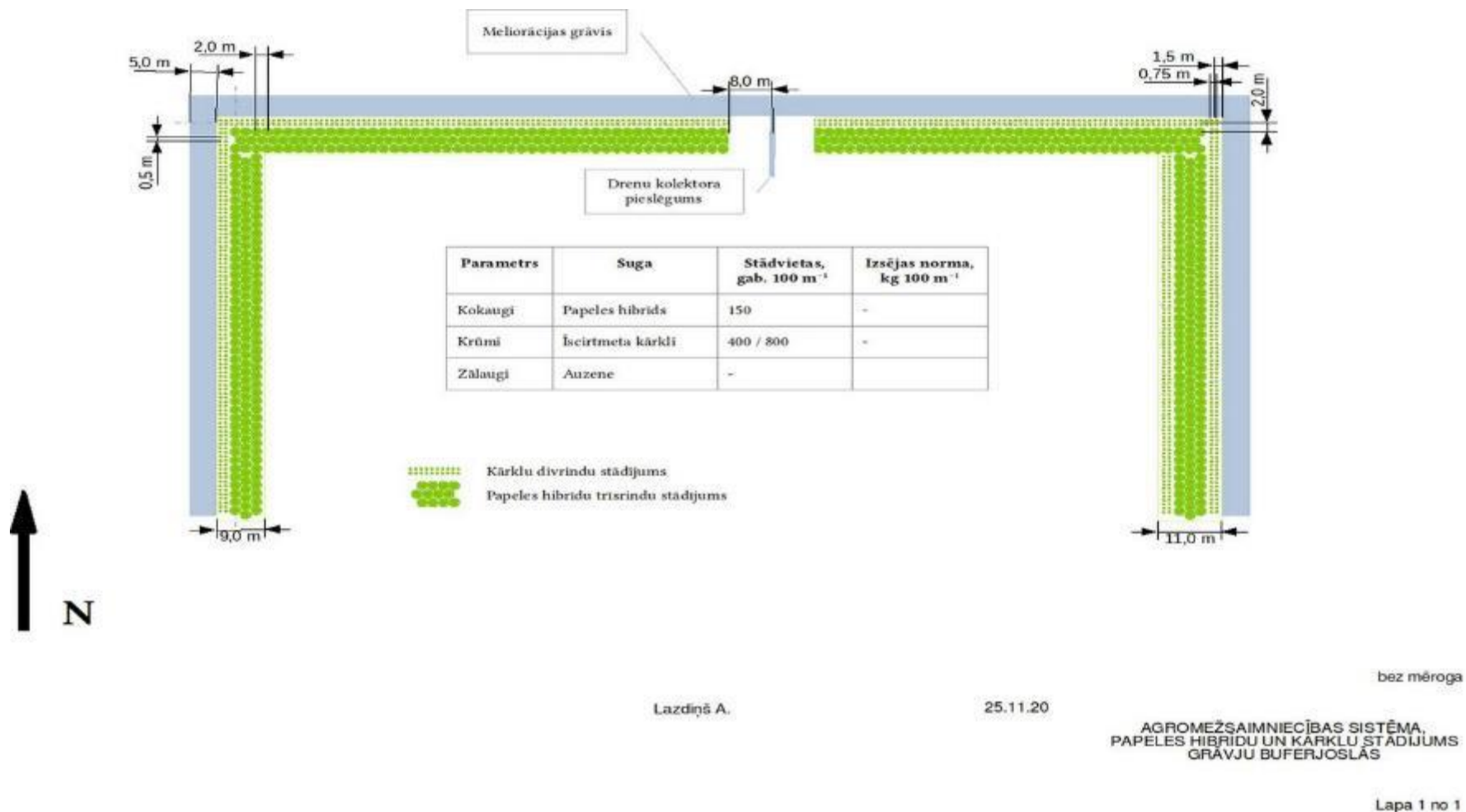


Attēls 47. Kokaugu stādījuma ierīkošanai paredzētā platība MPS apsaimniekotajos mežos.



Attēls 48. Grāvis, gar kuru plānojam ierīkot kokaugu joslu stādījumu.

Oglekļa aprite meža ekosistēmā



Attēls 49. Plānotā stādījuma shēma.

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

Pētījumu programmā paredzēts 2022. gadā sagatavot vienu populārzinātnisku rakstu, informācija radio un TV un LVMI Silava Youtube vietnē (kopā 2 sižeti), vismaz 4 raidierakstus par kokaugu stādījumiem nemeža zemēs un to potenciālo lomu SEG emisiju mazināšanā. Atbilstoši pieprasījumam paredzēts informēt LVM informācijas speciālistus par pētījuma aktivitātēm, sagatavojot materiālus ziņai LVM mājas lapas sadaļai Jaunumi 2 reizes gadā.

Pētījuma ietvaros veiktas dažādas publicitātes aktivitātes, kas pielāgotas informācijas sniegšanas piedāvājumam. Pētījuma rezultāti izmantoti vairākās prezentācijās:

1. Pašvaldību savienības sapulce Ērgemē 19.08.2022 “Kā domāt par klimata neitralitāti savā saimniecībā, pagastā, novadā, apsaimniekojot meža un lauksaimniecības zemes?”¹⁴;
2. lekcija Meža akadēmijā 13.05.2022 “Kā Latvija var sasniegt klimatneitralitātes mērķus zemes izmantošanas un mežsaimniecības sektorā?”¹⁵;
3. lekcija AS “Latvijas valsts meži” Meža stipendiātu seminārā 23.02.2022 “Oglekļa piesaiste meža un nemeža ekosistēmās”¹⁶;
4. lekcija Vidzemes inovāciju nedēļā 23.02.2022 “Koku augšanas apstākļu uzlabošana (mēslošana) – ieguvumi un riski oglekļa dioksīda (CO₂) piesaistes kontekstā”¹⁷.

Pētījuma ietvaros 10.06.2022 organizētas mežzinātnes dienas “Ogleklis, mežs un koki mainīgā pasaulē”, kurās raksturota meža ieaudzēšanas, dažādu augsnes sagatavošanas paņēmieni un meža mēslošanas ietekme uz SEG emisijām un CO₂ piesaisti¹⁸.

14.07.2022 LTV1 raidījumā Panorāma¹⁹ Andis Lazdiņš stāstīja par CO₂ emisiju daudzumu lauksaimniecības zemēs un iespējām mazināt emisijas no organiskām augsnēm.

Žurnāla “Baltijas koks” jūlija numurā publicēts Jurgā Jansona raksts par 10.06.2022 organizētajām mežzinātnes dienām “Ogleklis, mežs un koki mainīgajā pasaulē. Latvijas Mežzinātnes diena”²⁰.

Pētījuma rezultāti izmantoti vairākās prezentācijās konferencē “Engineering for Rural Development”, kas notika 2022. gada 25.-27. maijā, tajā skaitā:

- **Agris Zimelis**, Gints Spalva: Productivity and GHG balance of harvesting and forwarding in thinning of aspen hybrid plantations;
- **Aldis Butlers**, Gints Spalva, Ieva Līcīte, Dana Purviņa: Carbon dioxide (CO₂) emissions from naturally wet and drained nutrient-rich organic forests soils;
- **Santa Kalēja**, Aldis Butlers: Evaluation of public attitude to forest drainage as climate change mitigation measure;

¹⁴ <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.14474.13769>

¹⁵ <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.11819.52009>

¹⁶ <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.27145.93285>

¹⁷ <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.33017.95846>

¹⁸ <http://www.silava.lv/73/section.aspx/1352>

¹⁹ <http://www.silava.lv/73/section.aspx/1381>

²⁰ <http://www.silava.lv/73/section.aspx/1375>

Oglekļa aprite meža ekosistēmā

- **Andis Lazdiņš**, Aldis Butlers, Ritvars Ancāns: Nitrous oxide (N₂O) and methane (CH₄) fluxes from tree stems in birch and black alder stands – a case study in forests with deep peat soils;
- Jordane Champion, **Andis Lazdiņš**, Gints Spalva: Short term impact of application of different doses of wood ash on greenhouse gas (GHG) emissions from peat;
- **Raitis Meļņiks**, Irina Sietiņa, Andis Lazdiņš: Methodology for assessment of area and properties of farmlands suitable for establishment of shelter belts.

Konference “2nd International Conference on Pollution Prevention and Clean Technologies”
2022. gada 2. decembrī:

- **Bertins Maris**, Makovskis Kristaps, Lazdina Dagnija, Lazdins Andis, Klavins Maris and Viksna Arturs: Impact of wood ash and sewage sludge on elemental content in Hybrid Alder.

YouTube vietnē publicēti 3 raidieraksti par ZIZIMM sektoru un pasākumiem klimata pārmaiņu mazināšanai, tajā skaitā:

- Zemes izmantošanas, zemes izmantošanas maiņas un mežsaimniecības sektors (27.12.2022)²¹;
- Klimata politika zemes izmantošanas, zemes izmantošanas maiņas un mežsaimniecības sektorā (28.12.2022)²²;
- Pasākumi klimata pārmaiņu mazināšanas mērķu sasniegšanai zemes izmantošanas, zemes izmantošanas maiņas un mežsaimniecības sektorā (30.12.2022)²³.

²¹ <https://youtu.be/mIRvKpDnDl8>

²² <https://youtu.be/58PSk6Uisg8>

²³ <https://youtu.be/LOCHRlohrb4>

6. MEŽA RESURSU IZMANTOŠANAS EFEKTIVITĀTES PALIELINĀŠANA KLIMATA PĀRMAIŅU MAZINĀŠANAI

6.1. Mežizstrādes metožu ietekmes uz SEG emisijām ietekmes novērtēšana

6.1.1. Mežizstrādes metožu analīze

Pētījumā ietvertos veikta mežizstrādes risinājumu SEG emisiju samazināšanai saraksta aktualizēšana, iekļaujot tajā mežizstrādes tehnikas elektrifikāciju un harvesteru ar hidrīdu enerģijas avotu (dīzeļdegviela un elektroenerģija), lielākas kravnesības kokvedēju un šķeldu vedēju izmantošana un biodīzeļdegvielas izmantošana. Harvesterus ar hibrīdu enerģijas padevi (Logset 8H GTE Hybrid) praksē no 2019. gada izmanto, piemēram, somu kompānija JM Forest. Saskaņā ar ražotāja informāciju CO₂ emisiju samazinājums, izmantojot hibrīdu sistēmu, ir 15-30%, taču tas neapstiprinājās Metsāteho veiktā pētījumā. Pētījums vēl arvien turpinās. Pilnībā elektriskas mežizstrādes mašīnas ir jauns ražošanas virziens, kur pagaidām pietrūkst empīrisku datu par enerģijas ietaupījumu un ražošanas organizāciju, kā arī meža infrastruktūras elektrifikācijas praktisko risinājumu.

Lielākas kravnesības kokvedēju izmantošana ir jau vismaz 10 gadus pētīts jautājums, it īpaši Ziemeļvalstīs, palielinot kopējo autovilcienu masu līdz 92 tonnām. Somu pētījumos secināts, ka degvielas ietaupījums, palielinot autovilcienu kopējo masu no 76 tonnām līdz 92 tonnām, ir vismaz 10%. Vēl lielāks ietaupījums sagaidāms, palielinot autovilcienu masu no 52 tonnām līdz 92 tonnām. Tomēr Latvijā šis risinājums saistīts ar iespējamām būtiskām izmaiņām ceļa infrastruktūrā, kā arī papildus jāvērtē lokāla galvenās nozīmes ceļu kravnesības palielināšana, radot nepieciešamību ierīkot starpkrautuves un tērējot degvielu kokmateriālu vešanai uz starpkrautuvēm.

Somijā biodīzeļdegviela, kas saražota no celulozes ražošanas blakusproduktiem, ir kļuvusi par ikdienišķu parādību, un fosilās degvielas cenas pieaugums pietuvina biodegvielu pašizmaksu fosilās degvielas cenai. Pilotprojekts par biodegvielas izmantošanu kokmateriālu transportā ir uzsākts Somijas valsts uzņēmumā Metsähallitus. Saskaņā ar sākotnējiem rezultātiem biodegvielu izmantošana ļauj samazināt SEG emisijas par līdz pat 90%. Kokmateriālu transportēšanā biodegvielu izmantošanu Somijā kavē nepietiekoši blīvs uzpildes staciju tīkls, kā arī jaudas samazināšanās, biodegviela izmantojama kravas mašīnās ar ne vairāk kā 76 tonnu kopējo masu.

Informāciju par klimata pārmaiņu mazināšanas pasākumiem apkopota 2. pielikumā.

6.1.2. Mežizstrādes mašīnu veidoto risu attālinātas identificēšanas metode

Risu dziļuma noteikšanai pielāgota iepriekš izstrādātā lauksaimniecībā izmantojamās zemēs esošo grāvju identificēšanas metode (Melniks u.c., 2022), nerealizējot metodikā paredzētos loģiskās kontroles elementus beznoteces vagu atsijāšanai, kā arī mainot aprēķinu parametru robežvērtības. Digitālā reljefa modeļa (DEM) un digitālā virsmas modeļa (DSM) izveidei nepieciešamie LiDAR dati iegūti no Latvijas Ģeotelpiskās informācijas aģentūras (LĢIA). Izmantotajiem LiDAR datiem vertikālā precizitāte ir 12 cm un horizontālā precizitāte ir 36 cm (2 sigmas ar 95% ticamības līmeni pret Valsts ģeodēzisko tīklu). Minimālās prasības pret punktu blīvumu ir 4 punkti m⁻², un vidējais zemes punktu blīvums ir 1,5 punkti m⁻² (Latvijas Ģeotelpiskās informācijas aģentūra, 2019).

LiDAR punktu mākoņa precizitāte uz nogāzēm var būt zemāka, jo to var ietekmēt skanēšanas leņķis attiecībā pret Zemi un nogāzes slīpums. Līdz ar to, veidojot digitālā augstuma modeļa virsmu,

ne vienmēr detāli un korekti var attēlot visas mazākās reljefa formas un cilvēka radītos objektus. Precizitāti ietekmē arī veģetācijas blīvums un nogāzes apaugums, kas augstumu starpības var padarīt lielākas (Anderson u.c., 2006; Latvijas Ģeotelpiskās informācijas aģentūra, 2017).

Digitālais reljefa modelis (DEM) veidots 0,5 m horizontālajā izšķirtspējā izmantojot programmas Global Mapper liela apjoma automātiskās datu apstrādes iespējas. Izmantota Binning interpolācijas metode, kuras atbilstība izvērztajam mērķim pierādīta iepriekšējos pētījuma posmos. Iegūtie DEM apvienoti balstoties uz TKS-93 karšu lapām mērogā 1:50 000, kur katras lapas izmērs ir 25 x 25 km.

Lai augstuma modelī identificētu noteikta dziļuma rīses, šī darba ietvaros ir pielāgots algoritms, kas balstās uz loģiskiem vaičājumiem un izmantojams GRASS GIS rastra kalkulatora *r.mapcalc* vidē, bet pielāgojams jebkurai ĢIS programmai ar rastra kalkulatoru (19. vienādojums). Šajā darbā izmantotā metode pēc darbības principiem ir līdzīga (Cazorzi u.c., 2013; Rapinel u.c., 2013; Sofia u.c., 2011) veiktajos pētījumos izmantotajām. Mūsu izstrādātās metodes pamatā ir grāvju morfometrisko īpašību identificēšana reljefa modelī, meklējot lokālus noteikta pazeminājumus noteiktā joslas platumā un virzienā.

$$\text{if}((\text{DEM} + X < \text{DEM} [-Y,0] \ \&\& \ +X < \text{DEM} [Y,0]) \ || \ (\text{DEM} + X < \text{DEM} [0,Y] \ \&\& \ \text{DEM} + X < \text{DEM} [0,-Y]) \ || \ (\text{DEM} + X < \text{DEM} [Y,Y] \ \&\& \ \text{DEM} + X < \text{DEM} [-Y,-Y]) \ || \ (\text{DEM} + X < \text{DEM} [-Y,Y] \ \&\& \ \text{DEM} + X < \text{DEM} [Y,-Y]), 1, 0) \quad (19)$$

Formulā DEM ir vienāds ar digitālā augstuma modeļa rastra attēlu, X – identificējamās rīses minimālais dziļums metros, Y – grāvja maksimālais platums, rastra šūnās. Turpmākās reljefa analīzes veikšanai izmantots iepriekš minētais izstrādātais algoritms, kas darbojas identificējot rastra šūnas, kurām X un Y asu virzienā noteiktā attālumā uz abām pusēm atrodas šūnas, kuras ir ar lielāku vērtību, kā iestatītā vērtība un uzskatāma par grāvja minimālo dziļumu.

Plašāku reģionu, šajā gadījumā visas Latvijas teritorijas DEM apstrādē kā identificējamā rīses minimālais dziļums izvēlēti 0,2 m, bet maksimālais platums, kurā konstatēt šo dziļumu – 1 m.

Iegūtie rastra dati, kas satur gan savstarpēji saistītus, gan nesaistītus risu fragmentus ar dažāda veida “trokšņiem” tajos, konvertēti vektoru formātā. Tālākā vektordatu apstrāde veikta ArcGIS vidē, veicot laukuma aprēķinus iegūtajiem poligoniem, kā arī veikta to nogludināšana, saglabājot to platību, kā arī sākuma un beigu koordinātas. Pēc iegūto platību vērtībām, veikta vairāku līmeņu datu filtrēšana. Poligonu centra līnijas, kuras reprezentē rīses un to elementus, iegūtas ArcMap 10.6 paplašinājuma ArcScan vidē, ņemot vērā vairākus faktoros — maksimālais poligona platums, leņķis un rādiuss savienojuma identificēšanai.

Šī procesa laikā veikta nākamā filtrēšana, atbrīvojoties no 90% objektu, kuri uzskatāmi par troksni, kas radies, rēķinot ar 19. vienādojuma palīdzību identificējot lokālus pazeminājumus reljefā. Paralēli veic grāvju tīkla aprēķinu atbilstoši oriģinālajai metodei un starpība, ko iegūst ar *Difference* algoritmu, atbilst risu izvietojumam cirtmā.

Metode pielietojama ar darbību datiem, kas iegūti tūlīt pēc mežizstrādes un to var izmantot tikai atjaunošanas cirtēs. Ja darbību dati iegūti pēc augsnes sagatavošanas ar disku arklū, uzartās joslas var tik atpazītas kā rīses. Lielu trokšņu līmeni rada arī augsnes gatavošana ar ekskavatoru.

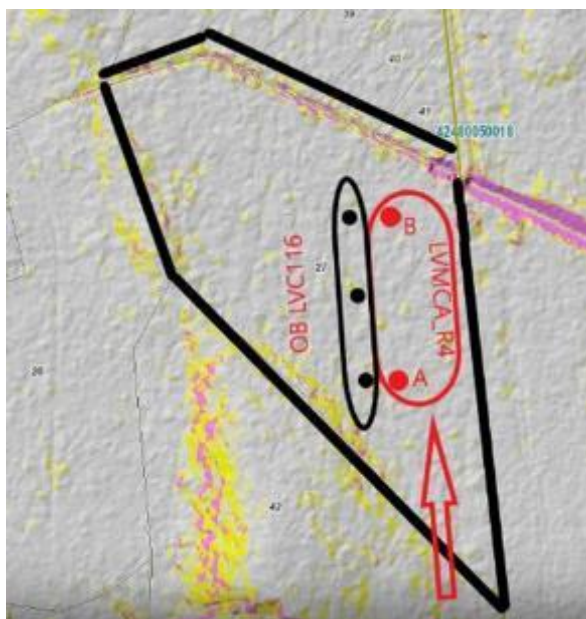
6.1.3. SEG emisiju no risēm mērījumu objektu ierīkošana

Ražošanas darbību datu iegūvi risu veidošanās ietekmes uz SEG emisijām raksturošanai, izmantojot lāzerskeneri, risu dziļuma raksturošanai vienlaidus atjaunošanas cirtēs un kopšanas cirtēs (sākotnēji bija plānotas tikai atjaunošanas cirtes) uzsākām 2022. gada rudenī. Pētījuma ietvaros ierīkoti 3 izpētes objekti atjaunošanas cirtēs purvainos, kur turpmāko 2 gadu laikā noteiksim SEG emisijas no risēm, kā arī piegulošās mežaudžu teritorijas, kas nav saimnieciskās darbības ietekmēta.

Pirms mežizstrādes šajās platībās veikta SEG emisiju mērīšana tehnikas neietekmētā platībā 24 mēnešus ilgā laika posmā LIFE OrgBalt pētījuma ietvaros.

Izpētes objekti

Pirmais objekts atrodas MPS Mežoles mežu novadā (012-193-27²⁴), blakus bijušajam LIFE OrgBalt parauglaukumam. Priežu audze, kurā 2022. gada ziemā veikta atjaunošanas cirte, nākošajā vasarā augsnes sagatavošana ar ekskavatoru un rudenī stādīti priedes ietvarstādi. Ar ekskavatoru sagatavotas ap 2000 stādvieta ha¹. Parauglaukumi ierīkoti nogabala rietumu pusē – pirms meliorācijas grāvja, kas sadala nogabalu. Ierīkots 1 parauglaukums paralēli bijušajam OrgBalt parauglaukumam (LVC116), kur A atkārtojums atrodas blakus LVC116 A atkārtojumam, bet B atkārtojums blakus LVC116 C atkārtojumam (50. attēls). Objekta identifikators: LVMCA_R4.



Attēls 50. Parauglaukumu izvietojuma shēma objektā LVMCA_R4.

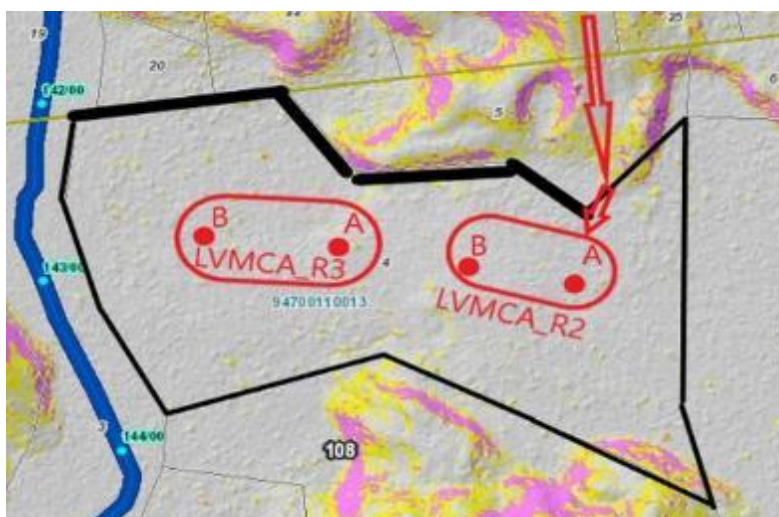
Otrs objekts atrodas MPS Mežoles novadā (012-218-51), blakus bijušajam LIFE OrgBalt parauglaukumam. Meža tips – dumbrājs. Atjaunošanas cirte veikta 2022. gada vasarā, tūlīt pēc atjaunošanas cirtes veikta augsnes sagatavošana un M stādīšana mitrākajā daļā un E stādīšana augstākajā un sausākajā daļā. Platībā izrakta dziļvaga ūdens novadīšanai uz meliorācijas grāvi. Ierīkots viens gāzu mērīšanas parauglaukums, kur A atkārtojums atrodas tuvāk uzkalniņam, savukārt, B atkārtojums – tuvāk bijušajam OrgBalt parauglaukumam (51. attēls). Objekta identifikators: LVMCA_R1.

²⁴ kvartālu apgabals – kvartāls – nogabals.



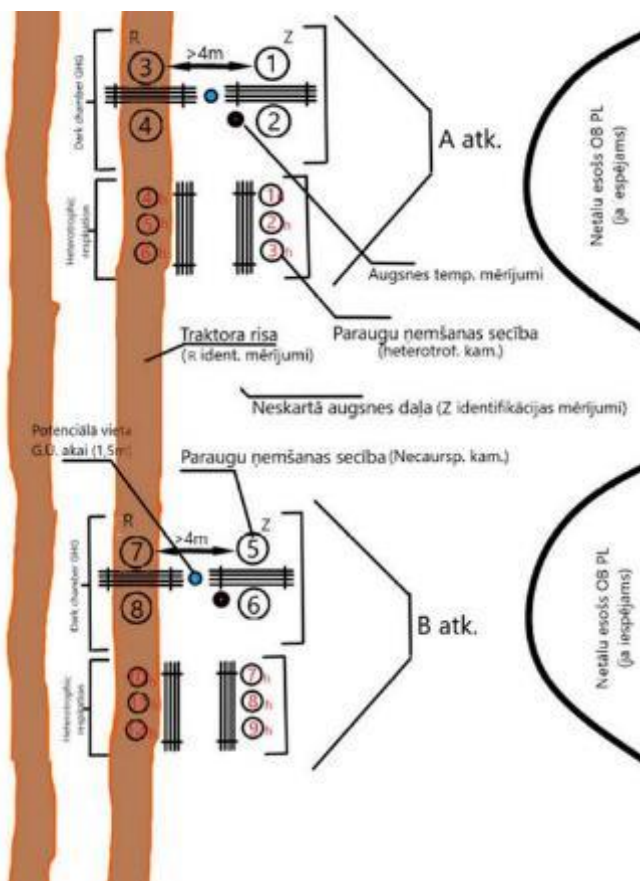
Attēls 51. Parauglaukumu izvietojuma shēma objektā LVMCA_R1.

Arī trešais objekts atrodas MPS Mežoles mežu novadā (031-108-4) blakus bijušajam LIFE OrgBalt parauglaukumam. Platībā 2022. gada ziemā veikta atjaunošanas cirte un 2022. gada vasarā notika augsnes sagatavošana ar ekskavatoru, kā arī izraktas divas dziļvagas gar augšējo un apakšējo nogabala malu. Nogabalā ierīkoti 2 parauglaukumu pāri, tajā skaitā viens nogabala labajā pusē (parauglaukums Nr. 1), un otrs tuvāk bijušajam OrgBalt parauglaukumam (parauglaukums Nr. 2). Parauglaukumi ierīkoti tā, lai veidotos augstuma gradients, kur LVMCA_R2 A atkārtotums ir visaugstāk, bet LVMCA_R3 B atkārtotums ir viszemāk reljefā (52. attēls). Objekta identifikatori: LVMCA_R2 un LVMCA_R3.



Attēls 52. Parauglaukumu izvietojuma shēma objektos LVMCA_R2 un LVMCA_R3.

Vispārīgā gāzu mērīšanas parauglaukuma shēma parādīta 53. attēlā.



Attēls 53. Vispārīgā parauglaukuma shēma.

Katrs objekts sastāv no 2 atkārtojumiem (atk.). Vienā atk. atsevišķi izdala mērījumus ar necaurspīdīgām kamerām un mērījumus heterotrofās elpošanas laukumos (h). Katrā atk. veicami gāzu mērījumi risē (R) un blakus, neskartajā augsnes daļā (Z). Attālums starp R un Z mērījumu punktiem ir vismaz 4 m. Objektu ierīko perpendikulāri grāvim, pēc iespējas tuvāk OrgBalt objektiem, lai nodrošinātu savstarpēju datu lietošanu no abām mērījumu vietām.

Parauglaukumu novieto tā, lai iegūtu gruntsūdens dziļuma gradientu. Ja tādas iespējas nav, meklē rīsi, kas nodrošina atšķirīgus mitruma apstākļus. Rīse var būt sadalīta arī atsevišķos pārtrūkstošos fragmentos starp atk., taču vēlams, lai rīses garums būtu pietiekams visu vienā atk. ietilpstošo mērījumu veikšanai. Katrā no atk. ierok 1,5 m dziļu gruntsūdens aku, tās vietu izvēloties pēc situācijas dabā. Augsnes temperatūru, gruntsūdens līmeņa datus u.c. mērījumus papildinošo informāciju ievāc atsevišķi. Augsnes temperatūru mēra vienu reizi atkārtojuma uzmērīšanas laikā (10 cm dziļumā ar termometru un piefiksē arī 5 cm no mitruma mērītāja), temperatūra šādi jāmēra abos atkārtojumos. Gruntsūdens līmeni mēra ar lineālu, 1x gāzu apmaiņas mērīšanas ciklā, katrā no ieraktajām akām.

Blakus augsnes temperatūras mērījumiem veic augsnes mitruma mērījumus. Augsnes mitruma mērījumus veic abos atkārtojumos. No mitruma mērītāja nolasa arī augsnes temperatūras rādījumu 5 cm dziļumā.

Ieraktajās gruntsūdens akās veic ūdens ķīmisko un fizikālo rādītāju mērījumus katrā gāzu apmaiņas mērīšanas ciklā, katrā akā vienu reizi. Mērījumi veicami ar YSI KorDSS pārnēsājamo analizatoru. Heterotrofās elpošanas laukumos augsni atbrīvo no augiem (tos noravē), bedres sānus atdur ar lāpstu vai izzāgē ar zāģi, ja risēs esošais zaru/kokmateriālu daudzums nav pārmērīgi liels.

Parauglaukuma shēmā 53. attēlā norādīta gāzu apmaiņas mērījumu secība. Kopā ierīkojami 8 necaurspīdīgo kameru mērījumu punkti un 12 heterotrofās elpošanas mērījumu punkti katrā

objektā. Mērījumu secību ir svarīgi nesajaukt un nemainīt, to piefiksējot gan dabā (ar mietiņiem), gan arī datubāzes sistēmā. Visos parauglaukumos mērījumi uzsākami no neskartās daļas.

Gāzu apmaiņas mērījumi uzsākti 2022. gada decembrī un tos plānots turpināt 24 mēnešu laikā ar 1 mēneša intervālu starp mērījumu cikliem. Pēc 24 mēnešiem mērījumus plānots veikt ik pēc 5 gadiem 12 mēnešus pēc kārtas ar 1 mēneša intervālu.

6.2. Metodes izstrādāšana koksnes produktu un padziļinātas koksnes pārstrādes ietekmes uz SEG emisijām analīzei

Pētījuma ietvaros papildināta metode koksnes produktu un padziļinātas koksnes pārstrādes ietekmes uz SEG emisijām analīzei, izmantojot IPCC 2019 vadlīnijās izmantojamo pieeju koksnes produktu raksturošanai. Kategorijā koksnes produkti (*Harvested Wood Products*) uzskaita CO₂ emisijas un piesaisti piesaiste, kas aprēķinātas atbilstoši metodoloģijai, kas aprakstīta IPCC Vadlīniju 2013. gada KP pielikumā (Hiraishi u.c., 2013). Darbību dati ir Eurostat vai Faostat noziņotie dati par koksnes produktu un zāģbaļķu ražošanu, eksportu un importu. Aprēķinu vienādojumi un galvenie pieņēmumi publicēti Vienotā pētniecības centra ziņojumā (Rüter, 2011).

Metodes mērķis ir uzskaitīt tos koksnes produktus, kas saražoti no Latvijā (vai citā valstī) iegūtiem un pārstrādātiem zāģmateriāliem. Koksnes produkti, kas saražoti no eksportētiem vai importētiem kokmateriāliem, nav iekļauti nevienas valsts uzskaitē, līdz ar to oglekļa uzkrājums koksnes produktos ir būtiski mazāks, nekā reālais oglekļa uzkrājums koksnes produktos. Tas noved pie nesaistes, salīdzinot ilgtermiņa oglekļa aprīti mežsaimniecības, enerģētikas un atkritumu sektora uzskaitē un būtiski samazina biokurināmā ražošanas prognozi, pārstrādājot koksnes produktus.

CO₂ emisijas no apaļkoksnes ražošanas atmežotajās platībās tiek novērtētas, izmantojot momentānās oksidēšanās (*instantaneous oxidation*) metodi, izņemot koksnes produktus, kas veidojušies atmežotās platībās, kur atkārtoti izauguši koki atkārtotas apmežošanas rezultātā.

IPCC 2019 vadlīniju papildinājumā nav ieviestas būtiskas izmaiņas koksnes produktu uzskaitē. Tomēr, rēķinot uzņēmuma SEG bilanci, it īpaši sasaistot dažādus sektorus, piemēram, koksnes produktu un biokurināmā ražošanu, ir lietderīgi uzskaitīt CO₂ piesaisti un SEG emisijas arī no eksportētajiem kokmateriāliem, un atsevišķi uzskaitīt arī Latvijā patērētos un eksportētos koksnes produktus, izmantojot īpatsvara novērtēšanai uz vietas patērēto un eksportēto koksnes produktu proporciju. Detalizētu aprēķinu metodiku iekļausim pētījumu programmas etapa pārskatā.

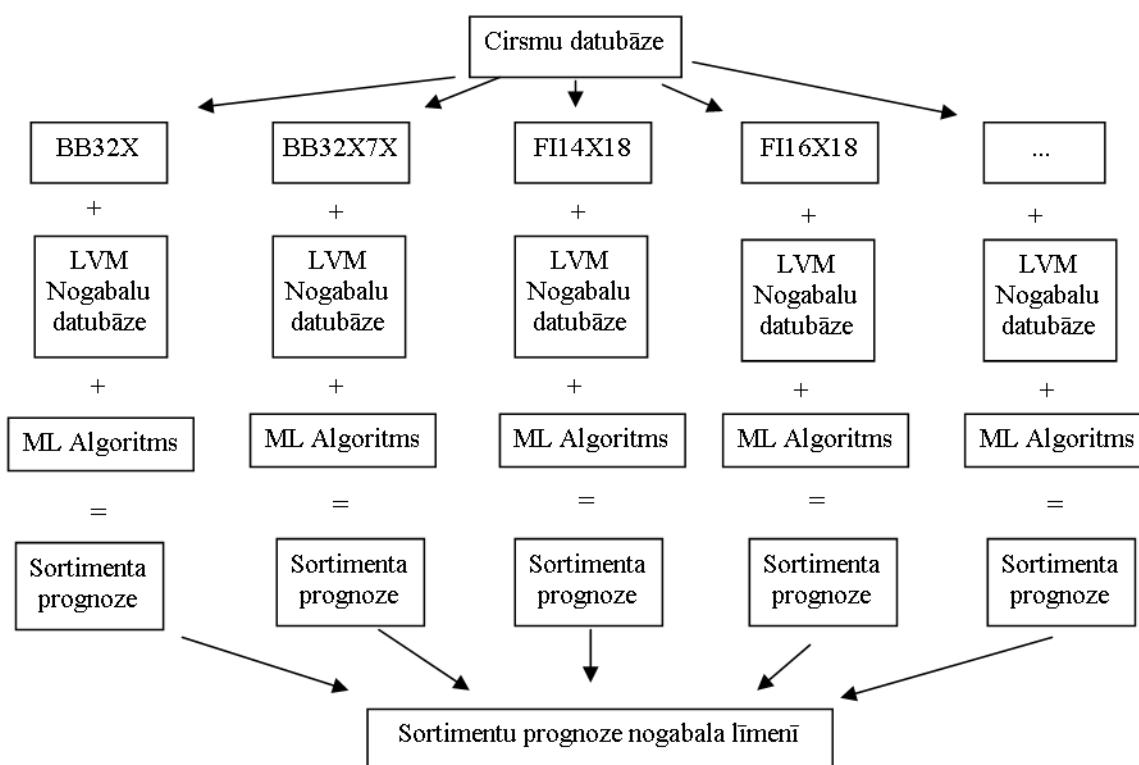
Nosacījumu definēšanu koksnes produktu salīdzināšanai ar alternatīviem produktiem (sistēmas robežas, iekļaujamās SEG emisijas, ražošanas tehnoloģijas), raksturojot starptautisko ietekmi, kas nav ietverta SEG inventarizācijas ziņojumā, veiksīm 2022. gada atlikušajos mēnešos, integrējot SEG inventarizācijas un dzīves cikla analīzes pieeju. Salīdzinot dažādas dzīves cikla analīzes pieejas, secinājām, ka meža sektorā visbiežāk atšķiras pieeja attiecībā uz tehnikas ražošanas emisijām, kā arī personāla radīto emisiju novērtējumā. Biokurināmā dzīves cikla analīzē lielākās atšķirības ir attiecībā uz aizstājamā fosilā kurināmā ražošanas radīto emisiju novērtējumu, piemēram, pieņēmums, ka akmeņogles ir iegūtas Ķīnā, palielina emisijas vairākus desmitus reižu, salīdzinot ar Eiropas valstīs ražotām akmeņoglēm (Kirkinen, 2010; Luo u.c., 2017). Otrs pieņēmums, kas būtiski ietekmē analīzes rezultātus, ir elektroenerģijas ražošanas radītās SEG emisijas un aizstāšanas efekts, ko rada elektroenerģijas ražošana no atjaunojamiem resursiem.

Kokmateriālu iznākuma analīzi cirsma taksācijas rādītāju, koksnes produktu un kokmateriālu veidu sasaistei paredzēts izmantot saražoto kokmateriālu veidu iznākuma datus no krājas kopšanas un atjaunošanas cirtēm. Pētījuma vajadzībām saņemti no pasūtītāja saņemti dati par 9025 atjaunošanas cirtēm, kas izstrādātas ar vienlaidus cirtes metodi 2021. gadā. Par katru cirsma pieejami dati par sagatavotajiem kokmateriāliem koku sugu un sortimentu griezumā un cirsma iekļauto nogabalu identifikatori (līdz 19 nogabali cirsma). Kopšanas cirtes pārstāvētas ar 4726 cirsma (līdz

25 nogabali cirmā). Kopējais sortimentu skaits cirmās ir 31. Pēc cirsmu datu saņemšanas ģenerēts izstrādāto nogabalu saraksts un veikta tam atbilstošu datu atlase Meža valsts reģistra datu bāzē (dati uz 2021. gada sākumu). Pēc tam atsijātas tās cirsmas, kurām neizdevās atšifrēt visus nogabalus²⁵ un izveidota datu kopa, kas izmantojama sortimentu iznākuma analīzei.

Pēc cirsmu ar neidentificējamiem nogabaliem atsijāšanas izveidota datu kopa, ko veido 8123 atjaunošanas cirtes cirsmas 15032 ha platībā ar kopējo krāju 2021. gada sākumā 5,43 milj. m³ un 4494 kopšanas cirtes cirsmas 16063 ha platībā ar kopējo krāju 3,85 milj. m³. Katra cirsmā papildināta ar cirsmas centra ģeogrāfiskajām koordinātēm, sagatavojamo sortimentu apjomu (nedalot sugās) un kopējo nozāģēto apjomu, kā arī taksācijas rādītāju apkopojumu no visiem cirmā iekļautajiem nogabaliem, tajā skaitā kopējā krāja sugu griezumā, kopējais koku skaits, vidējā koka stumbra tilpums, kopējā krāja, valdošā suga (ņemot vērā visu nogabalu datus), kopējā platība un platības procentuālais sadalījums atbilstoši meža tipam un bonitātei.

Šajā pētījumā plānotam pielietot mašīnmācīšanās algoritmus meža cirsmu sortimentu prognozēšanā. Datu apstrādes princips atainots 54. attēlā. Sākotnējo cirsmu datu kopu sadalīsim mazākās daļās pa dažādiem sortimentu veidiem, tādējādi iegūstot datus par konkrētu sortimenta apjomu nogabala teritorijā. Tālāk šai informācijai pievienosim datus no LVM nogabalu informācijas datubāzes, kurā glabājas informācija par dažādiem mežaudzi rakstošiem parametriem, izmantojot vidējos cirmā ietilpstošo nogabalu rādītājus. Paraleli veiksīm aprēķinu cirmām, ko veido tikai viens nogabals, lai novērstu iespējamās kļūdas, attiecinot nozāģēto apjomu uz visiem cirmā pārstāvētajiem nogabaliem.



Attēls 54. Datu apstrādes princips.

²⁵ Pirms mežizstrādes var būt mainīta nogabalu numerācija vai izdalīt jauni apakšnogabali.

Oglekļa aprite meža ekosistēmā

Nākamajā solī plānots sadalīt katru no sortimentu tabulām treniņdatu un validācijas datu kopās. Treniņdatu kopas apstrādāsim ar vairākiem mašīnmācīšanās algoritmiem, kuru rezultātus validēsim pret treniņprocesā neizmantotajiem datiem. Pēc tam mašīnmācīšanās modeļus apvienosim vienā kodā, lai spētu prognozēt kopējo sortimentu iznākumu, attiecīgi, arī sagaidāmo ieguldījumu koksnes produktu oglekļa krātuvēs jebkurā LVM mežaudzē.

7. MELIORĀCIJAS SISTĒMU APSAIMNIEKOŠANAS PLĀNOŠANAS SISTĒMA

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

Gāzu apmaiņas mērījumu objektu ierīkošana vidēja vecuma āreņos un slapjainos meliorācijas sistēmu ietekmes uz augsnes heterotrofo elpošanu un SEG emisijām raksturošanai saskaņā ar 2021. gadā izstrādāto metodiku (kopā 4 objekti, 40. tabula). Gāzu apmaiņas mērīšanas un parauglūkumu ierīkošanas metodika aprakstīta iepriekšējā etapa pārskatā.

Tabula 40. Izpētes objekti gāzu apmaiņas raksturošanai

| Suga | Meža tips | Identifikators | atlasīto audžu ID | koordinātas | koordinātas |
|--------|-----------|----------------|-------------------|-------------|-------------|
| Bērzs | As | LZP-BM-MRD | 011-141-1 | 56,69546 | 25,91823 |
| Bērzs | Dms | LZP-BM-MPW | 011-51-5 | 56,71167 | 26,06770 |
| Priede | Am | LVM-PJ-MPD | 011-247-8 | 56,64251 | 25,88730 |
| Priede | Mrs | LVM-PM-MPW | 012-67-21 | 57,32998 | 26,01230 |

Visos izpētes objektos uzsākta 2022. gadā gāzu apmaiņas mērīšana, ievācot paraugus un veicot mērījumus reizi mēnesī. Kopā 2022. gadā ievāktas 8 paraugu sērijas – no maija līdz decembrim.

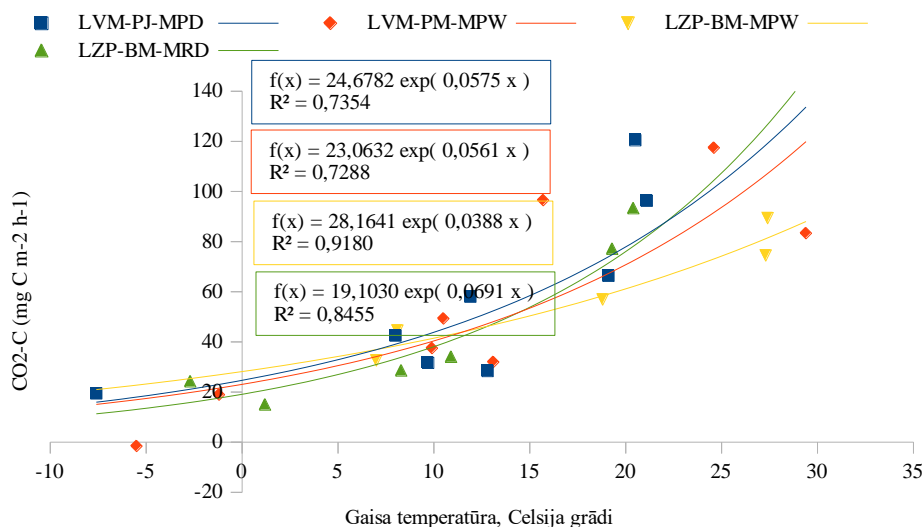
Sākotnējos izpētes datus konstatēts, ka CO₂ emisijas slapjainī bērza audzē būtiski neatšķiras no CO₂ emisijām ārenī. Priedes audzēs slapjainī CO₂ emisijas ir lielākas nekā ārenī un priedes audzēs, neatkarīgi no mitruma režīma, tās ir lielākas nekā bērza audzēs, lai gan, ņemot vērā, ka dažādi varianti pārstāvēti tikai ar 9 paraugšanas vietām, šos datus nevar izmantot dažādu koku sugu salīdzināšanai. Nevienā no izpētes objektiem nav konstatētas nozīmīgas N₂O un CH₄ emisijas.

Tabula 41. Vidējie gāzu apmaiņas rādītāji izpētes objektos

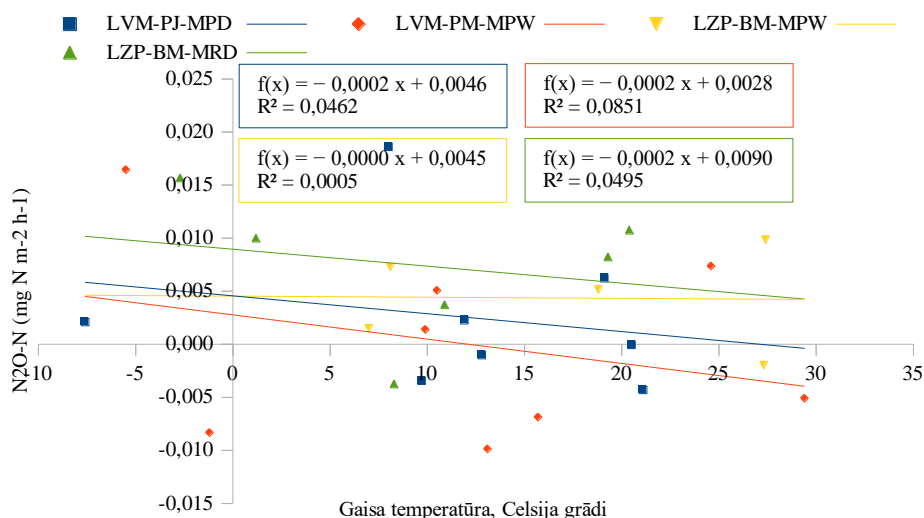
| Objekts | CO ₂ -C (mg C m ⁻² h ⁻¹) | N ₂ O-N (mg N m ⁻² h ⁻¹) | CH ₄ -C (kg C ha ⁻¹ h ⁻¹) |
|------------|--|--|---|
| LVM-PJ-MPD | 62,18 ± 6,99 | 0,002 ± 0,003 | -0,012 ± 0,008 |
| LVM-PM-MPW | 54,18 ± 8,92 | 0,000 ± 0,003 | 0,016 ± 0,009 |
| LZP-BM-MPW | 101,79 ± 9,65 | 0,011 ± 0,004 | -0,047 ± 0,014 |
| LZP-BM-MRD | 81,51 ± 11,7 | 0,009 ± 0,004 | -0,047 ± 0,011 |

Cieša sakarība ar gaisa temperatūru konstatēta ekosistēmas CO₂ aprītei. Atšķirības starp meliorētām un nemeliorētām augsnēm nav izteikta, lai arī sākotnējie dati rāda, ka slapjainos CO₂ emisijas pieaug lēnāk, palielinoties gaisa temperatūrai, taču secinājumus varēs izdarīt pēc 24 datu sēriju iegūšanas (2 gadu laikā no mērījumu uzsākšanas, 55. attēls). N₂O emisijām nav konstatēta sakarība ar gaisa temperatūru (56. attēls). CH₄ vērojama pieauguma tendence, paaugstinoties gaisa temperatūrai, lai gan pozitīvi emisiju rādītāji konstatēti tikai B parauglūkumā Dms un atsevišķās novēroju sērijās P parauglūkumā Mrs meža tipā (57. attēls).

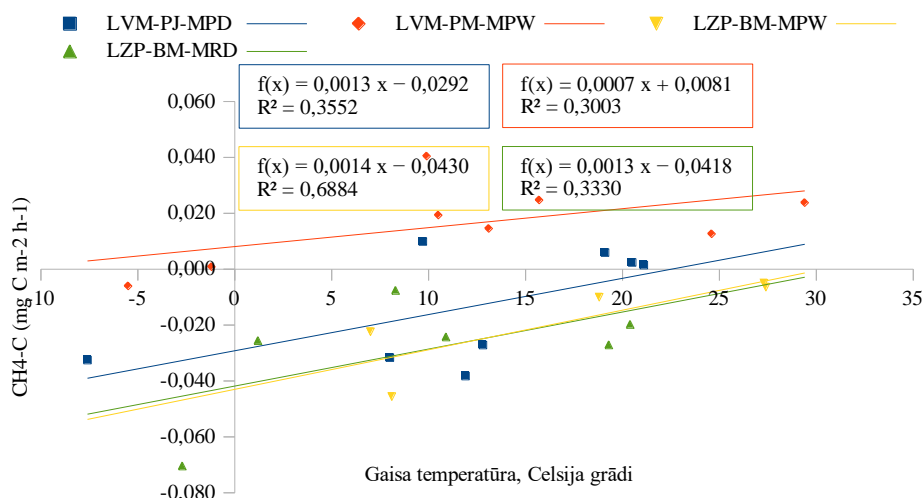
Oglekļa aprīte meža ekosistēmā



Attēls 55. Kopējās ekosistēmas CO₂ aprītes augsnē sakarība ar gaisa temperatūru.

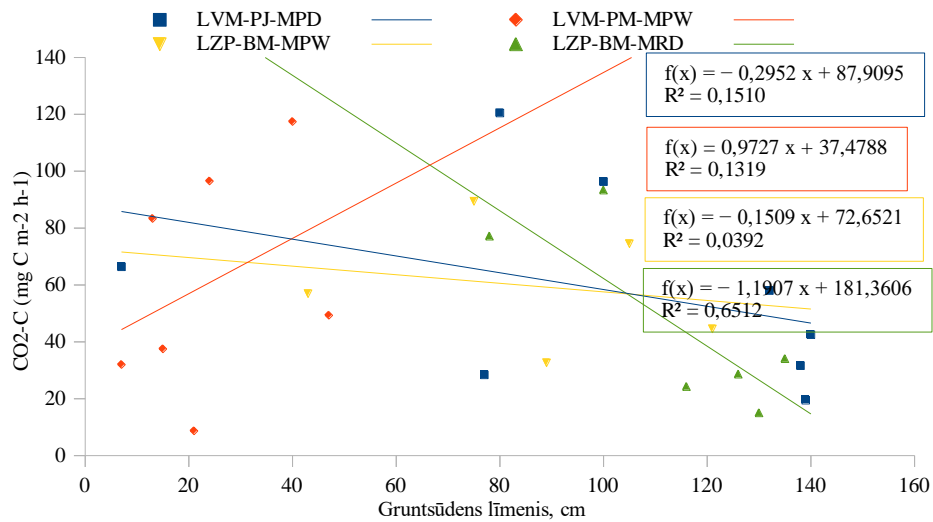


Attēls 56. N₂O emisiju no augsnes sakarība ar gaisa temperatūru.

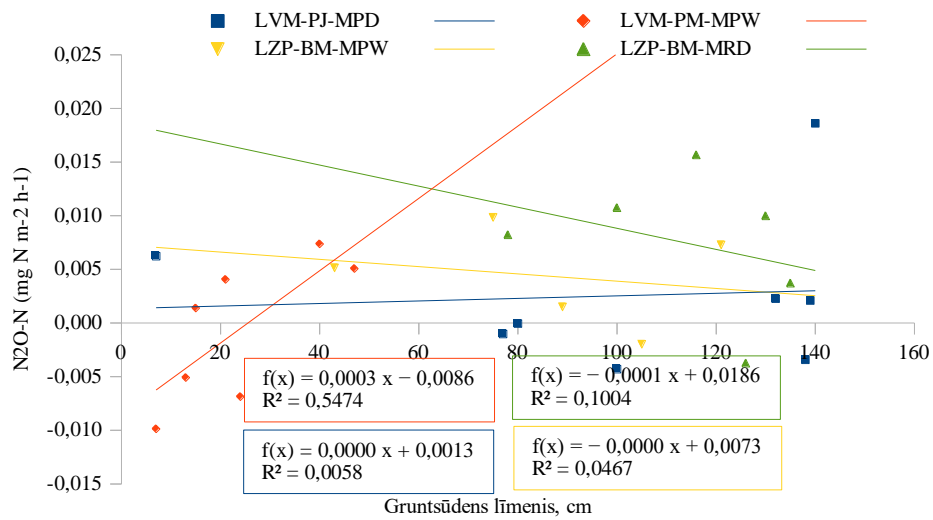


Attēls 57. CH₄ emisiju no augsnes sakarības ar gaisa temperatūru.

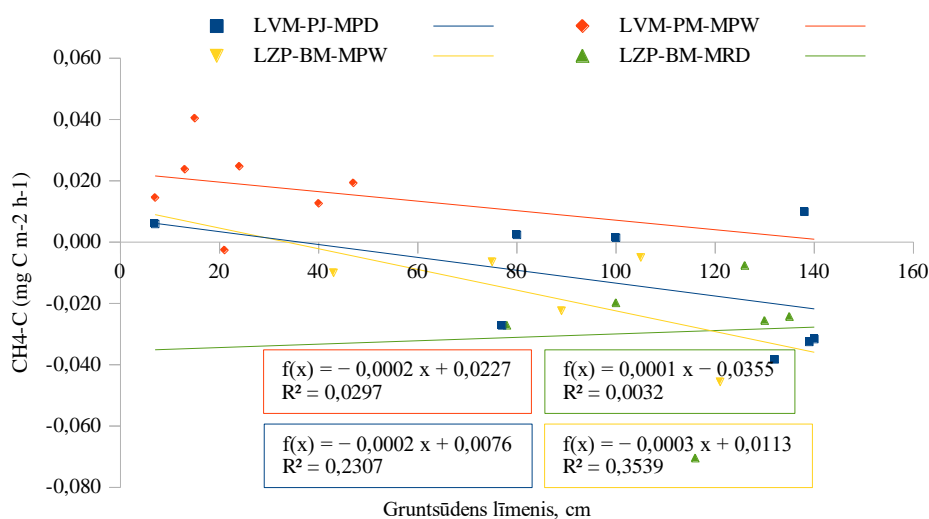
Pētījumā nav konstatētas izteiktas sakarības starp gruntsūdens līmeni un SEG emisijām (58., 59. un 60. attēls), izņemot atsevišķas korelācijas, kas var būt saistītas ar nelielu datu apjomu. Datu analīzi varēs veikt visu plānoto datu iegūšanas.



Attēls 58. Kopējās ekosistēmas CO₂ aprites augsnē sakarība ar gruntsūdens līmeni.



Attēls 59. N₂O emisiju no augsnes sakarība ar gruntsūdens līmeni.



Attēls 60. CH₄ emisiju no augsnes sakarība ar gruntsūdens līmeni.

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

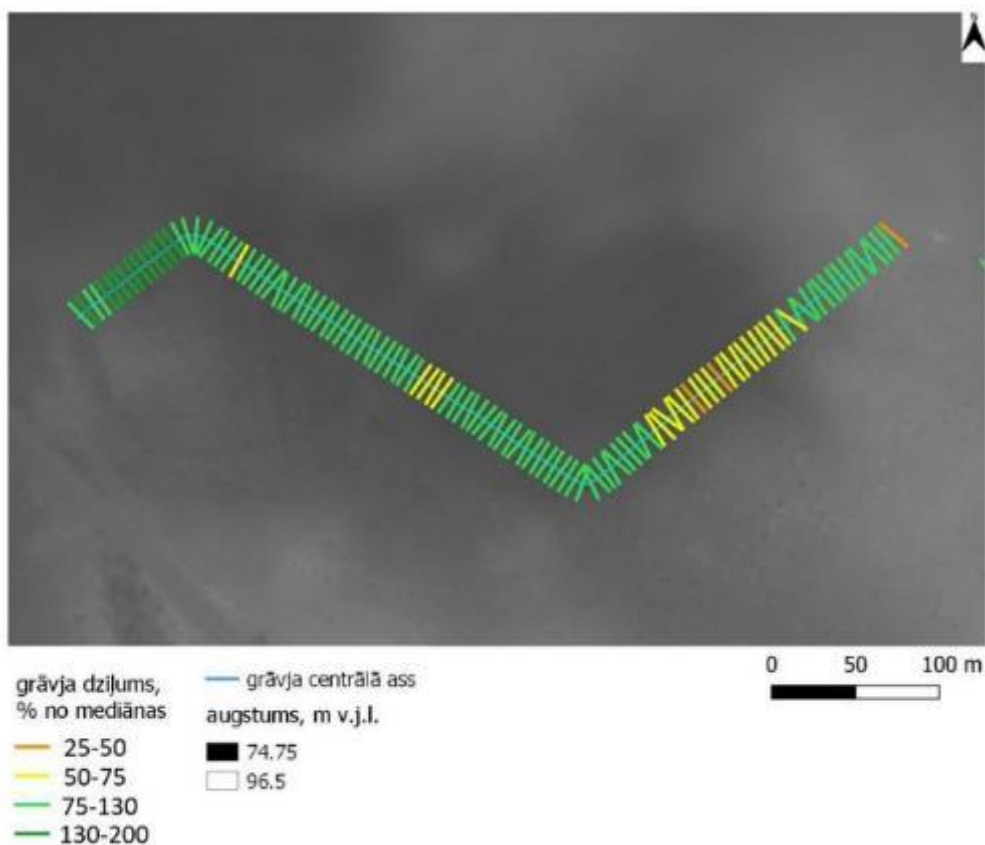
Darba uzdevums ir metodes meliorācijas sistēmu stāvokļa analīzes pielāgošana meža zemēm un SEG emisiju raksturošanai kūdreņos, balstoties uz izstrādāto metodiku lauksaimniecībā izmantojamās zemes raksturošanai.

Lielākā daļa no Latvijā esošās ilgtermiņa ekspluatācijas infrastruktūras, kurai pieskaitāms arī grāvju tīkls, ir veidota pirms atbilstība klimata pārmaiņu izraisītām izmaiņām iekļauta plānošanas procesā. Tādēļ ir būtiski iegūt precīzus datus par grāvju tīkla stāvokli, lai spētu novērtēt tā piemērotību prognozējamiem apstākļiem un uzlabošanas pasākumu nepieciešamību.

Metode grāvju tīkla identificēšanai, izmantojot LiDAR datus, sniedz labākus rezultātus, nekā citas līdzīgos pētījumos izmantotās metodes. Lauksaimniecības zemēs iegūts grāvju tīkla kopējais garums ar precizitāti līdz 96%, salīdzinot ar references datiem, bet meža zemēs – 90 līdz 95%, atkarībā no grāvju veida. Minimālais identificējamo grāvju dziļums mežā un lauksaimniecības zemēs ir 0,3 m, kas atbilst sezonālo grāvju dziļumam. Atsevišķos gadījumos var noteikt arī seklāku, līdz 0,2 m dziļu grāvju atrašanās vietas, bet apstrādājot datus plašākam reģionam, kļūdas rada dziļākas vagas un mežizstrādes tehnikas radītās rīses, tādēļ korektāk kā dziļuma robežvērtību izmantot 0,3 m. Modelētajos grāvju datos iespējami iztrūkstoši posmi, kuri var veidoties seklāku vai aizsērējušu grāvju identificēšanas laikā.

Šāda, uz augstas izšķirtspējas digitālā reljefa modeļa analīzi vai LiDAR datiem balstīta pieeja meliorācijas grāvju kartēšanā, ir unikāla un aktuālākajos pētījumos nav aprakstīta. Iepriekšējos pētījuma posmos izstrādātā metodika ir aprobēta un sevi pierādījusi ļoti plašu teritoriju un liela izmēra digitālo reljefa modeļu analīzē (Melniks u.c., 2022).

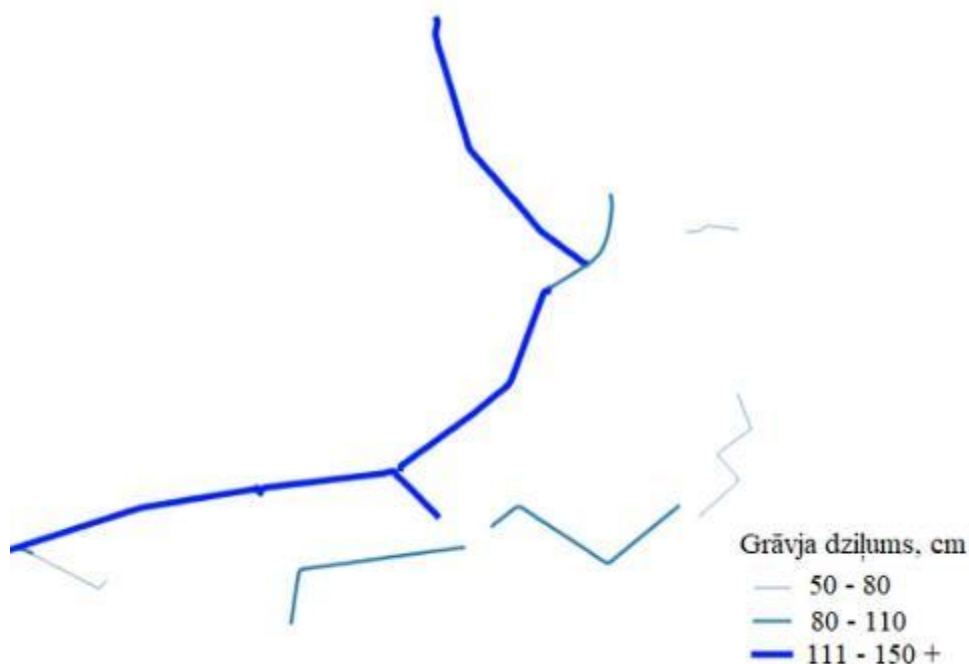
Izmantotā metode balstās uz trim grāvja tehnisko stāvokli un apaugumu raksturojoši parametri – grāvja dziļums, grāvja gultnes augstumatzīme un veģetācijas klātbūtne, tās augstuma klasifikācija. Šie parametri ir iegūstami ar lietotāja izvēlētu soļa attālumu atkarībā no nepieciešamās detalizācijas pakāpes (61. attēls).



Attēls 61. Grāvja šķērsprofilu analīzes piemērs.

Lai novērtētu grāvju posmu dziļumu atšķirības visā to garumā, ar 5 m soli izvietoti virtuāli šķērsprofili, kuri sniedz informāciju par dziļāko vietu grāvī, kā arī par abu grāvju malu augstumu. Šīs darbība veikta izmantojot SAGA GIS un QGIS rīkus, kā ieejas datus izmantojot DEM un grāvju vektorus. Izmantojot iegūto informāciju par grāvja dziļāko vietu un tā malas augstumu, grāvja dziļums aprēķināts ņemot vērā tā zemāko malu. Katram grāvja objektam aprēķināts tā vidējais dziļums, kā arī dziļuma mediāna. Analīze veikta ņemot vērā šos divus rādītājus un grāvja aktuālā dziļuma nobīdi no tiem, katrā no šķērsprofiliem.

Izmantojot iegūtos rezultātus iespējams veikt automātisku grāvju tīkla klasifikāciju pēc tā veida un dziļuma, iegūstot pilnīgāku informāciju par visa veida grāvju tehnisko stāvokli un tīkla savienojamību (62. attēls).



Attēls 62. Grāvju tīkla klasifikācijas piemērs.

7.3. Izstrādāt modelēšanas instrumentus Hg, SEG emisiju un biogēno elementu izneses aprēķiniem

Darba uzdevums ir metodikas izstrādāšana HYPE vai ekvivalenta modeļa adaptēšanai meža zemēm summārās noteces raksturošanai, salīdzinot nokrišņus, evapotranspirāciju un iespējamo gruntsūdeņu izspīlēšanos, kā arī darbību datu kvalitātes raksturošana un uzlabojumu plāna izstrādāšana problemātisko jautājumu risināšanai. Iegūtie dati izmantojami izšķīdušā organiskā oglekļa (DOC) un netiešo slāpekļa emisiju raksturošanai organiskās augsnēs. Galvenie kritēriji modeļa izvēlei ir ticami lokāla un reģionāla līmeņa modelēšanas rezultāti, ko apliecinājuši līdzšinēji pētījumi Latvijas apstākļiem līdzīgā klimatiskā reģionā, un vienkārši, no atvērtiem datu avotiem pieejami darbību dati, lai modeli varētu ieviest SEG inventarizācijas sistēmā bez būtiskām papildus izmaksām darbību datu iegūšanai.

Visas hidroloģiskās parādības un procesi ir cieši saistītas ar klimatu, laika apstākļiem, zemes segumu un izmantošanas veidu upju baseinos, reljefa īpatnībām, augsni un to veidojošajiem nogulumiem. Nepieciešamas zināšanas par upju tīklu, blīvumu, upes ieleju, purvainumu, ezerainību, morfometrisko raksturojumu (Zīverts, 2004).

Tāpat iespējams ar hidroloģiskās modelēšanas palīdzību pētīt ūdens kvalitāti un veikt simulācijas upju baseinos, kuros nav pieejami novērojumu dati (Bronstert u.c., 2002). Turklāt noteces modelēšana var kalpot kā papildus informācija gadījumos, kad tiek plānoti dambji, meliorācija un ūdens resursu novērtēšanai teritorijā (Boiten, 2003), kā arī videi draudzīgu meliorācijas sistēmu elementu projektēšanas fāzē, kad katra konkrētā elementa dimensiju noteikšanai nepieciešams veikt hidroloģiskos aprēķinus un prognozes (Lagzdīņš, 2012).

Plašas iespējas hidroloģiskās modelēšanas rīku izvēlē pieejamas brīvpieejas ĢIS programmatūrā, piemēram, GRASS GIS (Geographic Resources Analysis and Support System), kurā integrēti un tādi hidroloģiskie modeļi kā SIMWE (Simulation of Water Erosion, Mitas & Mitasova, 1998), kā arī TOPMODEL (Cho, 2000).

Mitasova ar līdzautoriem (Mitasova u.c., 2004) pielāgoja SIMWE modeli arī virszemes nokrišņu ūdens plūsmas simulāciju veidošanai, kas šobrīd pazīstams kā rīks r.sim.water. Ar tā palīdzību iespējams modelēt upju caurplūdumu un teritoriju stāvokli pie noteikta nokrišņu apjoma. Iespējams arī modelēt situāciju dinamikā, attēlojot teritorijas applūšanu laika vienībās, pie mainīga nokrišņu daudzuma. Šim modelim nepieciešami tādi izejas dati kā digitālais augstuma modelis, kā arī dažas tā transformācijas, kuras iegūstamas ar citu GRASS GIS modelēšanas rīku palīdzību. Korektākam rezultātam norādāma arī zemes seguma rastra karte, kura satur Maninga virsmas raupjuma koeficienta vērtības.

Iepriekš minētie modeļi izmantoti vairākos pētījumos (Hofierka u.c., 2018; Petrasova u.c., 2017) kur izmantojot ļoti augstas izšķirtspējas digitālos augstuma modeļus, simulēta teritoriju applūšana ekstrēmu nokrišņu gadījumu laikā, kā arī analizēta reljefa modeļa nepilnību ietekme uz iegūtajiem rezultātiem. Hofierkas (Hofierka u.c., 2018) pētījumā šis modelis izmantots karsta kritēju identificēšanā reljefa modelī un iespējamo ģeomorfoloģisko risku analizē, ar intensīvu divu stundu lietusgāžu radītā efekta modelēšanu. Secināts, ka modeļa darbība uzskatāma par tuvu reālajai situācijai dabā, kur liela nozīme ir Maninga koeficientam, zemes segumam un grunts infiltrācijas spējai. Ar modeļa rezultātiem veiksmīgi ir izdevies identificēt beznoteces ieplakas un ūdens akumulāciju tajās pie ekstrēmiem nokrišņiem. Būtiskākā šāda modeļa priekšrocība, salīdzinot ar citām metodēm, piemēram, beznoteces ieplaku identificēšanā, ir parādīt vietas šajās ieplakās, kurās ūdens tiešām varētu uzkrāties, ņemot vērā zemes seguma veidu un grunts infiltrāciju (Hofierka u.c., 2018). Pēdējam secinājumam var piekrist daļēji, balstoties uz pētījuma rezultātiem Latvijā, kur izstrādāta un aprobēta metode mitru minerālaugšņu identificēšanai mežā (Ivanovs & Lupikis, 2018).

2022. gadā veicām ūdens noteces modelēšanas izmēģinājumus ar HYPE (Hydrological Predictions for the Environment) modeli, kas līdz šim testēts lauksaimniecībā izmantojamās zemēs barības vielu noteces modelēšanai. HYPE modelis ir hidroloģisks modelis ūdens resursu un to kvalitātes novērtējuma veikšanai dažādos mērogos. Modelī ainavu iedala klasēs, kuru izšķiršanu ietekmē augsnes tips, zemes lietojuma veids un augstums virs jūras līmeņa.

Modelis simulē ūdens plūsmu un slāpekļa un fosfora transportu un apriti, taču to var izmantot arī oglekļa aprites modelēšanai. Barības elementu plūsma seko ūdens plūsmai dažādos veidos: virszemes notece, plūsma makroporās, drenāžas caurulēs un izplūde no atsevišķiem augsnes slāņiem (Lindström u.c., 2010).

HYPE modeļa ģeogrāfiskās vienības ir sateces baseini un apakšbaseini, kuros iegūtie mērījumi tiek attiecināti uz baseina aizņemto platību. Katrs apakšbaseins sīkāk var tikt iedalīts klasēs, kas ir sīkākā izdalāmā telpiskā vienība un tā netiek piesaistīta konkrētām ģeogrāfiskām vietām, taču tiek izteikta kā daļa no apakšbaseina platības (Lindström u.c., 2010). Lai iegūtu informāciju par sateces baseinu ģeogrāfisko izvietojumu, pielietoti QGIS un GRASS GIS rīki.

Lai pareizi pielietotu šo modeli, vērā jāņem arī caurtekas, kas konkrētajā vietā bijušo situāciju var izmainīt, tādēļ veikta to identificēšana, izmantojot LiDAR datus un iepriekšējos pētījumos gūtās atziņas (Melniks u.c., 2020). Ņemot vērā to, ka Latvijas teritorijas reljefs lielākoties uzskatāms par līdzenu, un meliorācijas sistēmu nolietojums ir augsts, automātiska caurteku identificēšana atsevišķās teritorijās var nebūt iespējama. Šajā pētījumā augstākā caurteku identificēšanas precizitāte ir lielajiem grāvjiem un nelielām upēm un strautiem, savukārt zemāka precizitāte ir līdzenās un pārmitrās teritorijās.

Parametri, kas nepieciešami, lai ar HYPE modeli nonāktu pie ūdens noteces, ir:

- nokrišņi;
- temperatūra;
- modeļa parametri;

Oglekļa aprite meža ekosistēmā

- sateces baseina dati;
- augsnes tips;
- zemes lietojuma veids/zemes seguma veids.

Meteoroloģiskie dati iegūti, izmantojot LVGMC datubāzes, bet augsnes un nogulumu telpiskās izplatības raksturošanai izmantota Kvartāra nogulumu karte (Meirons, 2002), kurai atkarībā no nogulumu veida un granulometriskā sastāva piešķirta infiltrācijas spējas absolūtā vērtība balstoties uz vairāku pētījumu datiem (42. tabula). Pētījumā ietvertā pilotteritorija ir kūdrenis 9 ha platībā (audzes identifikators 405-421-3) Aģes upes baseinā, kur noteces monitorings veikts 2016.-2019. gados koku augšanas apstākļu uzlabošanas pētījumu programmas ietvaros un ir pieejama detalizēta informācija par noteces īpašībām (Kārkliņa u.c., 2021).

Tabula 42. Infiltrācijas ātruma rādītāji (Hwang u.c., 2017; Suleiman, 2008)

| Nr. | Nogulumu veids | Aptuvenā infiltrācija, mm h ⁻¹ |
|-----|------------------------------|---|
| 1. | Māls | 0,004 - 0,04 |
| 2. | Smilšmāls | 0,4 - 4 |
| 3. | Mālsmilts | 4,0 - 20,0 |
| 4. | Aleirītisks māls, smilts | 21,0 - 41,0 |
| 5. | Smilts, smalkgraudaina | 41,0 - 208,0 |
| 6. | Smilts, vidējgraudaina | 208,0 - 833,0 |
| 7. | Smilts, rupjgraudaina | 833,0 - 2083,0 |
| 8. | Grants, oļi | 2083,0 - 20833,0 |
| 9. | Kūdra, atkarībā no sad. pak. | 0,4 - 625,0 |

Veicot modeļa pārbaudi ar Zviedrijā pielietotajiem parametriem (Lindström u.c., 2010), konstatējām, ka gan noteces īpašības, gan apjoms būtiski atšķiras – modelētais DOC saturs ūdenī ir vairākas reizes atšķiras no faktiskā (sezonāli var būt gan lielāks, gan mazāks), modelētais noteces apjoms ir būtiski mazāks par uzskaitīto. Galvenais iemesls šādai neatbilstībai var būt izmantoto modeļa parametru neatbilstība Latvijas situācijai. Pētījumā izvērtējam dažādu DOC modelēšanai nepieciešamo modeļa parametru (43. tabula) iegūšanas iespējas, secinot, ka vairumā gadījumu nepieciešama papildus izpēte, lai arī modelis teorētiski var korekti novērtēt ūdens noteci. Arī papildus izpētes gadījumā modeļa pielietošana būtu saistīta ar nepieciešamību iegūt detalizētu informāciju par teritorijām, kurām jāveic aprēķins, tāpēc praktiskam pielietojumam SEG inventarizācijā nepieciešams vienkāršāks DOC emisiju aprēķinu risinājums.

Tabula 43. HYPE modeļa aprēķinu parametri

| Nosaukums | Skaidrojums | Pieejamība |
|-----------|--|--|
| humusc1 | (humusC) stabilu oglekļa savienojumu sākuma koncentrācija augsnes virskārtā, mg m ⁻³ | MRM parauglaukumos var veikt aptuvenu novērtējumu, jo ir zināms kūdras slāņa biezums un var ekstrapolēt kūdras īpašības dažādos augsnes slāņos, taču nav zināms stabilo un viegli mineralizējamo oglekļa |
| fastc1 | (fastC) viegli mineralizējamo oglekļa savienojumu sākuma koncentrācija augsnes virskārtā, mg m ⁻³ | |

Oglekļa aprite meža ekosistēmā

| Nosaukums | Skaidrojums | Pieejamība |
|-----------|--|---|
| humusc2 | (humusC) stabilu oglekļa savienojumu sākuma koncentrācija augsnes vidējā slānī, mg m ⁻³ | savienojumu sadalījums, ne arī to ietekmējošie faktori. Faktoram ir būtiska ietekme uz DOC emisijām. |
| fastc2 | (fastC) viegli mineralizējamu oglekļa savienojumu sākuma koncentrācija augsnes vidējā slānī, mg m ⁻³ | |
| humusc3 | (humusC) stabilu oglekļa savienojumu sākuma koncentrācija augsnes dziļākajā slānī, mg m ⁻³ | |
| fastc3 | (fastC) viegli mineralizējamu oglekļa savienojumu sākuma koncentrācija augsnes dziļākajā slānī, mg m ⁻³ | |
| koflim | parametrs augsnes mitruma robežvērtībai, kad DOC pārvēršas par <i>fastC</i> | Nav pieejams, atkarīgs no meteoroloģiskajiem apstākļiem. |
| ocsoilslp | koeficients ar fiksētu vērtību (0,08) | - |
| ocsoilsat | koeficients ar fiksētu vērtību (0,6) | - |
| minc | oglekļa uzkrājuma daļa, kas mineralizēta līdz DOC | Nav pieejams, atkarīgs no meteoroloģiskajiem faktoriem, ūdens pH un barības vienu pieejamības |
| klh | parametrs nobiru transformācijas par stabiliem organiskiem savienojumiem ātrumam, d ⁻¹ | Nav pieejams, atkarīgs no nobiru ķīmiskā sastāva un meteoroloģiskajiem faktoriem |
| klo | parametrs nobiru transformācijas par DOC ātrumam, d ⁻¹ | |
| kho | parametrs stabilu organisku savienojumu transformācijas par DOC ātrumam, d ⁻¹ | |
| kof | parametrs DOC transformācijas par fastC ātrumam, d ⁻¹ | Nav pieejams, atkarīgs no meteoroloģiskajiem faktoriem |
| kegwreg | parametrs DOC koncentrācijas kritumam, ieskalojoties gruntsūdeņos | Nav pieejams, ietekme iespējams nebūtiska, jo kūdras augsnēs ieskalosānās dziļākajos gruntsūdeņos var būt nebūtiska |
| koc | parametrs DOC pārnesei starp augsnes slāņiem perkolācijas ietekmē | Var ekstrapolēt, izmantojot 42. tabulā dotās infiltrācijas vērtības, ja zināmi pārējie rādītāji |
| ocfldelx | parametrs organiskā oglekļa aizkavei no noteces, mm ts ⁻¹ | Nav pieejami |
| ocfldele | parametrs organiskā oglekļa aizkavei no noteces raksturošanai | |

Alternatīvs risinājums, kas vērtēts pētījuma ietvaros, ir evapotranspirācijas un DOC satura monitoringa datu izmantošana DOC emisiju novērtēšanai. Visas hidroloģiskās parādības un procesi ir cieši saistīti ar klimatu, laika apstākļiem, zemes segumu un izmantošanas veidu upju baseinos, reljefa īpatnībām, augsni un to veidojošajiem nogulumiem. Lai raksturotu ūdens apriti, nepieciešamas zināšanas par upju tīklu, blīvumu, upes ieleju, purvainumu, ezerainību, morfometrisko raksturojumu. Ūdens bilanci vienkāršoti var raksturot ar vienādojumu, kas apraksta ūdens plūsmu sistēmā un no tās noteiktā laika periodā (20. formula). Zivertā (2004) pētījumā iegūti

šādi vidējie rādītāji Latvijas teritorijai: nokrišņi 703 mm, notece 245 mm un evapotranspirācija, jeb iztvaikošana 458 mm.

$$Q = P - ET - V \quad (20)$$

kur

Q – notece,

P – nokrišņi,

ET – evapotranspirācija,

V – pazemes ūdeņu krājumu pieaugums.

Ar hidroloģiskās modelēšanas palīdzību var pētīt arī ūdens kvalitāti un veikt simulācijas upju baseinos, kuros nav pieejami novērojumu dati (Bronstert u.c., 2002). Turklāt noteces modelēšana var kalpot kā papildus informācija gadījumos, kad tiek plānoti dambji, meliorācija un ūdens resursu novērtēšanai teritorijā (Boiten, 2003), kā arī videi draudzīgu meliorācijas sistēmu elementu projektēšanas fāzē, kad katra konkrētā elementa dimensiju noteikšanai nepieciešams veikt hidroloģiskos aprēķinus un prognozes (Lagzdīņš, 2012).

Plašas iespējas hidroloģiskās modelēšanas rīku izvēlē pieejamas brīvpieejas ĢIS programmatūrā, piemēram, GRASS GIS (Geographic Resources Analysis and Support System), kurā integrēti un tādi hidroloģiskie modeļi kā SIMWE (Simulation of Water Erosion, Mitas & Mitasova, 1998), kā arī TOPMODEL (Cho, 2000).

Lai aprēķinātu evapotranspirāciju, izmantosim līdzīgu metodiku, kā (Penman-Monteith, turpmāk – PM), kā Somijas un citu valstu pētnieku modeļos (Guzinski u.c., 2020; Launiainen u.c., 2019; Running, Steve u.c., 2019).

Modelēto noteces datu ticamību pārbaudīsim, izmantojot iepriekš aprakstīto ūdens bilances vienādojumu, ņemot vērā sateces baseina parametrus un meteoroloģiskos datus.

Augsnes mitruma apstākļu raksturošanai izmantota LVMI Silava izstrādātā augsnes mitruma karte (Ivanovs & Lupikis, 2018). Šāda pieeja augsnes mitruma raksturošanai ir pielīdzināma Somijā izstrādātā evapotranspirācijas modelī izmantotajam Topogrāfiskā mitruma indeksam (TWI). Meteoroloģisko novērojumu datus raksturos ar minimālo, vidējo un maksimālo gaisa temperatūru, nokrišņu summu, gaisa mitrumu, atmosfēras spiedienu, kā arī saules spīdēšanas laiku.

Izmantojot Sentinel-2 satelītainas, jau iegūtas teritorijas Normalizētā veģetācijas indeksa (NDVI) kartes, kuras izmantotas lapu laukuma indeksa (LAI) novērtēšanai.

Datu apstrādi veiks divos blokos – telpisko datu apstrāde (LAI, augsnes mitruma kartes) QGIS programmā, kur pieņemts, ka transpirācija no koku lapotnes un ar veģetāciju klātas augsnes ir lielāka nekā iztvaikošana no augsnes bez veģetācijas. Lielākā evapotranspirācija ir sagaidāma lapu koku audzēs ar vidēju līdz vidēji lielu mitruma saturu augsnē, savukārt, mazāka evapotranspirācija sagaidāma sausos un ļoti mitros skujkoku mežos, attiecīgi ūdens nepieejamības un noēnojuma dēļ (Breil u.c., 2021). Otru datu apstrādes posmu veiks, izmantojot Pārtikas un Lauksaimniecības organizācijas (FAO) izstrādāto Evapotranspirācijas kalkulatoru *ET_o Calculator*. Šajā programmā kā ievades dati izmantoti visi iepriekš minētie vietas meteoroloģisko novērojumu dati par izvēlēto periodu. Izmantojot šos datus PM evapotranspirācijas vienādojumā iegūst vietai specifisku vidējās evapotranspirācijas (ET) novērtējumu dienas un mēneša griezumā, kuru telpiskajiem datiem piesaista, izmantojot pirmajā datu apstrādes posmā iegūto augsnes mitruma un LAI modeli.

Ar TOPMODEL iegūtos noteces datus salīdzināsim ar ūdens bilances un evapotranspirācijas modeļa rezultātiem, tādā veidā raksturojot ne tikai ūdens un attiecīgi ūdenī izšķīdušo savienojumu iznesi no sateces baseina, bet arī teritorijas mitruma potenciālās izmaiņas laikā.

Oglekļa aprīte meža ekosistēmā

DOC emisiju raksturošanai izmantosim LIFE OrgBalt un citu pētījumu ietvaros iegūtos ikmēneša DOC satura datus grāvju notecē un augsnes ūdenī. Iegūto datu verifikāciju veiksīm, izmantojot Koku augšanas apstākļu pētījumu programmas ietvaros pelnu izmantošanas izmēģinājumu objektā Aģes upes baseinā iegūtos datus.

8. OGLEKĻA BILANCE VECĀS MEŽAUDZĒS

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

Līdz šim Latvijā ir veikti maz pētījumi par meliorācijas sistēmu ietekmi uz oglekļa uzkrājumu un oglekļa piesaisti mežaudzēs galvenajās oglekļa krātuvēs (Bārdule, Butlers, u.c., 2021; Bārdule, Petaja, u.c., 2021; Butlers u.c., 2021; Lupiķis u.c., 2017). Tomēr iegūtie rezultāti apliecina, ka audzēs mežos ar organiskajām augsnēm, oglekļa uzkrājums ne tikai dzīvo koku biomasā, bet arī atmirušajā koksniē, zemsegā, nobirās, kā arī augsnē ir nozīmīgi atšķirīgs un to ietekmē konkrētās vietas apstākļi – gruntsūdens līmeņa svārstības un citi, īpaši vecās mežaudzēs. Tāpēc šajā pētījumu posmā iegūti turpināta datu ieguve par oglekļa uzkrājumu vecās bērza audzēs mežos ar auglīgām organiskajām augsnēm niedrāja (Nd), šaurlapju kūdreņa (Ks) un platlapju kūdreņa (Kp) meža tipos.

Šī pētījuma ietvaros ar jēdzienu **veca (pāraugusi) kokaudze** apzīmē audzi, kurā valdošās sugas koki pārsnieguši noteikto ciršanas vecumu par vairāk nekā divām vecumklasēm. Savukārt, **vecs mežs** attiecināms uz ilgstoši (vismaz divas valdošās koku sugas vecumklases) antropogēni maz traucētu mežu. Vecā mežā nav veikta krājas kopšanas un galvenā cirte, un to veido vai nu veca kokaudze, vai dabisko traucējumu ietekmē (piemēram, vējgāzes, ugunsgrēki, dendrofāgo kukaiņu savairošanās) izveidojusies jauna audze. Tātad, veca kokaudze var būt vecs mežs, bet ne visi vecie meži sastāv no vecām kokaudzēm – kuras tiek analizētās pētījuma ietvarā.

Pētījuma sākumā tika atlasīta vecas bērza audzes, kuras atbilda konkrētajiem kritērijiem: 1) valdošā suga – bērzs, 2) audzes vecums > 110 gadi,; 3) meža tips (Nd, Ks, Kp); 4) valdošās sugas īpatsvars audzes sugas sastāva vienādojums (> 60% no pirmā stāva šķērslaukuma); 5) nav pieejama dokumentāla informācija par saimniecisko darbību audzē; 6) attālas vietas (vismaz 5 km no ciematiem un 1 km no ceļiem); 7) nogabala lielums vismaz 0,5 ha (4-6 parauglaukumiem (PL)).

Šādi izvēlētās mežaudzes tika apsektas dabā, lai pārlicinātos par atbilstību faktiskajai situācijai. Tikai tās audzes, kuras atbilda visiem atlasē kritērijiem, tika uzmērītas. Pēc datu bāzē atlasītām vairāk kā 100 audzēm, dabā apsekoja 82 audzes. Kopumā 26 audzes atbilda visiem kritērijiem. Pētījumā pirmajā etapā ievākti dati par 8 bērzu audzēm Nd un 8 bērzu audzēm kūdreņos (4 audzes Ks un 4 audzes Kp). Šajā etapā saskaņā ar plānu ievākti dati no 10 atlikušajām izvēlētajām audzēm, kuru vidējais vecums 122 gadi (63. attēls, 44. tabula).

Tabula 44. Pētījuma objektu raksturojums

| NPK | Koka suga | Atrašanās vieta (kv.apg_kv_nog) | Meža tips | Vecums | C uzkrājums dzīvajā biomasā, t C ha ⁻¹ |
|-----|-----------|------------------------------------|-----------|--------|---|
| 1 | Bērzs | 102-11-8 | Ks | 123 | 154,7 |
| 2 | Bērzs | 102-138-12 | Kp | 138 | 140,1 |
| 3 | Bērzs | 102-386-3 | Nd | 133 | 107,3 |
| 4 | Bērzs | 104-118-8 | Ks | 118 | 106,6 |
| 5 | Bērzs | 105-156-33 | Kp | 133 | 128,9 |
| 6 | Bērzs | 105-169-6 | Kp | 133 | 95,8 |
| 7 | Bērzs | 106-62-9 | Nd | 142 | 100,1 |

Oglekļa aprite meža ekosistēmā

| NPK | Koka suga | Atrašanās vieta (kv.apg_kv_nog) | Meža tips | Vecums | C uzkrājums dzīvajā biomasā, t C ha ⁻¹ |
|-----|-----------|------------------------------------|-----------|--------|---|
| 8 | Bērzs | 107-367-1 | Ks | 121 | 114,1 |
| 9 | Bērzs | 107-455-12 | Ks | 121 | 134,4 |
| 10 | Bērzs | 111-284-1 | Kp | 132 | 105,6 |
| 11 | Bērzs | 207-26-12 | Nd | 128 | 111,2 |
| 12 | Bērzs | 303-41-8 | Kp | 117 | 121,8 |
| 13 | Bērzs | 408-505-13 | Nd | 124 | 96,0 |
| 14 | Bērzs | 409-125-19 | Ks | 124 | 109,1 |
| 15 | Bērzs | 409-432-5 | Ks | 119 | 100,1 |
| 16 | Bērzs | 409-661-3 | Nd | 124 | 82,4 |
| 17 | Bērzs | 411-301-5 | Nd | 164 | 81,3 |
| 18 | Bērzs | 411-365-20 | Nd | 164 | 79,3 |
| 19 | Bērzs | 503-473-7 | Nd | 120 | 44,5 |
| 20 | Bērzs | 511-1-9 | Nd | 122 | 113,6 |
| 21 | Bērzs | 701-197-42 | Nd | 120 | 87,5 |
| 22 | Bērzs | 701-471-7 | Ks | 140 | 129,7 |
| 23 | Bērzs | 709-152-8 | Nd | 120 | 109,8 |
| 24 | Bērzs | 712-109-9 | Ks | 138 | 141,3 |
| 25 | Bērzs | 713-322-3 | Nd | 130 | 70,8 |
| 26 | Bērzs | 714-269-2 | Nd | 148 | 76,9 |

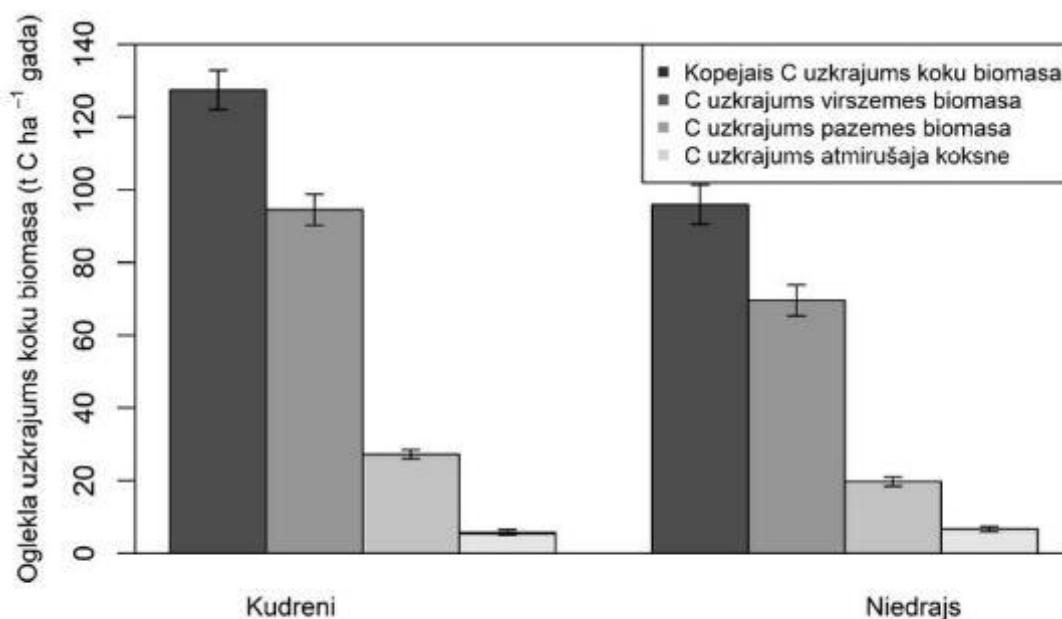


Attēls 63. Pētījuma rezultātu prezentēšana Mežzinātnes dienā 21.10.2022 vecā bērza mežaudzē

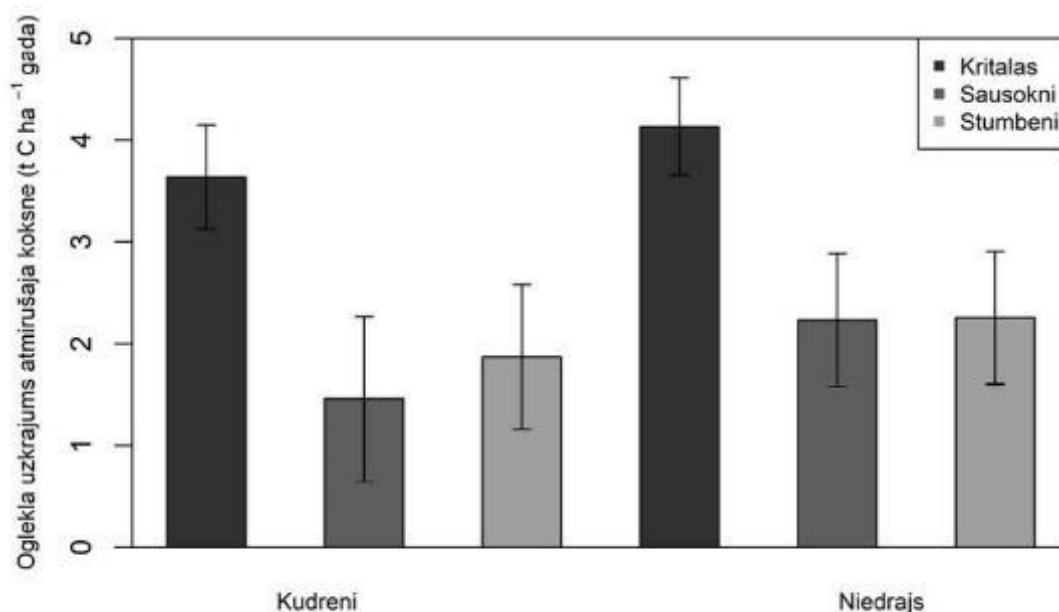
Datu ievākšana un analīze veikt atbilstoši iepriekšējā etapa pārskatā aprakstītajai metodikai.

Oglekļa aprīte meža ekosistēmā

Meliorācijas sistēmai ir bijusi nozīmīga loma un statistiski būtiska ($p < 0.001$), determinējot veco bērza audžu parametrus un oglekļa (C) uzkrājumu, kas koku virszemes un pazemes biomasā augstāks kūdreņos nekā niedrājā (64. attēls). Vidējais uzkrātais C apjoms (dzīvo koku biomasā un atmirušajā koksne) kūdreņos ir $127,5 \pm 6,0 \text{ t C ha}^{-1}$ ($\pm 95\%$ ticamības intervāls), bet niedrājā $95,9 \pm 5,03 \text{ t C ha}^{-1}$. Vidējais C uzkrājums dzīvo koku virszemes biomasā kūdreņos ir $94,5 \pm 4,7 \text{ t C ha}^{-1}$, bet niedrājā $69,6 \pm 4,0 \text{ t C ha}^{-1}$. Vidējais C uzkrājums dzīvo koku pazemes biomasā kūdreņos ir $27,2 \pm 1,29 \text{ t C ha}^{-1}$, bet niedrājā $19,7 \pm 1,11 \text{ t C ha}^{-1}$. Savukārt, atmirušās koksnes C uzkrājums kūdreņos ir $5,7 \pm 0,98 \text{ t C ha}^{-1}$, un niedrājā $6,7 \pm 0,70 \text{ t C ha}^{-1}$.



Attēls 64. Vidējais oglekļa (C) uzkrājums kūdreņos un niedrājos dažādās koka frakcijās un atmirušajā koksne ($\pm 95\%$ ticamības intervāls).

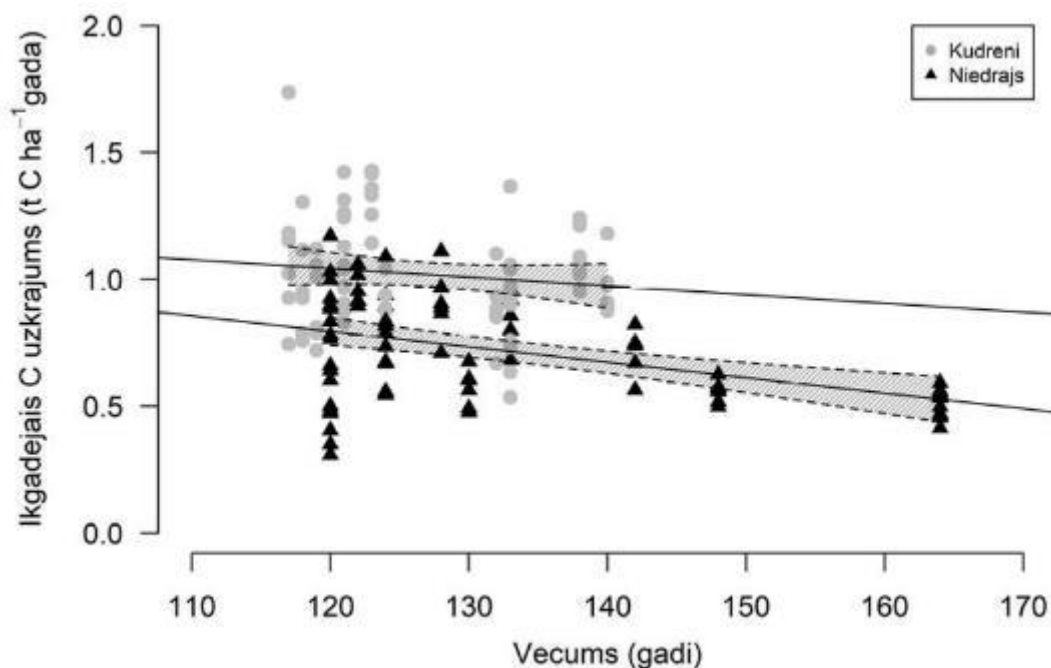


Attēls 65. Vidējais C uzkrājums dažādās atmirušās koksnes frakcijās pa meža tipiem (\pm 95% ticamības intervāls).

Kopējais uzkrātais oglekļa apjoms nīdrājā ir par 28% mazāks, nekā kūdreņos. Koku virszemes biomasā (stumbrs+zari) uzkrātais C apjoms veido 73% un 74%, pazemes biomasā (balstsaknes, uzsūcošās saknes un celms) sastāda 21%, bet atmirusī koksne veido 5 un 6%, no vidējā uzkrātā C apjoma kūdreņos un Nd meža tipos, attiecīgi.

Atmirušās koksnes lielāko daļu veido kritālas kūdreņos un nīdrājos, $4,1 \pm 0,48$ t C ha⁻¹ un $3,6 \pm 0,51$ t C ha⁻¹, attiecīgi (65. attēls). Otru lielāko daļu veido stumbeņi, $1,9 \pm 0,71$ t C ha⁻¹ kūdreņos un $2,3 \pm 0,65$ t C ha⁻¹ nīdrājā, bet sausokņi veido $1,5 \pm 0,81$ t C ha⁻¹ kūdreņos un $2,2 \pm 0,65$ t C ha⁻¹ nīdrājā. Konstatēts, ka abos meža tipos C uzkrājums kritālās ir būtiski ($p < 0,001$) lielāks nekā sausokņos un stumbeņos. Taču, analizējot atšķirības starp meža tipiem un C uzkrājumu, atmirušās koksnes frakcijām būtiskas atšķirības nav novērotas.

Lai raksturotu oglekļa uzkrājuma izmaiņas laikā, aprēķināts ikgadējais C uzkrājums dzīvo koku biomasā un atmirušajā koksnē. Pieaugot mežaudzes vecumam veco audžu grupā (no 117 līdz 164 gadiem), ikgadējais C uzkrājums samazinās gan kūdreņos, gan nīdrājā (66. attēls). Lai arī mežaudzes krāja ar vecumu turpina pieaugt, tomēr ikgadējais C ir ievērojami zemāks salīdzinājumā ar jaunākām audzēm. Vidējais ikgadējais C uzkrājums kūdreņos sastāda $1,0 \pm 0,05$ t C ha⁻¹ gadā, bet nīdrājā $0,7 \pm 0,04$ t C ha⁻¹ gadā, turklāt atšķirības ikgadēja C uzkrājumā starp meža tipiem ir statistiski būtiskas ($p < 0,001$).

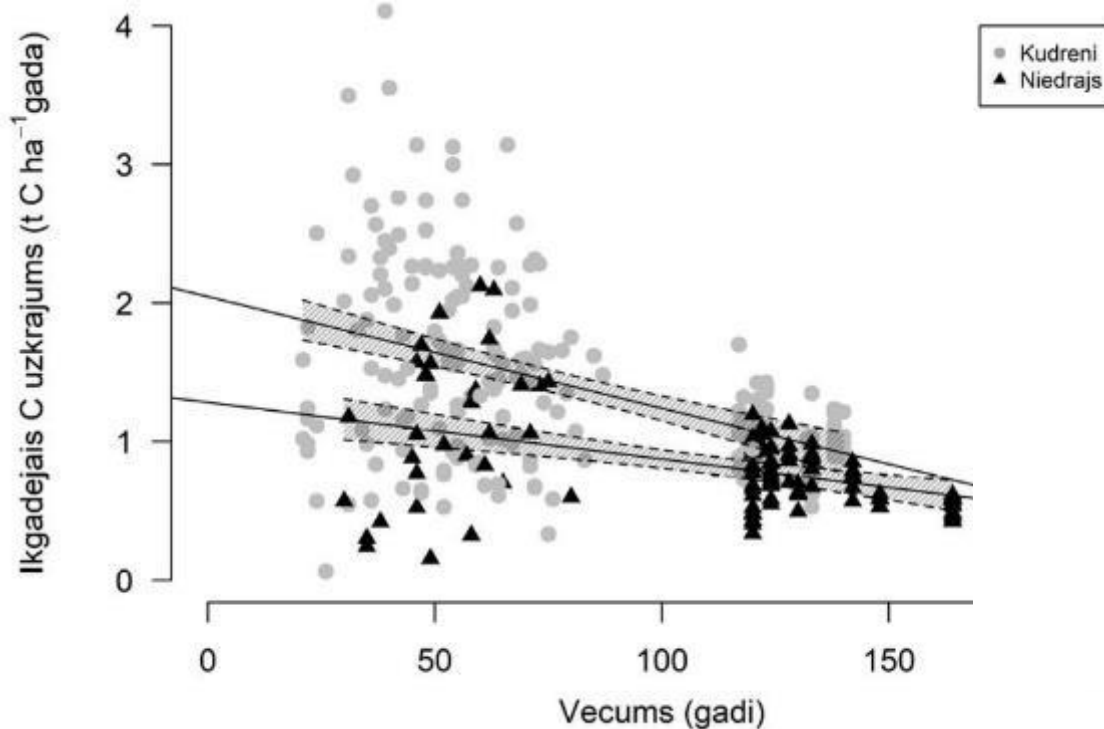


Attēls 66. Ikgadējais C uzkrājums biomasā un atmirušajā koksne atkarībā no audzes vecuma dažādos meža tipos vecās bērza audzēs (pelēkais iekrāsojums apzīmē $\pm 95\%$ ticamības intervālu).

Lai iegūtu priekšstatu par oglekļa uzkrājuma atšķirībām vecās bērza audzēs organiskajās augsnēs, salīdzināšanai izmantoti MRM dati par vidēji 2,3 reizes jaunākām audzēm mežos ar organiskām augsnēm (vidējais vecums 53 ± 4 gadi).

Kopējais C uzkrājums dzīvo koku biomasā un atmirušajā koksne vecās audzēs ir būtiski ($p < 0,01$) lielāks nekā jaunākās audzēs, gan niedrājā (vidēji $60,6 \pm 12,99$ t C ha⁻¹), gan kūdrenī (vidēji $84,9 \pm 6,63$ t C ha⁻¹). Salīdzinot atmirušās koksnes C daudzumu, būtiski ($p < 0,01$) mazāks C uzkrājums atmirušajā koksne novērojams jaunākās bērza audzēs niedrājā (vidēji $2,2 \pm 0,92$ t C ha⁻¹) salīdzinot ar vecām audzēm, taču kūdrenī atšķirības nav izteiktas ($p > 0,05$). Oglekļa uzkrājums dažādās koka frakcijās proporcionāli neatšķiras no vecām audzēm. Jaunākās audzēs virszemes biomasā (stumbrs + zari) uzkrātais C apjoms veido 74% un 75%, pazemes biomasā ir 21%, bet atmirusī koksne – 5% un 4%, no vidējā uzkrātā C daudzuma, attiecīgi, kūdreņos un niedrājā.

Ikgadējais C uzkrājums biomasā un atmirušajā koksne samazinās, pieaugot audzes vecumam gan kūdreņos, gan niedrājā (67. attēls), turklāt atšķirības starp meža tipiem ir statistiski būtiskas ($p < 0,001$). Vidējais ikgadējais C uzkrājums jaunākās ir $1,6 \pm 0,12$ t C ha⁻¹ gadā, kūdrenī, bet niedrājā $1,1 \pm 0,20$ t C ha⁻¹ gadā, taču pieaugušās audzēs (71-80 gadi) kūdreņos ikgadējais C uzkrājums sastāda $1,4 \pm 0,29$ t C ha⁻¹ gadā, bet niedrājā $1,1 \pm 0,39$ t C ha⁻¹ gadā, turklāt atšķirības ir statistiski būtiskas ($p < 0,01$), gan starp meža tipiem, gan salīdzinot vecās audzes ar jaunākām audzēm.



Attēls 67. Ikgadējais C uzkrājums biomasā un atmirušajā koksne atkarībā no audzes vecuma dažādos meža tipos vecās bērza audzes salīdzinājumā ar jaunākām audzēm (pelēkais iekrāsojums apzīmē ± 95% ticamības intervālu).

Šajā pētījuma etapā atbilstoši plānotajam ievākti un analīzei nodoti augsnes paraugi no 10 vecām bērza mežaudzēm (5 Nd, 5 Ks un Kp), kopā ar iepriekšējo etapu nodrošinot visu šai sugai plānoto objektu skaitu (26 gab.). Augsnes paraugi ievākti no 4 parauglaukumiem katrā audzē, 2 atkārtojumos, 4 dažādos dziļumos (0-10, 10-20, 20-40, 40-80 cm) augsnes un zemsegas blīvuma, augsnes oglekļa un slāpekļa koncentrācijas raksturošanai (68. attēls).



Attēls 68. Augsnes paraugu ievākšana.

Galvenās atziņas par 2022. gada rezultātiem:

1. Oglekļa uzkrājums dzīvo koku biomasā vecās bērza audzēs ir būtiski (par 28%) lielāks kūdreņos nekā niedrājā. Mežaudzes ar meliorētām auglīgām kūdras augsnēm var sniegt nozīmīgu ieguldījumu klimata pārmaiņu mazināšanā salīdzinot ar periodiski pārmitrām mežaudzēm niedrājā, tādēļ svarīgi, lai primāri šajās teritorijās tiktu plānota efektīva mežsaimniecība, bet bioloģiskās daudzveidības mērķus realizēt mežaudzēs, kuru klimata pārmaiņu mazināšanas ietekme ir zemāka.
2. Palielinoties audzes vecumam, būtiski samazinās pirmā stāva koku skaits ($r=0,7$ niedrājā, $r=0,4$ kūdreņos; $p<0,05$), liecinot par zemu uzkrājuma stabilitāti un augstu atsevišķu koku bojāejas ietekmi uz kopējo uzkrājumu vecajās audzēs.
3. Vidējais ikgadējais C uzkrājums jaunākās bērza audzēs ir par 44-46% lielāks nekā vecās bērza audzēs. Tātad, pat tajos gadījumos, kad vecie koki joprojām ir dominējošais meža elements, tie nenodrošina efektīvu oglekļa uzkrāšanu.

Pētījuma noslēguma šī etapa rezultāti tiks vērtēti salīdzinājumā ar audzēs ar citām valdošajām koku sugām, kā arī mežos ar organiskām augsnēm iegūtajiem, raksturojot kopējās likumsakarības.

8.2. Rekomendāciju sagatavošana mežkopības praksei

Sagatavoti priekšlikumi, secinājumi ņemot vērā šobrīd ievākot datu materiālu un tie prezentēti politikas veidotājiem “Meža akadēmijā” 13.05.2022 un Augsta līmeņa ekspertu konferencē “Mežsaimniecības un mežrūpniecības ilgtspēja Zaļā kursa ietvarā” 10.06.2022., kā arī Mežzinātnes dienās 21.10.2022. Līdz ar to nodrošināta darba uzdevuma izpilde. Pētījuma noslēguma etapā priekšlikumi tiks papildināt ar iegūtajām atziņām mežos ar organiskām augsnēm.

6. Oglekļa uzkrājumu analizētajās audzēs būtiski ietekmē valdošā koku suga un meža tipu grupa (sausieņi, purvaiņi, kūdreņi). Oglekļa uzkrājumu vecās priedes un bērzu mežaudzēs palielina relatīvi liels egles īpatsvars pirmajā stāvā un tās dominance otrajā stāvā, liecinot par šajā vecumā notiekošu sukcesiju.
7. Nozīmīgākās oglekļa krātuves vecās mežaudzēs sausieņos ir koku biomasas un augsnes. Pirmā stāva biezums ir atšķirīgs ($p < 0,001$) dažādu valdošo koku sugu vecajās audzēs, un tas ir zemāks ($p < 0,001$) nekā kontroles audzēs, liecinot par zemu oglekļa uzkrājuma stabilitāti: atsevišķu pirmā stāva koku bojāeja dabisko traucējumu un/vai vecuma ietekmē var nozīmīgi samazināt kopējo oglekļa uzkrājumu.
8. Saimnieciskās darbības ilgstoši neietekmētās vecās mežaudzēs, kur vecie koki ir dominējošais meža elements, kopējais oglekļa uzkrājums ir vidēji par 20% lielāks nekā par 54-103 gadiem jaunākās (kontroles) audzēs: atšķirības atkarīgas no valdošās koku sugas un meža tipu grupas.
9. Oglekļa uzkrāšanās efektivitāte (oglekļa uzkrājums gadā) koku biomasā un atmirušajā koksniē vecās mežaudzēs ir būtiski (par 27% līdz 47% atkarībā no koku sugas) mazāka nekā vidēji divas reizes jaunākās kontroles audzēs.
10. Nelielais oglekļa uzkrājums atmirušajā koksniē, kā arī ļoti vājā korelācija starp oglekļa uzkrājumu koku biomasā un atmirušajā koksniē liecina, ka analizētajā audžu kopā dabisko traucējumu ietekme ilgstoši ir bijusi neliela. Tātad iegūtie dati raksturo oglekļa uzkrājuma potenciālu (maksimumu) vecās audzēs.
11. Apzinoties, ka dzīvo koku biomasas ir lielākā dinamiskā oglekļa krātuve, rekomendējams meža platībās, kurās ietekme uz klimata pārmaiņu mazināšanu ir galvenais mērķis, veicināt atjaunošanu stādot un pielietot tādu mežsaimniecības modeļi, lai veidotu iespējami ražīgas un pret dabiskajiem traucējumiem noturīgas audzes, tādējādi veicinot arī oglekļa uzkrājuma palielināšanos laika vienībā.
12. Meža platībās, kurās primārais mērķis ir dabas aizsardzība, jāņem vērā, ka ikgadējais oglekļa uzkrājuma pieaugums laika periodā starp pieaugušo un veco audžu stadiju būtiski samazinās. Vecās mežaudzes (vecas kokaudzes) turpina lēni uzkrāt oglekli koku biomasā tik ilgi, kamēr koku vecuma un / vai dabisko traucējumu ietekmē nemainās dominējošais meža elements. Tādēļ, plānojot šādu teritoriju izvietojumu, ieteicams rīkoties tā, lai atstātu iespējami mazāku negatīvo ietekmi uz ES līmeņa klimata politikas realizāciju.

LITERATŪRA

4. Ahirwal, J., Kumari, S., Singh, A. K., Kumar, A., & Maiti, S. K. (2021). Changes in soil properties and carbon fluxes following afforestation and agriculture in tropical forest. *Ecological Indicators*, *123*, 107354. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107354>
5. Akaike, H. (1974). A new look at the statistical model identification. *IEEE Transactions on Automatic Control*, *19*(6), 716–723. <https://doi.org/10.1109/TAC.1974.1100705>
6. Anderson, E. S., Thompson, J. A., Crouse, D. A., & Austin, R. E. (2006). Horizontal resolution and data density effects on remotely sensed LIDAR-based DEM. *Geoderma*, *132*(3–4), 406–415. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2005.06.004>
7. Aosaar, J., Drenkhan, T., Adamson, K., Aun, K., Becker, H., Buht, M., Drenkhan, R., Fjodorov, M., Jürimaa, K., Morozov, G., Pihlak, L., Piiskop, K., Riit, T., Varik, M., Väär, R., Uri, M., & Uri, V. (2020). The effect of stump harvesting on tree growth and the infection of root rot in young Norway spruce stands in hemiboreal Estonia. *Forest Ecology and Management*, *475*, 118425. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118425>
8. Arhipova, N., Gaitnieks, T., Donis, J., Stenlid, J., & Vasaitis, R. (2011). 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>
9. Arhipova, N., Gaitnieks, T., Donis, J., Stenlid, J., & Vasaitis, R. (2012). Heart-rot and associated fungi in *Alnus glutinosa* stands in Latvia. *Scandinavian Journal of Forest Research*, *27*(4), 327–336. <https://doi.org/10.1080/02827581.2012.670727>
10. Bāders, E., Lazdiņš, A., Butlers, A., & Lupiķis, A. (2016). *Atmežošanas radīto siltumnīcefekta gāzu emisiju pārrēķins, tajā skaitā atmežošanas radītās mežistrādes apjoma novērtējums* (ZM/2016/28_EEA; lpp. 23). LVMI Silava.
11. Bārdule, A., Butlers, A., Lazdiņš, A., Līcīte, I., Zvirbulis, U., Putniņš, R., Jansons, A., Adamovičš, A., & Razma, Ģ. (2021). Evaluation of Soil Organic Layers Thickness and Soil Organic Carbon Stock in Hemiboreal Forests in Latvia. *Forests*, *12*(7), 1–15. <https://doi.org/10.3390/f12070840>
12. Bārdule, A., Gerra-Inohosa, L., Kļaviņš, I., Kļaviņa, Z., Bitenieks, K., Butlers, A., Lazdiņš, A., & Lībiete, Z. (2022). Variation in the Mercury Concentrations and Greenhouse Gas Emissions of Pristine and Managed Hemiboreal Peatlands. *Land*, *11*(1414), 20. <https://doi.org/10.3390/land11091414>
13. 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), Art. 9. <https://doi.org/10.3390/f12091292>
14. Bārdule, A., Petaja, G., Butlers, A., Purviņa, D., & Lazdiņš, A. (2021). Estimation of litter input in hemiboreal forests with drained organic soils for improvement of GHG inventories. *BALTIC FORESTRY*, *27*(2), Art. 2. <https://doi.org/10.46490/BF534>
15. Boiten, W. (2003). *Hydrometry* (0 red.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780203971093>
16. Breil, M., Davin, E. L., & Rehid, D. (2021). What determines the sign of the evapotranspiration response to afforestation in European summer? *Biogeosciences*, *18*(4), 1499–1510. <https://doi.org/10.5194/bg-18-1499-2021>
17. Bronstert, A., Niehoff, D., & Bürger, G. (2002). Effects of climate and land-use change on storm runoff generation: Present knowledge and modelling capabilities. *Hydrological Processes*, *16*(2), 509–529. <https://doi.org/10.1002/hyp.326>
18. Burnham, K. P., & Anderson, D. R. (Red.). (2004). *Model Selection and Multimodel Inference*. Springer New York. <https://doi.org/10.1007/b97636>
19. Butlers, A., Bārdule, A., Spalva, G., & Muižnieks, E. (2021). N₂O and CH₄ emissions from naturally

- wet and drained nutrient-rich organic forest soils. *Proceedings of the International Scientific Conference "Rural Development"*, 196–200. <https://doi.org/10.15544/RD.2021.030>
20. Butlers, A., & Ivanovs, J. (2018). Improved activity data for accounting greenhouse gas emissions due to management of wetlands. *Annual 24th International Scientific Conference Research for Rural Development 2018, 1*, 27–33. <https://doi.org/10.22616/rrd.24.2018.004>
21. Butlers, A., Lazdiņš, A., Kalēja, S., & Bārdule, A. (2022). Carbon Budget of Undrained and Drained Nutrient-Rich Organic Forest Soil. *Forests, 13*(11), 1790. <https://doi.org/10.3390/f13111790>
22. Butlers, A., Spalva, G., Licite, I., & Purvina, D. (2022). Carbon dioxide (CO₂) emissions from naturally wet and drained nutrient-rich organic forests soils. *Engineering for Rural Development*, 577–582. <https://doi.org/10.22616/ERDev.2022.21.TF190>
23. Cazorzi, F., Fontana, G. D., Luca, A. D., Sofia, G., & Tarolli, P. (2013). Drainage network detection and assessment of network storage capacity in agrarian landscape. *Hydrological Processes*, 27(4), 541–553. <https://doi.org/10.1002/hydr.2511>
24. Cho, H. (2000). *Development of a GIS Hydrologic Modeling System by Using the Programming Interface of GRASS GIS* [Master of Science]. Department of Civil Engineering, Kyungpook National University.
25. Christensen, N. L., Bartuska, A. M., Brown, J. H., Carpenter, S., D'Antonio, C., Francis, R., Franklin, J. F., MacMahon, J. A., Noss, R. F., Parsons, D. J., Peterson, C. H., Turner, M. G., & Woodmansee, R. G. (1996). The Report of the Ecological Society of America Committee on the Scientific Basis for Ecosystem Management. *Ecological Applications*, 6(3), 665–691. <https://doi.org/10.2307/2269460>
26. Clark, D. A., Brown, S., Kicklighter, D. W., Chambers, J. Q., Thomlinson, J. R., & Ni, J. (2001). MEASURING NET PRIMARY PRODUCTION IN FORESTS: CONCEPTS AND FIELD METHODS. *Ecological Applications*, 11(2), 356–370. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(2001\)011\[0356:MNPPIF\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2001)011[0356:MNPPIF]2.0.CO;2)
27. Cleary, M. R., Arhipova, N., Morrison, D. J., Thomsen, I. M., Sturrock, R. N., Vasaitis, R., Gaitnieks, T., & Stenlid, J. (2013). Stump removal to control root disease in Canada and Scandinavia: A synthesis of results from long-term trials. *Forest Ecology and Management*, 290, 5–14. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.05.040>
28. Djomo, A. N., Picard, N., Fayolle, A., Henry, M., Ngomanda, A., Ploton, P., McLellan, J., Saborowski, J., Adamou, I., & Lejeune, P. (2016). Tree allometry for estimation of carbon stocks in African tropical forests. *Forestry*, 89(4), 446–455. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpw025>
29. Dunn, S. M., & Mackay, R. (1995). Spatial variation in evapotranspiration and the influence of land use on catchment hydrology. *Journal of Hydrology*, 171(1–2), 49–73. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(95\)02733-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(95)02733-6)
30. Durbha, S. S., King, R. L., & Younan, N. H. (2007). Support vector machines regression for retrieval of leaf area index from multiangle imaging spectroradiometer. *Remote Sensing of Environment*, 107(1–2), 348–361. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.09.031>
31. Eggleston, S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., & Kiyoto, T. (Red.). (2006). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Agriculture, Forestry and Other Land Use. No 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (Sēj. 4, lpp. 678). Institute for Global Environmental Strategies (IGES).
32. European Commission. (2021). *Impact assessment accompanying the document Proposal for a regulation of the European Parliament and of the Council amending Regulation (EU) 2018/841 on the inclusion of greenhouse gas emissions and removals from land use, land use change and forestry in the 2030 climate and energy framework*.
33. European Parliament. (2013). *Decision No 529/2013/EU of the European Parliament and of the Council*

- of 21 May 2013 on accounting rules on greenhouse gas emissions and removals resulting from activities relating to land use, land-use change and forestry and on information concerning actions relating to those activities. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32013D0529>
34. Field, C. B., Barros, V. R., & Intergovernmental Panel on Climate Change (Red.). (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.
35. Field, C. B., & Intergovernmental Panel on Climate Change (Red.). (2012). *Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation: Special report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
36. Gibbs, H. K., Brown, S., Niles, J. O., & Foley, J. A. (2007). Monitoring and estimating tropical forest carbon stocks: Making REDD a reality. *Environmental Research Letters*, 2(4), 045023. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/2/4/045023>
37. Gleason, C. J., & Im, J. (2011). A Review of Remote Sensing of Forest Biomass and Biofuel: Options for Small-Area Applications. *GIScience & Remote Sensing*, 48(2), 141–170. <https://doi.org/10.2747/1548-1603.48.2.141>
38. Gschwantner, T., Alberdi, I., Bauwens, S., Bender, S., Borota, D., Bosela, M., Bouriaud, O., Breidenbach, J., Donis, J., Fischer, C., Gasparini, P., Heffernan, L., Hervé, J.-C., Kolozs, L., Korhonen, K. T., Koutsias, N., Kováčevics, P., Kučera, M., Kulbokas, G., ... Tomter, S. M. (2022). Growing stock monitoring by European National Forest Inventories: Historical origins, current methods and harmonisation. *Forest Ecology and Management*, 505, 119868. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119868>
39. Guzinski, R., Nieto, H., Sandholt, I., & Karamitilios, G. (2020). Modelling High-Resolution Actual Evapotranspiration through Sentinel-2 and Sentinel-3 Data Fusion. *Remote Sensing*, 12(9), Art. 9. <https://doi.org/10.3390/rs12091433>
40. Haapalehto, T. O., Vasander, H., Jauhiainen, S., Tahvanainen, T., & Kotiaho, J. S. (2011). The Effects of Peatland Restoration on Water-Table Depth, Elemental Concentrations, and Vegetation: 10 Years of Changes. *Restoration Ecology*, 19(5), 587–598. <https://doi.org/10.1111/j.1526-100X.2010.00704.x>
41. Hietala, A. M., Dörsch, P., Kvaalen, H., & Solheim, H. (2015). Carbon Dioxide and Methane Formation in Norway Spruce Stems Infected by White-Rot Fungi. *Forests*, 6(9), Art. 9. <https://doi.org/10.3390/f6093304>
42. Hiraishi, T., Krug, T., Tanabe, K., Srivastava, N., Baasansuren, J., Fukuda, M., & Troxler, T. G. (Red.). (2013). *Revised Supplementary Methods and Good Practice Guidance Arising from the Kyoto Protocol*. IPCC, Switzerland. http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/kpsg/pdf/KP_Supplement_Entire_Report.pdf
43. Hodges, C. S. (1999). *Heterobasidion annosum. Biology, Ecology, Impact and Control*. S. Woodward, J. Stenlid, R. Karjalainen and A. Hutterman (eds). 16.5 x 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>
44. Hofierka, J., Gallay, M., Bandura, P., & Šašak, J. (2018). Identification of karst sinkholes in a forested karst landscape using airborne laser scanning data and water flow analysis. *Geomorphology*, 308, 265–277. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.02.004>
45. Hudak, A. T., Crookston, N. L., Evans, J. S., Hall, D. E., & Falkowski, M. J. (2008). Nearest neighbor imputation of species-level, plot-scale forest structure attributes from LiDAR data. *Remote Sensing of Environment*, 112(5), 2232–2245. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.10.009>
46. Hwang, H.-T., Jeon, S.-W., Suleiman, A. A., & Lee, K.-K. (2017). Comparison of Saturated Hydraulic Conductivity Estimated by Three Different Methods. *Water*, 9(12), Art. 12. <https://doi.org/10.3390/w9120942>
47. Ya'acob, N., Azize, A. B. M., Mahmon, N. A., Yusof, A. L., Azmi, N. F., & Mustafa, N. (2014). Temporal

- Forest Change Detection and Forest Health Assessment using Remote Sensing. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 19(1), 012017. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/19/1/012017>
48. Ilic, J., Boland, D., McDonald, M., Downes, G., & Blakemore, P. (2000). *Woody density: Phase I—State of knowledge* (NCAS technical report no.18; lpp. 229). University of Melbourne.
49. Ivanovs, J., & Lupikis, A. (2018). Identification of wet areas in forest using remote sensing data. *Agronomy Research*, 16(5), 2049–2055. Scopus. <https://doi.org/10.15159/AR.18.192>
50. Jackson, R. B., Canadell, J., Ehleringer, J. R., Mooney, H. A., Sala, O. E., & Schulze, E. D. (1996). A global analysis of root distributions for terrestrial biomes. *Oecologia*, 108(3), 389–411. <https://doi.org/10.1007/BF00333714>
51. Johansson, S. M., Pratt, J. E., & Asiegbu, F. O. (2002). Treatment of Norway spruce and Scots pine stumps with urea against the root and butt rot fungus *Heterobasidion annosum*—Possible modes of action. *Forest Ecology and Management*, 157(1–3), 87–100. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00661-7](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00661-7)
52. Kärhä, K., Koivusalo, V., Palander, T., & Ronkanen, M. (2018). Treatment of *Picea abies* and *Pinus sylvestris* Stumps with Urea and *Phlebiopsis gigantea* for Control of *Heterobasidion*. *Forests*, 9(3), 139. <https://doi.org/10.3390/f9030139>
53. Kārklīņa, I., Petaja, G., Lazdina, D., Lazdiņš, A., Ķēniņa, L., Matisons, R., & Jansons, A. (2021). *Koku augšanas apstākļu uzlabošanas risinājumi un rekomendācijas to pielietošanai praksē*.
54. Kirkinen, J. (2010). *Greenhouse impact assessment of some combustible fuels with a dynamic life cycle approach*. VTT.
55. Korkanç, S. Y. (2014). Effects of afforestation on soil organic carbon and other soil properties. *CATENA*, 123, 62–69. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.07.009>
56. Kozłowski, T. T., & Pallardy, S. G. (2002). Acclimation and adaptive responses of woody plants to environmental stresses. *The Botanical Review*, 68(2), 270–334. [https://doi.org/10.1663/0006-8101\(2002\)068\[0270:AAAROW\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1663/0006-8101(2002)068[0270:AAAROW]2.0.CO;2)
57. Krumšteds, L. L., Ivanovs, J., Jansons, J., & Lazdiņš, A. (2019). Development of Latvian land use and land use change matrix using geospatial data of National forest inventory. *Agronomy Research*, 17. <https://doi.org/10.15159/AR.19.195>
58. 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>
59. Kulawardhana, R. W., Popescu, S. C., & Feagin, R. A. (2014). Fusion of lidar and multispectral data to quantify salt marsh carbon stocks. *Remote Sensing of Environment*, 154, 345–357. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.10.036>
60. Kumar, R., Pandey, S., & Pandey, A. (2006). Plant roots and carbon sequestration. *Current Science*, 91(7), 885–890.
61. Lagzdiņš, A. (2012). *Slāpekļa un fosfora savienojumu noplūdes analīze lauksaimniecībā izmantotajās platībās (Analysis of nitrogen and phosphorus leaching in the agricultural areas)* [LATVIJAS LAUKSAIMNIECĪBAS UNIVERSITĀTE LAUKU INŽENIERU FAKULTĀTE]. https://llufb.llu.lv/dissertation-summary/environmental_engineering/A_Lagzdins_promocijas_darba_kopsavilkums_2012_LLU_LIF.pdf
62. Lal, R. (2005). Forest soils and carbon sequestration. *Forest Ecology and Management*, 220(1–3), 242–258. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.08.015>
63. Latvijas Ģeotelpiskās informācijas aģentūra. (2017). *Aerolāzerskenēšanas dati, to apstrāde un pielietojums*. Fotogrammetrijas diena.
64. Latvijas Ģeotelpiskās informācijas aģentūra. (2019). *Aerolāzerskenēšana*. LĢIA.

- http://map.lgia.gov.lv/index.php?lang=0&cPath=4_5&txt_id=126
65. Launiainen, S., Guan, M., Salmivaara, A., & Kieloaho, A.-J. (2019). Modeling boreal forest evapotranspiration and water balance at stand and catchment scales: A spatial approach. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(8), 3457–3480. <https://doi.org/10.5194/hess-23-3457-2019>
66. Lazdins, A., Butlers, A., & Ancans, R. (2022). Nitrous oxide (N₂O) and methane (CH₄) fluxes from tree stems in birch and black alder stands – a case study in forests with deep peat soils. *Engineering for Rural Development*, 754–759. <https://doi.org/10.22616/ERDev.2022.21.TF229>
67. Lazdiņa, D., Lazdiņš, A., Bebre, I., Lupiķis, A., Makovskis, K., Spalva, G., Sarkanābols, T., Okmanis, M., Krīgere, I., Dreimanis, I., & Kalniņa, L. (2019). Afforestation. No A. Priede & A. Gancone (Red.), *Sustainable and responsible after-use of peat extraction areas* (lpp. 178–183). Baltijas Krasti.
68. Lazdiņš, A. (2022, februārī 14). *Climate change mitigation options in hemiboreal Baltic (a case study of Latvia)*. OPAL-Life final webinar. Land use change and optimization to mitigate climate change, Teams platform.
69. Lazdiņš, A., Līcīte, I., & Butlers, A. (2022). Climate change mitigation potential of afforestation in organic soils in farmlands. *Engineering for Rural Development*, 34–36.
70. Lazdiņš, A., Lupiķis, A., Butlers, A., Bārdule, A., Kārklīņa, I., Šņepsts, G., & Donis, J. (2019). *Latvia's national forestry accounting plan and proposed forest reference level 2021-2025* (lpp. 200). LSFRI Silava. https://www.researchgate.net/publication/338187883_Latvia's_national_forestry_accounting_plan_and_proposed_forest_reference_level_2021-2025
71. Lazdiņš, A., Šņepsts, G., Petaja, G., & Kārklīņa, I. (2019). Verification of applicability of forest growth model AGM in elaboration of forestry projections for National forest reference level. *Rural Development*, 289–294. <https://doi.org/10.15544/RD.2019.065>
72. Līcīte, I., Popluga, D., Rivža, P., Lazdiņš, A., & Meļņiks, R. (2022). Nutrient-Rich Organic Soil Management Patterns in Light of Climate Change Policy. *Civil Engineering Journal*, 8(10), Art. 10. <https://doi.org/10.28991/CEJ-2022-08-10-017>
73. Liepa, I. (1996). *Pieauguma mācība*. LLU.
74. Liepiņš, J., Bleive, A., Lazdiņš, A., & Liepiņš, K. (2021). REDUCTION OF WOOD BASIC DENSITY IN DECAYED GREY ALDER STEMS. *Proceedings of the International Scientific Conference "Rural Development"*, 242–246. <https://doi.org/10.15544/RD.2021.043>
75. Liepiņš, J., Ivanovs, J., Lazdiņš, A., Jansons, J., & Liepiņš, K. (2017). Mapping of basic density within European aspen stems in Latvia. *Silva Fennica*, 51(5). <https://doi.org/10.14214/sf.7798>
76. 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>
77. Liepiņš, J., & Liepiņš, K. (2017). Mean basic density and its axial variation in Scots pine, Norway spruce and birch stands. *Research for Rural Development*, 1, 21–27.
78. Liepiņš, J., Liepiņš, K., & Lazdiņš, A. (2021). Equations for estimating the above- and belowground biomass of grey alder (*Alnus incana* (L.) Moench.) and common alder (*Alnus glutinosa* L.) in Latvia. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 0(0), 1–12. <https://doi.org/10.1080/02827581.2021.1937696>
79. Lygis, V., Vasiliauskas, R., Stenlid, J., & Vasiliauskas, A. (2004a). Silvicultural and pathological evaluation of Scots pine afforestations mixed with deciduous trees to reduce the infections by *Heterobasidion annosum* s.s. *Forest Ecology and Management*, 201(2–3), 275–285. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.07.013>
80. Lygis, V., Vasiliauskas, R., Stenlid, J., & Vasiliauskas, A. (2004b). Silvicultural and pathological evaluation of Scots pine afforestations mixed with deciduous trees to reduce the infections by

- Heterobasidion annosum s.s. *Forest Ecology and Management*, 201(2–3), 275–285.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.07.013>
- 81.Lindén, M., & Vollbrecht, G. (2002). Sensitivity of *Picea abies* to butt rot in pure stands and in mixed stands with *Pinus sylvestris* in southern Sweden. *Silva Fennica*, 36(4). <https://doi.org/10.14214/sf.519>
- 82.Lindström, G., Pers, C., Rosberg, J., Strömqvist, J., & Arheimer, B. (2010). Development and testing of the HYPE (Hydrological Predictions for the Environment) water quality model for different spatial scales. *Hydrology Research*, 41(3–4), 295–319. <https://doi.org/10.2166/nh.2010.007>
- 83.Litton, C. M., Raich, J. W., & Ryan, M. G. (2007). Carbon allocation in forest ecosystems. *Global Change Biology*, 13(10), 2089–2109. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01420.x>
- 84.Lõhmus, A., Remm, L., & Rannap, R. (2015). Just a Ditch in Forest? Reconsidering Draining in the Context of Sustainable Forest Management. *BioScience*, 65(11), 1066–1076.
<https://doi.org/10.1093/biosci/biv136>
- 85.LSFR Silava. (2022). *Latvijai piemērotākā mežsaimniecības attīstības scenārija izvērtēšana iespējamā Eiropas līmeņa zemes izmantošanas, zemes izmantošanas maiņas un mežsaimniecības sektora siltumnīcefekta gāzu emisiju un piesaistes uzskaites regulējuma pārskatīšanā* (Nr. 22-00-S0MF01-000005; lpp. 75). 10.13140/RG.2.2.19959.29606
- 86.Luo, G., Zhang, J., Rao, Y., Zhu, X., & Guo, Y. (2017). Coal Supply Chains: A Whole-Process-Based Measurement of Carbon Emissions in a Mining City of China. *Energies*, 10(11), Art. 11.
<https://doi.org/10.3390/en10111855>
- 87.Lupiķis, A., Lazdiņš, A., Okmanis, M., Butlers, A., Saule, Z., Saule, L., Martinsone, K., Saule, G., Purviņa, D., Bārdule, A., & Skranda, I. (2017). *Empīrisku datu ieguve meža meliorācijas ietekmes uz CO2 emisijām no organiskajām augsnēm novērtēšanai (Elaboration of measurement data for evaluation of impact of amelioration systems on GH emissions from organic soils)* (2015/13, līguma 1.13 punkts; lpp. 43). LVMI Silava.
- 88.Malhi, Y., Aragão, L. E. O. C., Metcalfe, D. B., Paiva, R., Quesada, C. A., Almeida, S., Anderson, L., Brando, P., Chambers, J. Q., da COSTA, A. C. L., Hutyra, L. R., Oliveira, P., Patiño, S., Pyle, E. H., Robertson, A. L., & Teixeira, L. M. (2009). Comprehensive assessment of carbon productivity, allocation and storage in three Amazonian forests. *Global Change Biology*, 15(5), 1255–1274.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01780.x>
- 89.Malhi, Y., Meir, P., & Brown, S. (2002). Forests, carbon and global climate. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 360(1797), 1567–1591. <https://doi.org/10.1098/rsta.2002.1020>
- 90.Meirons, Z. (2002). Kvartāra nogulumi. No *Latvijas ģeoloģiskā karte, M 1:200000*. Valsts ģeoloģijas dienests.
- 91.Melniks, R., Ivanovs, J., & Lazdins, A. (2019). Method for shallow drainage ditch network generation using remote sensing data. *Proceedings of the 9th International Scientific Conference Rural Development 2019*. <https://doi.org/10.15544/RD.2019.008>
- 92.Melniks, R., Ivanovs, J., & Lazdins, A. (2020). Identification of possible ditch culvert locations using lidar data. *ENGINEERING FOR RURAL DEVELOPMENT*, 1706–1711.
<https://doi.org/10.22616/ERDev2020.19.TF439>
- 93.Melniks, R., Ivanovs, J., Lazdins, A., & Makovskis, K. (2022). Mapping drainage ditches in agricultural landscapes using LiDAR data [PDF]. *Agronomy Research*, 20(2), 318–325.
<https://doi.org/10.15159/AR.22.012>
- 94.Mitas, L., & Mitasova, H. (1998). Distributed soil erosion simulation for effective erosion prevention. *Water Resources Research*, 34(3), 505–516. <https://doi.org/10.1029/97WR03347>
- 95.Mitasova, H., Thaxton, C., Hofierka, J., McLaughlin, R., Moore, A., & Mitas, L. (2004). Path sampling

- method for modeling overland water flow, sediment transport, and short term terrain evolution in Open Source GIS. No C. T. Miller & G. F. Pinder (Red.), *Developments in Water Science* (Sēj. 55, lpp. 1479–1490). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0167-5648\(04\)80159-X](https://doi.org/10.1016/S0167-5648(04)80159-X)
96. Montès, N., Gauquelin, T., Badri, W., Bertaudière, V., & Zaoui, E. H. (2000). A non-destructive method for estimating above-ground forest biomass in threatened woodlands. *Forest Ecology and Management*, 130(1–3), 37–46. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(99\)00188-7](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(99)00188-7)
97. 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/d4mgtz>
98. Moser, G., Leuschner, C., Röderstein, M., Graefe, S., Soethe, N., & Hertel, D. (2010). Biomass and productivity of fine and coarse roots in five tropical mountain forests stands along an altitudinal transect in southern Ecuador. *Plant Ecology & Diversity*, 3(2), 151–164. <https://doi.org/10.1080/17550874.2010.517788>
99. Musienko, S., Luk'yanets, V., Tarnopylska, O., Kobets, O., & Babenko, V. (2018). Merchantability and assortment structure of pine stands affected by root rot in the Volyn Polissya region, Ukraine. *Central European Forestry Journal*, 64(2), 96–103. <https://doi.org/10.1515/forj-2017-0034>
100. Nikodemus, O., Kaupe, D., Kukuļs, I., Brūmelis, G., Kasparinskis, R., Dauškane, I., & Treimane, A. (2020). Effects of afforestation of agricultural land with grey alder (*Alnus incana* (L.) Moench) on soil chemical properties, comparing two contrasting soil groups. *Forest Ecosystems*, 7(1), 38. <https://doi.org/10.1186/s40663-020-00253-0>
101. Oliva, J., Samils, N., Johansson, U., Bendz-Hellgren, M., & Stenlid, J. (2008). Urea treatment reduced *Heterobasidion annosum* s.l. Root rot in *Picea abies* after 15 years. *Forest Ecology and Management*, 255(7), 2876–2882. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.01.063>
102. Pan, Y., Birdsey, R. A., Fang, J., Houghton, R., Kauppi, P. E., Kurz, W. A., Phillips, O. L., Shvidenko, A., Lewis, S. L., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Pacala, S. W., McGuire, A. D., Piao, S., Rautiainen, A., Sitch, S., & Hayes, D. (2011). A Large and Persistent Carbon Sink in the World's Forests. *Science*, 333(6045), 988–993. <https://doi.org/10.1126/science.1201609>
103. Parrott, D. L., Brinks, J. S., & Lhotka, J. M. (2012). Designing Nelder wheel plots for tree density experiments. *New Forests*, 43(2), 245–254. <https://doi.org/10.1007/s11056-011-9278-4>
104. Peltomaa, R. (2007). Drainage of forests in Finland. *Irrigation and Drainage*, 56(S1), S151–S159. <https://doi.org/10.1002/ird.334>
105. Pētersons, J., Lazdiņš, A., & Kasakovskis, A. (2019). LIFE REstore database on areas affected by peat extraction. No A. Priede & A. Gancone (Red.), *Sustainable and responsible after-use of peat extraction areas* (lpp. 122–129). Baltijas Krasti.
106. Petrasova, A., Mitasova, H., Petras, V., & Jeziorska, J. (2017). Fusion of high-resolution DEMs for water flow modeling. *Open Geospatial Data, Software and Standards*, 2(1), 6. <https://doi.org/10.1186/s40965-017-0019-2>
107. Piirainen, S., Finér, L., Andersson, E., Belova, O., Čiuldienė, D., Futter, M., Gil, W., Glazko, Z., Hiltunen, T., Janek, M., Joensuu, S., Jägrud, L., Lībiete, Z., Lode, E., Löfgren, S., Pierzgałski, E., Ring, E., Zariņš, J., & Thorell, D. (2017). *Meža nosusināšana un ūdens aizsardzība Baltijas jūras reģiona valstīs – pašreizējās zināšanas, metodes un attīstības virzieni* (lpp. 24). <https://www.skogsstyrelsen.se/globalassets/projektwebbplatser/wambaf/drainage/reviews/drainage-latvia.pdf>
108. Piri, T. (1996). The spreading of the S type of *Heterobasidion annosum* from Norway spruce stumps to the subsequent tree stand. *Forest Pathology*, 26(4), 193–204. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0329.1996.tb00839.x>

109. Piri, T. (2003). Early development of root rot in young Norway spruce planted on sites infected by Heterobasidion in southern Finland. *Canadian Journal of Forest Research*, 33(4), 604–611. <https://doi.org/10.1139/x02-200>
110. Piri, T., & Hamberg, L. (2015). Persistence and infectivity of Heterobasidion parviporum in Norway spruce root residuals following stump harvesting. *Forest Ecology and Management*, 353, 49–58. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.05.012>
111. Pitkänen, T. P., Piri, T., Lehtonen, A., & Peltoniemi, M. (2021). Detecting structural changes induced by Heterobasidion root rot on Scots pines using terrestrial laser scanning. *Forest Ecology and Management*, 492, 119239. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119239>
112. Profft, I., Mund, M., Weber, G.-E., Weller, E., & Schulze, E.-D. (2009). Forest management and carbon sequestration in wood products. *European Journal of Forest Research*, 128(4), 399–413. <https://doi.org/10.1007/s10342-009-0283-5>
113. Qi, J., Du, X., Zhang, X., Lee, S., Wu, Y., Deng, J., Moglen, G. E., Sadeghi, A. M., & McCarty, G. W. (2020). Modeling riverine dissolved and particulate organic carbon fluxes from two small watersheds in the northeastern United States. *Environmental Modelling & Software*, 124, 104601. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.104601>
114. R Core Team. (2022). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.r-project.org/>
115. 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>
116. Ravindranath, N. H., & Ostwald, M. (2008). Methods for Estimating Above-Ground Biomass. No *Carbon Inventory Methods Handbook for Greenhouse Gas Inventory, Carbon Mitigation and Roundwood Production Projects* (lpp. 113–147). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6547-7_10
117. Rytter, L., & Rytter, R.-M. (2016). Growth and carbon capture of grey alder (*Alnus incana* (L.) Moench.) under north European conditions – Estimates based on reported research. *Forest Ecology and Management*, 373, 56–65. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.04.034>
118. Roberts, M., Gilligan, C. A., Kleczkowski, A., Hanley, N., Whalley, A. E., & Healey, J. R. (2020). The Effect of Forest Management Options on Forest Resilience to Pathogens. *Frontiers in Forests and Global Change*, 3, 7. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2020.00007>
119. Running, Steve, Mu, Qiaozhen, Zhao, Maosheng, & Moreno, Alvaro. (2019). *MOD16A2GF MODIS/Terra Net Evapotranspiration Gap-Filled 8-Day L4 Global 500 m SIN Grid V006* [Data set]. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD16A2GF.006>
120. Rüter, S. (2011). *Projection of Net-Emissions from Harvested Wood Products in European Countries* (Work Report No. 2011/x of the Institute of Wood Technology and Wood Biology; lpp. 62). Johann Heinrich von Thünen-Institute (vTI).
121. Salas, C., Ene, L., Gregoire, T. G., Næsset, E., & Gobakken, T. (2010). Modelling tree diameter from airborne laser scanning derived variables: A comparison of spatial statistical models. *Remote Sensing of Environment*, 114(6), 1277–1285. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.01.020>
122. Saranpää, P. (2003). Wood density and growth. No J. R. Barnett & G. Jeronimidis (Red.), *Wood quality and its biological basis*. Blackwell ; Published in the USA/Canada by CRC Press.
123. Schindler, T., Machacova, K., Mander, Ü., Escuer-Gatius, J., & Soosaar, K. (2021). Diurnal Tree Stem CH₄ and N₂O Flux Dynamics from a Riparian Alder Forest. *Forests*, 12(7), Art. 7. <https://doi.org/10.3390/f12070863>
124. Schindler, T., Mander, Ü., Machacova, K., Espenberg, M., Krasnov, D., Escuer-Gatius, J., Veber, G.,

- Pärn, J., & Soosaar, K. (2020). Short-term flooding increases CH₄ and N₂O emissions from trees in a riparian forest soil-stem continuum. *Scientific Reports*, 10(1), Art. 1. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-60058-7>
125. Sheridan, R., Popescu, S., Gatzliolis, D., Morgan, C., & Ku, N.-W. (2014). Modeling Forest Aboveground Biomass and Volume Using Airborne LiDAR Metrics and Forest Inventory and Analysis Data in the Pacific Northwest. *Remote Sensing*, 7(1), 229–255. <https://doi.org/10.3390/rs70100229>
126. Sierota, Z., Żółciak, A., Małecka, M., Sikora, K., & Damszel, M. (2018). An approach to calculate CO₂ release through Norway spruce wood decay by *Heterobasidion parviporum*. *Dendrobiology*, 79, 91–96. <https://doi.org/10.12657/denbio.079.008>
127. Skaggs, R. W., Tian, S., Chescheir, G. M., Amatya, D. M., & Youssef, M. A. (2016). Forest drainage. No D. M. Amatya, T. M. Williams, L. Bren, & C. de Jong (Red.), *Forest hydrology: Processes, management and assessment* (1-ā red., lpp. 124–140). CABI. <https://doi.org/10.1079/9781780646602.0124>
128. Smilga, J. (1988). Populus sugas pasaules mežsaimniecībā. *Mežsaimniecība un mežrūpniecība*, 5(127), 5–7.
129. Smyth, C. E., Kurz, W. A., Neilson, E. T., & Stinson, G. (2013). National-scale estimates of forest root biomass carbon stocks and associated carbon fluxes in Canada: CANADA'S MANAGED FOREST ROOT DYNAMICS. *Global Biogeochemical Cycles*, 27(4), 1262–1273. <https://doi.org/10.1002/2012GB004536>
130. Sofia, G., Tarolli, P., Cazorzi, F., & Dalla Fontana, G. (2011). An objective approach for feature extraction: Distribution analysis and statistical descriptors for scale choice and channel network identification. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15, 1387. <https://doi.org/10/d6nzq5>
131. Song, C., Schroeder, T., & Cohen, W. (2007). Predicting temperate conifer forest successional stage distributions with multitemporal Landsat Thematic Mapper imagery. *Remote Sensing of Environment*, 106(2), 228–237. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.08.008>
132. Stovall, A. E. L., Anderson-Teixeira, K. J., & Shugart, H. H. (2018). Assessing terrestrial laser scanning for developing non-destructive biomass allometry. *Forest Ecology and Management*, 427, 217–229. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.06.004>
133. Suleiman, A. A. (2008). Modeling daily soil water dynamics during vertical drainage using the incoming flow concept. *CATENA*, 73(3), 312–320. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2007.12.002>
134. Šņepsts, G., Bārdule, A., & Lazdiņa, D. (2018). *Verification of AGM model* (Draft Nr. 2018-05–1; Elaboration of forest reference level for Latvia for the period between 2021 and 2025, lpp. 19). LSFRI Silava. https://drive.google.com/open?id=1f_2nHEPUHYR6OIkwdA7DZlYn5K4FBV8C
135. Šņepsts, G., Kārklīņa, I., Lupiķis, A., Butlers, A., Bārdule, A., & Lazdiņš, A. (2018). *AGM model description* (Draft Nr. 2018-01–1; Elaboration of forest reference level for Latvia for the period between 2021 and 2025, lpp. 98). LSFRI Silava. <https://drive.google.com/open?id=1VeylfH2F8angICoU1QfnUGPwBI29ezBX>
136. Thor, M., & Stenlid, J. (2005). *Heterobasidion annosum* infection of *Picea abies* following manual or mechanized stump treatment. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 20(2), 154–164. <https://doi.org/10.1080/02827580510008338>
137. UNFCCC. (2011). *Submission of information on forest management reference levels by Latvia*. UNFCCC. http://unfccc.int/files/meetings/ad_hoc_working_groups/kp/application/pdf/awgkp_latvia_fmrl_2011.pdf
138. Vargas, R., & Barba, J. (2019). Greenhouse Gas Fluxes From Tree Stems. *Trends in Plant Science*, 24(4), 296–299. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2019.02.005>
139. Vestin, P., Mölder, M., Kljun, N., Cai, Z., Hasan, A., Holst, J., Klemedtsson, L., & Lindroth, A.

- (2022). Impacts of stump harvesting on carbon dioxide, methane and nitrous oxide fluxes. *IForest - Biogeosciences and Forestry*, 15(3), 148–162. <https://doi.org/10.3832/ifor4086-015>
140. Wen, Y., Freeman, B., Hunt, D., Musarika, S., Zang, H., Marsden, K. A., Evans, C. D., Chadwick, D. R., & Jones, D. L. (2021). Livestock-induced N₂O emissions may limit the benefits of converting cropland to grazed grassland as a greenhouse gas mitigation strategy for agricultural peatlands. *Resources, Conservation and Recycling*, 174, 105764. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105764>
141. Wilcox, W. W. (1978). Review of literature on the effects of early stages of decay on wood strength. *Wood and Fiber*.
https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Review+of+literature+on+the+effects+of+early+stages+of+decay+on+wood+strength.&author=Wilcox+W.W.&publication_year=1978
142. Zhao, K., Popescu, S., & Nelson, R. (2009). Lidar remote sensing of forest biomass: A scale-invariant estimation approach using airborne lasers. *Remote Sensing of Environment*, 113(1), 182–196. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.09.009>
143. Zhou, X., Li, J., Zhao, Y., Jiang, S., Liu, H., & Wang, X. (2022). Effect of Time since Afforestation on Soil Organic Carbon Stock and Turnover Rate. *Sustainability*, 14(16), 10403. <https://doi.org/10.3390/su141610403>
144. Zīverts, A. (2004). *Hidroloģija. Ievads un hidroloģiskie aprēķini*. LLU.

1. Pielikums SEG inventarizācijas metožu salīdzinājums

Tabula 1. Dažādu valstu SEG inventarizācijā izmantotie pieņēmumi un vienādojumi biomasas un oglekļa uzkrājuma rēķināšanai

| Valsts | Dzīvā biomasa | Atmirusī koksne | BEFs | Oglekļa saturs/frakcija | Literatūras avoti BEFs un oglekļa saturam biomasā |
|-----------|---------------|-----------------|--|-------------------------------|--|
| Austrija | T3 | T3 | Vidējie, sugām specifiskie kopējās un stumbra koksnes biomasas ekspansijas attiecības koeficienti iegūti no biomasas funkcijām | skujkoki: 0.47, lapkoki: 0.48 | ECKMÜLLNER, O. (2006): Allometric relations to estimate needle and branch mass of Norway spruce and Scots pine in Austria. Austrian Journal on Forest Science, Special Issue on Austrian Biomass Functions. 123. Jg., Heft 1/2, 7–16. LEDERMANN, T. & NEUMANN, M. (2006): Biomass equations from data of old long-term experimental plots. Austrian Journal on Forest Science, Special Issue on Austrian biomass functions. 123. Jg., Heft 1/2, 47–64. RUBATSCHER, D.; MUNK, K.; STÖHR, D.; BAHN, M.; MADER-OBERHAMMER, M. & CERNUSCA, A. (2006): Biomass expansion functions for Larix decidua: a contribution to the estimation of forest carbon stocks. Austrian Journal on Forest Science, Special Issue on Austrian biomass functions. 123. Jg., Heft 1/2, 86–101. HOCHBICHLER, E.; BELLOS, P. & LICK, E. (2006): Biomass functions and expansion factors for spruce, pine, beech and oak in Austria. Austrian Journal on Forest Science, Special Issue on Austrian biomass functions. 123. Jg., Heft 1/2, 35–46. GSCHWANTNER, TH. & SCHADAUER, K. (2006): Branch biomass functions for broadleaved tree species in Austria. Austrian Journal on Forest Science, Special Issue on Austrian Biomass Functions, 123 Jg.; Heft 1/2, 17–34. OFFENTHALER, I. & HOCHBICHLER, E. (2006): Estimation of root biomass for Austrian forest tree species. Austrian Journal on Forest Science, Special Issue on Austrian biomass functions. 123. Jg., Heft 1/2, 65–86. Konversijas faktori stumbra koksnei atmirušās koksnes aprēķiniem: UMWELTBUNDESAMT (2000a): Weiss, P.; Schieler, K.; Schadauer, K.; Radunsky, K. & Englisch, M.: Die Kohlenstoffbilanz des Österreichischen Waldes und Betrachtungen zum Kyoto-Protokoll. Monographien, Bd. M-106, Umweltbundesamt, Wien. |
| Beļģija | T1 | T1 | noklusējuma | noklusējuma | IPCC 2006, Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara and K. Tanabe. Institute for Global Environmental Strategies (IGES), IPCC, 2006 |
| Bulgārija | T1 | T1 | noklusējuma | noklusējuma | IPCC 2006, Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara and K. Tanabe. Institute for Global Environmental Strategies (IGES), IPCC, 2007 |

Oglekļa aprīte meža ekosistēmā

| Valsts | Dzīvā biomasa | Atmirusī koksne | BEFs | Oglekļa saturs/frakcija | Literatūras avoti BEFs un oglekļa saturam biomasā |
|-----------|---------------|-----------------|--|-------------------------|--|
| Horvātija | T1 | T1 | noklusējuma | noklusējuma | IPCC 2006, Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara and K. Tanabe. Institute for Global Environmental Strategies (IGES), IPCC, 2008 |
| Kipra | T1 | T1 | noklusējuma | 0,47 | IPCC 2006, Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara and K. Tanabe. Institute for Global Environmental Strategies (IGES), IPCC, 2009 |
| Čehija | T3 | T3 | Biomassas vienādojumi un ekspansijas faktori pieminēti CBM modeļa ietvaros | 0,5 | Kull, S.J., Rampley, G.J., Morken, S., Metsaranta, J., Neilson, E.T., Kurz, W.A., 2019. Operational-scale carbon budget model of the Canadian forest sector (CBM-CFS3): version 1.2, user's guide. Canadian Forest Service, Northern Forestry Centre, Canada, 348 pp. Kurz, W.A.A., Dymond, C.C.C., White, T.M.M., Stinson, G., Shaw, C.H.H., Rampley, G.J.J., Smyth, C., Simpson, B.N.N., Neilson, E.T.T., Trofymow, J.A.A., Metsaranta, J., Apps, M.J.J., (2009). CBM-CFS3: A model of carbon-dynamics in forestry and land-use change implementing IPCC standards. Ecol. Modell. 220, 480– 504. https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2008.10.018 Boudewyn, P., Song, X., Magnussen, S., Gillis, M.D., 2007. Model-Based, volume-to-biomass conversion for forested and vegetated land in Canada, Forestry. https://doi.org/Information Report – BC-X-411 . Vonderach, C., Kändler, G., Dormann, C.F. (2018): Consistent set of additive biomass functions for eight tree species in Germany fit by nonlinear seemingly unrelated regression. Ann. For. Sci. 75, 49. https://doi.org/10.1007/s13595-018-0728-4 . Wutzler T., Wirth C. and Schumacher J. (2008): Generic biomass functions for Common beech (<i>Fagus sylvatica</i> L.) in Central Europe - predictions and components of uncertainty, Canadian Journal of Forest Research 38(6): 1661–1675 Cienciala E., Cerny M., Tatarinov F., Apltauer A. and Exnerova Z. (2006b): Biomass functions applicable to Scots pine. Trees 20: 483-495, 2006b. Cienciala E., Apltauer J., Exnerova Z. and Tatarinov F. (2008a): Biomass functions applicable to oak trees grown in Central-European forestry. Journal of Forest Science 54, 109-120. |
| Dānija | T3 | T1 T3? | Biomassas vienādojumi, BEF – atkarībā no koku sugas | 0,47 | Larsen, T., Meilby, H. and Skovsgaard, J.P. 2017: Simultaneous estimation of biomass models for 13 tree species: effects of compatible additivity requirements.; Skovsgaard, J.P., Bald, C. & Nord-Larsen, T. 2011: Functions for biomass and basic density of stem, crown and root system of Norway spruce |

Oglekļa aprīte meža ekosistēmā

| Valsts | Dzīvā biomasa | Atmirusī koksne | BEFs | Oglekļa saturs/frakcija | Literatūras avoti BEFs un oglekļa saturam biomasā |
|----------|---------------|-----------------|--|---|---|
| | | | | | (Picea abies (L.) Karst.) in Denmark, Scandinavian Journal of Forest Research, vol. 26 (Suppl 11), pp. 3-20. Skovsgaard, J.P. & Nord-Larsen, T. 2012: Biomass, basic density and biomass expansion factor functions for European beech (Fagus sylvatica L.) in Denmark. European Journal of Forest Research 131(4):1035-1053. DOI: 10.1007/s10342-011-0575-4; Nord-Larsen, T. & Nielsen, A. 2015. Biomass, stem basic density and expansion factor functions for five exotic conifers grown in Denmark. Scandinavian Journal of Forest Research, 30. Moltesen, P. 1985: Skovtræernes ved og anvendelse. Skovteknisk Institut, Frederiksberg. 132 p. |
| Igaunija | T3 | T1 | Fiksētas vērtības, atkarībā no meža tipa un koku sugas, vidējā vērtība 0.596 | Dzīvā biomasa 0,47, atmirusī koksne 0,487 | NFI, "Elaboration of country specific biomass models for Estonian forests," carried out by the Estonian University of Life Sciences. Köster, K., Metslaid, M., Engelhart, J., Köster E. (2015). Deadwood basic density, and concentration of carbon and nitrogen for main tree species in managed hemiboreal forests. Forest Ecology and Management, 354, 35–42. |
| Somija | T3 | T3 | BCEFs – biomasas pieauguma attiecība pret krājas pieaugumu | Noklusējuma – 0,5 | Repola, J. 2008. Biomass equations for birch in Finland. Silva Fennica 42(4): 605-624. Repola, J. 2009. Biomass equations for Scots pine and Norway spruce in Finland. Silva Fennica 43(4): 625-647. Repola, J., Ojansuu, R. & Kukkola, M. 2007. Biomass functions for Scots pine, Norway spruce and birch in Finland. Metla Working Paper 53. |
| Francija | T2 | T1 | Nav informācijas, norādīti vienādojumi no IPCC 2006 | 0,48 | IPCC 2006, Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara and K. Tanabe. Institute for Global Environmental Strategies (IGES), IPCC, 2008 |
| Vācija | T1 | T1 | fiksēti skaitļi atkarībā no koku sugas un sadalīšanās pakāpes | 0,5 | Changes in biomass carbon stocks - Equation 2.8, 2006 IPCC Guidelines; Deadwood - Fraver, S., Wagner, R. G., & Day, M. (2002): Dynamics of coarse woody debris following gap harvesting in the Acadian forest of central Maine, USA. Canadian Journal of Forest research, 32(12), 2094-2105; Müller-Using, S., & Bartsch, N. (2009): Decay dynamic of coarse and fine woody debris of a beech (Fagus sylvatica L.) forest in Central Germany. European Journal of Forest Research, 128(3), 287-296. |

Oglekļa aprite meža ekosistēmā

| Valsts | Dzīvā biomasa | Atmirusī koksne | BEFs | Oglekļa saturs/frakcija | Literatūras avoti BEFs un oglekļa saturam biomasā |
|----------|---------------|-----------------|---|-------------------------|--|
| Grieķija | T1 | T1 | noklusējuma | noklusējuma | IPCC 2006, Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara and K. Tanabe. Institute for Global Environmental Strategies (IGES), IPCC, 2006 |
| Ungārija | T1 | T1 | noklusējuma | noklusējuma | IPCC 2006, Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara and K. Tanabe. Institute for Global Environmental Strategies (IGES), IPCC, 2006 |
| Islande | T3 | T3 | nav informācijas | nav informācijas | Biomassamodelis: Jónsson, T. H. (2004). Stature of Sub-arctic Birch in Relation to Growth Rate, Lifespan and Tree Form. <i>Annals of Botany</i> , 94, 753-762.; Jónsson, T. H., & Snorrason, A. (2018). Single tree aboveground biomass models for native birch in Iceland. <i>Icelandic Agricultural Sciences</i> , 65-80. |
| Īrija | T3 | T3 | 1.68 - 4 t/t-1 | 0,5? | Biomassas vienādojumi: Black et al., Biomass equations for modelling C dynamics in Irish forests (in prep); Black K., Tobin B., Saiz G., Byrne K. & Osborne B. (2004). Improved estimates of biomass expansion factors for Sitka spruce. <i>Irish Forestry</i> 61:50-65; National research harvested tree database (COFORD funded project CARBiFOR); Forest Research pulled tree database (Brice Nicholl, NRS, Forest Research, UK), Brown S (2002) . Measuring carbon in forests: current status and future challenges. <i>Environmental Pollution</i> 116: 363-372; Johansson, T. Dry matter amounts and increment in 21-to 91-year-old common alder and grey alder some practical implicatons. <i>Canadian Journal of Forest Research</i> 29 1679-1690; Bartelink, H.H., Allometric relationship for biomass and leaf area of beech (<i>Fagus sylvatica</i> L). <i>Annals of Forest Science</i> , 1997. 54: p. 39-50; Boudewyn, P. Song, X. Magnussen, S. and Gillis, M.D. 2007. Model-based, volume-to-biomass conversion for forested and vegetated land in Canada. <i>Natural Resources Canada Canadian Forest Service Pacific Forestry Centre Victoria, British Columbia Information Report BC-X-411</i> |
| Itālija | T3 | T3 | Biomassas vienādojums, BEF vērtība atkarīga no koku sugas/meža tipa | 0,47 | BEF – ISAF, 2004. RiselvItalia Project, Personal communication; atmirušās koksnes aprēķini: Di Cosmo L., Gasparini P., Paletto A., Nocetti M., 2013. Deadwood basic density values for national-level carbon stock estimates in Italy. <i>Forest Ecology and Management</i> 295 (2013) 51–58; CF – IPCC |
| Latvija | T2 | T2 | fiksēts skaitlis atkarībā no koku sugas | Nav norādīta vērtība | BEFs: Liepiņš J., Lazdiņš A., Liepiņš K. 2015. Above- and below-ground biomass functions for four most common trees species in Latvia, in: Abstracts from the |

Oglekļa aprīte meža ekosistēmā

| Valsts | Dzīvā biomasa | Atmirusī koksne | BEFs | Oglekļa saturs/frakcija | Literatūras avoti BEFs un oglekļa saturam biomasā |
|--------------|---------------|-----------------|---|-----------------------------------|--|
| | | | | | International Scientific Conference Knowledge based forest sector, Riga, Latvia, pp. 51–53; Liepins J., Liepins K., Lazdiņš A. 2015. Biomass equations for the most common tree species in Latvia. Presented at the Adaptation and mitigation: strategies for management of forest ecosystems, Airport hotel ABC, pp. 47–50.; Liepiņš J., Liepiņš K., Lazdiņš A. 2016. Estimation of the biomass stock from growing stock volume, in: Collection of Abstracts. Presented at the 11th International Scientific Conference Students on Their Way to Science, Jelgava, p. 120.; 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, DOI: 10.1080/02827581.2017.1337923. |
| Lietuva | T3 | T1 | fiksēts skaitlis skujkokiem un platlapjiem | Platlapji – 0,48, skujkoki – 0,51 | BEFs: Усольцев В.А. 2001. Фитомасса лесов Северной Евразии. База данных и география. 707с., Екатеринбург; Усольцев В.А. 2002. Фитомасса лесов Северной Евразии. Нормативы и элементы географии. 762с. Екатеринбург; Усольцев В.А. 2003. Фитомасса лесов Северной Евразии. Предельная продуктивность и география. 405 с., Екатеринбург; 2006 IPCC. CF- IPCC 2006 vadlīnijas. |
| Luksembur ga | T2 | T2 | dzīvajai biomasai – fiksēti skaitļi, atmirušajai koksnei neizmanto BEFs | 0,47 | BEF virszemes biomasai: Deleuze, C., Morneau, F., Renaud, J., Vivien, Y., Rivoire, M., Santenoise P., . . . Vallet, P. (2014). Estimer le volume total d'un arbre, quelles que soient l'essence, la taille, la sylviculture, la station. RDV Techniques, 44: 22-32.; pazemes biomasai: Vande Walle, I., Van Camp, N., Perrin, D., Lemeur, R., Verheyen, K., Van Wesemael, B., & Laitat, E. (2005). Growing stock-based assessment of the carbon stock in the Belgian forest biomass. Ann. For. Sci., 62(8):853-864.; CF- noklusējuma vērtība |
| Malta | T1 | T1 | noklusējuma | noklusējuma | IPCC 2006, Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara and K. Tanabe. Institute for Global Environmental Strategies (IGES), IPCC, 2006 |
| Nīderlande | T2 | T2 | Sugām specifiski BCEFs (biomass conversion and expansion factors) parauglūkumu līmenī | | Biomasas allometriskie vienādojumi: Forrester, D.I., I.H.H. Tachauer, P. Annighoefer, I. Barbeito, H. Pretzsch, R. Ruiz-Peinado, H. Stark, G. Vacchiano, T. Zlatanov, T. Chakraborty, S. Saha en G.W. Sileshi. (2017): Generalized biomass and leaf area allometric equations for European tree species incorporating stand structure, tree age and climate. Forest Ecology and Management 396:160-175.; |

Oglekļa aprīte meža ekosistēmā

| Valsts | Dzīvā biomasa | Atmirusī koksne | BEFs | Oglekļa saturs/frakcija | Literatūras avoti BEFs un oglekļa saturam biomasā |
|-----------|---------------|-----------------|---|--|--|
| | | | | | BCEFs: NFI-5- Daamen, W. & G.M. Dirkse, (2005): Veldinstructie. Meetnet Functie Vervulling (in Dutch); Arets, E.J.M.M., S.A. van Baren, H. Kramer, J.P. Lesschen en M.J. Schelhaas. (2022). Greenhouse gas reporting of the LULUCF sector in the Netherlands. Methodological background, update 2022. WOt Technical report 217. Statutory Research Tasks Unit for Nature & the Environment (WOT Natuur & Milieu), Wageningen UR, Wageningen, The Netherlands. |
| Polija | T2 | T1 | BEFs – fiksēti skaitļi | IPCC noklusējuma vērtības atkarībā no koku sugas | BEF, CF: IPCC noklusējuma vērtības; BCEF aprēķināšanas metodika: IPCC (2006). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (the section 2.3.1.1 of the chapter 2 of the Volume 4). |
| Portugāle | T2 | T2 | BCEFs biomasas vienādojumā | skujkokiem 51% un platlapjiem - 48% | BCEFs un oglekļa saturs biomasā: IPCC (2006). Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. |
| Rumānija | T2 | T1 | Skujkokiem – IPCC labas prakses vadlīnijām, platlapjiem BEF = 1 | 0,51 platlapjiem un 0,48 skujkokiem | BEF: 2003 IPCC Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry. J. Penman, M. Gytarsky, T. Hiraishi, T. Krug, D. Kruger, R. Pipatti, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, K. Tanabe and F. Wagner. Institute for Global Environmental Strategies (IGES), IPCC, 2003; biomasas vienādojumi: IPCC 2006, Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara and K. Tanabe. Institute for Global Environmental Strategies (IGES), IPCC, 2006 |
| Slovākija | T2 | T1 | fiksētas vērtības, atkarībā no koku sugas; atmirušajai koksnei – sausas biomasu aprēķina, izmantojot koksnes blīvuma koeficientus un sadalīšanās pakāpes koeficientus | 51% skujkokiem un 48% platlapjiem, atmirušajai koksnei 0,496 | IPCC 2006, Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara and K. Tanabe. Institute for Global Environmental Strategies (IGES), IPCC, 2006. atmirušās koksnes biomasā: Šebeň, V. 2017: Národná inventarizácia a monitoring lesov SR 2015-2016. Informácie, metódy, výsledky. (National forest inventory and monitoring SR 2015-2016. Information, methods, results) Lesnícke štúdie 65/2017. Národné lesnícke centrum – Lesnícky výskumný ústav Zvolen, 256 p. (in Slovak). Atmirušās koksnes CF: Šmelko, Š.; Šebeň, V.; Priwitzer, T. 2011: Determination of dry wood density and carbon stock in aboveground dendromass from sampling forest inventory in mountain forest ecosystem of the Biosphere Reserve Poľana. Lesn. Čas. – Forestry Journal, 57(2): p. 87–95. |

Oglekļa aprīte meža ekosistēmā

| Valsts | Dzīvā biomasa | Atmirusī koksne | BEFs | Oglekļa saturs/frakcija | Literatūras avoti BEFs un oglekļa saturam biomasā |
|---------------------|---------------|-----------------|---|-------------------------|--|
| Slovēnija | T3 | T2 | Nosaka ar funkciju, ņemot vērā meža tipu/koku ģinti | 0,47 | BEFs: Teobaldelli M., Somogyi Z., Migliavacca M., Usoltsev V.A. 2009. Generalized functions of biomass expansion factors for conifers and broadleaved by stand age, growing stock and site index. Forest Ecology and Management, 257: 1004-1013. Atmirusī koksne: IPCC 2006, Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara and K. Tanabe. Institute for Global Environmental Strategies (IGES), IPCC, 2006. |
| Spānija | T2 | T1 | | atkarībā no koku sugas | IFN2: Segundo Inventario Forestal Nacional 1986-1996. Madrid: ICONA. IFN3: Tercer Inventario Forestal Nacional 1997-2007. Madrid: Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. IFN4: izstrādes procesā. CF: Monografía 13 del Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA), Serie Forestal Producción de biomasa y fijación de CO2 por los bosques españoles (Gregorio Montero, Ricardo Ruiz Peinado y Marta Muñoz, 2005). |
| Zviedrija | T3 | T3 | Biomāsas vienādojumi | fiksēta vērtība 0,5 | Marklund, L.G. 1987. Biomass functions for Norway spruce in Sweden. Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Forest Survey, report 43. 127p. ISSN 0348-0496.; Marklund, L.G. 1988. Biomassfunktioner för tall, gran och björk i Sverige. Sveriges Lantbruksuniversitet, Institutionen för skogstaxering, rapport 45. 73 sidor ISSN 0348-0496.; Petersson, H., and Ståhl, G. 2006. Functions for Below Ground Biomass of Pinus sylvestris, Picea abies, Betula pendula and B. pubescens in Sweden. Scandinavian Journal of Forest Research, 21(Suppl 7): 84-93.; Sandström, F., Petersson, H., Kruys, N., och Ståhl, G., 2007. Biomass conversion factors (density and carbon concentration) by decay classes for dead wood of Pinus sylvestris, Picea abies and Betula spp. in boreal forests of Sweden. Forest Ecology and Management. 243:19-27; Näslund, M., 1947. Funktioner och tabeller för kubering av stående träd. Tall, gran och björk i södra Sverige samt i hela landet. Meddelande från Statens Skogsförsöksanstalt, 36:3 (in Swedish).; Melin, Y., Petersson, H., and Nordfjell, T. 2009. Decomposition of stump and root systems of Norway spruce in Sweden –A modelling approach. For. Ecology and Management. 257: 1445-1451. |
| Apvienotā karaliste | T3 | T3 | Sugām specifiski BEFs, CARBINE modelis, sīksakņu BEF – 0.02 | 0,5 | Matthews, R., Malcolm, H., Buys, G., Henshall, P., Moxley, J., Morris, A. and Mackie, E. (2014) Changes to the representation of Forest Land and associated land-use changes in the 1990-2012 UK Greenhouse Gas Inventory. Forest |

Oglekļa aprīte meža ekosistēmā

| Valsts | Dzīvā biomasa | Atmirusī koksne | BEFs | Oglekļa saturs/frakcija | Literatūras avoti BEFs un oglekļa saturam biomasā |
|-----------|---------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------|--|
| | | | | | Research and Centre for Ecology and Hydrology (DECC Contract GA0510, UKCEH Contract no. NEC0376); Levy and Rowland (2011). A further review of data sets and models relevant to the LULUCF inventory methodology. Unpublished UKCEH report to DECC.; Matthews et al. (in prep). The CARBINE model. A technical description. Chapter 2. Modelling purpose and scope; Liski, J., Perruchoud, D., & Karjalainen, T. (2002). Increasing carbon stocks in the forest soils of western Europe. <i>Forest Ecology and Management</i> , 169(1–2), 159–175. https://doi.org/10.1016/S0378-1127(02)00306-7 ; Jenkins et al. 2011 ? |
| Kanāda | | | modelis, biomasas vienādojumi | | Kurz WA, Dymond CC, White TM, Stinson G, Shaw CH, Rampley GJ, Smyth C, Simpson BN, Neilson ET, Trofymow JA, et al. 2009. CBM-CFS3: A model of carbon-dynamics in forestry and land-use change implementing IPCC standards. <i>Ecological Modelling</i> 220: 480–504; Boudewyn P, Song X, Magnussen S, Gillis M. 2007. Model-based, volume-to-biomass conversion for forested and vegetated land in Canada. Natural Resources Canada, Canadian Forest Service. Information Report – BC-X-411.; Li Z, Kurz WA, Apps MJ, Beukema SJ. 2003. Belowground biomass dynamics in the Carbon Budget Model of the Canadian Forest Sector: recent improvements and implications for the estimation of NPP and NEP. <i>Canadian Journal of Forest Research</i> 33:126–136. |
| Norvēģija | T3 | T3 | Biomasas vienādojumi | nav informācijas | Marklund, L. G. (1988): Biomassafunktioner för tall, gran och björk i Sverige: biomass functions for pine, spruce and birch in Sweden, Rapport 45: Swedish University of Agricultural Sciences (SLU-Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för skogstaxering). 73 pp. Petersson, H. & Ståhl, G. (2006): Functions for below-ground biomass of <i>Pinus sylvestris</i> , <i>Picea abies</i> , <i>Betula pendula</i> and, <i>Betula pubescens</i> in Sweden. <i>Scandinavian Journal of Forest Research</i> , 21 (S7): 84-93; Smith, A., Granhus, A., Astrup, R. (2016): Functions for estimating belowground and whole tree biomass of birch in Norway. <i>Scandinavian Journal of Forest Research</i> , 31 (6): 568-582. Smith, A., Granhus, A., Astrup, R., Bollandsås, O.M., Petersson, H., (2014): Functions for estimating aboveground biomass of birch in Norway. <i>Scandinavian Journal of Forest Research</i> , 29 (6): 565-578. |

**2. Pielikums Klimata pārmaiņu
mazināšanas pasākumi
mežizstrādē**

Tabula 2. Identificēto klimata pārmaiņu mazināšanas pasākumu mežizstrādē raksturojums

| Nosaukums | Pasākumu ietekmes pamatojums | Kritēriji pasākumu īstenošanas vietu izvēlei | Oglekļa krātuves un SEG emisijas, uz ko attiecas pasākums | Metodes un modeļi, kas pielietoti ietekmes novērtējumam vietējā un valsts mērogā | Kā jāuzlabo LPIIS un citas pārraudzības sistēmas pasākuma ietekmes pārbaudei | Ietekmes ilgums un papildus pasākumi ietekmes saglabāšanai | Kvantitatīvs pasākuma īstenošanas potenciāls valsts mērogā | Atbilstība ilgtspējas kritērijiem | Izmaksu un ieguvumu attiecības novērtējums | Mijiedarbība un sinerģija ar citām nozarēm, zemes izmantošanas veidiem un politiku | Statuss valsts politikā, pašreizējās atbalsta shēmas | Izpētes prioritātes |
|--|--|---|--|--|---|---|---|-----------------------------------|--|--|--|--|
| Harvesteru ar hibrīdu enerģijas padevi izmantošana mežizstrādē | Efektīvāka energoresursu izmantošana, izmantojot dažādiem darba elementiem piemērotāko enerģijas avotu, kā arī efektīvi izmantojot enerģijas pārpalikumu, ļauj samazināt degvielas patēriņu, attiecīgi, arī SEG emisijas | Jebkurā cirsnā | CO ₂ , N ₂ O un CH ₄ emisijas | Faktiskie degvielas patēriņa rādītāji, ko fiksē mežizstrādes tehnika | Jānodrošina degvielas patēriņa un saražotās produkcijas automatizēta uzskaitē un saglabāšana, tajā skaitā konvencionālajai tehnikai | Pasākumam ir nepārtraukta ietekme | Pagaidām nav novērtēta kvantitatīvā ietekme, un nav pieejami zinātniski pierādīti dati. | Atbilst ilgtspējas kritērijiem | Nav pieejama informācija par iespējamo SEG emisiju samazinājumu, tādēļ izmaksu un ieguvumu attiecību nevar noteikt | Samazina SEG emisijas enerģētikas sektorā | Pasākums nav atbalstīts valsts politikā | Faktiskā SEG emisiju samazināšanas potenciāla novērtējums dažādos ciršu veidos un atkarībā no darba apstākļiem |
| Elektriskas piedziņas mežizstrādes mašīnu izmantošana | Degvielas aizstāšana ar elektroenerģiju ļauj būtiski samazināt SEG emisijas enerģētikas sektorā (aptuveni par 50%, ņemot vērā SEG emisijas elektroenerģijas ražošanas un pārvades procesā), papildus emisijas radītu meža ceļu elektrificēšana, veidojot pagaidu vai pastāvīgas ergoapgādes sistēmas mežizstrādes objektos | Jebkurā cirsnā, kur iespējama tehnikas uzlāde | CO ₂ , N ₂ O un CH ₄ emisijas | Faktiskie elektroenerģijas patēriņa rādītāji, ko fiksē tehnika | Jānodrošina elektroenerģijas patēriņa un saražotās produkcijas datu automatizēta uzskaitē un saglabāšana | Pasākumam ir nepārtraukta ietekme, taču tā atkarīga no patērētās elektroenerģijas CO ₂ ekvivalenta un emisijas var pat pārsniegt līmeni, ko rada fosilais kurināmais | Pagaidām nav novērtēta kvantitatīvā ietekme, un nav pieejami zinātniski pierādīti dati. | Atbilst ilgtspējas kritērijiem | Tehnoloģija ir attīstības stadijā un netiek praksē pielietota, būtisku ietekmi uz izmaksām rada arī meža infrastruktūras elektrifikācija | Samazina SEG emisijas enerģētikas sektorā | Pasākums nav atbalstīts valsts politikā | Faktiskā SEG emisiju samazināšanas potenciāla novērtējums dažādos ciršu veidos un atkarībā no darba apstākļiem; elektrifikācijas iespēju analīze, tajā skaitā izmaksu un ieguvumu attiecības novērtējums |
| Lielākas kravnesības kokvedēju un šķeldu vedēju izmantošana | Ziemeļvalstīs veikti pētījumi, ka autovilcienu masas palielināšana līdz 92 tonnām, var panākt būtisku degvielas patēriņa samazinājumu (10- | Ceļu infrastruktūrai jāatbilst 92 tonnas sma- | CO ₂ , N ₂ O un CH ₄ emisijas | Faktiskie degvielas patēriņa rādītāji, ko fiksē tehnika | Jānodrošina degvielas patēriņa un piegādātās produkcijas automatizēta | Pasākumam ir nepārtraukta ietekme | Pagaidām nevar novērtēt, jo papildus SEG emisijas var | Atbilst ilgtspējas kritērijiem | Būtiskas investīcijas nepieciešamas ceļu infrastruktūrā, tā- | Samazina SEG emisijas enerģētikas sektorā | Pasākums nav atbalstīts valsts politikā | Ceļu tīkla pilnveidošanas iespēju analīze, vērtējot dažādus pārklājuma un maršrutu scenārijus, tajā skaitā ierīkojot |

Oglekļa aprīte meža ekosistēmā

| Nosaukums | Pasākumu ietekmes pamatojums | Kritēriji pasākumu īstenošanas vietu izvelei | Oglekļa krātuves un SEG emisijas, uz ko attiecas pasākums | Metodes un modeļi, kas pielietoti ietekmes novērtējumam vietējā un valsts mērogā | Kā jāuzlabo LPIS un citas pārraudzības sistēmas pasākuma ietekmes pārbaudei | Ietekmes ilgums un papildus pasākumi ietekmes saglabāšanai | Kvantitatīvs pasākuma īstenošanas potenciāls valsts mērogā | Atbilstība ilgtspējas kritērijiem | Izmaksu un ieguvumu attiecības novērtējums | Mijiedarbība un sinerģija ar citām nozarēm, zemes izmantošanas veidiem un politiku | Statuss valsts politikā, pašreizējās atbalsta shēmas | Izpētes prioritātes |
|-----------|--|--|---|--|---|--|--|-----------------------------------|---|--|--|---------------------|
| | līdz 2 reizes mazāk degvielas, kā arī mazāk smērvielu un citu naftas produktu. Kompaktklases forvarderu pielietošanas ietekme uz SEG emisijām atkarīga no pievešanas ceļa garuma un SEG emisiju mazināšanai var būt nepieciešamas starpkrautuves | samazinājums sagaidāms, ja pievešanas ceļa garums nav lielāks par 300 m vai cīsmā ierīkotas starpkrautuves un lielāku attālumu veikšanai izmanto vidējās klases vai lielo forvarderu | | | | | | zemsedzes augiem | nepieciešami līdzekļi tehnikas parka atjaunošanai, operatoru apmācībai un meža darbu organizācijai, lai novērstu šīs tehnikas dīkstāves | | | |

**3. Pielikums Taksācijas rādītāji
parauglaukumos, kas
izmantoti koku augstuma un
skaita noteikšanas algoritma
pārbaudei**

Tabula 3. Koku taksācijas rādītāji koku augstuma un skaita modeļa pārbaudei ierīkotajos parauglaukumos

| PL | Valdošā suga | Vecums, gados | Meža tips | D, cm | H, m | Dzīvo koku skaits, gab. ha ⁻¹ | Sausokņu skaits, gab. ha ⁻¹ | G, m ² ha ⁻¹ | Dzīvo koku krāja, m ³ ha ⁻¹ | Sausokņu krāja, m ³ ha ⁻¹ | Pameža projektīvais segums, % |
|--------|--------------|---------------|-----------|-------|------|--|--|------------------------------------|---|---|-------------------------------|
| 1-11-1 | P | 93 | Ln | 24,2 | 24,0 | 1 100 | 120 | 49,3 | 576,5 | 32,1 | 0,0 |
| 1-11-2 | P | 93 | Ln | 25,9 | 25,9 | 1 080 | 40 | 49,1 | 619,0 | 9,5 | 0,0 |
| 1-11-3 | P | 93 | Ln | 26,7 | 26,5 | 700 | 200 | 48,2 | 618,4 | 43,8 | 6,0 |
| 1-12-1 | P | 88 | Dm | 25,5 | 25,5 | 1 240 | 20 | 45,2 | 602,1 | 1,5 | 16,0 |
| 1-12-2 | P | 88 | Dm | 25,2 | 25,1 | 1 320 | 40 | 56,3 | 724,1 | 8,7 | 21,0 |
| 1-12-3 | P | 88 | Dm | 26,0 | 25,8 | 1 000 | 100 | 51,2 | 652,8 | 0,6 | 24,0 |
| 1-14-1 | P | 57 | Dm | 26,5 | 23,8 | 660 | 0 | 34,2 | 386,0 | 0,0 | 38,0 |
| 1-14-2 | P | 57 | Dm | 29,4 | 25,7 | 460 | 0 | 32,1 | 382,8 | 0,0 | 17,0 |
| 1-14-3 | P | 57 | Dm | 23,7 | 23,0 | 780 | 0 | 35,5 | 386,7 | 0,0 | 49,0 |
| 1-14-4 | P | 57 | Dm | 26,5 | 23,6 | 600 | 0 | 30,5 | 333,8 | 0,0 | 30,0 |
| 1-14-5 | P | 57 | Dm | 22,1 | 20,0 | 1 020 | 100 | 28,5 | 318,8 | 0,5 | 40,0 |
| 1-15-1 | E | 93 | Dms | 30,0 | 24,0 | 360 | 20 | 29,1 | 343,1 | 4,6 | 105,0 |
| 1-15-2 | B | 93 | Dms | 22,7 | 19,3 | 780 | 40 | 24,3 | 230,2 | 14,9 | 58,0 |
| 1-15-3 | P | 93 | Dms | 27,2 | 22,3 | 1 040 | 0 | 46,3 | 529,6 | 0,0 | 29,0 |
| 1-18-1 | P | 88 | Dms | 25,7 | 25,4 | 920 | 60 | 45,6 | 588,3 | 12,3 | 5,0 |
| 1-18-2 | P | 88 | Dms | 24,5 | 22,9 | 1 060 | 80 | 41,8 | 485,4 | 21,8 | 16,0 |
| 1-18-3 | P | 88 | Dms | 22,8 | 20,9 | 1 440 | 260 | 46,9 | 558,1 | 18,2 | 25,0 |
| 1-18-4 | P | 88 | Dms | 23,3 | 23,2 | 1 140 | 0 | 35,8 | 423,7 | 0,0 | 16,0 |
| 1-18-5 | P | 88 | Dms | 26,5 | 25,3 | 840 | 100 | 46,0 | 564,3 | 25,7 | 14,0 |
| 1-18-6 | P | 88 | Dms | 28,3 | 26,8 | 900 | 140 | 61,4 | 808,1 | 15,6 | 8,0 |
| 1-18-7 | P | 88 | Dms | 25,2 | 24,9 | 1 040 | 260 | 55,8 | 650,8 | 66,8 | 19,0 |

Oglekļa aprīte meža ekosistēmā

| PL | Valdošā suga | Vecums, gados | Meža tips | D, cm | H, m | Dzīvo koku skaits, gab. ha ⁻¹ | Sausokņu skaits, gab. ha ⁻¹ | G, m ² ha ⁻¹ | Dzīvo koku krāja, m ³ ha ⁻¹ | Sausokņu krāja, m ³ ha ⁻¹ | Pameža projektīvais segums, % |
|---------|--------------|---------------|-----------|-------|------|--|--|------------------------------------|---|---|-------------------------------|
| 1-18-8 | P | 88 | Dms | 26,4 | 25,4 | 1 000 | 80 | 53,6 | 687,0 | 18,6 | 18,0 |
| 1-2-1 | E | 93 | Dm | 26,8 | 25,4 | 540 | 120 | 36,9 | 477,0 | 11,8 | 55,0 |
| 1-2-2 | A | 93 | Dm | 29,3 | 26,7 | 720 | 20 | 48,2 | 706,1 | 7,1 | 5,0 |
| 1-2-4 | E | 93 | Dm | 26,2 | 22,7 | 760 | 200 | 46,0 | 516,6 | 29,6 | 16,0 |
| 1-20-1 | E | 93 | Dms | 21,0 | 19,5 | 1 300 | 0 | 32,9 | 365,5 | 0,0 | 10,0 |
| 1-20-2 | P | 93 | Dms | 22,9 | 20,9 | 1 080 | 0 | 30,2 | 378,1 | 0,0 | 33,0 |
| 1-21-1 | P | 93 | Dm | 29,3 | 26,8 | 540 | 20 | 41,5 | 537,7 | 4,6 | 32,0 |
| 1-21-10 | E | 93 | Dm | 25,8 | 25,9 | 1 140 | 140 | 51,6 | 661,3 | 14,4 | 8,0 |
| 1-21-11 | P | 93 | Dm | 25,4 | 24,8 | 880 | 20 | 38,9 | 486,4 | 5,3 | 15,0 |
| 1-21-12 | P | 93 | Dm | 25,7 | 25,7 | 800 | 40 | 42,5 | 524,6 | 11,5 | 19,0 |
| 1-21-2 | P | 93 | Dm | 27,5 | 26,4 | 900 | 20 | 46,2 | 614,6 | 5,4 | 33,0 |
| 1-21-3 | P | 93 | Dm | 28,9 | 27,5 | 940 | 20 | 58,4 | 788,0 | 10,3 | 19,0 |
| 1-21-4 | P | 93 | Dm | 25,4 | 22,7 | 1 260 | 140 | 54,7 | 654,4 | 21,6 | 10,0 |
| 1-21-5 | P | 93 | Dm | 24,9 | 24,7 | 1 500 | 20 | 55,7 | 735,2 | 5,0 | 15,0 |
| 1-21-6 | P | 93 | Dm | 24,7 | 24,5 | 1 360 | 0 | 48,9 | 642,8 | 0,0 | 12,0 |
| 1-21-7 | P | 93 | Dm | 26,7 | 25,5 | 900 | 20 | 40,5 | 532,9 | 8,1 | 64,0 |
| 1-21-9 | P | 93 | Dm | 22,6 | 21,7 | 1 420 | 60 | 40,5 | 483,4 | 19,4 | 23,0 |
| 1-22-1 | P | 88 | Dms | 31,5 | 28,6 | 740 | 40 | 58,5 | 789,2 | 12,5 | 12,0 |
| 1-22-10 | B | 88 | Dms | 19,0 | 19,9 | 1 680 | 0 | 34,4 | 334,9 | 0,0 | 24,0 |
| 1-22-11 | P | 88 | Dms | 19,2 | 20,2 | 1 560 | 0 | 33,3 | 350,3 | 0,0 | 55,0 |
| 1-22-2 | P | 88 | Dms | 29,4 | 28,0 | 860 | 60 | 48,4 | 698,6 | 15,3 | 25,0 |
| 1-22-3 | B | 88 | Dms | 20,1 | 22,7 | 1 320 | 120 | 36,0 | 386,8 | 13,7 | 23,0 |
| 1-22-4 | B | 88 | Dms | 20,2 | 21,2 | 860 | 300 | 30,7 | 292,1 | 20,7 | 30,0 |

Oglekļa aprīte meža ekosistēmā

| PL | Valdošā suga | Vecums, gados | Meža tips | D, cm | H, m | Dzīvo koku skaits, gab. ha ⁻¹ | Sausokņu skaits, gab. ha ⁻¹ | G, m ² ha ⁻¹ | Dzīvo koku krāja, m ³ ha ⁻¹ | Sausokņu krāja, m ³ ha ⁻¹ | Pameža projektīvais segums, % |
|--------|--------------|---------------|-----------|-------|------|--|--|------------------------------------|---|---|-------------------------------|
| 1-22-5 | B | 88 | Dms | 20,9 | 21,5 | 1 320 | 0 | 40,7 | 421,3 | 0,0 | 41,0 |
| 1-22-6 | P | 88 | Dms | 23,5 | 21,7 | 820 | 120 | 36,5 | 420,8 | 14,9 | 45,0 |
| 1-22-7 | P | 88 | Dms | 28,4 | 26,6 | 920 | 40 | 54,0 | 728,4 | 12,2 | 38,0 |
| 1-22-8 | P | 88 | Dms | 25,4 | 23,8 | 1 040 | 280 | 51,5 | 603,3 | 40,8 | 19,0 |
| 1-22-9 | P | 88 | Dms | 30,7 | 27,6 | 740 | 20 | 55,9 | 748,3 | 5,9 | 46,0 |
| 1-23-1 | B | 93 | Dms | 17,3 | 17,3 | 1 720 | 40 | 26,0 | 231,9 | 18,4 | 70,0 |
| 1-23-2 | B | 93 | Dms | 18,3 | 16,9 | 1 180 | 200 | 27,1 | 222,8 | 14,2 | 44,0 |
| 1-23-3 | B | 93 | Dms | 20,4 | 19,3 | 1 960 | 100 | 55,5 | 516,1 | 17,4 | 30,0 |
| 1-28-1 | P | 93 | Dm | 27,3 | 24,1 | 1 240 | 20 | 53,2 | 717,5 | 2,3 | 21,0 |
| 1-28-2 | P | 93 | Dm | 29,1 | 27,7 | 920 | 100 | 69,4 | 958,5 | 4,8 | 15,0 |
| 1-29-1 | P | 88 | Dm | 28,6 | 24,9 | 980 | 100 | 58,1 | 749,8 | 0,2 | 32,0 |
| 1-29-2 | P | 88 | Dm | 28,3 | 23,8 | 780 | 0 | 41,1 | 495,7 | 0,0 | 25,0 |
| 1-29-3 | P | 88 | Dm | 27,4 | 25,3 | 1 000 | 60 | 55,7 | 682,3 | 30,4 | 14,0 |
| 1-29-4 | P | 88 | Dm | 25,5 | 22,9 | 1 380 | 0 | 53,7 | 677,0 | 0,0 | 7,0 |
| 1-3-1 | P | 72 | Ln | 19,5 | 21,2 | 2 000 | 20 | 41,3 | 459,0 | 3,5 | 42,0 |
| 1-3-2 | P | 72 | Ln | 22,9 | 23,9 | 1 260 | 0 | 40,2 | 479,5 | 0,0 | 24,0 |
| 1-31-1 | E | 69 | Dm | 24,8 | 23,4 | 860 | 120 | 44,7 | 502,9 | 17,9 | 10,0 |
| 1-33-1 | B | 93 | As | 24,7 | 20,6 | 1 100 | 60 | 49,0 | 536,3 | 13,8 | 27,0 |
| 1-33-2 | B | 93 | As | 25,6 | 19,5 | 1 000 | 100 | 47,9 | 515,2 | 15,7 | 30,0 |
| 1-33-3 | B | 93 | As | 20,2 | 18,0 | 840 | 200 | 29,6 | 248,0 | 15,0 | 40,0 |
| 1-34-1 | P | 93 | Dm | 28,3 | 26,6 | 1 060 | 100 | 47,6 | 652,1 | 1,5 | 21,0 |
| 1-34-2 | P | 93 | Dm | 27,4 | 24,4 | 1 440 | 0 | 45,9 | 627,2 | 0,0 | 22,0 |
| 1-8-1 | P | 88 | Dm | 28,6 | 26,1 | 740 | 0 | 43,0 | 567,3 | 0,0 | 18,0 |

Oglekļa aprīte meža ekosistēmā

| PL | Valdošā suga | Vecums, gados | Meža tips | D, cm | H, m | Dzīvo koku skaits, gab. ha ⁻¹ | Sausokņu skaits, gab. ha ⁻¹ | G, m ² ha ⁻¹ | Dzīvo koku krāja, m ³ ha ⁻¹ | Sausokņu krāja, m ³ ha ⁻¹ | Pameža projektīvais segums, % |
|-------|--------------|---------------|-----------|-------|------|--|--|------------------------------------|---|---|-------------------------------|
| 1-8-2 | P | 88 | Dm | 29,5 | 27,0 | 700 | 0 | 41,5 | 559,4 | 0,0 | 16,0 |
| 1-8-3 | P | 88 | Dm | 25,4 | 23,9 | 960 | 0 | 34,9 | 456,1 | 0,0 | 25,0 |
| 1-9-1 | P | 96 | Dm | 29,5 | 26,9 | 660 | 0 | 38,8 | 512,5 | 0,0 | 40,0 |
| 1-9-2 | P | 96 | Dm | 31,2 | 29,3 | 560 | 0 | 40,3 | 552,8 | 0,0 | 23,0 |
| 1-9-3 | P | 96 | Dm | 29,8 | 27,9 | 520 | 0 | 32,9 | 432,4 | 0,0 | 46,0 |

4. Pielikums Mežaudžu biomasas prognozēšanas modelis

MEŽAUDŽU BIOMASAS PROGNOZĒŠANAS MODELIS

Šis kods paredzēts mašīnmācības modeļu apmācīšanai izmantojot empīriski iegūtus lauka datus un citas piesaistītas ģeotelpiskas datu kopas.

Izmantojamās bibliotēkas

```
library(caret)
library(raster)
library(rgdal)
library(doParallel)
library(cluster)
library(corrplot)
library(ggplot2)
library(plyr)
library(xgboost)
library(DiagrammeR)
```

Norāda darba direktoriju

```
setwd("H:/2022/Ogleklis/csv")
getwd()
## [1] "H:/2022/Ogleklis/csv"
```

Ielasa datus

```
OriginalDataNumeric<-read.csv("Training_20230107_v2.csv", stringsAsFactors=F, header = TRUE, dec = ".",
sep = ";")
sapply(OriginalDataNumeric, class)
## X Y Elev.mean Elev.P50
## "integer" "integer" "numeric" "numeric"
## Elev.P60 Elev.P70 Elev.P75 Elev.P80
## "numeric" "numeric" "numeric" "numeric"
## Elev.P90 Elev.P95 Elev.P99 Elev.SQRT
## "numeric" "numeric" "numeric" "numeric"
## IDENTIF Time_Diff AGB_kop BGB_kop
## "numeric" "integer" "numeric" "numeric"
## SB_kop BB_kop SRB_kop DTW_30
## "numeric" "numeric" "numeric" "numeric"
## DTW_10 WAM Nedela Kontinentalitate
## "numeric" "numeric" "integer" "numeric"
## DEM Priede Egle Berzs
## "numeric" "integer" "integer" "integer"
## Melnalksnis Apse Baltalksnis
## "integer" "integer" "integer"
OriginalDataNumeric <- na.omit(OriginalDataNumeric)
```

Izveido jaunu datu kopu atmetot lielās kolonnas

```
df = subset(OriginalDataNumeric, select = -c(BGB_kop, SRB_kop, SB_kop, BB_kop, IDENTIF))
```

Sagatavo apmācīšanas un validācijas datu kopas

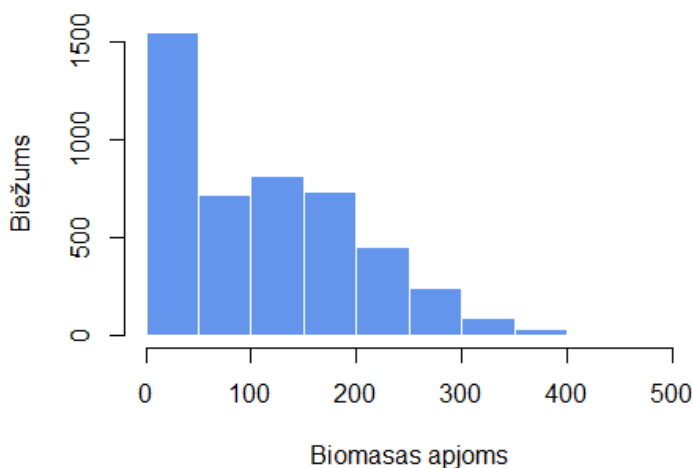
```
sample_size = floor(0.8*nrow(df))
set.seed(42)
picked = sample(seq_len(nrow(df)),size = sample_size)
TrainingData =df[picked,]
```



```
TestData =df[-picked,]
```

Izveido histogrammu ar datu sadalījumu pa biomasas apjoma grupām

```
hist(unlist(df$AGB_kop),border="white",
col="cornflowerblue",main="",xlab="Biomasas apjoms", ylab='Biežums')
```



Attēls 69. Pielieto lineārās regresijas modeli.

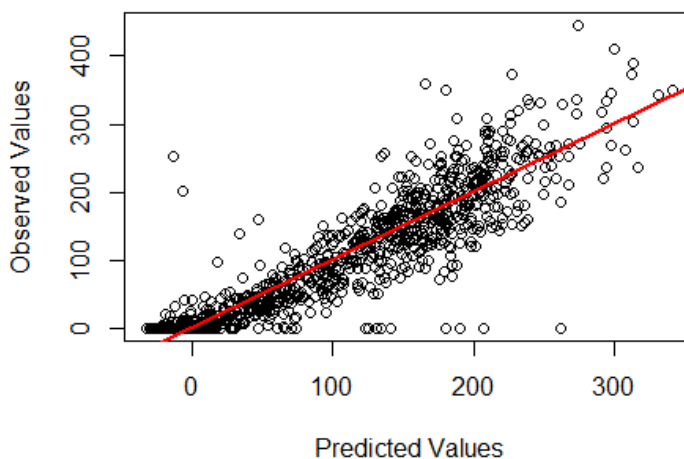
```
model_lm <- train(AGB_kop ~ .,
data = TrainingData,
method = "lm")
```

Ataino lineārās regresijas modeļa parametrus

```
model_lm
## Linear Regression
##
## 3715 samples
## 25 predictor
##
## No pre-processing
## Resampling: Bootstrapped (25 reps)
## Summary of sample sizes: 3715, 3715, 3715, 3715, 3715, ...
## Resampling results:
##
## RMSE Rsquared MAE
## 41.00807 0.7944753 27.65471
##
## Tuning parameter 'intercept' was held constant at a value of TRUE
pred.test_lm <- predict(object = model_lm, newdata = TestData, type = "raw")
## Warning in predict.lm(modelFit, newdata): prediction from a rank-deficient fit
## may be misleading
TestData$pred_lm <- pred.test_lm

plot(TestData$pred_lm,
TestData$AGB_kop,
xlab = "Predicted Values",
```

```
ylab = "Observed Values")
abline(a = 0,
b = 1,
col = "red",
lwd = 2)
```



Attēls 70. Lineārā regresijas modeļa vērtības.

```
postResample(TestData$pred_lm, TestData$AGB_kop)
## RMSE Rsquared MAE
## 41.9992761 0.7850848 28.3774916
```

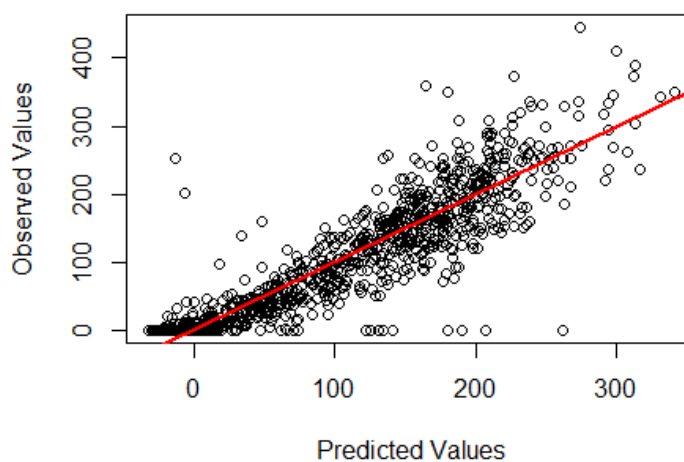
Pielieto *Ridge* regresijas modeli

```
model_ride <- train(AGB_kop ~ .,
data = TrainingData,
method = "ridge")
```

Ataino *Ridge* regresijas modeļa parametrus

```
model_ride
## Ridge Regression
##
## 3715 samples
## 25 predictor
##
## No pre-processing
## Resampling: Bootstrapped (25 reps)
## Summary of sample sizes: 3715, 3715, 3715, 3715, 3715, 3715, ...
## Resampling results across tuning parameters:
##
## lambda RMSE Rsquared MAE
## 0e+00 40.81983 0.7952318 27.63661
## 1e-04 40.79538 0.7954764 27.62797
## 1e-01 41.84233 0.7906868 29.81752
##
## RMSE was used to select the optimal model using the smallest value.
## The final value used for the model was lambda = 1e-04.
```

```
pred.test.ri <- predict(object = model_ride, newdata = TestData, type = "raw")  
TestData$pred_ri <- pred.test.ri  
plot(TestData$pred_ri,  
      TestData$AGB_kop,  
      xlab = "Predicted Values",  
      ylab = "Observed Values")  
abline(a = 0,  
        b = 1,  
        col = "red",  
        lwd = 2)
```



Attēls 71. Ridge regresijas modeļa vērtības.

```
postResample(TestData$pred_ri, TestData$AGB_kop)  
## RMSE Rsquared MAE  
## 41.9942988 0.7851309 28.3716312
```

Pielieto Lasso regresijas modeli

```
model_lasso <- train(AGB_kop ~ .,  
                     data = TrainingData,  
                     method = "lasso")
```

Ataino Lasso regresijas modeļa parametrus

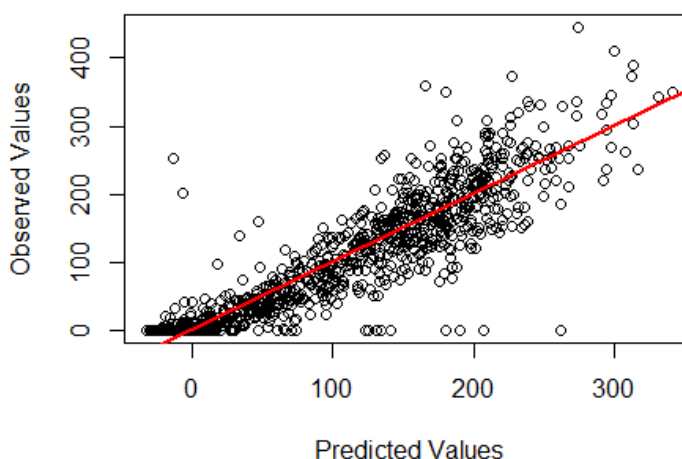
```
model_lasso  
## The lasso  
##  
## 3715 samples  
## 25 predictor  
##  
## No pre-processing  
## Resampling: Bootstrapped (25 reps)  
## Summary of sample sizes: 3715, 3715, 3715, 3715, 3715, 3715, ...  
## Resampling results across tuning parameters:  
##
```

Oglekļa aprite meža ekosistēmā

```
## fraction RMSE Rsquared MAE
## 0.1 64.37600 0.7896276 52.24455
## 0.5 40.68744 0.7987211 27.70803
## 0.9 40.77175 0.7978192 27.67173
##
## RMSE was used to select the optimal model using the smallest value.
## The final value used for the model was fraction = 0.5.
pred.test.la <- predict(object = model_lasso, newdata = TestData, type = "raw")

TestData$pred_la <- pred.test.la

plot(TestData$pred_la,
      TestData$AGB_kop,
      xlab = "Predicted Values",
      ylab = "Observed Values")
abline(a = 0,
       b = 1,
       col = "red",
       lwd = 2)
```



Attēls 72. Lasso regresijas modeļa vērtības.

```
postResample(TestData$pred_la, TestData$AGB_kop)
## RMSE Rsquared MAE
## 41.9992761 0.7850848 28.3774916
```

Pielieto *Bagged CART* regresijas modeli

```
model_treebag <- train(AGB_kop ~ .,
                       data = TrainingData,
                       method = "treebag")
```

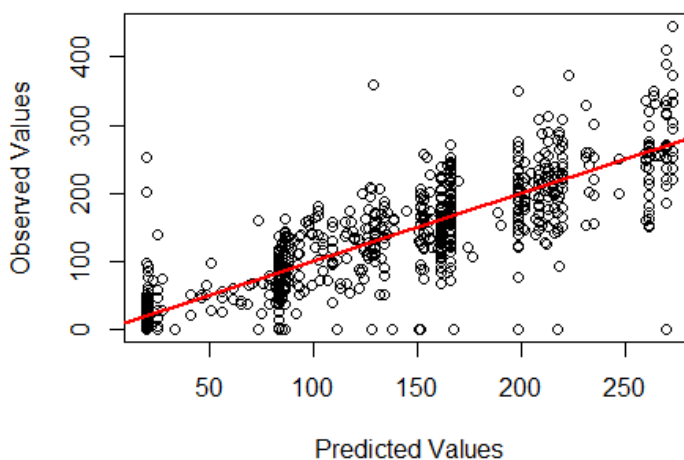
Ataino Bagged CART regresijas modeļa parametrus

```
model_treebag
## Bagged CART
##
## 3715 samples
```

```
## 25 predictor
##
## No pre-processing
## Resampling: Bootstrapped (25 reps)
## Summary of sample sizes: 3715, 3715, 3715, 3715, 3715, ...
## Resampling results:
##
## RMSE Rsquared MAE
## 41.84593 0.7862627 29.71916
pred.test.tr <- predict(object = model_treebag, newdata = TestData, type = "raw")

TestData$pred_tr <- pred.test.tr

plot(TestData$pred_tr,
      TestData$AGB_kop,
      xlab = "Predicted Values",
      ylab = "Observed Values")
abline(a = 0,
       b = 1,
       col = "red",
       lwd = 2)
```



Attēls 73. Bagged CART regresijas modeļa vērtības.

```
postResample(TestData$pred_tr, TestData$AGB_kop)
## RMSE Rsquared MAE
## 44.3174884 0.7607245 30.9632628
```

Sagatavo parametrus priekš *xgbTree* algoritma un norāda dažādas *n_rounds* un *max_depth* vērtības, lai pēc tam izvēlētos labāko kombināciju

```
tune_control <- caret::trainControl(method = "cv", number = 5, verboseIter = FALSE)

gridTuning = expand.grid(
  nrounds = c(5, 10, 25, 50, 75, 100, 150, 200, 300),
  max_depth = c(5, 10, 20, 30),
```

Oglekļa aprite meža ekosistēmā

```
eta = c(0.3),
gamma = c(0),
colsample_bytree = c(1),
min_child_weight = c(1),
subsample = c(0.5)
)
```

Apmāca xgbTree algoritmu izmantojot iepriekš norādītās nrounds un max_depth kombinācijas. Modeļa izdrukā izvēlas parametrus, kas sniedz zemākās RMSE un MAE vērtības

```
xgbTreetuningmodel <- caret::train(AGB_kop~, data = TrainingData, trControl = tune_control, tuneGrid =
gridTuning, method = "xgbTree", verbose = FALSE)
xgbTreetuningmodel
## eXtreme Gradient Boosting
##
## 3715 samples
## 25 predictor
##
## No pre-processing
## Resampling: Cross-Validated (5 fold)
## Summary of sample sizes: 2973, 2971, 2972, 2972, 2972
## Resampling results across tuning parameters:
##
## max_depth nrounds RMSE Rsquared MAE
## 5 5 46.09728 0.8030046 30.67985
## 5 10 39.32933 0.8113090 26.06106
## 5 25 38.22273 0.8201926 25.16705
## 5 50 38.51515 0.8183653 25.27748
## 5 75 38.48249 0.8190336 25.08195
## 5 100 38.44880 0.8194560 24.90768
## 5 150 38.60234 0.8186702 24.74160
## 5 200 38.71927 0.8181235 24.51087
## 5 300 38.77646 0.8179497 24.11586
## 10 5 47.77707 0.7938141 31.57988
## 10 10 39.60446 0.8098802 25.66069
## 10 25 39.01766 0.8139824 24.65940
## 10 50 38.86693 0.8159142 23.87809
## 10 75 38.82309 0.8165716 23.50027
## 10 100 38.84076 0.8164774 23.35545
## 10 150 38.82645 0.8166420 23.24948
## 10 200 38.82111 0.8166948 23.23141
## 10 300 38.83938 0.8165435 23.23945
## 20 5 48.47772 0.7904043 31.94667
## 20 10 40.74123 0.8004897 25.75646
## 20 25 40.19892 0.8040851 24.63368
## 20 50 40.08709 0.8055038 24.03555
## 20 75 40.07434 0.8056565 23.92047
## 20 100 40.07259 0.8056817 23.90125
## 20 150 40.07470 0.8056828 23.89531
## 20 200 40.08660 0.8055778 23.89991
## 20 300 40.08814 0.8055775 23.89488
## 30 5 48.12659 0.7951733 31.56554
```

Oglekļa aprīte meža ekosistēmā

```
## 30 10 40.24960 0.8044296 25.06114
## 30 25 39.37958 0.8106586 23.73288
## 30 50 39.35975 0.8112594 23.33269
## 30 75 39.36125 0.8112980 23.25330
## 30 100 39.36634 0.8112586 23.24137
## 30 150 39.37209 0.8112039 23.24612
## 30 200 39.38129 0.8111288 23.25257
## 30 300 39.36315 0.8113219 23.24905
##
## Tuning parameter 'eta' was held constant at a value of 0.3
## Tuning
##
## Tuning parameter 'min_child_weight' was held constant at a value of 1
##
## Tuning parameter 'subsample' was held constant at a value of 0.5
## RMSE was used to select the optimal model using the smallest value.
## The final values used for the model were nrounds = 25, max_depth = 5, eta
## = 0.3, gamma = 0, colsample_bytree = 1, min_child_weight = 1 and subsample
## = 0.5.
```

Ievada galīgos *xgbTree* modeļa parametrus

```
set.seed(42)

control <- caret::trainControl(method = "cv", number = 10, verboseIter = FALSE)

FinalParameters = expand.grid(
  nrounds = c(100),
  max_depth = c(5),
  eta = c(0.3),
  gamma = c(0),
  colsample_bytree = c(1),
  min_child_weight = c(1),
  subsample = c(0.5)
)
```

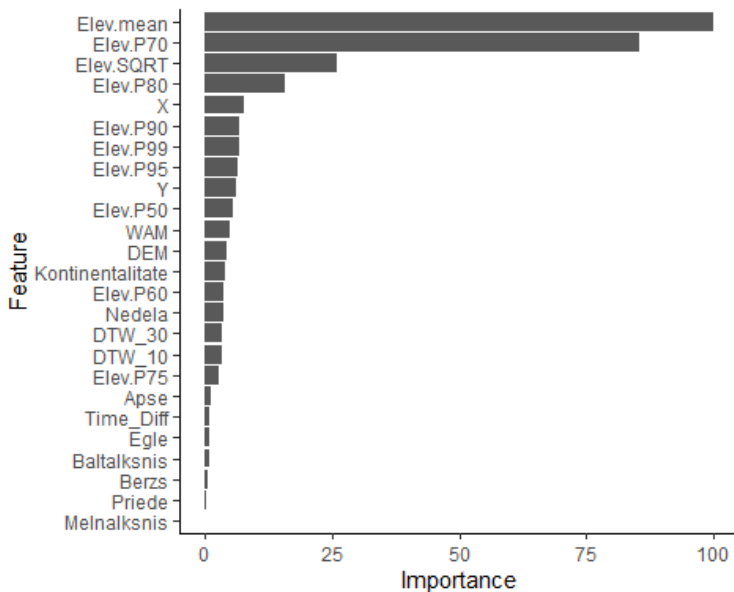
Veic *xgbTree* modeļa apmācīšanu

```
xgbTreeFinalmodel <- caret::train(AGB_kop~, data = TrainingData, trControl = control, tuneGrid =
FinalParameters, method = "xgbTree", verbose = TRUE)
print(xgbTreeFinalmodel)
## eXtreme Gradient Boosting
##
## 3715 samples
## 25 predictor
##
## No pre-processing
## Resampling: Cross-Validated (10 fold)
## Summary of sample sizes: 3344, 3343, 3344, 3344, 3344, 3344, ...
## Resampling results:
##
## RMSE Rsquared MAE
## 38.13654 0.8237479 24.77717
##
## Tuning parameter 'nrounds' was held constant at a value of 100
```

```
## Tuning
## held constant at a value of 1
## Tuning parameter 'subsample' was held
## constant at a value of 0.5
```

Vizualizē būtiskākos *xgbTree* modeļa ievades parametrus

```
ggplot(varImp(xgbTreeFinalmodel)) +
  theme_bw() + theme(panel.border = element_blank(), panel.grid.major = element_blank(),
  panel.grid.minor = element_blank(), axis.line = element_line(colour = "black"))
```



Attēls 74. Būtiskākie *xgbTree* modeļa ievades parametri.

Aprēķina *xgbTree* modeļa precizitāti un vizualizē prognožu rezultātus

```
pred.test.rf <- predict(object = xgbTreeFinalmodel, newdata = TestData, type = "raw")
summary(pred.test.rf)
## Min. 1st Qu. Median Mean 3rd Qu. Max.
## -36.20 33.34 111.58 113.03 180.12 419.51
pred.test.rf
class(pred.test.rf)
## [1] "numeric"
TestData$pred_rf <- pred.test.rf

library(dplyr)
TestData$starp <- TestData$AGB_kop - TestData$pred_rf
TestDataFiltered <- filter(TestData, abs(starp)<200)

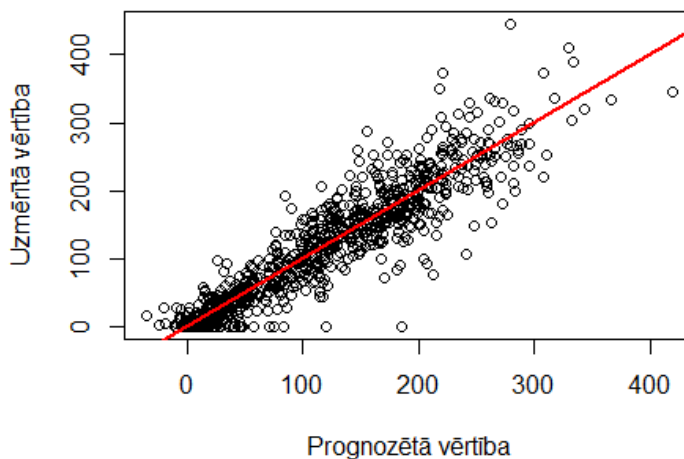
pred.test.rf <- predict(object = xgbTreeFinalmodel, newdata = TestData, type = "raw")

TestData$pred_rf <- pred.test.rf

plot(TestDataFiltered$pred_rf, # Draw plot using Base R
  TestDataFiltered$AGB_kop,
  xlab = "Prognozētā vērtība",
  ylab = "Uzmērītā vērtība")
abline(a = 0, # Add straight line
```



```
b = 1,  
col = "red",  
lwd = 2)
```

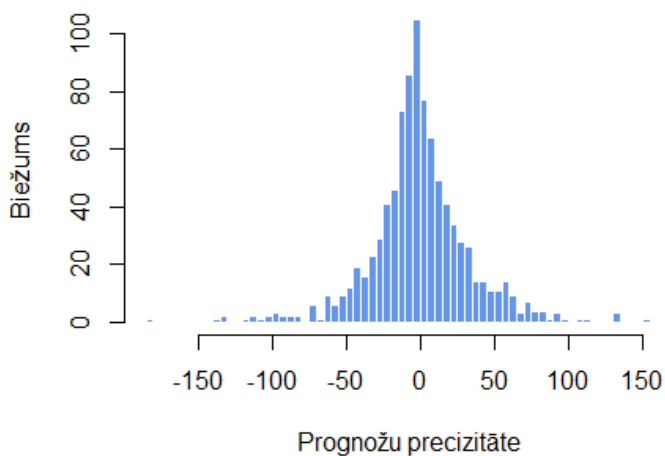


Attēls 75. xgbTree regresijas modeļa vērtības.

```
postResample(TestDataFiltered$pred_rf, TestDataFiltered$AGB_kop)  
## RMSE Rsquared MAE  
## 34.2592801 0.8542864 23.5405323
```

Izveido histogrammu, atainojot prognožu precizitāti

```
hist(unlist(TestDataFiltered$starp),border="white", nclass = 100,  
col="cornflowerblue",main="",xlab="Prognožu precizitāte", ylab="Biežums")
```



Attēls 76. Histogramma modeļa precizitātes raksturošanai.

Saglabā izveidoto modeli

```
saveRDS(xgbTreeFinalmodel, "./final_model.rds")
```