

PĀRSKATS

PAR PĒTĪJUMA IZPILDI 2025. GADĀ

PĒTĪJUMA NOSAUKUMS: LATVIJAS ZEMES IZMANTOŠANAS, ZEMES IZMANTOŠANAS MAIŅAS UN MEŽSAIMNIECĪBAS (ZIZIMM) SEKTORA KLIMATA PĀRMAIŅU MAZINĀŠANAS MĒRĶU SASNIEGŠANAI ĪSTENOJAMO DARBĪBU SILTUMNĪCEFEKTA GĀZU (SEG) EMISIJU MAZINĀŠANAI UN OGLEKĻA DIOKSĪDA (CO₂) PIESAISTES VEICINĀŠANAI MEŽA APSAIMNIEKOŠANĀ SOCIĀLI EKONOMISKAIS VĒRTĒJUMS

PĒTĪJUMS ĪSTENOTS SASKAŅĀ AR SASKAŅĀ AR MINISTRU KABINETĀ NOTEIKUMIEM Nr. 140 "GROZĪJUMI MINISTRU KABINETĀ 2015. GADA 3. FEBRUĀRA NOTEIKUMOS Nr. 59 "VALSTS UN EIROPAS SAVIENĪBAS ATBALSTA PIEŠKIRŠANAS KĀRTĪBA INVESTĪCIJU VEICINĀŠANAI LAUKSAIMNIECĪBĀ""

LĪGUMA Nr. 25-00-S0INZ03-000027

PĒTĪJUMA ZINĀTNISKAIS ANDIS LAZDIŅŠ, LVMI SILAVA VADOŠAIS PĒTNIEKS
VADĪTĀJS:

Kopsavilkums

Šis pētījums risina aktuālus zinātniskos un praktiskos jautājumus, kas saistīti ar meža zemes lomu SEG emisiju bilanci, biomasas pieaugumu un oglekļa krātuvju dinamiku. Latvijā meža ekosistēmas aizņem vairāk nekā 50% no valsts teritorijas, un tai ir būtiska nozīme gan klimata pārmaiņu mazināšanā, gan ilgtspējīgā dabas resursu apsaimniekošanā. Lai efektīvi pārvaldītu šo resursu, nepieciešami zinātniski pamatoti modeļi un metodoloģijas, kas ļauj precīzi noteikt oglekļa piesaisti un SEG emisijas.

Pētījuma ietvaros zinātnieki apsekoja 34 pirmā līmeņa meža veselības monitoringa parauglaukumus valsts mežos, kas izveidoti BioSoil demonstrācijas projekta ietvaros un kuru atkārtota apsekošana uzsākta 2024. gadā pēc pirmo divu mērījumu ciklu pabeigšanas 2006. un 2012. gadā. Iegūtā informācija palīdzēs raksturot organiskā oglekļa un kopējā slāpekļa saturu un uzkrājumu meža augsnēs, izmantojot ICP Forests metodiku. Vienlaikus tiks pilnveidota organisko augšņu SEG emisiju aprēķinu metodika, īpaši fokusējoties uz kūdras augsnēm, zemes izmantošanas maiņu un mitruma režīma ietekmi. Pētījumā sagatavoti priekšlikumi šo uzlabojumu iekļaušanai nacionālajā SEG inventarizācijā, lai nodrošinātu precīzākus datus un efektīvāku SEG emisiju uzskaiti.

Lai veicinātu zinātniski pamatotu pieeju SEG emisiju un oglekļa aprites analīzei, sagatavots izziņātības apskats par organisko augšņu apsaimniekošanas ietekmi uz SEG emisijām renaturalizētās un apmežotās teritorijās. Šajā apskatā apkopotas un analizētas jaunākos starptautiskos un Latvijas pētījumos publicētās atziņas, lai izstrādātu zinātniski pamatotus priekšlikumus ilgtspējīgai organisko augšņu apsaimniekošanai. Sagatavotais pārskata raksts iesniegts publicēšanai Ambio žurnālā,

Projektā būtisku lomu ieņems augšanas gaitas modeļa (AGM) pilnveidošana, integrējot jaunākās zinātnes atziņas un precizējot nepilnīgi pārstāvētas emisiju kategorijas un oglekļa krātuves. Pētnieki izmantos ilgtermiņa monitoringa datus un attālās izpētes tehnoloģijas, lai uzlabotu modeļa precizitāti un pielāgotu to Latvijas klimatiskajiem un ekoloģiskajiem apstākļiem.

Pētījuma ietvaros aprobēti biomasas pieauguma prognožu modeļi, balstoties uz divu ciklu aerolāzerskenēšanas (ALS) datiem un Sentinel-2 satelītattēliem. Šie modeļi nodrošina iespēju veikt regulāru biomasas karšu “no sienas līdz sienai” atjaunošanu, kas ļauj precīzāk prognozēt meža resursu izmaiņas un to ietekmi uz oglekļa bilanci.

Pētījumā veikts meža apsaimniekošanas ietekmes uz SEG emisijām pasākumu ietekmes pārrēķins. Papildus scenāriju aprēķins nav veikts.

Pētījuma rezultāti pilnveido risinājumus oglekļa piesaistes un SEG emisiju aprēķiniem, kas noderīgi gan politikas plānotājiem, gan meža apsaimniekotājiem un zinātniskajai sabiedrībai. Pētījumā iegūtās zināšanas palīdzēs Latvijai izpildīt starptautiskās klimata saistības un attīstīt ilgtspējīgu meža apsaimniekošanas pieeju.

Izmantotie saīsinājumi

CO₂ – oglekļa dioksīds;

EK – Eiropas Komisija;

ES – Eiropas Savienība

ETS – emisiju tirdzniecības sistēma

KLP – kopējā lauksaimniecība politika;

MZV - monitorings, ziņošanas un verifikācija;

SEG – siltumnīcefekta gāzes;

UNFCCC - Apvienoto Nāciju Organizācija Vispārējai konvencijai par klimata pārmaiņām;

ZIZIMM – zemes izmantošanas, zemes izmantošanas maiņas un mežsaimniecības sektors;

SEG – siltumnīcefekta gāzes;

N₂O – dislāpekļa oksīds;

CH₄ – metāns;

NH₃ – amonjaks;

NO – slāpekļa oksīds;

NO₃ – nitrāti;

C/N – oglekļa/slāpekļa attiecība, kas nosaka ātrumu, ar kādu mikroorganismi sadala organisko vielu;

N – slāpeklis;

C – ogleklis;

ppm – tilpuma miljondaļas;

LVĢMC – Latvijas vides, ģeoloģijas un meteoroloģijas centrs;

SOC – augsnes organiskais ogleklis.

Saturs

Kopsavilkums.....	2
Izmantotie saīsinājumi.....	3
Saturs.....	4
Ievads.....	5
Oglekļa uzkrājuma izmaiņu augsnē novērtējums pirmā līmeņa meža veselības monitoringa parauglaukumos.....	9
Izzinātības apskats par organisko augšņu apsaimniekošanas ietekmi uz SEG emisijām renaturalizētās un apmežotās platībās.....	15
Ievads.....	15
Metodoloģija.....	16
Rezultāti.....	17
Zemes izmantošana.....	17
Augsnes oglekļa (C) krājumu izmaiņas.....	18
SEG emisijas no augsnes (CO ₂ , CH ₄ un N ₂ O).....	19
C piesaiste dzīvajā biomasā un novāktos koksnes produktos.....	21
Problēmas un ierobežojumi.....	22
Nākotnes virzieni.....	24
Secinājumi.....	25
Augšanas gaitas modeļa sistēmas vienādojumu pilnveidošana.....	27
Biomases pieauguma modeļu izstrādāšana, balstoties uz divu ciklu aerolāzerskenēšanas (ALS) datiem.....	52
Meža apsaimniekošanas ietekmes uz SEG emisijām scenāriju un prognožu pārrēķini.....	58
Koksnes pelnu izmantošana meža mēslošanai.....	58
Minerālmēslojuma izmantošana meža mēslošanai.....	60
Hidroloģiskā režīma uzlabošana mežos ar pārmitrām minerālaugsnēm.....	62
Mazvērtīgo lapu koku audžu nomaiņa.....	64
Dabiskas, pārslapinātas meža ekosistēmas atjaunošana organiskās augsnēs lauksaimniecībā izmantojamās zemēs.....	66
Meža ieaudzēšana lauksaimniecībā izmantojamās zemēs ar organiskām augsnēm.....	68
Meža ieaudzēšana lauksaimniecībā izmantojamās zemēs ar organiskām augsnēm.....	70
Vienlaidus ātraudzīgu kokaugu stādījumi lauksaimniecībā izmantojamās zemēs.....	72
Atvasāji notekūdeņu dūņu izmantošanai lauksaimniecībā izmantojamās zemēs.....	73
Par 0,1 ha mazāku koku grupu ierīkošana ganībās.....	75
Kokaugu joslu stādījumi gar meliorācijas sistēmām un ceļu nodalošajām joslām.....	77
Kūdras ieguves vietu rekultivācija.....	79
Izmantotā literatūra.....	82

Ievads

Pētnieciskie uzdevumi saskaņā ar Ministru kabineta noteikumu Nr. 140 “Grozījumi Ministru kabineta 2015. gada 3. februāra noteikumos Nr. 59 “Valsts un Eiropas Savienības atbalsta piešķiršanas kārtība investīciju veicināšanai lauksaimniecībā”” 7. pielikumu:

1. Apsēkot atlikušos 34 pirmā līmeņa meža veselības monitoringa parauglaukumus, kas ierīkoti BioSoil demonstrācijas projekta ietvaros valsts mežos, un raksturot oglekļa un slāpekļa saturu un uzkrājumu atbilstoši ICP Forests metodikai.
2. Organisko augšņu radīto SEG emisiju aprēķinu metodikas (darbību datu meža zemēm – organisko augšņu izplatība, zemes izmantošanas maiņa un mitruma režīms) pilnveidošana un priekšlikumu sagatavošana to ietveršanai nacionālajā SEG inventarizācijā.
3. Izzinātības apskata – zinātniskas publikācijas – sagatavošana par organisko augšņu apsaimniekošanas ietekmi uz SEG emisijām un oglekļa apriti renaturalizētās un apmežotās platībās.
4. Augšanas gaitas modeļa (AGM) sistēmas vienādojumu pilnveidošana, integrējot jaunākās zinātnes atziņas un nepilnīgi pārstāvētās emisiju kategorijas un oglekļa krātuves.
5. Biomasas pieauguma modeļu izstrādāšana, balstoties uz divu ciklu aerolāzerskenēšanas (ALS) datiem, nodrošinot iespēju veikt biomasas karšu “no sienas līdz sienai” ikgadēju atjaunošanu, balstoties uz izstrādātajiem biomasas pieauguma modeļiem, Sentinel-2 satelītainām un ALS datiem.
6. Meža apsaimniekošanas ietekmes uz SEG emisijām scenāriju un prognožu pārrēķini, izmantojot aktualizētus pieņēmumus un modelēšanas algoritmus un jaunu scenāriju sagatavošana nepieciešamības gadījumā.

Īstenojot pirmo uzdevumu, apsekojām 34 pirmā līmeņa meža veselības monitoringa parauglaukumus, kuros augsnes oglekļa uzkrājuma monitorings uzsākts 2006. gadā demonstrācijas projekta Biosoil ietvaros un atkārtota paraugu ievākšana veikta 2012. gadā. Pētījumā iekļauti valsts mežos esošie parauglaukumi. Apsēkotajos augsnes oglekļa monitoringa parauglaukumos divos atkārtojums ievākti augsnes paraugus 0-10 cm, 10-20 cm, 20-40 cm un 40-80 cm dziļumā, kā arī no zemsegas visā tās biezumā. Analīzēm ievākti noteikta tilpuma (100 cm³) augsnes paraugi un noteikta laukuma (100 cm²) zemsegas paraugus, nepieciešamības gadījumā ievācot papildus zemsegas paraugus ķīmisko parametru analīzēm. Augsnes ķīmisko parametru analīzēm papildus ievākti paraugus visā slāņa biezumā. Ievāktajos paraugos noteikts organiskā oglekļa un

kopējā slāpekļa saturs, kā arī augsnes pH un augsnes blīvums, atbilstoši 2012. gadā izmantotajai metodikai. Augsnes analīzes veiktas LVMI Silava Meža vides laboratorijā. Organiskās augsnēs papildus fiksēts zemes virsmas augstums, izmantojot brīvpieejas ALS (aerolāzerskenēšanas) datus. Iegūtie dati izmantoti oglekļa aprites meža zemēs modelēšanas vienādojumu (Yasso20 modeļa) validācijai.

Pētījuma otrā uzdevuma īstenošanas ietvaros, lai uzlabotu SEG emisiju aprēķinus organiskajām augsnēm, pilnveidojām metodiku, ko izmanto nacionālajā SEG inventarizācijā organisko augšņu izplatības noteikšanai. Mērķis ir nodrošināt precīzākus datus par emisijām un oglekļa apriti, kas saistīta ar dažādām zemes izmantošanas praksēm, īpaši meža zemēs. Pētījuma ietvaros vispirms apkopoti un analizēti pieejamie dati – izmantota Latvijas SEG inventarizācijas informāciju, Meža resursu monitoringa rezultāti, kā arī attālās izpētes dati no aerolāzerskenēšanas (ALS), Sentinel-2 satelītattēliem un ortofoto kartēm, kā arī publicētās organisko augšņu kartes. Šie dati palīdz precīzāk noteikt, kā mainās organisko augšņu izmantošanas prakse, kā arī kādas ir mitruma režīma izmaiņas, kas būtiski ietekmē SEG emisijas. Īpaša uzmanība pievērsta tam, lai uzlabotu emisiju aprēķinus un pielāgotu vienādojumus Latvijas apstākļiem, balstoties uz jaunākajiem zinātniskajiem pētījumiem un starptautiskajām vadlīnijām. Aprēķinos izmantoti dažādi modelēšanas rīki, tostarp AGM un EPIM modeļi. Pētījuma rezultātā izstrādāti priekšlikumi nacionālās SEG inventarizācijas uzlabošanai, kas ļauj precīzāk noteikt, kā dažādi meža apsaimniekošanas pasākumi ietekmē emisijas un oglekļa piesaisti. Šī pieeja ne tikai palīdz izpildīt starptautiskās klimata saistības, bet arī nodrošina precīzākus, valstij specifiskus datus politikas plānošanai un ilgtspējīgas mežsaimniecības attīstībai.

Pētījuma trešā uzdevuma īstenošanai sagatavots sistemātisks zinātniskās literatūras pārskats, analizējot recenzētus pētījumus, politikas dokumentus un tehniskos ziņojumus, kas saistīti ar SEG emisiju plūsmām organiskajās augsnēs pēc pārpurvošanas un apmežošanas. Īpaša uzmanība pievērsta reģionālajiem un globālajiem pētījumiem par organisko augšņu apsaimniekošanu un to ietekmi uz SEG emisijām; meta analīzei un sintēzes pētījumiem par oglekļa bilanci organiskajās augsnēs; Klimata pārmaiņu starpvaldību padomes (IPCC) vadlīnijām un ES politikas dokumentiem attiecībā uz klimata pārmaiņu mazināšanu ZIZIMM sektorā.

Datu avoti un salīdzinošā analīze. Iegūtie dati strukturēti, izmantojot salīdzinošo pieeju, salīdzinot divus apsaimniekošanas scenārijus:

- a) pārpurvošana – augsnes atkārtota pārslāpināšana (gruntsūdens līmeņa paaugstināšana) un tās ietekme uz CO₂ piesaisti un metāna emisijām;
- b) apmežošana lauksaimniecībā izmantojamās zemēs (LIZ) ar organiskajām augsnēm – meža ieaudzēšana un tās ilgtermiņa ietekme uz oglekļa apriti un SEG emisijām.

Pētījumā analizēti esošie modelēšanas rīki, kas izmantoti oglekļa aprites un SEG emisiju prognozēšanai dažādos scenārijos. Izvērtēta to pielietojamība Latvijas apstākļiem, īpaši platībās ar organiskajām augsnēm. Pētījumā secināts, ka pagaidām neviena pasaules valsts neizmanto SEG emisiju uzskaiti no organiskām augsnēm pilnvērtīgas, reģionāli validētas trešā līmeņa aprēķinu metodes, lai arī iepriekšējo piecu gadu laikā šajā jomā vērojams būtisks progress.

Pamatojoties uz analīzes rezultātiem, formulēti priekšlikumi SEG inventarizācijas uzlabošanai, kā arī sagatavota zinātniska publikācija, kas iesniegta publicēšanai žurnālā *Ambio*. Publikācijas manuskripts ietvertās atziņas kopsavilkuma veidā apkopotas šajā pārskatā.

Pētījuma ceturtajā uzdevumā, lai uzlabotu augšanas gaitas modelēšanas iespējas, precizēti esošie SEG emisiju aprēķinu vienādojumi, iekļaujot tajos jaunākās zinātniskās atziņas, tajā skaitā nesen veiktus pētījumu rezultāti, kas balstīti uz lauka mērījumiem un attālās izpētes tehnoloģijām. Aprēķinu sistēma paplašināta, iekļaujot iepriekš nepietiekami analizētus oglekļa krātuvju komponentus, tajā skaitā zemsedzes un augšnes organiskās vielas aprīte, kā arī atmirušo sakņu un nedzīvās koksnes sadalīšanās parametru uzlabošana. Modelēšanas rezultāti validēti, izmantojot meža augšnes ilgtermiņa monitoringa datus. Aprēķinos ietverta, piemēram, trupes ietekme, kā arī dažādu meža apsaimniekošanas stratēģiju (pārtraukta saimnieciskā darbība, līdzšinējā saimnieciskā darbība un intensificēta saimnieciskā darbība, ietekme uz SEG emisijām un CO₂ piesaisti. Veiktie uzlabojumi palīdz precīzāk prognozēt meža lomu klimata pārmaiņu mazināšanā un sekmēs zinātniski pamatotu politikas plānošanu.

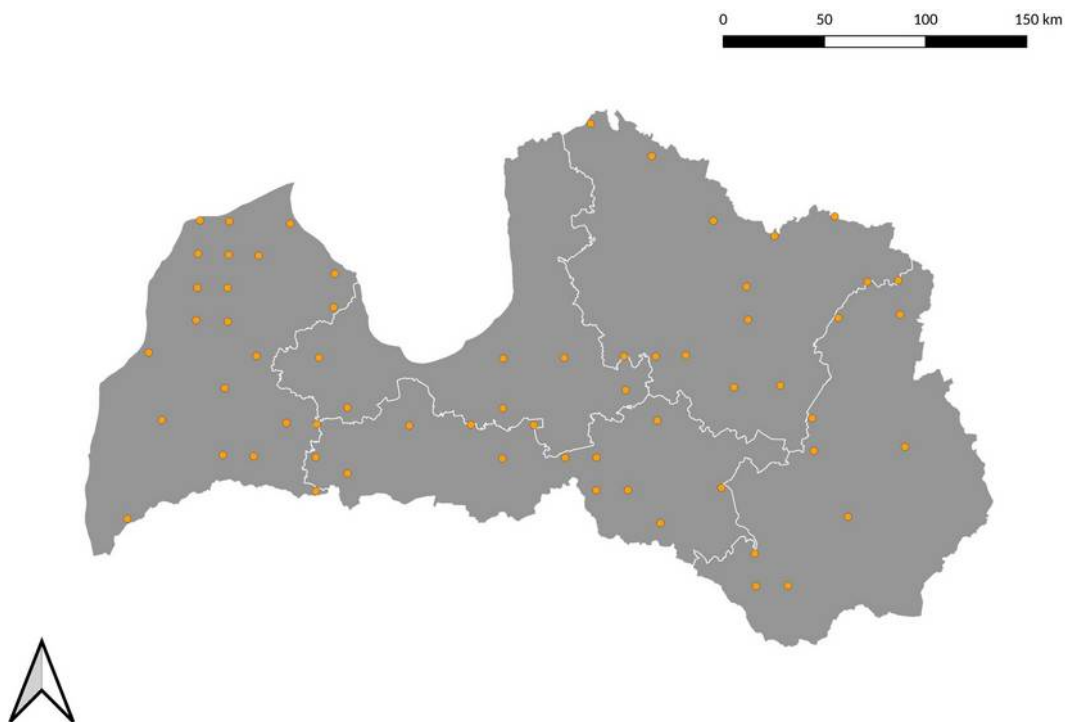
Pētījuma piektajā uzdevumā izmantoti divu ciklu aerolāzerskenēšanas (ALS) dati un Sentinel-2 satelītattēlus. Pētījumā analizēti attālās izpētes dati un lauka mērījumi, kas veikti Meža resursu monitoringa parauglaukumos, lai noteiktu koku augstuma un biomasas pieauguma dinamiku dažādās mežaudzēs. Pētījumā iegūti precīzi digitālie virsmas modeļi, kas salīdzināti ar iepriekšējā cikla ALS virsmas modeļiem, lai aprēķinātu koku augšanas ātrumu un biomasas pieaugumu. Pētījumā izmantoti divu laika periodu ALS skenējumi un jau iepriekš publicētā metodiku biomasas raksturošanai, lai izveidotu diferencētas izmaiņu kartes, kas parāda izmaiņas koku augstumā un meža struktūrā. Papildus ALS datiem analizēti Sentinel-2 satelītattēli, kas nodrošina regulārus optiskos datus par veģetācijas dinamiku. Šajā gadījumā satelītattēlu dati izmantoti sugu sastāva maiņai. Šī pieeja ļauj precīzāk modelēt biomasas pieaugumu un uzlabot tā telpisko detalizāciju. Pētījumā ņemtas vērā vērā Jāņa Ivanova un citu pētnieku publicētās atziņas par ALS datu pielietošanu Latvijas apstākļos meža taksācijas rādītāju modelēšanai (Breidenbach, Ivanovs, u.c., 2021; Dostálová u.c., 2021; Ivanovs u.c., 2021, 2023, 2024; Melniks u.c., 2024). Pētījumā izmantota regresijas un mašīnmācīšanās pieeja, lai pielāgotu prognožu modeļus Latvijas meža apstākļiem un samazinātu nenoteiktību prognozēs. Iegūtie modeļi nodrošinu iespēju katru gadu atjaunot biomasas kartes “no sienas līdz sienai”, sniedzot informāciju par meža resursu

izmaiņām. Šī metode palīdz gan SEG emisiju un piesaistes monitorēšanā, gan mežsaimniecības plānošanā un oglekļa kredītu aprēķinos. Aprēķinu precizitāti samazināja tas, ka 2025. gadā publiski bija pieejami ALS dati tikai nelielai daļai Latvijas teritorijas, tāpēc lauka mērījumu datiem, kas izmantoti otrā cikla ALS datu analīzei ir būtiski lielāka kļūdas robeža.

Pētījuma sestajā uzdevumā sagatavots SEG emisiju prognožu pārrēķins WEM (*with existing measures* jeb esošās saimnieciskās darbības turpināšanas) un klimata pārmaiņu mazināšanas pasākumu ietekmes prognožu pārrēķins, salīdzinot efektivitāti pie dažādiem mežsaimnieciskās darbības intensitātes scenārijiem, ar un bez dabisko traucējumu ietekmes ietveršanas aprēķinā.

Oglekļa uzkrājuma izmaiņu augsnē novērtējums pirmā līmeņa meža veselības monitoringa parauglaukumos

Pētījuma ietvaros apsekoti 60 pirmā līmeņa meža veselības monitoringa parauglaukumi, kuros augsnes oglekļa uzkrājuma monitorings uzsākts 2006. gadā demonstrācijas projekta Biosoil (Bārdule u.c., 2009; Komorovska u.c., 2009; Lazdiņš, 2008) ietvaros un atkārtots monitorings veikts 2012. gadā (Krisāns, 2012). Pētījumā iekļauti valsts mežos esošie parauglaukumi (Att. 1). Apsekotajos augsnes oglekļa monitoringa parauglaukumos divos atkārtojumos ievākti augsnes paraugi 0-10 cm, 10-20 cm, 20-40 cm un 40-80 cm dziļumā, kā arī no zemsegas visā tās biezumā. Analīzēm ievākti noteikta tilpuma (100 cm³) augsnes paraugi un noteikta laukuma (100 cm²) zemsegas paraugus, nepieciešamības gadījumā ievācot papildus zemsegas paraugus analīzēm (Att. 2). Augsnes analīzēm papildus ievākti paraugi ķīmiskajām analīzēm visā slāņa biezumā. Ievāktajos paraugos noteikts oglekļa un slāpekļa saturs, kā arī augsnes pH un augsnes blīvums, atbilstoši 2012. gadā izmantotajai metodikai (Krisāns, 2012). Augsnes analīzes veiktas LVMI Silava Meža vides laboratorijā, kas akreditēta attiecīgo analīžu veikšanai. Iegūtie dati izmantoti oglekļa aprites meža zemēs modelēšanas vienādojumu (Yasso20 modeļa) validācijai.



Att. 1. 2024. un 2025. gadā apsekotie parauglaukumi.



Att. 2. Paraugu ievākšanas vietas piemērs.

Datu kopā ir 60 parauglaukumi ar kopējo oglekļa uzkrājumu (tonnas C ha⁻¹) trijos laika punktos (2006.¹, 2012. un 2025.² gads) un detalizētiem mežaudžu un vides raksturlielumiem 2025. gadam.

Kopējais oglekļa uzkrājums parauglaukumos 2006. gadā ir no ~48 līdz ~956 t C ha⁻¹, mediānai 121,8 t C ha⁻¹ un vidējai vērtībai 193,6 t C ha⁻¹. 2012. gadā mediāna paaugstinās līdz 126,2 t C ha⁻¹, bet vidējā vērtība – līdz 207,5 t C ha⁻¹. 2025. gadā mediāna sasniedz 145,7 t C ha⁻¹, savukārt vidējā vērtība – 230,1 t C ha⁻¹. Visos trīs gados raksturīga ļoti liela variācija starp parauglaukumiem (standarta novirze 2006. gadā ~206, 2012. gadā ~195, 2025. gadā ~219 t C ha⁻¹), kas atspoguļo plašu mežaudžu tipu, auglības un oglekļa uzkrājuma stāvokļu amplitūdu.

Kopējais oglekļa uzkrājums 2006. gadā minerālaugsnēs svārstās no 47,5 līdz 233,3 t C ha⁻¹, vidējai vērtībai 109,3 t C ha⁻¹ un mediānai 101,0 t C ha⁻¹. 2012. gadā intervāls nobīdās uz augšu (55,9–235,5 t C ha⁻¹), vidējā vērtība palielinās līdz 113,8 t C ha⁻¹, bet mediāna saglabājas ļoti tuvu 2006. gada līmenim (101,4 t C ha⁻¹). 2025. gadā oglekļa uzkrājums sasniedz 36,6–303,4 t C ha⁻¹, vidēji 127,6 t C ha⁻¹ ar mediānu 119,1 t C ha⁻¹. Standarta novirze pieaug no 41,9 t C ha⁻¹ 2006. gadā līdz 61,8 t C ha⁻¹ 2025. gadā, kas liecina par palielinātu heterogenitāti starp parauglaukumiem.

Absolūtās izmaiņas 2006.–2012. gadā ($\Delta 12 = 2012 - 2006$) ir ļoti variablas: no –124,5 līdz +113,7 t C ha⁻¹, vidēji +4,4 t C ha⁻¹ ar mediānu –4,0 t C ha⁻¹. Pozitīvas izmaiņas novērotas apmēram pusei parauglaukumu, bet kopējā tendence ir vāja, un t-tests rāda, ka vidējais pieaugums nav būtiski atšķirīgs no nulles ($p \approx 0,51$). Tātad īsākā

¹ Paraugu ievākšana veikta 2004.–2006. gados.

² Paraugu ievākšana veikta 2024. un 2025. gadā.

periodā starp 2006. un 2012. gadu minerālaugsnes nav statistiski drošas viennozīmīgas pieauguma vai samazinājuma tendences.

Ilgtermiņa izmaiņas 2006.–2025. gadā ($\Delta 25 = 2025 - 2006$) ir izteiktākas: tās svārstās no $-104,1$ līdz $+186,3$ t C ha⁻¹, vidēji $+18,3$ t C ha⁻¹ ar mediānu $+7,7$ t C ha⁻¹. Oglekļa krājums palielinās 23 parauglaukumos un samazinās 20, tātad arī ilgtermiņā izmaiņu zīme ir sadalīta samērā līdzsvaroti, taču ar nelielu pārsvaru par labu pieaugumam. Statistiski vidējais $\Delta 25$ ir pozitīvs, bet tikai robežlīmenī ($p \approx 0,07$), kas drīzāk liecina par tendenci uz kopēju oglekļa krājumu palielināšanos, nevis par ļoti izteiktu un viennozīmīgu signālu.

Relatīvās izmaiņas uzrāda līdzīgu ainu. 2006.–2012. gadā relatīvais oglekļa krājuma pieaugums ir vidēji $+10,4\%$ ar mediānu $-3,3\%$, bet diapazons $-53,4$ līdz $+93,8\%$. 2006.–2025. gadā vidējais relatīvais pieaugums sasniedz $+26,4\%$ (mediāna $+11,2\%$, diapazons $-66,7$ līdz $+180,1\%$). Tātad vairumā minerālaugsnes parauglaukumu oglekļa krājums ilgtermiņā palielinās, taču ir arī nozīmīga daļa gadījumu ar relatīvu samazinājumu.

Triju gadu oglekļa krājumi minerālaugsnēs ir savstarpēji cieši korelēti (korelācijas koeficienti starp 2006., 2012. un 2025. gada krājumiem ir augsti un pozitīvi), kas nozīmē, ka parauglaukumi ar augstu oglekļa uzkrājumu 2006. gadā saglabā relatīvi augstu līmeni arī 2012. un 2025. gadā. Tātad absolūtā līmeņa atšķirības starp parauglaukumiem ir stabilas laikā, pat ja krājumu dinamika (pieaugums vai samazinājums) ir heterogēna.

Analizējot saistību starp kopējo oglekļa krājumu katrā gadā (2006., 2012. un 2025.) un mežaudžu strukturālajiem parametriem 2025. gadā, redzams, ka lineārās korelācijas parasti ir vājas. Piemēram, 2006. gada oglekļa krājuma korelācijas koeficients ar krāju ir tikai $\sim 0,12$, ar stumbra biomasu $\sim 0,10$, ar pazemes biomasu $\sim 0,22$, bet ar oglekli koku biomasā $\sim 0,16$. 2012. un 2025. gada krājumiem šīs korelācijas pat kļūst nedaudz negatīvas (piemēram, 2025. gadā korelācija ar krāju $\approx -0,19$ un ar stumbra biomasu $\approx -0,21$). Tātad oglekļa krājumu līmeni minerālaugsnēs nav iespējams vienkārši prognozēt, balstoties tikai uz 2025. gada koku krāju vai biomasu.

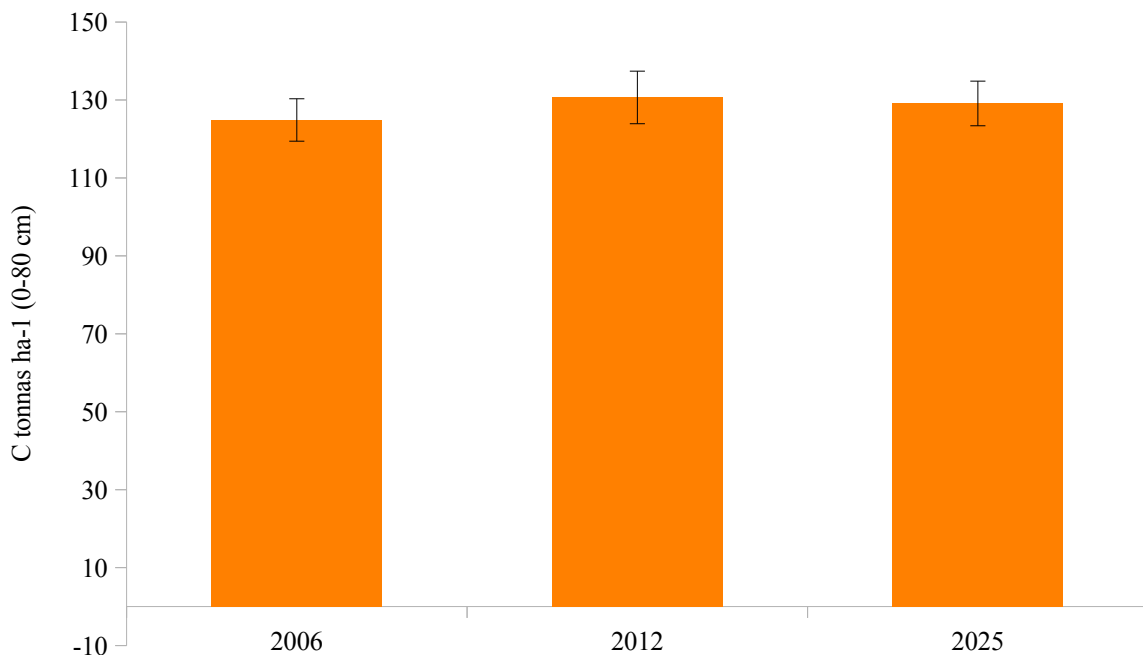
Ikgadējā oglekļa ienese (kopējā ikgadējā ienese, t. sk. koku un zemsedzes nobiras) ar krājumiem dažādos gados korelē ļoti vāji (korelācijas koeficienti parasti ir tuvu nullei). Tas nozīmē, ka vienā laika punktā novērtētā oglekļa ienese neatspoguļo ilgtermiņa krājumu dinamiku 19 gadu periodā, kuru ietekmē mežaudžu attīstības vēsture, vecuma struktūra un apsaimniekošanas pasākumi.

Absolūtās oglekļa krājuma izmaiņas 2006.–2025. gadā ($\Delta 25$) uzrāda vājas līdz mērenas negatīvas korelācijas ar stumbra biomasu, krāju, pazemes biomasu un oglekli koku biomasā ($r \approx -0,24 \dots -0,27$). Tas liecina, ka audzēs ar ļoti lielu koku biomasu 2025. gadā ilgtermiņa pieaugums kopējā oglekļa krājumā bieži ir mazāks vai pat negatīvs, salīdzinot ar audzēm ar vidēju vai zemāku biomasu. Šo tendenci var interpretēt kā norādi, ka dinamiskākās oglekļa uzkrājuma izmaiņas notikušas audzēs, kas atrodas

intensīvas pieauguma fāzē, savukārt augstas krājas un biomasas audzēs krājumu pieaugums palēninās vai ir kompensēts ar cirti un citiem zudumiem.

Relatīvajām izmaiņām (*rel25*) saistība ar biomasas rādītājiem ir nedaudz izteiktāka, bet joprojām vāja līdz mērena: korelācijas koeficienti ar krāju, stumbra un pazemes biomasu un oglekli koku biomasā ir ap $-0,29 \dots -0,32$. Tas nozīmē, ka procentuāli lielākais oglekļa krājumu pieaugums bijis tipiskāk audzēs ar mazāku pašreizējo krāju un biomasu, taču šādas attiecības nav pietiekami spēcīgas, lai tās uzskatītu par determinējošām.

Interesanta tendence ir relatīvo izmaiņu pozitīva korelācija ar oglekļa ienesi ar zemsedzes augu nobirām ($r \approx 0,38$) un, absolūtajām izmaiņām, ar to pašu parametru ($r \approx 0,34$). Tas norāda, ka parauglaukumos, kur zemsedzes veģetācija rada lielāku oglekļa ienesi, ilgtermiņā biežāk novērojams arī lielāks kopējā oglekļa krājuma pieaugums. Šo sakarību gan jāinterpretē piesardzīgi, ņemot vērā salīdzinoši nelielo paraugu skaitu un vairākus potenciālus vienlaicīgus ietekmējošos faktorus. Vidējais oglekļa uzkrājums minerālaugsnēs parādīts Att. 3.

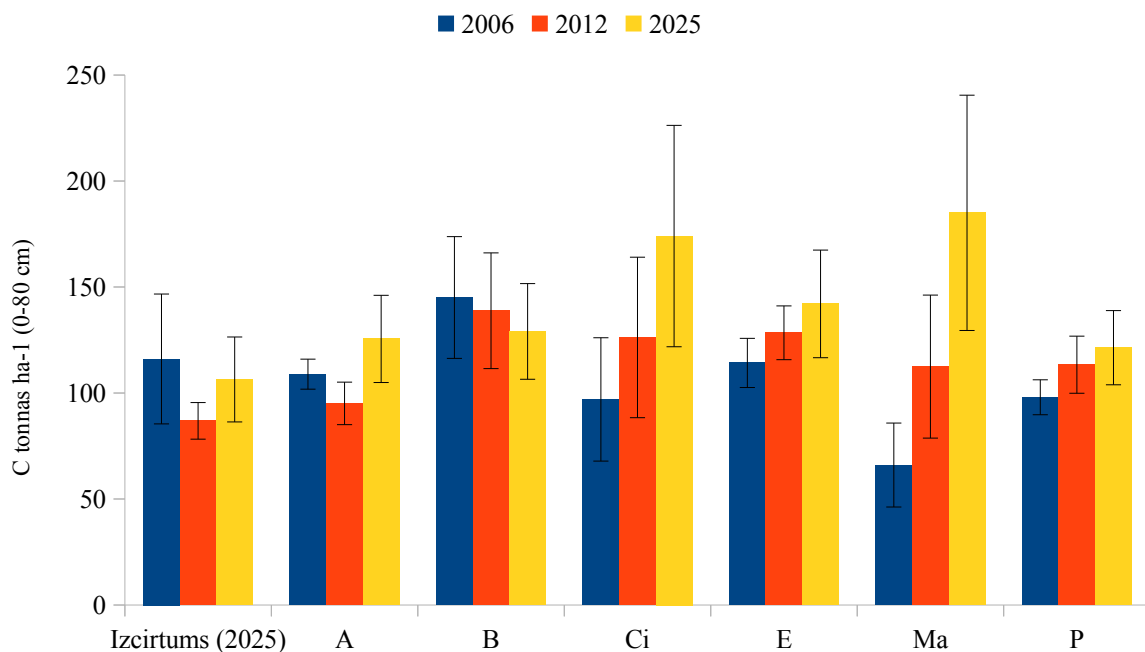


Att. 3. Vidējais oglekļa uzkrājums minerālaugsnēs.

Bonitātes rādītājs minerālaugsnēs neuzrāda izteiktu lineāru saistību ar oglekļa krājumiem nevienā no gadiem (korelācijas koeficienti ir tuvu nullei). Saistība ar relatīvajām ilgtermiņa izmaiņām (*rel25*) ir vāja pozitīva ($r \approx 0,09$), kas nav uzskatāms par statistiski nozīmīgu signālu. Tātad šajā datu kopā augsnes auglības klase pati par sevi neizskaidro oglekļa krājumu dinamiku minerālaugsnēs.

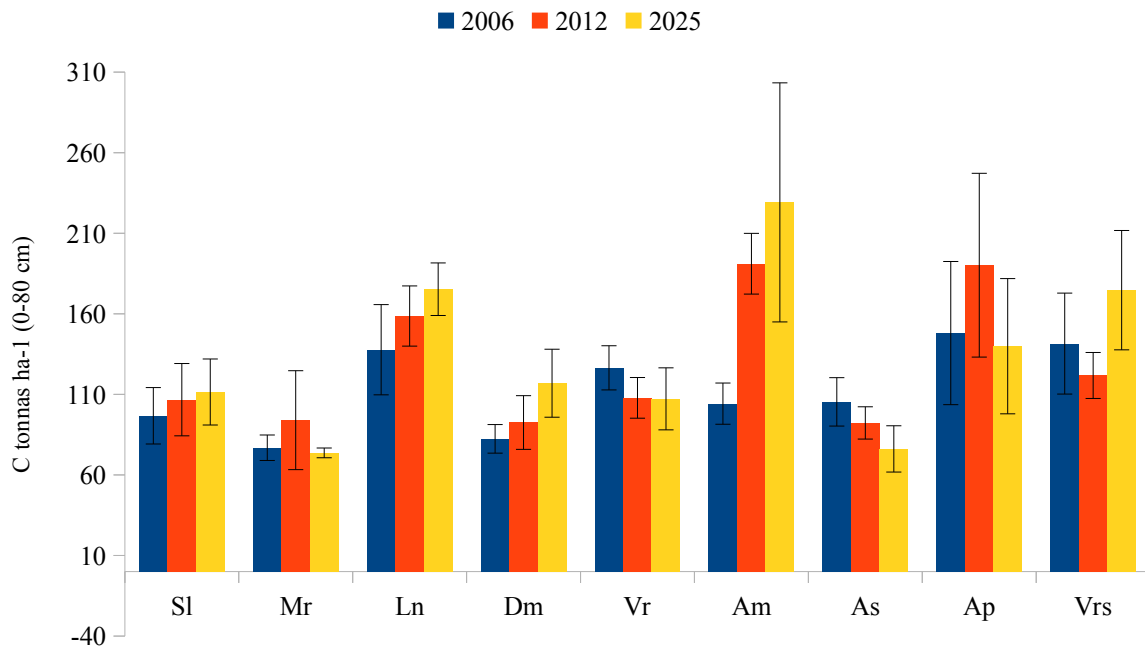
Dominējošās sugas līmenī atšķirības ir izteiktākas (Att. 4), taču parauglaukumu skaits atsevišķām sugām ir neliels. Parauglaukumos ar dominējošo sugu A vidējais *delta25* ir

~16,6 t C ha⁻¹ (relatīvi ~16,1%), ar sugu E – ~27,8 t C ha⁻¹ (relatīvi ~31,2%), bet ar sugu P vidējais *delta25* ir ~23,4 t C ha⁻¹, bet mediāna tuva nullei, kas norāda uz ļoti heterogēnu dinamiku šajā sugā. Suga B vidēji uzrāda nelielu negatīvu absolūto izmaiņu (-16,0 t C ha⁻¹), bet relatīvās izmaiņas ir tuvu 0. Sugām Ci un Ma ir tikai pa vienam parauglaukumam, tomēr abos gadījumos novērots ļoti liels oglekļa krājumu pieaugums (attiecīgi ~77 un ~119 t C ha⁻¹; relatīvi ~80 un ~180%). Šos rezultātus drīzāk var izmantot hipotēžu formulēšanai nekā stingriem vispārinājumiem.



Att. 4. Vidējais oglekļa uzkrājums minerālaugsnē atkarībā no valdošās sugas.

Meža tipu griezumā ir vērojams, ka dažiem tiptiem raksturīgs izteiktāks oglekļa krājumu pieaugums (Att. 5). Piemēram, tipam Dm vidējais *delta25* ir ~34,5 t C ha⁻¹ (relatīvais pieaugums ~40%), tipam Ln – ~37,6 t C ha⁻¹ (relatīvi ~55%), bet tipam Am vidējais *delta25* sasniedz pat ~124,9 t C ha⁻¹ (relatīvi ~114%), lai gan šeit n = 2. Savukārt tiptiem As, Vr, Db novērots vidējs oglekļa uzkrājuma samazinājums. Lielākajai daļai tipu parauglaukumu skaits nepārsniedz 2-5, tādēļ secinājumi par tiptiem ir interpretējami piesardzīgi un izmantojami galvenokārt kā indikācija par iespējamiem atšķirīgiem oglekļa dinamikas režīmiem minerālaugsnēs.



Att. 5. Vidējais oglekļa uzkrājums minerālaugsnē meža tipu griezumā.

Secinājumi:

1. Minerālaugsnēs kopējais oglekļa krājums 2006.–2025. gadā vidēji palielinās par ~18 t C ha⁻¹ (aptuveni par ceturto daļu no sākotnējā līmeņa), taču izmaiņu zīme un lielums ir heterogēni: gandrīz vienāds parauglaukumu skaits piedzīvo pieaugumu un samazinājumu. Statistiski šī tendence ir robežlīmenī un nav tik izteikta kā kopējā datu kopā.
2. Īsajā periodā 2006.–2012. gadā oglekļa krājumu vidējās izmaiņas minerālaugsnēs ir nelielas un statistiski nenoīmīgas, kas norāda, ka īstermiņa svārstības šajā intervālā nav dominējušas virs fona variācijās.
3. Oglekļa krājumu līmeni minerālaugsnēs nevar vienkārši izskaidrot ar 2025. gada krāju, koku biomasu vai kopējo ikgadējo oglekļa ienesi. Korelācijas ar šiem parametriem ir vājas vai pat negatīvas, kas liecina par nozīmīgu citu faktoru (vecuma struktūra, apsaimniekošanas vēsture, augsnes īpašības) ietekmi.
4. Relatīvi lielāks oglekļa krājumu pieaugums biežāk novērojams audzēs ar mazāku 2025. gada krāju un biomasu un audzēs, kur zemsedzes veģetācija nodrošina lielāku oglekļa ienesi. Šī saistība gan ir tikai vāja līdz mērena, tomēr norāda, ka zemsedzes oglekļa plūsmas minerālaugsnēs var būt nozīmīgs komponents ilgtermiņa krājumu izmaiņās.
5. Atšķirības starp sugām un mežaudžu tipiem minerālaugsnēs ir vērojamas, taču tās balstās uz salīdzinoši mazu parauglaukumu skaitu katrā grupā. Šie rezultāti ir izmantojami kā pamats turpmākai mērķtiecīgai izpētei, bet ne kā stingrs pamatojums tipveida oglekļa dinamiku vispārināšanai minerālaugsnēs.

Izzinātības apskats par organisko augšņu apsaimniekošanas ietekmi uz SEG emisijām renaturalizētās un apmežotās platībās

Ievads

Kūdrāju meliorēšana 20. gadsimtā radījusi disproporcionāli lielas siltumnīcefekta gāzu (SEG) emisijas attiecībā pret platību (Laudon u.c., 2025). Kūdras augsnes veido tikai aptuveni 3% no pasaules sauszemes, taču to saimnieciskā izmantošana izraisa intensīvu organiskā oglekļa mineralizāciju un CO₂ emisijas (Laudon u.c., 2025). Piemēram, Zviedrijā meliprētu organisko augšņu radītās SEG emisijas ir gandrīz pielīdzināmas visiem vieglo automobiļu izmešiem valstī (Laudon u.c., 2025). Klimata politikas kontekstā Eiropas Savienība (ES) ir izvirzījusi mērķi, lai zemes izmantošanas, zemes izmantošanas maiņas un mežsaimniecības (ZIZIMM) sektors jau no 2030. gada būtu klimatneitrāls, un līdz 2050. gadam zemes sektoram jāklūst par neto CO₂ piesaistītāju, kompensējot citu nozaru emisijas (Regula (ES) 2023/839). Šajos apstākļos īpaša uzmanība pievērsta organiskajām augsnēm (kūdrājiem), kas ZIZIMM sektorā rada nesamērīgi lielu SEG emisiju daļu.

Vēsturiski kūdrāji meliorēti kūdras ieguvei, lauksaimniecībai un mežsaimniecībai, pazeminot gruntsūdens līmeni un paātrinot kūdras mineralizāciju. Mazinot klimata pārmaiņas, arvien biežāk kā risinājums tiek minēta kūdrāju pārpurvošana (pārslapināšana) jeb ūdens režīma atjaunošana. Tiek sagaidīts, ka paaugstinot gruntsūdens līmeni, samazināsies CO₂ emisijas kūdras sadalīšanās rezultātā, un ilgtermiņā atjaunotie kūdrāji atkal kļūs par oglekļa piesaistītājiem. Renaturalizācija jau ir iekļauta ES klimata politikā – gan ZIZIMM regulējumā, gan nesen pieņemtajā Dabas atjaunošanas likumā, kas nosaka saistītus mērķus degradētu kūdrāju atjaunošanai. Tomēr zinātniskās diskusijas norāda, ka pārpurvošanas efektivitāti ietekmē virkne neskaidrību: optimālo teritoriju izvēle, laiks līdz neto klimata ieguvumam, kā arī blakus procesi (piemēram, metāna emisiju pieaugums) (Laudon u.c., 2025).

Alternatīva pieeja ir meža atjaunošana uz meliorētiem kūdras augsnēm, t.i., šo platību apmežošana vai mežainās veģetācijas veicināšana. Dažas ES dalībvalstis ir ierosinājušas aktīvu kūdrāju apmežošana kā atjaunošanas un “oglekļa lauksaimniecības” pasākumu ES Dabas atjaunošanas likuma ietvaros (Butlers u.c., 2025). Šāda pieeja sola oglekļa uzkrāšanu augošā koksnes biomasā un daļēji arī augsnē, vienlaikus dodot koksnes produktus ar ilgstošu oglekļa piesaisti. Piemēram, Eiropas Meža institūta pētījumā secināts, ka lauksaimniecībā vai neizmantotās zemēs īstenota apmežošana var ilgtermiņā sniegt nozīmīgu ieguldījumu klimata pārmaiņu mazināšanā un nepārprotami

ir uzskatāma par oglekļa piesaistes pasākumu (Chiti u.c., 2024). Tāpat jaunākie pētījumi ziemeļu reģionos rāda, ka daudzos gadījumos meliorētu kūdrāju apmežošana spēj pārsteidzoši ātri pārvērst sistēmu par oglekļa dioksīda piesaistītāju – fiksējot vairāk CO₂ nekā emisijā no augsnes (Bjarnadottir u.c., 2021). Tomēr zinātnieku vidū turpinās diskusijas par šīs pieejas ilgtspējību: pastāv neskaidrības, vai meža piesaistītais ogleklis ilgtermiņā spēs kompensēt turpināto kūdras sadalīšanos augsnē (Jurasinski u.c., 2024). Šajā pētījumā pieņemts, ka, turpinot kūdrāju uzturēt meliorētu, pat ar meža klātbūtni ilgtermiņā var saglabāties neto oglekļa zudums, jo kūdras slāņa oglekļa krājums (22-66 kg C m⁻²) var pārsniegt koku biomasā uzkrāto oglekli (3-6 kg C m⁻²). Šajā pētījumā gan ir ignorēts koksnes produktu un biokurināmā radītais aizstāšanas efekts, kā arī izdarīti pieņēmumi par oglekļa uzkrājumu mežā, kas atbilst viszemākās bonitātes audzēm. Vienlaikus rakstā ir ignorētas CH₄ emisijas, kas vairākkārtīgi pieaugs pārpurvošanas rezultātā un var pārsniegt sagaidāmo CO₂ emisiju samazinājumu, it īpaši tāpēc, ka CH₄ emisijas nav terminētas laikā (Lee u.c., 2017), bez tam rakstā pieņemts, ka pārpurvošana vienmēr ir sekmīga, lai gan Latvijā un citos reģionos veikti pētījumi apliecina to, ka ūdens trūkums, izmainīts klimats, netieša antropogēnā ietekme un citi faktori var padarīt pārslāpīnātās platības par CO₂ emisiju avotu (Bārdule, Meļņiks, u.c., 2025; Escobar u.c., 2022; Friedrich u.c., 2024).

Šī pārskata mērķis ir izvērtēt divu galveno klimata mazināšanas pasākumu – kūdrāju pārpurvošanas un meža atjaunošanas (apmežošanas) – ietekmi uz oglekļa apriti degradētos kūdrājos. Tajā apkopoti jaunākie zinātniskie rezultāti par zemes lietojuma maiņu un oglekļa krājumu izmaiņām, augsnes SEG emisiju dinamiku, koksnes biomasas un no tās iegūto produktu oglekļa piesaisti. Tāpat aplūkosim šo pasākumu potenciālās problēmas un ierobežojumus un novērtēsim, kādas ir nākotnes pētījumu vajadzības. Pārskatā balstījāmies uz jaunākajiem publiski pieejamiem avotiem un, lai sniegtu kompleksu zinātnisku izvērtējumu par meža atjaunošanas un kūdrāju pārpurvošanas lomu klimata pārmaiņu mazināšanā Latvijā un līdzīgos apstākļos. Pētījuma rezultāti apkopoti manuskriptā “Afforestation and Rewetting as Climate Change Mitigation Measures in Degraded Current and Former Peatlands”, kas iesniegts publicēšanai žurnālā *Ambio*, un šobrīd atrodas izvērtēšanas stadijā.

Metodoloģija

Pētījuma ietvaros veikta literatūras analīze, aptverot jaunākos pētījumus par siltumnīcefekta gāzu (SEG) emisijām un oglekļa (C) piesaisti organiskajās augsnēs. Uzmanība pievērsta nosusinātu kūdrāju ilgtspējīgas apsaimniekošanas stratēģijām – meža atjaunošanai (apmežošanai) un pārpurvošanai – kā klimata pārmaiņu mazināšanas pasākumiem. Analīzē iekļauti emisijas faktori no IPCC vadlīnijām un valstu SEG inventarizācijām, kā arī lauka pētījumu dati, lai salīdzinātu CO₂, CH₄ un N₂O emisiju atšķirības starp dažādiem zemes lietošanas veidiem: lauksaimniecībā izmantotām kūdrājiem, kūdras ieguves laukiem, apmežotiem meliorētiem kūdrājiem un

appludinātām platībām. Tāpat apkopoti pētījumi par augsnes C krājumu izmaiņām pēc meliorēšanas un pēc pārpurvošanas, kā arī oglekļa piesaisti dzīvajā biomasā (piemēram, mežaudžu koksnē) un koksnes produktos (HWP). Izskatīti arī Eiropas Savienības (ES) politikas mērķi – piemēram, ES ZIZIMM regulējums, kas paredz klimata neitralitāti zemes izmantošanas sektorā no 2030. gada, lai novērtētu pētījumā vērtēto kūdrāju apsaimniekošanas pasākumu atbilstību klimata mērķiem.

Rezultāti

Zemes izmantošana

Nav viena “universāla” risinājuma kūdrāju apsaimniekošanā – katrai teritorijai piemērotākie klimata pārmaiņu mazināšanas pasākumi ir atkarīgi no lokālajiem apstākļiem un zemes lietošanas vēstures. Bieži pausts nepareizs uzskats par to, ka meža atjaunošana (apmežošana) tiek veikta sākotnēji neskartos augstajos purvos, tādējādi kaitējot klimata mērķiem un iznīcinot dabiskos biotopus. Patiesībā mērķa teritorijas apmežošanai pārklājas ar jau meliorētiem vai iepriekš, mainoties lokālajiem apstākļiem, dabiski apmežotām kūdras augsnēm, galvenokārt bijušajām lauksaimniecības zemēm vai pamestiem kūdras ieguves laukiem, kas nereti jau dabiski apmežojusies. Proti, apmežošana netiek veikta neskartos purvos, bet gan tur, kur purvs sen zaudējis dabisko hidroloģiju cilvēka darbības rezultātā vai, mainoties klimatam. Līdz ar to meža stādīšana šādās teritorijās nesamazina esošās dabisko purvu platības – tā notiek dabiski vai mākslīgi transformētās platībās, kurās emisijas tāpat ir augstas un dabiskā purva ekosistēma vairs nepastāv un, būtiski nemainoties klimatiskajiem apstākļiem un hidroloģiskajam režīmam, nevar atjaunoties.

Savukārt kūdrāju pārpurvošanai (appludināšanai), lai tā būtu veiksmīga, nepieciešami specifiski apstākļi. Nepieciešama atbilstoša augsnes kvalitāte, pirmkārt, iespēja uzturēt stabilu, paaugstinātu ūdens līmeni ilgtermiņā, tajā skaitā vasarā. Ja meliorācijas sistēmas slēgšana vai dambju izveide nespēj noturēt gruntsūdeni augstu visu gadu, purva atjaunošanās būs apgrūtināta vai neiespējama. Piemēram, pētījumi rāda, ka, lai sekmīgi atjaunotu purva biotopu un C akumulāciju, gruntsūdens līmenim visu laiku jāatrodas augstāk par 30 cm no zemes virsmas. Turklāt jāievieš purviem raksturīgā biota – sūnas un hidrofilie augi, kas nodrošina kūdras akumulācijas atsākšanos. Ja šie nosacījumi nav izpildīti, pastāv risks, ka pārpurvošana nedos cerēto rezultātu vai purvs neatsāks pilnvērtīgi veidot jaunu kūdru, tajā pat laikā radot palielinātu CH₄ emisiju daudzumu. Jāņem vērā, ka meliorēšanas sekas (piemēram, augsnes sablīvēšanās, barības elementu uzkrāšanās) var traucēt dabiskā purva funkcionēšanai pat pēc appludināšanas. Tas saskan ar atziņu, ka, atjaunot purva ekosistēmu tās sākotnējā stāvoklī, var būt ļoti sarežģīti – pārpurvots kūdrājs nav identisks neskartam purvam pat vairākas desmitgades pēc appludināšanas. Piemēram, daudzviet Eiropā novērots, ka arī gadu desmitus pēc

pārpurvošanas kūdrājā paliek strukturālas un funkcionālas atšķirības salīdzinājumā ar iespējamo sākotnēji dabisko stāvokli. Šie faktori jāņem vērā, lemjot par konkrētās teritorijas atjaunošanas stratēģiju (Krūmiņš u.c., 2014).

Augsnes oglekļa (C) krājumu izmaiņas

Meliorētās kūdras augsnē notiekošais augsnes oglekļa krājumu samazinājums vedina uz pieņēmumu, ka apmežošana, kas parasti ietver meliorācijas uzturēšanu, var būt saistīta ar oglekļa zudumiem no augsnes. Piemēram, Jurasinski u.c. (2024) argumentēja, ka meža stādīšana meliorētos kūdrājos nav ilgtspējīga, jo neaptur kūdras sadalīšanos un nenodrošina ekosistēmas atjaunošanu. Šīs bažas galvenokārt balstās faktā, ka meliorācija paātrina kūdras organiskās vielas mineralizāciju, novērojot lielas CO₂ emisijas lauksaimniecībā izmantotos kūdrājos. Tomēr jāuzsver, ka apmežošanas projektus parasti īsteno jau meliorētās un degradētās augsnēs nevis neskartos purvos. Citiem vārdiem sakot, meža ieaudzēšana neizraisa jaunu kūdrāju nosusināšanu, bet notiek tur, kur kūdra jau sen zaudējusi ievērojamu C daļu oksidācijas ceļā. Tādēļ bažas par mežaudžu negatīvo ietekmi uz augsnes C krājumiem ne vienmēr apstiprinās praksē.

Empīriskie pētījumi rāda, ka kūdras augsnes mežā ne vienmēr turpina zaudēt oglekli. Piemēram, ilgtermiņa novērojumi boreālajā zonā liecina, ka nosusināts mežains purvs var saglabāties neto oglekļa piesaistītājs, pateicoties koku pieaugumam, pat ja augsnes ogleklis lēni sadalās. Minkkinen u.c. (2018) pētījumā Somijā atklāja, ka meliorēta kūdras augsne mežā vairākus gadus kalpoja par CO₂ neto piesaistītāju, jo koku biomasā akumulētais C pārsniedza augsnes emisijas. Līdzīgi rezultāti iegūti arī Baltijas valstīs veiktā pētījumā, salīdzinot augsnes oglekļa apriti meliorētās un dabiski mitrās kūdras augsnēs mežā (Butlers u.c., 2025). Ilgtermiņā kūdras krājums šādā augsnē samazinās lēnāk nekā lauksaimniecības izmantojamā zemē. Svarīgi, ka apmežošana nepaātrina kūdras mineralizāciju, salīdzinot ar situāciju, ja teritorija paliktu neapmežota, bet meliorēta (piemēram, atstāta kā zālājs). Gluži pretēji, koki daļēji stabilizē oglekļa bilanci, jo koksnes pieaugums un meža nobiras kompensē daļu augsnes zudumu. Vērtējot ilgākā laika posmā, var konstatēt, ka pārmitru vietu meliorācija mežsaimniecībai var dot klimata ziņā neitrālu vai pat pozitīvu efektu, jo meža biomasas, tajā skaitā tās nedzīvās frakcijas, akumulācija atsver augsnes C zudumus. Piemēram, pētījumos Ziemeļvalstīs un Baltijas valstīs atklāts, ka pārmitru kūdrāju meliorācija mežu audzēšanai rezultējusies ilgtermiņā lielākā oglekļa uzkrāšanā koksnē nekā zaudējumos no augsnes (Dubra u.c., 2023). Protams, tas atkarīgs no augšanas apstākļiem – auglīgās kūdrās ar lielāku kokaudzes pieaugumu koku biomasā var būt nozīmīgs oglekļa piesaistes avots, kamēr nabadzīgos augstajos purvos ieguvums ir mazāks, tomēr augstajos purvos ir arī mazāki oglekļa zudumi no augsnes (Krüger u.c., 2016; Lazdiņš u.c., 2024).

Tikmēr pārpurvošanas gadījumā augsnes C krājumu saglabāšana notiek, ja izdodas apturēt turpmāku kūdras sadalīšanos. Sekmīgi appludinot kūdrāju, skābekļa piekļuve

augšnei būtiski samazinās, kas palēnina organiskās vielas oksidāciju. Rezultātā CO₂ emisijas no augsnes ievērojami samazinās, un teorētiski kūdra pārstāj sadalīties. Turklāt, ja purva veģetācija (sfagni, purva augi) atjaunojas, augsne var atsākt akumulēt jaunu C, lēni palielinot kopējo oglekļa uzkrājumu. Tomēr praksē novērots, ka pēc degradētas teritorijas appludināšanas, augsne var turpināt zaudēt oglekli vai vismaz neveidot jaunus krājumus vairākus gadus vai pat gadu desmitus. Arī pēc ūdens līmeņa atjaunošanas kūdras mineralizācija pilnībā neapstājas uzreiz – daļa aerobās sadalīšanās var turpināties, līdz augsnes profils piesātinās ar ūdeni un bioloģiskie procesi pielāgojas jaunam režīmam. Jāņem vērā arī tas, ka gruntsūdens līmenis nav statisks un pēc appludināšanas arī dziļākie kūdras slāņi var nonākt saskarē ar gaisu, it īpaši vasarā, kad CO₂ emisijas no augsnes ir vislielākās. Piemēram, ilgtermiņa pētījumā Vācijā secināts, ka pārpurvotā kūdrājā vairāk nekā desmit gadus pēc appludināšanas joprojām bija vērojamas neto CO₂ emisijas, lai arī tās samazinās. Tikai pakāpeniski ekosistēma pārgāja uz nelielu CO₂ piesaisti, un pat tad oglekļa balance svārstījās atkarībā no laika apstākļiem un citiem faktoriem (Günther u.c., 2017; Tiemeyer u.c., 2020). Tas norāda, ka interpretēt pārpurvošanu kā tūlītēju oglekļa piesaistes garantu ir spekulatīvi – realitātē oglekļa krājumu balance stabilizējas pakāpeniski un var ievērojami atšķirties dažādās vietās. Dažos gadījumos pārpurvošana var pat nesamazināt neto emisijas pirmajās desmitgadēs, ja vienlaikus būtiski pieaug CH₄ emisijas (Launiainen u.c., 2025).

SEG emisijas no augsnes (CO₂, CH₄ un N₂O)

Meliorētu un appludinātu kūdrāju salīdzinājumos bieži uzmanība koncentrēta uz CO₂ emisijām un augsnes oglekļa bilanci, taču nedrīkst ignorēt citas siltumnīcefekta gāzes. Īpaši būtiskas ir metāna (CH₄) un dislāpekļa oksīda (N₂O) emisijas, kuras atšķiras pretējos virzienos meliorēšanas un pārpurvošanas gadījumā. Meliorētās kūdrās gandrīz visa augsnē veidojošās gāzveida oglekļa emisija ir CO₂ formā (oksidējoties kūdrai aerobos apstākļos), savukārt CH₄ emisijas tur ir niecīgas, jo metanogēnie procesi tiek apspiesti aerētā vidē, bet dziļākajos kūdras slāņos radušos CH₄ patērē augsnes mikroorganismi. N₂O emisijas meliorētās organiskās augsnēs parasti pieaug, jo periodiski pārmitros apstākļos notiek denitrifikācija, bet arī nitrifikācija ir iespējama – īpaši lauksaimniecības augsnēs ar augstu N saturu tas izraisa ievērojamu N₂O izdalīšanos atmosfērā. Tādējādi, piemēram, meliorēta kūdrāja kultivēšana var radīt ne vien CO₂ plūsmas, bet arī būt N₂O emisiju “karstais punkts”, kas palielina tās kopējo ietekmi uz klimatu (Fabre u.c., 1996; Higgins u.c., 2012; Maljanen u.c., 2010). Tomēr arī pārpurvotas platības var kļūt par būtisku N₂O emisiju avotu, it īpaši mainoties gruntsūdens līmenim un pavasaros, kad atkūst augsne un N₂O emisijas sasniedz īslaicīgu maksimumu. Šīs emisijas nereti tiek ignorētas pētījumos, kuros dati iegūti tikai vasarā vai mērījumu blīvums ir pārāk mazs, lai uztvertu īslaicīgu emisiju pieaugumu (Berglund & Berglund, 2011; Drösler u.c., 2008; Zhu u.c., 2021).

Sekmīgi appludinātos kūdrājos CO₂ emisijas strauji krītas (kūdra vairs nesadalās aerobos apstākļos), taču pieaug CH₄ emisijas, jo anaerobos apstākļos metanogēnās baktērijas ražo metānu. Metāns ir spēcīga siltumnīcefekta gāze – 100 gadu laika horizontā tā potenciāls ~28 reizes pārsniedz CO₂ (GTP₁₀₀ ≈ 28), bet 12 gados, kas ir vidējais CH₄ molekulas dzīves ilgums atmosfērā, GTP ir aptuveni 233 reizes lielāks nekā CO₂ efekts. Tādēļ pat salīdzinoši nelielas CH₄ emisijas spēj kompensēt CO₂ emisiju samazinājumu. Pētījumi rāda, ka tikko appludinātos kūdrājos CH₄ emisijas var pieaugt daudzkārtīgi. Piemēram, Vācijā appludinātos augstajos purvos konstatēts, ka atjaunotās purva platībās CH₄ “uzliesmojumi” (periodi paaugstinātas emisijas) būtiski pasliktina purva SEG bilanci. “Karstie punkti” – teritorijas ar īpaši lielu CH₄ plūsmu, piemēram, lokāli virs ūdens stāvoši ciņi vai augu grupas – var veidot lielu daļu kopējo purva CH₄ emisiju (Byrne u.c., 2009). Byrne u.c. (2009) atklāja, ka pārpurvošanas rezultātā kūdrājā izveidojušies jauni atklāta ūdens laukumi, kas izdala CH₄ daudz intensīvāk nekā apkārtējie sausākie apgabali, radot CH₄ emisiju “karstos punktus” ekosistēmas līmenī. Vanselow-Algan u.c. (2015) pētījumā par kūdrāju, kas pārpurvots pirms 30 gadiem, arī secināts, ka purvs joprojām izdala ievērojamu daudzumu CH₄, kas dominē tā SEG bilanci, padarot to par SEG avotu ikgadējā griezumā, neskatoties uz to, ka CO₂ plūsmas bija līdzsvarā, t.i. arī šajā pētījumā netika konstatētas neto CO₂ piesaistes, ne tikai būtisks CH₄ emisiju pieaugums.

Arī N₂O emisijas appludinātos kūdrājos var neizzust. Jaunākie pētījumi rāda, ka noteiktos apstākļos atkārtoti appludināti organiskie augšnes turpina radīt N₂O emisijas, kas var būt salīdzināmas ar mežainu nosusinātu kūdrāju emisijām, īpaši ja mitruma režīms purvā svārstās (periodiski aerējot augšējo slāni). Tomēr kopumā pārpurvošana samazina N₂O emisijas, jo, veidojoties anoksiem apstākļiem, nitrifikācija izsīkst. Līdz ar to galvenā uzmanība klimata bilances izmaiņās jāpievērš CO₂–CH₄ attiecībai.

Kopsavilkumā var secināt, ka, nosusinot kūdrāju, CO₂ un N₂O emisijas pieaug, bet CH₄ emisijas praktiski izzūd; savukārt appludinot kūdrāju, CO₂ un parasti arī N₂O emisijas samazinās, bet palielinās CH₄ emisijas. Klimata ziņā optimāls būtu stāvoklis, kur CO₂ emisiju samazinājums pārsniedz CH₄ radīto efektu. Pastāv pierādījumi, ka ilgtermiņā tā var būt – piemēram, daži aprēķini liecina, ka savlaicīga meliorēto kūdrāju pārpurvošana kopumā samazina klimata sasilšanas potenciālu, neraugoties uz metāna emisijām. Tomēr citi pētījumi ir skeptiskāki: Laine u.c. (2024) un Ojanen u.c. (2013) simulācijas parāda, ka pirmajā gadsimtā pēc meža kūdrāja pārpurvošanas neto radītais sasilšanas efekts, visticamāk, palielinās (salīdzinot ar to, ja mežs turpinātu augt) (Launiainen u.c., 2025). Tas galvenokārt saistīts ar zaudēto koku piesaisti un CH₄ emisiju pieaugumu. Piemēram, vienā scenārijā aprēķināts, ka 100 gadu griezumā kūdrāja pārpurvošana nesasniedz klimata atdzišanas efektu, ja vien netiek saglabāta daļa meža seguma (piemēram, izvēloties purva – meža mozaikas atjaunošanu). Tādēļ jaunākie pētījumi uzsver, ka pārpurvošanas klimata efektivitāte ļoti variē atkarībā no purva tipa, barības vielu bagātības un, būtiski, – no tā, vai pirms pārpurvošanas teritorijā atstāj biomasa (mežs) vai tā tiek pilnībā izvākta (Launiainen u.c., 2025).

C piesaiste dzīvajā biomasā un novāktos koksnes produktos

Novērtējot apmežošanas un pārpurvošanas ietekmi, jāņem vērā ne tikai augšnes emisijas, bet arī oglekļa piesaiste ekosistēmas biomasā un potenciāli koksnes produktos. Meža ekosistēmas mērenajā un boreālajā klimata joslā parasti nodrošina neto C piesaisti, jo katru gadu koku biomasā pieaug un uzkrāj oglekli koksni. Piemēram, degradētās kūdrāju augsnēs mežaudzes var akumulēt 2-5 t C ha⁻¹ gadā koksnes pieaugumā, neskaitot dabisko atmirumu, meža nobiras un zemsedzes veģetāciju, atkarībā no koku sugas un augšanas apstākļiem (auglīgākās minerālvielām bagātās kūdrās pieaugums būs lielāks). Šis piesaistītais ogleklis paliek mežā līdz koksnes atmiršanai vai novākšanai, un pēc tam var saglabāties koksnes produktos vai aizstāt oglekli, kas uzkrāts fosilajos materiālos enerģētikas sektorā. Turpretim purvu ekosistēmas oglekli uzkrāj daudz lēnāk – dabiskos purvos neto piesaiste kūdras slānī parasti ir tikai daži simti kg C ha⁻¹ gadā (Byrne u.c., 2009). Pārpurvošanas gadījumā, pat ja purvs atsāk funkcionēt, C piesaistes temps ir mazs, salīdzinot ar iespējamo meža pieaugumu. Tādēļ, zaudējot mežu pārpurvošanas rezultātā, tiek zaudēts arī potenciāls oglekļa piesaistes avots.

Ja kūdras augsnē augošie koki tiek nocirsti un izmantoti koksnes produktos, daļa tajos uzkrātā oglekļa turpina uzturēties ārpus atmosfēras vēl gadu desmitus vai gadsimtus (piemēram, būvniecības materiālos, mēbelēs). Līdz ar to mežsaimniecības scenārijā var rēķināt klāt arī HWP sektora oglekļa piesaisti. Piemēram, Launiainen u.c. (2025) modelēja vairākus scenārijus Somijas meliorēta meža purva atjaunošanai un secināja, ka gadījumos, kad meža biomasā saglabāta (piemēram, atstājot daļu koku vai atjaunojot kokiem apaugušu purvu – purvaini, nevis atklātu purvu), īstermiņa sasilšanas efekts ievērojami samazinās. Iemesls – saglabājot koku biomasu, neveidojas tūlītējs liels CO₂ emisiju pieaugums koksnes sadalīšanās rezultātā, un koksnes ogleklis vai nu paliek uz vietas vai nonāk izstrādājumos. Tas paver iespēju kombinēt oglekļa piesaisti biomasā ar purva hidroloģijas uzlabošanu, piemēram, pārveidojot nosusinātu mežu kūdrājospar mitru mežu (purvainu meža tipa ekosistēmu) vai mozaīku, tā vietā lai veidotu pilnībā atklātu purvu. Šādi risinājumi var radīt sinerģiju starp bioloģiskās daudzveidības mērķiem (uzlabots hidroloģiskais režīms) un klimata mērķiem (saglabāta oglekļa piesaiste kokos).

Apmežošanas scenārijos oglekļa piesaiste biomasā ir centrālais klimata labvēlīgais process. Pētījumi Latvijā un citur hemiboreālajā reģionā apliecina, ka bijušo kūdras ieguves lauku apmežošana būtiski samazina SEG emisijas, salīdzinot ar to atstāšanu novārtā, un nodrošina ilgstošu C uzkrāšanu kokmateriālā (Samariks u.c., 2023). Piemēram, pētījumā Samariks u.c. (2023) analizēja dažādas rekultivācijas stratēģijas pamestiem kūdras laukiem un secināja, ka apmežošana samazināja augšnes CO₂ un N₂O emisijas un vienlaikus iesaistīja oglekli koksni, salīdzinot ar kontroli (neatjaunotu lauku). Citiem vārdiem sakot, apmežošana ne tikai “izslēdz” kūdras emisiju avotu

(drenēta kūdra zem klajas debess turpina sadalīties), bet arī rada jaunu C piesaistes rezervuāru – augošu mežu. Šo ieguvumu gan daļēji var atsvērt tas, ka meža augsnes joprojām lēnām zaudē kūdras oglekli. Tomēr, kā minēts, meža radītā piesaiste bieži kompensē augsnes zudumus vismaz vairāku desmitgažu periodā, bet, ņemot vērā koksnes produktos uzkrāto oglekli un fosilā kurināmā aizstāšanas efektu, faktiski neierobežotu laiku.

Savukārt pārpurvošanas scenārijos dzīvajā biomasā oglekļa piesaiste parasti samazinās, tajā skaitā zemsedzes veģetācijā. Ja appludināšanas dēļ iet bojā pastāvošā koku audze (kas bieži notiek, jo koki neiztur sakņu ilgstošu applūšanu), tad ekosistēma zaudē koku uzkrājumu un pat pārvēršas par oglekļa avotu, jo atmirusī koksne sadalās un emitē CO₂. Ja purva atjaunošanas mērķis ir pilnībā atbrīvoties no koku veģetācijas, tad jārēķinās ar šo oglekļa “parādu”: vispirms notiek strauja CO₂ emisija no biomasas zuduma, un tikai pēc ilga laika purva augsne lēnām to kompensē ar jaunas kūdras piesaisti (Launiainen u.c., 2025). Pētījumos aprēķināts, ka barības vielām bagātu mežu kūdrājospārpurvošana var neatmaksāties klimata ieguvumu izteiksmē pat 200 gados, ja visa meža biomasā tiek zaudēta un neiekļaujas turpmākā oglekļa bilancē (Launiainen u.c., 2025). Ja tomēr pārpurvošanas scenārijā tiek saglabāta koku komponente (piemēram, tiek veidots purvājs ar retāku koku sastāvu vai vismaz atstāti daži koki), tad īstermiņa oglekļa zudums ir mazāks un klimata balance izdevīgāka. Šī pieeja – meža un purva integrēta atjaunošana – literatūrā tiek minēta kā potenciāli pārejas risinājums, kas nodrošina kompromisu starp bioloģisko daudzveidību un klimata mērķiem.

Problēmas un ierobežojumi

Gan meža atjaunošanas, gan kūdrāju pārpurvošanas pieejām ir savi ierobežojumi un riski, kas jāņem vērā, plānojot klimata pasākumus. Lieli organiskā oglekļa krājumi augsnē paši par sevi negarantē, ka attiecīgais klimata pasākums būs telpā un laikā efektīvs. Piemēram, fakts, ka meliorētos kūdrājos uzkrāts daudz C, nenozīmē, ka vienmēr pareizā stratēģija ir to appludināšana – jāņem vērā, cik ātri un pilnīgi var apturēt emisijas un vai nerodas citi emisiju avoti.

Kūdrāju pārpurvošana: galvenais izaicinājums ir nenoteiktība par reālo emisiju samazinājumu un ekosistēmas reakciju. Kā minēts, CH₄ emisiju pieaugums var būt būtisks – IPCC Vadlīnijas (2014) norāda ļoti plašu iespējamo CH₄ emisiju diapazonu pārpurvotos kūdrājos, atkarībā no apstākļiem. Šī neskaidrība atspoguļojas, piemēram, IPCC 2014. gada Mitrāju pielikumā, kur Tier 1 līmeņa emisijas faktori appludinātiem organisko augšņu veidiem dod lielas neprecizitātes robežas. Tas nozīmē – rezultāti pēc appludināšanas var būt ļoti atšķirīgi dažādās vietās, un pastāv risks, ka paredzētās emisiju samazināšanas nenotiks vai būs mazākas nekā cerēts. Kritiskos komentāros literatūrā norādīts, ka dažkārt pārpurvošanas ieguvumi tiek pārspīlēti spekulatīvos pieņēmumos, neņemot pietiekami vērā gāzu apmaiņas dinamikas sarežģītību. Piemēram, aprēķinot oglekļa kredītus kūdrāju pārpurvošanu, nereti ignorē projektu

ilgtermiņa uzturēšanas nepieciešamību – ja pēc 10-20 gadiem atjaunotais purvs nespēs uzturēt augstu ūdens līmeni (piemēram, klimata pārmaiņu izraisītu sausuma periodu dēļ), tad sākotnēji iegūtie labumi var tikt zaudēti. Ja pārpurvošanas projekts netiek pienācīgi uzturēts, ir risks, ka tas nepildīs solīto SEG emisiju samazinājumu, īpaši ilgtermiņā. Tas ir būtisks jautājums arī oglekļa kredītu tirgū – 2025. gada pētījumā atzīmēts, ka oglekļa kreditēšana par kūdrāju pārpurvošanu var pārvērtēt klimata ieguvumus, ja netiek garantēta ūdens līmeņa noturēšana un projekta ilglaicīgums.

Vēl viens pārpurvošanas ierobežojums ir bioloģiskās daudzveidības un zemes izmantošanas konflikts. Appludinot agrāk lauksaimniecībā vai mežsaimniecībā izmantotu zemi, tā nereti izstājas no saimnieciskās aprites, kas var radīt sociālekonomiskas sekas (piemēram, samazinās vietējā koksnes ieguve vai lauksaimniecības produkcija), kā arī veicināt atmežošanu, lai saglabātu ražošanas apjomu. Lai gan purvu atjaunošana veicina biotopu atgriešanos un var sniegt pozitīvus dabas aizsardzības ieguvumus, vietējie iedzīvotāji un zemes īpašnieki var būt piesardzīgi attieksmē pret šādiem projektiem. Politiskām un juridiskām barjerām arī ir būtiska loma – piemēram, ES Dabas atjaunošanas likumdošanā uzsvērta purvu atjaunošana, taču nav pilnīgas skaidrības, kā tas saderēs ar mežsaimniecības interesēm. Tāpat klimata pārmaiņu ietekme (piemēram, ilgstošs sausums) var apdraudēt atgrūdināto purvu noturību – periodiska izžūšana ne tikai atkal palielina CO₂ emisijas, bet var izraisīt kūdras ugunsgrēkus vai augsnes sablīvēšanos. Summējot, pārpurvošanas pasākuma efektivitāte nav garantēta; to var ierobežot tehniskie (ūdens līmeņa regulācija), ekoloģiskie (metāna emisijas, veģetācijas sastāvs) un sociālekonomiskie faktori.

Meža atjaunošana kūdrājos: šai pieejai lielākais ierobežojums ir tas, ka tā neatjauno purva ekosistēmu, līdz ar to bioloģiskās daudzveidības ziņā tā nav kompensācija par dabisko purvu zaudējumu, ja pieņem, ka purvs ir dabiska ekosistēma konkrētajā platībā pašreizējos apstākļos. Jurasinski u.c. (2024) norāda, ka apmežojot meliorētu kūdrāju, purvs kā ekosistēma netiek atjaunots – kūdras veidošanās neatjaunojas, hidroloģiskais režīms saglabājas mainīts un biotopi paliek pārsvarā sausi meži nevis mitrāji. Tādējādi no dabas daudzveidības viedokļa apmežošana netiek uzskatīta par purva “atveseļošanu”, bet drīzāk kā alternatīva zemes izmantošana. Līdz ar to apmežošana nepalīdz purva specifiskajām sugām un neuzlabo purva ekosistēmu funkcijas (piemēram, ūdens regulāciju, biotopu saglabāšanu mitrāju sugām). Šī iemesla dēļ dabaszinātnieki un vides NVO bieži kritizē apmežošanu kā klimata risinājumu kūdrāju kontekstā – uzsverot, ka tā nevar aizstāt purva dabas vērtības un var novirzīt uzmanību no nepieciešamības atjaunot mitrājus. Tajā pat laikā šajā rakstā ignorēts fakts, ka mežs platībās ar kūdras augsnēm veidojies arī bez cilvēka līdzdalības un ir tāda pati dabiska ekosistēma kā purvs.

No klimata skatpunkta apmežošanas ierobežojums ir tas, ka jebkurš mežs var tikt nocirsts, un tad tajā uzkrātais ogleklis agrāk vai vēlāk atgriežas atmosfērā. Lai gan

koksnes produktos daļa oglekļa saglabājas, citi izmantošanas veidi (piemēram, sadedzināšana) C uzkrājumu ātri mazina, ja neņem vērā nesadedzinātajā fosilajā kurināmajā uzkrāto oglekli. Tādēļ apmežošanu var uzskatīt par klimata pasākumu tikai tad, ja vienlaikus tiek īstenota ilgtspējīga meža apsaimniekošana – nodrošinot, ka mežs tiek atjaunots un efektīvi izmantots un ka ievērojama biomasas daļa nonāk ilglaicīgos produktos vai aizstāj fosilo kurināmo. Praksē tas var būt izaicinājums, it sevišķi privātajos mežos vai mainīgos tirgus apstākļos. Vēl jāņem vērā, ka mežsaimniecība kūdras augsnēs saistīta ar nepieciešamību uzturēt meliorācijas sistēmas, kas rada papildus izmaksas un ietekmi uz apkārtējām teritorijām (piemēram, pazeminot gruntsūdeni kaimiņu purvā). Šīs inženiertehniskās prasības ierobežo apmežošanas piemērotību – ne visur iespējams ekonomiski un no dabas aizsardzības skatpunkta pamatoti uzturēt meliorācijas sistēmu. Turklāt klimata pārmaiņu dēļ sagaidāms, ka vasaras kļūs sausākas un ugunsbīstamība mežos palielināsies; meliorētus kūdrāju mežaudzes var kļūt ļoti ugunsnedrošas, kā to redzam Sibīrijā un citur, kur deg kūdras meži. Pārpurvoti kūdrāji, tieši pretēji, var mazināt ugunsgrēku risku, lai arī pilnībā to neizslēdz. Tādējādi sabiedrības drošības un dabas aizsardzības kontekstos apmežošana var nebūt vēlama.

Kopumā abas pieejas – apmežošana un pārpurvošana – nav savstarpēji izslēdzošas, bet drīzāk ar atšķirīgiem mērķiem un kompromisiem. Apmežošana dod ātrāku klimata ieguvumu (oglekļa piesaiste koksnē) un saglabā ekonomisko vērtību (koksnes ieguvī), bet neatjauno purva ekosistēmu. Pārpurvošana var atjaunot purva ekosistēmu un apturēt kūdras sadalīšanos, bet klimata efekts var būt lēns vai pat negatīvs pirmajos gados metāna emisiju rezultātā, un zeme vairs nedod tradicionālu saimniecisku pienesumu. Bez tam pārpurvošanas sagaidāmais efekts saistīts ar daudz lielāku nenoteiktību nekā meža ekosistēmas atjaunošana. Tāpēc izaicinājums ir integrēt šīs pieejas gudri, piemēram, izvēloties pārpurvot tās platības, kur klimata un dabas ieguvumi ir ticami prognozējami (ļoti degradētas, ar mazu meža pieaugumu), un apmežot vai citādi izmantot tās, kur pārpurvošana ir tehniski vai sociāli neiespējama.

Nākotnes virzieni

Ņemot vērā aprakstītos aspektus, nākotnes pētījumu un rīcībpolitikas virzieni koncentrējas uz pierādījumu bāzes uzlabošanu un kombinētu stratēģiju attīstīšanu. Pirmkārt, nepieciešama precīzāka SEG emisiju monitorēšana pārpurvotos un apmežotos kūdrājos. Pašlaik daudz emisijas faktoru balstās uz īstermiņa un punktveida mērījumiem; nākotnē jāveido ilgtermiņa novērojumu tīkls (piemēram, ar *eddy covariance* stacijām), lai iegūtu pilnīgāku ainu par emisiju dinamiku sezonāli un gadu griezumā. Dr. Kalhori (2025) uzsvēra, ka IPCC izmantotie standarti bieži neņem vērā emisiju izmaiņas laika gaitā – piemēram, cik gadus pēc pārpurvošanas purvs vēl emitē CO₂, kā mainās CH₄ emisijas utt. Ilgtermiņa dati no pārpurvotiem kūdrājiem ļautu labāk

prognozēt, kad un vai tie kļūst par neto C piesaistītājiem. Šie dati arī palīdzētu uzlabot emisijas faktorus – pašlaik tie var pārvērtēt vai nenovērtēt reālo situāciju.

Otrkārt, nepieciešami pētījumi par jaunām inženiertehniskām pieejām, kas spēj apvienot meža un mitrāja priekšrocības. Viens virziens ir mitro mežu (paludikultūru) attīstība – tas nozīmē stādīt kokus vai citas koksnes kultūras kūdrā, neveicot pilnīgu meliorēšanu. Piemēram, izmantojot alkšņus vai citu mitrumizturīgu koku sugas, var iegūt koksni no mitriem kūdrājiem (purvaiņiem), vienlaikus saglabājot augstu gruntsūdeni. Šāda mežsaimniecības prakse, piemēram, Baltijas valstīs ir ikdienišķa un ar pietiekoši precīziem modelēšanas instrumentiem attiecībā uz kokaudzes stāvu. Tas dod iespēju kūdras augsnēm piesaistīt CO₂ koksnē, bet neizdalīt daudz CH₄, ja koku saknes patērē daļu organikas un augsne nav pilnībā anaeroba. Paludikultūru jomā patlaban notiek izmēģinājumi arī ar nekoksnes kultūrām, taču nepieciešams vairāk datu par SEG bilanci šādās sistēmās un to ekonomisko efektivitāti (De Jong u.c., 2021).

Treškārt, politikas plānošanā jāvirzās uz elastīgiem risinājumiem, kas ņem vērā gan klimatu, gan ekosistēmas. Var sagaidīt, ka nākotnē tiks veidotas kombinētas atjaunošanas shēmas, kur, piemēram, plašākos meliorētos purvu masīvos daļu platību pārpurvo (atjaunojot purvu serdi), bet daļu apmežo vai izmanto bioenerģijas kultūrām kūdrāja malās. Šāda mozaīka var nodrošināt, ka kopējais emisiju samazinājums tiek panākts bez pilnīgas atteikšanās no zemes izmantošanas. Arī oglekļa kredītu mehānismi jāpielāgo, lai atbalstītu šādus kombinētus risinājumus – piemēram, kredītus varētu piešķirt par neto emisiju samazinājumu reģionālā mērogā, nevis izolēti vienam pasākumam. Tas stimulētu integrētu plānošanu.

Visbeidzot, vēl viens virziens ir jaunu tehnoloģiju pielietošana, piemēram, attālās izpētes metodes kūdrāju hidroloģiskā stāvokļa un seguma monitoringam. Satelītu dati un dronu apsekojumi var palīdzēt identificēt teritorijas, kuras potenciāli var atgrūdināt, neradot lielus CH₄ riskus vai kuras nepieciešams prioritāri apmežot biodaudzveidības mērķu sasniegšanai. Modelēšanas rīki arī tiek attīstīti – piemēram, integrēti klimatariska modeļi, kas ņem vērā dažādu pasākumu ietekmi uz emisijām, bioloģisko daudzveidību un ekonomiku. Šādi rīki varētu sniegt zinātniski pamatotas rekomendācijas politikas veidotājiem, kur un kā labāk īstenot pasākumus (Ghezelayagh u.c., 2024; Günther u.c., 2018; Kitson & Bell, 2020; Maier u.c., 2022).

Secinājumi

Apkopojot, meža atjaunošana (AF) un kūdrāju pārpurvošana (RW) nav savstarpēji izslēdzoši pasākumi, bet gan savstarpēji papildinošas stratēģijas, kuras piemērojamas dažādos apstākļos. Katrai no tām ir savas stiprās puses un trūkumi klimata pārmaiņu mazināšanas kontekstā. Meža atjaunošana meliorētos kūdrājos nodrošina salīdzinoši ātru oglekļa piesaisti koku biomasā un var samazināt kopējās SEG emisijas, īpaši salīdzinot ar turpinātu lauksaimniecisku izmantošanu vai kūdras ieguvi. Tā saglabā

ekonomisku aktivitāti (koksnes produkciju) un nepieprasa radikālas izmaiņas zemes lietojumā, taču neatjauno purva ekosistēmu un prasa papildus ieguldījumus meliorācijas sistēmu uzturēšanā. Sekmīga kūdrāja pārpurvošana aptur kūdras noārdīšanos un potenciāli atjauno dabisko C akumulāciju augsnē, vienlaikus atjaunojot unikālos mitrāju biotopus – tas ir būtisks ieguvums bioloģiskajai daudzveidībai un ūdeņu regulācijai. Tomēr klimata ziņā pārpurvošana var nedot labumu: pirmajās desmitgadēs CH₄ emisijas bieži paaugstina purva radiatīvās ietekmes bilanci, un zaudētā koku piesaiste rada oglekļa zudumus, kas jākompensē ilgākā laikā (Launiainen u.c., 2025).

Pieejamie pierādījumi arvien vairāk norāda, ka vienkāršoti apgalvojumi (“appludināsim purvus un iegūsim tūlītēju klimata labumu” vai “apmežosim purvus un ignorēsim mitrāju vērtību”) ir maldinoši. Efektīvai rīcībai nepieciešama sabalansēta, uz zinātni balstīta pieeja, neignorējot faktus, kas nerunā par labu konkrētam pasākumam. Tas nozīmē: turpināt pētījumus un pilnveidot izpratni par šo pasākumu īstenošanas seku pilnu spektru, pielāgot stratēģijas konkrētiem vietām apstākļiem (piemēram, bagātās zemās kūdrās var dot priekšroku mitrām mežaudžu sistēmām, savukārt nabadzīgus augstos purvus labāk pilnībā atjaunot, ja vietējie apstākļi ir piemēroti purva atjaunošanai), un saskaņot klimata mērķus ar dabas un socioekonomiskajiem mērķiem.

Klimata pārmaiņu mazināšanas kontekstā organiskajās augsnēs der atcerēties, ka primārais uzdevums ir aizsargāt vēl neskartos purvus – tie ir milzīgi oglekļa rezervuāri un vienlaikus unikālas ekosistēmas, kurās šobrīd var dominēt gan oglekļa piesaistes, gan emisiju procesi. Jau meliorētiem un degradētām kūdrājiem jāpiemēro gudra atjaunošana: kur iespējams, jāatgriež ūdens (samazinot CO₂), bet, kur tas nav reāli vai kur mežs dod lielu oglekļa piesaisti, jāapsver apmežošana vai kombinēti risinājumi. Pierādījumi no pēdējiem gadiem (piemēram, Launiainen u.c. 2025, Minkkinen u.c. 2018) liecina, ka mežs platībā ar kūdras augsni var kalpot par neto oglekļa piesaistītāju vai vismaz klimata neitrālu risinājumu vismaz līdz gadsimta beigām. Vienlaikus purvu atjaunošana ir neaizstājama ekoloģiski un ilgtermiņā vienīgais veids, kā pilnībā pārtraukt kūdras sadalīšanos. Tāpēc risinājums ir rūpīgi izvērtēt katru gadījumu – līdzīgi kā ārsts izvēlas ārstēšanu atkarībā no pacienta stāvokļa, nevis visiem izraksta vienas zāles.

Nobeigumā, klimata politikas ietvaros ieteicams veicināt integrētus kūdrāju apsaimniekošanas pasākumus, kas balstīti uz jaunākajiem zinātnes atziņām un kuros apvieno gan emisiju samazināšanu, gan oglekļa piesaisti. Tas nozīmē investēt gan pārpurvošanā, gan inovatīvās apsaimniekošanas tehnoloģijās (piemēram, paludikultūrās), vienlaikus nodrošinot, ka jebkura īstenotā stratēģija tiek ilgtermiņā uzturēta un uzraudzīta. Tikai tā varēs garantēt, ka kūdrāju apsaimniekošana tiešām sniedz gaidīto ieguldījumu klimata pārmaiņu mazināšanā, nepārspīlējot vienas vai otras pieejas ieguvumus un nenovēršoties no zinātniskajiem faktiem.

Augšanas gaitas modeļa sistēmas vienādojumu pilnveidošana

AGM modelī veikti saturiski uzlabojumi (parametru maiņa un papildus aprēķinu kategorijas), kas nodrošina nodrošina būtiski augstāku precizitāti SEG inventarizācijā un prognozēšanā. Aprēķinos integrēti jaunākie, 2024. gada pētījumos iegūtie augšanas gaitas vienādojumu koeficienti un aktuālie MRM un VMD dati, kas precizē gan atjaunošanās, gan jaunaudžu kopšanas algoritmus. Modelis kļuvis dinamiskāks un ietver būtiskas mežsaimnieciskas nianšes: augsnes gatavošanas un stādmateriāla izcelsmes ietekmi uz atjaunošanos, iesaigāšanos pēc jaunaudžu un izlases cirtēm, kā arī sugu un vecuma specifiskus dabiskos traucējumus. Papildus tam, vienlaidus atjaunošanas cirtēs tagad tiek modelēta ekoloģisko koku saglabāšana un simulācijas gaitā tiek ņemts vērā koksnes pieaugums, tādējādi radot visaptverošu un ticamu pamatu meža resursu attīstības un oglekļa piesaistes modelēšanai. Tomēr nozīmīgākais ieguldījums SEG emisiju modelēšanas rīku pilnveidošanā bija augsnes oglekļa aprites vienādojumu integrēšana SEG emisiju aprēķinu vienādojumos meža zemēs.

Augsnes oglekļa apritei izmantots Yasso20 modelis, kas ļauj novērtēt augsnes organiskā oglekļa (SOC) gada krājumu izmaiņas minerālaugsnēs. Yasso20 ir dinamisks, procesos balstīts augsnes organiskā oglekļa modelis, kas simulē organiskās vielas noārdīšanos, SOC krājumus un to izmaiņas laikā. Modelis balstās uz četriem plaši atzītiem augu atlieku (litter) noārdīšanās pieņēmumiem: (i) augu atliekas sastāv no ķīmiski diferencējamām savienojumu grupām, kurām raksturīgi atšķirīgi noārdīšanās ātrumi; (ii) noārdīšanās gaitā ogleklis tiek pārveidots vai nu par CO₂, vai par citu savienojumu grupu oglekli; (iii) noārdīšanās ātrumus nosaka vides apstākļi, īpaši temperatūra un mitrums; un (iv) koksnes atlieku noārdīšanās ir atkarīga no atlieku izmēra (diametra). Šie principi ir pārņemti no iepriekšējām Yasso versijām un saglabāti Yasso20.

Yasso20 sadala ienākošās organiskās atliekas piecās krātuvēs, kas atbilst ķīmiski definētām frakcijām: A – skābē hidrolizējami savienojumi (celuloze), W – ūdenī šķīstoši savienojumi (cukuru frakcija), E – etanolā šķīstoši savienojumi (vaski), N – nešķīstoši, nehidrolizējami lignīnam līdzīgi savienojumi, un H – stabils humuss, kas veidojas minerālaugsnē. Oglekļa noārdīšanās katrā no šiem baseiniem rada oglekļa plūsmas uz citiem baseiniem vai uz atmosfēru CO₂ veidā, atbilstoši diferenciālvienādojumu sistēmai, kas parametizēta katrai krātuvei. H baseins reprezentē ilgmūžīgu augsnes organisko vielu, kas veidojas sadalījušos organisko atlieku un minerālvielu mijiedarbībā; līdz ar to H veidošanās iespējama tikai minerālaugsnes slāņos, un Yasso20 parametri šai krātuvei ir ierobežoti attiecināmi, izmantojot globālas SOC datu kopas.

Salīdzinājumā ar agrākām versijām Yasso20 modelī ir palielināta jutība pret klimata apstākļiem, piemērojot atsevišķas klimata atbildes funkcijas AWE, N un H krātuvēm. Noārdīšanās ātrumu nosaka mēneša vidējās temperatūras (12 vērtības gadā), kas raksturo gada temperatūras dinamiku, gada nokrišņu daudzums un koksnes atlieku diametrs, kas ietekmē noārdīšanos ar izmēram specifiskas korekcijas funkcijas starpniecību. Šāds detalizētāks vides raksturojums aizstāj Yasso07 izmantoto vienkāršoto gada temperatūras amplitūdu. Yasso20 kalibrēts Bajāna inferenču ietvarā, izmantojot uzlabotus Markova ķēžu Montekarlo algoritmus, lai novērtētu pilnus parametru *a posteriori* sadalījumus. Kalibrācija veikta vienlaicīgi, izmantojot vairākas savstarpēji neatkarīgas datu kopas ($n \approx 17\,500$), tostarp ilgtermiņa augu atlieku maisiņu eksperimentu datu kopas (CIDET, LIDET, ED), globālos augsnes organiskā oglekļa mērījumus (*Oak Ridge* datu kopa) un ilgtermiņa koksnes noārdīšanās datu kopas, nodrošinot, ka parametri atspoguļo plašu klimata apstākļu, atlieku kvalitātes un ekosistēmu tipu spektru.

Salīdzinājumā ar iepriekšējām Yasso versijām, Yasso20 izmanto uzlabotu kalibrēšanas protokolu (DEzs MCMC algoritms), fiksētus datu iekļaušanas kritērijus un reproducējamu darba plūsmu, kas ieviesta, izmantojot R pakešu komplektu *BayesianTools*. Kalibrācija, kurā vienlaicīgi izmantotas vairākas datu kopas, uzlaboja modeļa veikspēju globālā mērogā, salīdzinājumā ar kalibrāciju, balstoties uz atsevišķām datu kopām. Yasso20 ticami raksturo SOC dinamiku plašā klimatisko apstākļu un ekosistēmu tipu gradientā. Validācijas testi parāda precīzu SOC krājumu un to ilgtermiņa uzkrāšanās tendenču atveidi, uzlabotu veikspēju salīdzinājumā ar Yasso07, kā arī reālistiskāku oglekļa sadalījumu starp īslaicīgajām krātuvēm (A, W, E), starpkrātuvi N un ilgmūžīgo H krātuvi, kas tagad labāk atbilst empīriskajiem novērojumiem.

Yasso20 struktūra un kalibrācija padara šo modeli piemērotu 3. līmeņa (Tier 3) augsnes organiskā oglekļa krājumu izmaiņu novērtēšanai dažādos zemes izmantošanas un apsaimniekošanas apstākļos Latvijā, tai skaitā mežu ierīkošanā, mežsaimnieciskajā apsaimniekošanā un izmaiņu gadījumā organisko atlieku ieplūdē augsnē. Plašāks Yasso20 modeļa apraksts sniegts Viskari u.c. (2022).

Yasso20 augsnes organiskā oglekļa (SOC) modelis ir piemērots izmantošanai Latvijā, jo tas atbilst vispārējām 3. līmeņa metodes prasībām. Pirmkārt, Yasso20 nodrošina precīzāku un procesos balstītu augsnes organiskā oglekļa krājumu izmaiņu reprezentāciju nekā 1. vai 2. līmeņa pieejas. Modelis ņem vērā atšķirības augu atlieku ķīmiskajā sastāvā, koksnes atlieku izmēros un klimata ietekmētos noārdīšanās ātrumos, un tā parametri ir kalibrēti, izmantojot plašu globālu datu kopu (~17 000 novērojumu), kas ietver mēreno un boreālo klimatu, ļoti līdzīgu Latvijas apstākļiem. Validācijas rezultāti uzrāda labu modeļa veikspēju Ziemeļvalstu mežos, kas norāda, ka

modelis uzticami raksturo SOC dinamiku klimatiskajos un ekoloģiskajos apstākļos, kas raksturīgi Latvijas minerālaugsnēm.

Yasso20 nepieciešamie ievaddati Latvijā ir daļēji pieejami. Modelim nepieciešama gada organisko atlieku (litter) ienese, sadalīta AWEN frakcijās, koksnes atlieku izmēru sadalījums, kā arī mēneša vidējās gaisa temperatūras un gada nokrišņu summas. Šie ievaddati jau tiek ģenerēti Nacionālajā meža inventarizācijā un lokāli izstrādātajā meža pieauguma modelī (AGM), balstoties uz mežsaimniecības statistiku un Latvijas nacionālo klimata datu kopu. Tas nodrošina, ka modelis Latvijā ir īstenojams konsekventi un caurredzami, izmantojot nacionāli iegūtus datus.

Yasso20 modelis kalibrēts, izmantojot vairākas lielas augu atlieku noārdīšanās un SOC datu kopas, kas reprezentē plašu mēreno un boreālo klimatu spektru, tai skaitā apstākļus, kas raksturīgi Latvijai. Šīs datu kopas ietver CIDET, LIDET, EURODECO, globālos SOC mērījumus un ilgtermiņa Somijas koksnes noārdīšanās datu kopas, kopā veidojot aptuveni 17 563 kalibrācijas datu punktus. Latvijas klimats (vēss, mēreni kontinentāls ar izteiktu sezonālītāti) ietilpst šīs kalibrācijas telpā, jo:

- EURODECO datu kopa ietver Centrālās un Ziemeļeiropas parauglaukumus ar klimatiskajiem apstākļiem, kas ir līdzīgi Baltijas reģionam;
- CIDET un LIDET ietver vēsā mērenā klimata parauglaukumus, kas ir būtiski Latvijas meža augu atlieku noārdīšanās raksturojumam;
- Somijas ilgtermiņa koksnes noārdīšanās dati nodrošina labus analogus bērza, priedes, egles un jauktajiem mežiem, kas dominē Latvijas mežos;
- globālā SOC datu kopa ietver mērenā, mitrā klimata mežu un lauksaimniecības augsnes, kas ir salīdzināmas ar Latvijas minerālaugsnēm.

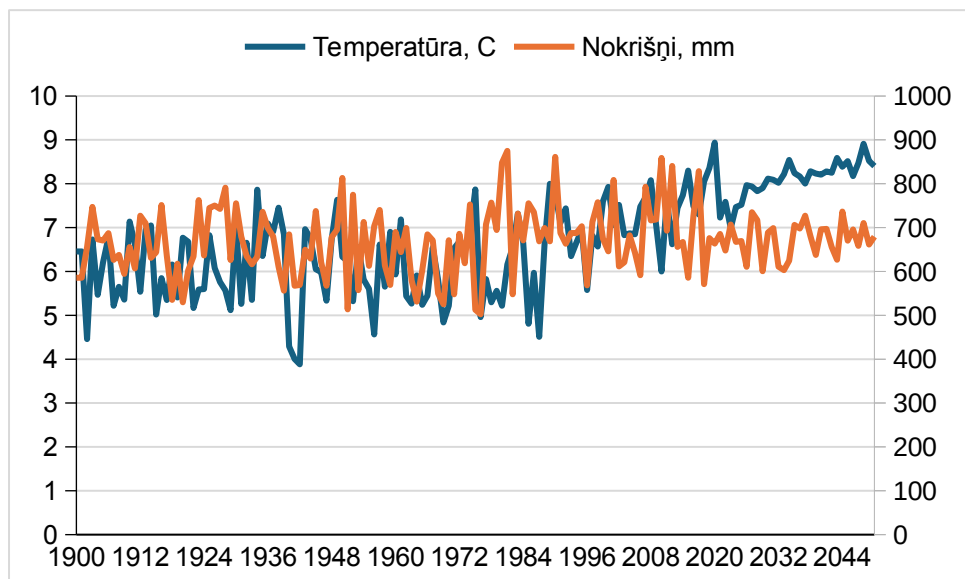
Tādējādi kalibrētie parametri reprezentē temperatūras, nokrišņu, sezonālītātes, augu atlieku īpašību un augsnes oglekļa dinamikas diapazonu, kas ir būtisks Latvijas apstākļiem.

Viskari u.c. (2022) sniedz pilnu Yasso20 rezultātu salīdzinājumu ar kalibrācijā izmantotajām datu kopām, izmantojot RMSE, nenoteiktības sadalījumus un atlikumu analīzi. Globālā kalibrācija nodrošināja labāko kopējo atbilstību visām datu kopām, ar stabilu veikspēju dažādos klimata apstākļos, kuros ietilpst arī Latvija. Yasso20 kalibrēts, izmantojot mūsdienīgas Bajāna metodes (DEzs MCMC), vairākas ķēdes un stingrus konverģences kritērijus, kas nodrošināja robustus parametru novērtējumus un labi definētas nenoteiktības robežas. Modelis papildus validēts ar neatkarīgām Somijas SOC datu kopām (parauglaukumu SOC un piekrastes hronosekvences datiem), kas reprezentē klimatiskos un veģetācijas apstākļus, kas ir līdzīgi Latvijai. Modelis precīzi atveidoja SOC krājumus, to ilgtermiņa uzkrāšanos un reālistisku

oglekļa sadalījumu starp sadalīšanās krātuvēm, vēl vairāk nostiprinot pārliecību par tā piemērotību Latvijas apstākļiem.

Izmantotie modeļa ievaddati ir zeme, kas pārvērstas meža zemēs, un meža zeme, kas saglabā meža zemes statusu.

Latvijā Yasso20 modelim nepieciešamie ievaddati ir daļēji pieejami un savietojami ar modeļa algoritmiem. Vides mainīgo dati, kas nepieciešami Yasso20 – gan vēsturiskās, gan prognozētās mēneša vidējās gaisa temperatūras un gada nokrišņu summas (Att. 6) – nodrošināja Latvijas Vides, ģeoloģijas un meteoroloģijas centrs (LVĢMC).



Att. 6. Vidējā gaisa temperatūra un nokrišņi, kas izmantoti Yasso20 modelī kā ievades dati.

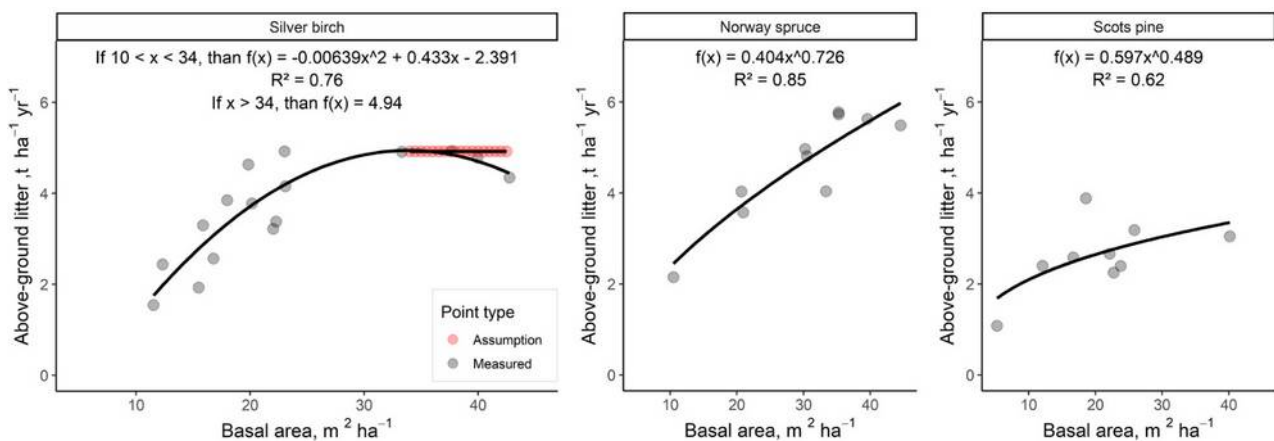
Ikgadējā oglekļa ienese augsnē (augu atlieku produkcija), kas izmantota modelēšanas scenārijos, iegūti no Latvijai specifiskiem pētījumiem, Nacionālās meža inventarizācijas (NFI) datiem un mežaudžu pieauguma modeļa AGM, kas balstās uz lokāliem empīriskiem mērījumiem. Šie informācijas avoti nodrošina nacionāli reprezentatīvas, sugu specifiskas aplēses virszemes un pazemes biomasas aprītei, novākto atlieku plūsmām un zemsedzes veģetācijas dinamikai.

Tā kā Yasso20 modelim nepieciešams augu atlieku ieplūdumu sadalījums pa atlieku tipiem un diametru klasēm, apmežotām minerālaugsnēm (Att. 7) iekļauti šādi oglekļa ieneses veidi: rupjās koksnes atliekas, kas ietver ik gadu atmirušās koksnes biomasu, zarus un atmirušo pazemes biomasu; smalkās vainaga kritālas; smalkās saknes, tostarp koku smalko sakņu dabisko atmirumu, nozāģēto koku smalkās saknes un zemsedzes veģetācijas saknes; kā arī zemsedzes veģetācijas virszemes atliekas.

AGM mežaudžu pieauguma modelis bija būtisks ievaddatu avots Yasso20 modelim. AGM rezultāti tika tieši izmantoti, lai kvantificētu ikgadējo oglekļa ienesi augsnē no ik gadu atmirušī koksnes biomasas, mežizstrādes atliekām, pazemes biomasas (celmiem un rupjām saknēm), kā arī nozāģēto koku smalkajām saknēm. Izvesto zaru frakcijai

piemērots koeficients 0,4, pieņemot, ka 60% mežizstrādes atlieku izved no meža. Ikgadējais lielo koksnes atlieku “raksturizmērs” aprēķināts kā svērtais vidējais, pieņemot, ka vidējais zaru diametrs ir 4 cm un ka dabiski atmirusī koksne un pazemes biomasas atliekas pēc mežizstrādes raksturojamas ar diametru, kas atbilst pusei no AGM attiecīgajā gadā pēc apmežošanas prognozētā vidējā koka krūšaugstuma caurmēra.

Papildus AGM rezultāti par mežaudžu šķērslaukuma un vecuma dinamiku tipiskas mežsaimniecības apsaimniekošanas apstākļos izmantoti netieši, lai novērtētu lapotnes nobiru ienesi. Ikgadējo smalko atlieku (vainaga nobiru) ieneses aprēķināšanai izmantoti Latvijai specifiski pētījumi par nobiru atkarību no audzes šķērslaukuma (Att. 7). Platlapju koku sugām pieņemts, ka bērza mežaudžu nobiru sakarības ir reprezentatīvas citām lapu kokiem. Jaunaudzēs atlieku ieneses trajektorijas tika iegūtas ar lineāru interpolāciju, pieņemot, ka audzes vecumā 0 gadi atlieku ienese ir nulle. Pieņemts, ka visu augu atlieku frakciju oglekļa saturs sausrnā ir 47,5% (Bārdule u.c., 2021).



Att. 7. Saistība starp audzes šķērslaukumu un vainaga nobiru biomasu (Bārdule u.c., 2021).

Publicētie mērījumi no Latvijas (Butlers, Lazdiņš, u.c., 2022; Butlers u.c., 2025) izmantoti, lai raksturotu ikgadējo oglekļa ieplūdumu no smalko sakņu dabiskās atmiršanas. Pieņemts, ka ikgadējā smalko sakņu produkcija ir vienāda ar ikgadējo smalko sakņu atmirumu. Tā kā pieejamie dati nav pietiekami, lai raksturotu smalko sakņu apriti atkarībā no mežaudzes raksturlielumiem, aprēķinos izmantotas statistiskās vidējās vērtības. Apmežošanas scenārijos ar baltalksni un apsei piemērota lapu koku sugām raksturīgā vidējā vērtība 0,54 t C ha⁻¹ gad⁻¹ (Tab. 1).

Tab. 1. Ikgadējā oglekļa ienese ar smalko sakņu biomasu dominējošo koku sugu griezumā

Koku suga	Ikgadējā oglekļa ienese ar sīksakņu biomasu, t C ha ⁻¹
Melnalksnis	0,44
Bērzs	0,63
Priede	1,64
Egle	0,76
Citi lapu koki	0,54

Statiskas vērtības tika izmantotas arī, lai raksturotu zemsedzes veģetācijas devumu, balstoties uz mērījumiem Latvijas mežaudžu parauglaukumos organiskajās augsnēs (Butlers, Spalva, u.c., 2022; Butlers u.c., 2025). Apmežošanas scenārijos ar baltalksni un apsei tika piemērotas lapu koku sugām raksturīgās vidējās vērtības (2. tabula). Papildus pieņemts, ka kailcirtēs noteiktā zemsedzes biomasas vērtība ir reprezentatīva mežaudžu vecumam līdz 20 gadiem.

Tab. 2. Ikgadējā oglekļa ienese no zemsedzes veģetācijas dabiskā atmiruma, sadalījumā pēc dominējošās koku sugas

Valdošā koku suga	Vidējā ikgadējā oglekļa ienese ar zemsedzes veģetāciju, t C ha ⁻¹	
	Virszemes	Pazemes
Melnalksnis	0,84	1,30
Bērzs	0,72	1,18
Priede	1,08	1,79
Egle	0,90	0,97
Citi lapu koki	0,77	1,24
Izcirtums	2,22	1,12

Visas augu atlieku ieneses mēs izteicām kā ikgadējās oglekļa ieneses un pēc tam sadalījām Yasso20 modelim nepieciešamajās AWENH frakcijās un diametru klasēs. Latvijai specifiskas AWENH vērtības pašlaik nav noteiktas, tāpēc mēs piemērojām literatūrā aprobētus pieņēmumus, kas balstās uz publicētiem mineralizācijas pētījumiem un Yasso modeļa aprakstošo literatūru. Latvijas apstākļiem mēs AWENH frakcijas piešķīrām, izmantojot reprezentatīvas vērtības bērza un citu lapu koku, priedes un egles mežaudžu augu atliekām, atspoguļojot to zināmo ķīmisko sastāvu. Šīs sugu grupas dominē Latvijas mežos un ir labi pārstāvētas starptautiskajās augu atlieku mineralizācijas datu kopās, kas kalpoja Yasso20 kalibrācijai. Līdz ar to pieņemtās AWENH frakcijas ir savietojamas gan ar modeļa kalibrācijas datiem, gan ar galvenajiem augu atlieku tiem, kas raksturīgi Latvijai (Tab. 3).

Tab. 3. Augu atlieku oglekļa sadalījums pa AWENH frakcijām

Nobiru veids	Valdošā koku suga	A	W	E	N	H
Rupjās atliekas	Priede	0,46	0,02	0,08	0,43	0
	Egle	0,67	0,02	0,01	0,31	0
	Lapu koki	0,65	0,015	0,015	0,32	0
Smalkās kritālas	Priede	0,52	0,18	0,09	0,22	0
	Egle	0,48	0,13	0,07	0,32	0
	Lapu koki	0,41	0,20	0,10	0,30	0
Smalkās saknes	Priede	0,58	0,13	0,06	0,23	0
	Egle	0,55	0,13	0,07	0,25	0
	Lapu koki	0,51	0,05	0,05	0,39	0

Nobiru veids	Valdošā koku suga	A	W	E	N	H
Zemsedzes nobiras	Visas sugas	0,46	0,32	0,04	0,18	0

AGM modeļa izvades, ko izmanto tieši vai Yasso20 ievaddatu atvasināšanai, tostarp mežaudzes attīstības raksturlielumi un meteoroloģiskie dati, kas piemēroti visos apmežošanas scenārijos aramzemēs un zālājos, ir pieejamas datu repozitorijā Zenodo. Šos datu kopumus izmanto, lai novērtētu apmežošanas ar dažādām koku sugām ietekmi uz augsnes organiskā oglekļa (SOC) krājumu izmaiņām. Att. 8 parādīts modeļa ievaddatu un rezultātu piemērs. Attēlā parādīts viens apmežošanas scenārija simulācijas piemērs, kurā aramzeme pāriet bērza mežaudzes stāvoklī. Attēlā attēlots ikgadējais oglekļa ienese augsnē pa augu atlieku veidiem atkarībā no mežaudzes attīstības stadijas un apsaimniekošanas pasākumiem, to ietekme uz augsnes organiskā oglekļa krājumu ikgadējām un kumulatīvajām izmaiņām, kā arī kopējais augsnes organiskā oglekļa krājums un tā sadalījums pa AWENH frakcijām.



Mean result, t C ha ⁻¹	Initial	2024-2042	2043-2062	2063-2082	2083-2102	2103-2122	2123-2142	2143-2162	2163-2182	2183-2202	2203-2222
Carbon input	4.8	5	5.6	5.6	7.6	5.7	6.9	5.7	4.9	6.6	6.1
Carbon stock	87	85.3	93.4	96.8	105.7	105.2	105	102.1	99.9	102.7	103.2

Att. 8. Yasso20 rezultātu ilustrācija.

Lai prognozētu augsnes organiskā oglekļa (SOC) krājumus minerālaugsnēs aramzemēs un zālajos, izmantota integrēta modelēšanas pieeja. Modelēšana ietvēra SOC krājumu dinamiku aramzemē, kas saglabā aramzemes statusu, SOC krājumu dinamiku zālajos, kas saglabā zālāju statusu, kā arī savstarpējās zemes izmantošanas maiņas starp šīm kategorijām. Tādēļ modeļa aprēķinātie ikgadējie SOC krājumu izmaiņu faktori ir vispārīgi piemērojami SEG inventarizācijas kategorijām “aramzeme, kas saglabā aramzemes statusu”, “zālāji, kas saglabā zālāju statusu”, “aramzeme, kas pārvērsta zālajos”, un “zālāji, kas pārvērsti aramzemē”, jo tie jau iekšēji atspoguļo aramzemes un zālāju kultūru telpisko sadalījumu un pārejas starp tām.

Modelēšanas pamats bija šāda ievaddatu informācija: (i) lauksaimniecības kultūru tipu statistiskais sadalījums un to laika izmaiņas periodā 2019.–2023. gadā, ietverot gan aramzemes, gan zālāju kultūras, un (ii) kultūrspecifiskie oglekļa ienese augsnē ar virszemes un pazemes augu atliekām, kas parādīta Tab. 2 (Rancāne u.c., 2023, 2025). Lai noteiktu vēsturiskās pārejas starp lauksaimniecības kultūrām, no pieejamiem lauku līmeņa statistikas datiem, izmantojot R pakotni *TraMineR*, konstruēta pāreju matrica. Vispirms no nacionālajām datu kopām apkopoja divu secīgu gadu kultūru kodu virknes (1. gads, 2. gads), piemēram, 2019.–2020. un 2022.–2023. gadam, un izlases veidā atlasīja 100 000 novērojumu, lai nodrošinātu aprēķinu efektivitāti, vienlaikus saglabājot empīrisko kultūru sadalījuma struktūru. Šie dati pārveidoti par secību objektiem (*seqdef*), un ar funkciju *seqtrate* noteica empīriskās pārejas varbūtības starp kultūru tipiem, iegūstot pāreju matricu, kuras katra šūna raksturo pārejas varbūtību no kultūras i pirmajā gadā uz kultūru j otrajā gadā. Pāreju matricas stabilitāti un ticamību pārbaudīja, salīdzinot novēroto un ar modeli prognozēto secību sadalījumu un veicot nākotnes kultūru kodu simulācijas vairākiem gadiem, izmantojot Markova ķēdes pieeju, kur katra nākamā gada kultūras kodu ģenerēja atbilstoši novērtētajām pārejas varbūtībām. Galīgās pāreju matricas un prognozētās vairāku gadu kultūru virknes izmantoja kā ievaddatus SOC krājumu modelēšanai, lai reprezentētu vēsturiskās un prognozētās pārejas starp lauksaimniecības kultūrām aramzemēs un zālājos.

Konkrētām kultūrām piemērotās AWENH attiecības ir dotas Tab. 9. Modeļa inicializāciju veica, prognozējot SOC stacionāro stāvokli, izmantojot vidējās oglekļa iekļūšanas vērtības.

Yasso20 pamata modelis pats par sevi nenodrošina nenoteiktības intervālus rezultātiem. Tāpēc nenoteiktības kvantifikācija pašlaik koncentrējas uz ievaddatu mainību un modeļa rezultātu jutību pret ievaddatiem. Lai novērtētu, kā ievaddatu nenoteiktība ietekmē SOC krājumu izmaiņu novērtējumu, katru apmežošanas scenāriju simulēja 20 neatkarīgos atkārtojumos. Šie atkārtojumi ir atvasināti no AGM mežaudžu pieauguma modeļa, kas ietver tipisko mežaudžu attīstības variabilitāti Latvijas apstākļos. Lai gan Yasso20 modelis ir deterministisks, ievaddatu variabilitāte, kas iegūta no AGM, rada SOC rezultātu variabilitāti. Šī variabilitāte atspoguļo Yasso20 ievaddatu jutību pret ievaddatu nenoteiktību un līdz ar to kalpo kā ikgadējo SOC krājumu izmaiņu faktoru nenoteiktības novērtējums. SOC krājumu izmaiņu faktoru variabilitāte starp apmežošanas scenārijiem norāda relatīvās standartnovirzes lielumu 47% apmērā “Zemes, kas pārvērstas meža zemēs” gadījumā un 19% “Meža zeme, kas saglabā meža zemes statusu” gadījumā (vidēji 33%).

Tā kā strukturālo nenoteiktību Yasso20 ietvaros tieši kvantificēt nav iespējams, modeļa strukturālo atbilstību izvērtēja, izmantojot ārējo validāciju. Katram scenārijam Yasso20 modelis prognozēja SOC krājumus 200 gadu periodā pēc apmežošanas. Šīs ilgtermiņa prognozes salīdzināja ar mērītajiem SOC krājumiem pieaugušās mežaudzēs Latvijā. Papildus tam Yasso20 aprēķināto SOC krājumu izmaiņu faktoru “Meža zeme, kas

saglabā meža zemes statusu” kategorijai salīdzināja ar Latvijā mērītajām SOC krājumu izmaiņu tendencēm, izmantojot Biosoil projekta parauglaukumu datus par 2006., 2012. un 2025. gadu. Šie salīdzinājumi apstiprina Yasso20 sniegto vērtību ticamību. Sakritība starp prognozētajiem un novērotajiem SOC krājumiem parāda, ka Yasso20 pietiekami labi reprezentē Latvijas meža augsnēm raksturīgo ilgtermiņa SOC uzkrāšanās dinamiku.

Lai ņemtu vērā nenoteiktību sākotnējos SOC krājumos apmežošanas sākuma brīdī, izmantoja divas pieejas. Pirmajā pieejā (A) sākotnējos SOC krājumus apmežotajās zemēs noteica, tieši izmantojot Latvijas minerālaugsnēs iegūtos lauka mērījumus, kurus ievadīja modelī kā sākotnējās vērtības. Otrajā pieejā (B) sākotnējos SOC krājumus novērtēja, balstoties uz aramzemju un zālāju raksturlielumiem un zemsedzes biomasu, izmantojot tos pašus metodoloģiskos pieņēmumus, kas piemēroti 2024. gada nacionālajā ziņojumā un pamatoti ar nacionālajiem mērījumiem. Izmantojot abas pieejas, varēja izvērtēt ilgtermiņa SOC prognožu jutību pret pieņēmumiem par sākotnējo SOC stāvokli. Atšķirības starp šiem diviem simulāciju kopumiem nodrošina papildu nenoteiktības mēru, kas saistīts ar sākotnējo SOC novērtējumu. Laba atbilstība starp abu pieeju rezultātiem palielina uzticēšanos modeļa izvaddatu piemērotībai un robustumam.

Lai simulētu SOC krājumus pirms apmežošanas, kas nepieciešami sākotnējo SOC vērtību noteikšanai apmežošanas scenārijos, izmantoja vispārīgu informāciju par oglekļa ienesi augsnē lauksaimniecības zemēs. Aramzemēs oglekļa ienese pieņemta $4,70 \text{ t C ha}^{-1} \text{ gad}^{-1}$ apmērā. Šī vērtība reprezentē vidējo starp (i) zemsedzes oglekļa saturu, kas Latvijas pētījumā noteikts $4,94 \text{ t C ha}^{-1} \text{ gad}^{-1}$, un atbilst izmantotajam nacionālajā SEG inventarizācijā (Bārdule, Laiho, u.c., 2025), un (ii) IPCC vadlīnijās doto noklusēto faktoru $4,70 \text{ t C ha}^{-1} \text{ gad}^{-1}$.

Zālājiem oglekļa ienese pieņemta $3,36 \text{ t C ha}^{-1} \text{ gad}^{-1}$. Šī vērtība atbilst nacionālajai SEG inventarizācijai un reprezentē vidējo starp diviem lokāli mērītiem lielumiem: $3,06 \text{ t C ha}^{-1} \text{ gad}^{-1}$ (Purviņa u.c., 2024) un $3,65 \text{ t C ha}^{-1} \text{ gad}^{-1}$ (Bārdule, Laiho, u.c., 2025) (Bārdule u.c., 2025). Izmantojot šīs ievaddatu vērtības kopā ar ilgtermiņa vidējām mēneša gaisa temperatūrām un gada nokrišņu summām (Tab. 4), Yasso20 prognozēja SOC krājumus $87,0 \text{ t C ha}^{-1}$ aramzemēm un $65,9 \text{ t C ha}^{-1}$ zālājiem. Aramzemēm iegūtais novērtējums ir līdzīgs vērtībai $85,60 \text{ t C ha}^{-1}$, kas izmantota Latvijas 2024. gada SEG inventarizācijas ziņojumā un balstīta uz nacionālā augsnes oglekļa krājumu novērtējuma projekta rezultātiem (projekts Nr. 10942).

SEG inventarizācijā pieņem, ka SOC krājumi aramzemēs un zālajos būtiski neatšķiras, jo nacionālais lauksaimniecības augsņu oglekļa krājumu novērtējums nav konstatējis statistiski nozīmīgas SOC atšķirības starp šiem zemes izmantošanas veidiem. Līdz ar to Yasso20 iegūtais SOC krājumu novērtējums zālājiem ir būtiski mazāks nekā tieši mērītās vērtības. Šādas zemākas modelētās vērtības izmantošana kā sākotnējais SOC krājums apmežošanas simulācijās, visticamāk, pārvērtētu ar apmežošanu saistīto SOC

pieaugumu. Visticamākais šīs neatbilstības iemesls ir nepietiekami novērtēta oglekļa ienese zālāju apmežošanas gadījumā. Labā sakritība starp mērīto un prognozēto SOC stacionāro stāvokli aramzemēs, izmantojot pieeju A, interpretēta kā norāde uz Yasso20 modeļa rezultātu piemērotību Latvijas apstākļiem.

Tab. 4. Klimatiskie parametri, ko izmanto, lai aprēķinātu sākotnējās augsnes organiskā oglekļa krājas zālajos un aramzemēs

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Air temperature, °C	-5,5	-5,3	-1,7	4,8	10,8	14,6	16,9	16,0	11,8	6,5	1,2	-3,1
Precipitation, mm	650											

B pieeja sniedza papildu norādes par modeļa piemērotību. Šajā pieejā mēs sākotnējo augsnes organiskā oglekļa krājumu raksturojam ar svērtu vidējo vērtību, ko aprēķinām, balstoties uz SOC mērījumiem 0–40 cm slānī divos Latvijā īstenotos pētījumos (Tab. 5). Katrai apmežošanas shēmai, ko definē sākotnējais zemes izmantošanas veids un dominējošā koku suga, mēs veicam 20 simulācijas atkārtojumus, un katrs atkārtojums reprezentē atšķirīgu mežaudzes attīstības trajektoriju, kas atbilst tipiskajai mežsaimniecības prakses variabilitātei Latvijā. Tādējādi viens atkārtojums raksturo SOC dinamiku atsevišķā mežaudzes līmenī, savukārt visu atkārtojumu vidējā vērtība atspoguļo sagaidāmo SOC attīstību nacionālā līmenī. Rezultātus mēs attēlojam kā vidējās vērtības.

Tab. 5. Ar tiešiem mērījumiem noteitkais oglekļa uzkrājums augsnē

Zemes izmantošana	C uzkrājums, t C ha ⁻¹	Novērojumi	Avots
Aramzeme	83,91	120	Bārdule et al., 2017
	82,78	152	Petaja et al., 2024
	83,28	272	Vidēji
Zālājs	89,4	120	Bārdule et al., 2017
	76,95	45	Petaja et al., 2024
	86,0	165	Vidēji

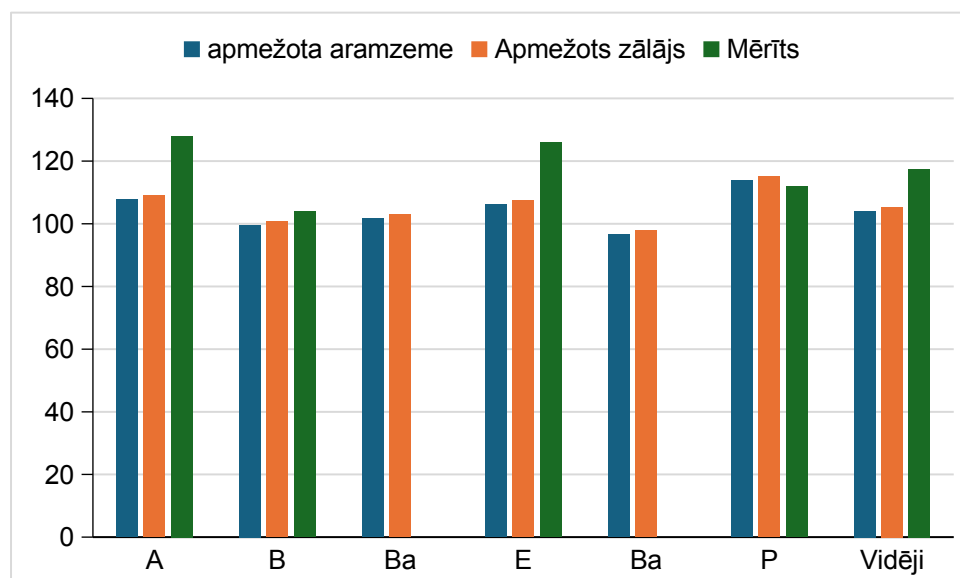
Simulāciju rezultāti rāda, ka apmežošana lauksaimniecības zemēs 100 gadu periodā ļauj palielināt augsnes organiskā oglekļa krājumus no aptuveni 85 t C ha⁻¹ līdz apmēram 105 t C ha⁻¹. Tā kā aramzemēm un zālājiem sākotnējie SOC krājumi ir līdzīgi, arī simulētā SOC reakcija uz apmežošanu abos zemes izmantošanas veidos ir līdzīga. Lielāko SOC uzkrājumu iegūst, ja apmežošanai izmanto skuju koku sugas.

Yasso20 prognozes ir salīdzināmas ar tiešajiem SOC krājumu mērījumiem mežaudžu parauglaukumos Latvijā. Lauka mērījumi uzrāda SOC krājumus 126–128 t C ha⁻¹ pieaugušās parastās egles un apses audzēs platībās ar sausām minerālaugsnēm, 112 t C ha⁻¹ – priedes audzēs un 104 t C ha⁻¹ – bērza audzēs (Kēniņa u.c., 2022). Līdz ar to Yasso20 prognozētās SOC uzkrāšanās trajektorijas atbilst empīriski novērotajiem SOC

krājumiem izveidotās mežaudzes, kas tālāk nostiprina modeļa piemērotību Latvijas apstākļiem (Tab. 6, Att. 9). Iegūto tendenču salīdzināmība ar tiešajiem mērījumiem norāda, ka šos rezultātus var izmantot nacionālajā SEG inventarizācijā. Visticamāk zemāko prognozēto vērtību izraisa atšķirības vidējā periodā kopš apmežošanas starp salīdzināmajām datu kopām.

Tab. 6. Prognozētā un izmērītā (Ķēniņa u.c., 2022) augsnes organiskā oglekļa krāja ($t\ C\ ha^{-1}$), kas sasniegta pēc 100 gadiem apmežotā zemē

Land use	Apse	Bērzs	Baltalksnis	Egle	Melnalksnis	Pride	Vidēji
Aramzeme	108	100	102	106	97	114	104
Zālājs	109	101	103	107	98	115	105
Mērīts	128	104	-	126	-	112	118
Atšķirība,%	-43	-8	-	-41	-	-10	-28

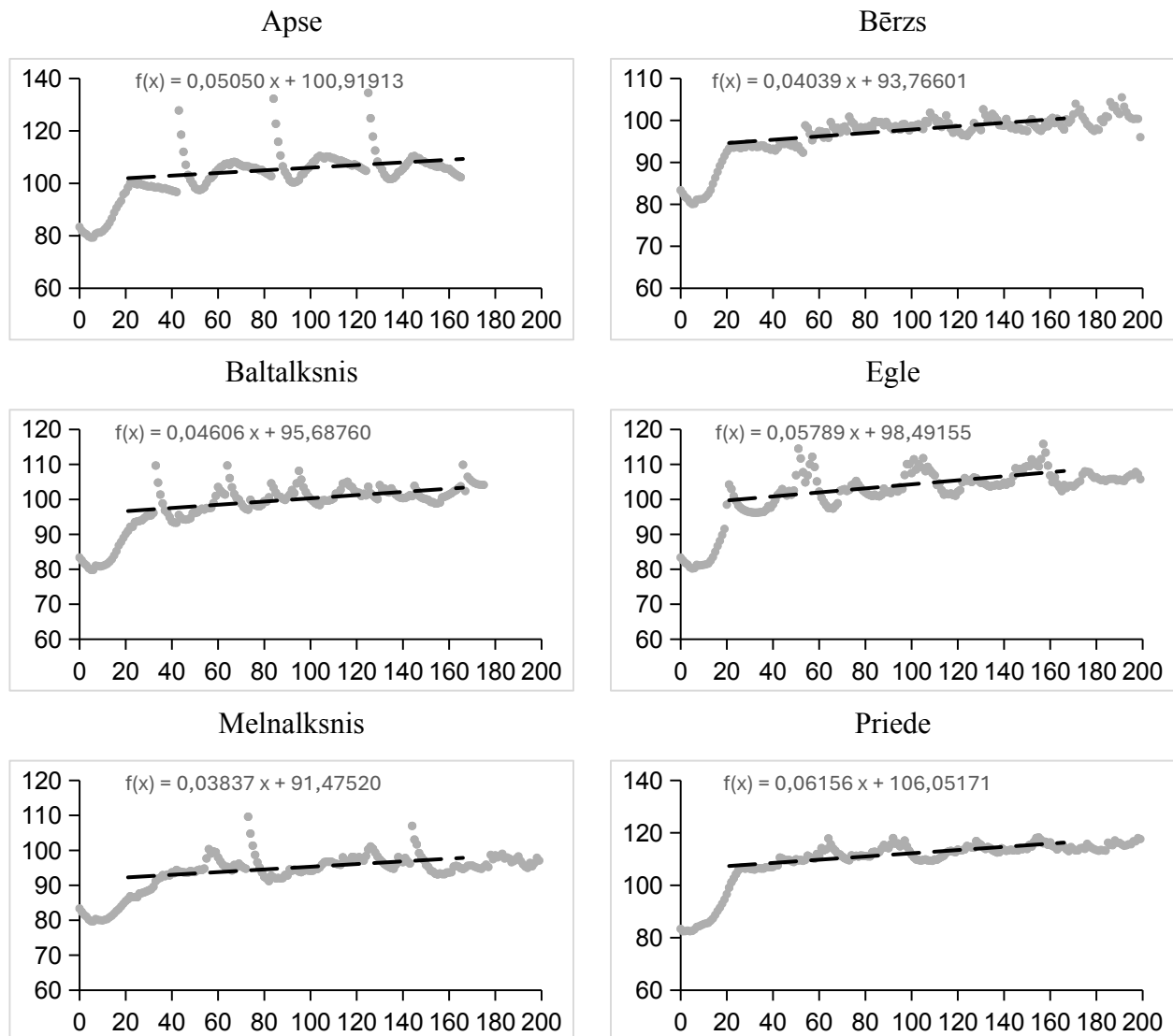


Att. 9. Prognozētais augsnes organiskā oglekļa krājums ($t\ C\ ha^{-1}$) pēc 100 gadiem apmežotā zemē, salīdzinot ar izmērītajiem SOC krājumiem mežaudzēs sausās minerālaugsnēs (Ķēniņa u.c., 2022).

Saskaņā ar sākotnējiem, vēl nepublicētiem rezultātiem vidējie SOC krājumi, kas 2006., 2012. un 2025. gadā Biosoil meža zemēs (0–48 cm slānī) noteikti, attiecīgi ir 124,9; 130,87 un 127,8 $t\ C\ ha^{-1}$. Šie mērījumi liecina par vidējo ikgadējo SOC krājumu pieaugumu 0,096 $t\ C\ ha^{-1}\ gad^{-1}$, kas ir par 28% lielāks nekā modeļa aprēķinātais SOC krājumu izmaiņu temps kategorijā “Meža zeme, kas saglabā meža zemes statusu” (vidēji 0,075 $t\ C\ ha^{-1}\ gad^{-1}$).

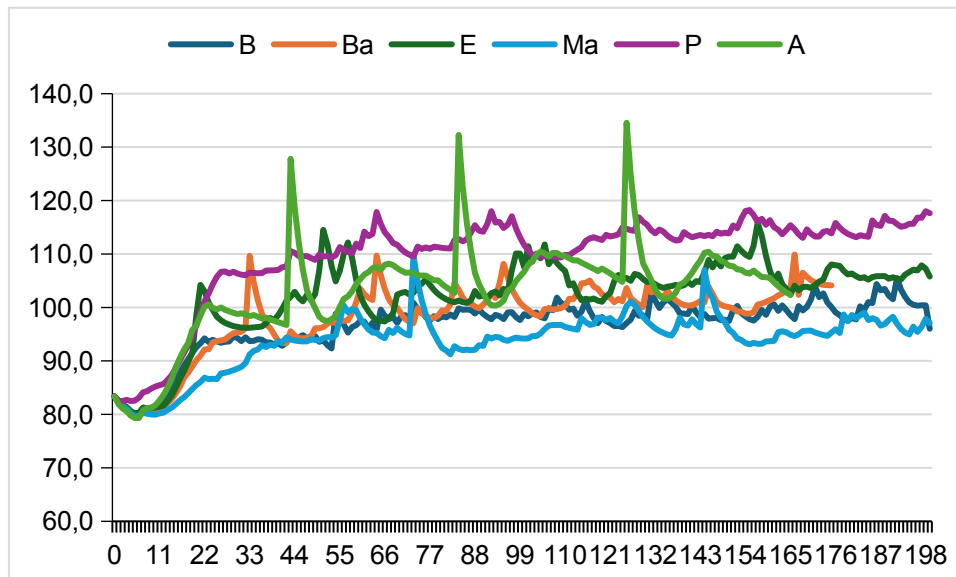
Apvienojot novērtēto modeļa jutību pret ievaddatu variāciju apmežošanas scenārijos (vidēji 33%), vidējo nobīdi (28%) un atšķirību starp vidējo prognozēto SOC krājumu izmaiņu tendenci un mērītajām vērtībām (28%), kopējo Yasso20 nenoteiktību novērtē 52% apmērā.

Pirmajos 20 gados pēc apmežošanas prognozētais vidējais ikgadējais augsnes oglekļa krājumu pieaugums aramzemēs svārstās no 0,11 līdz 0,76 t C ha⁻¹ gad⁻¹, ar vidējo vērtību 0,50 t C ha⁻¹ gad⁻¹. Šajā 20 gadu periodā prognozētie SOC krājumi sasniedz 85,5–98,5 t C ha⁻¹, ar vidējo vērtību 93,3 t C ha⁻¹. Tādējādi kopējais SOC pieaugums pirmajos 20 gados ir robežās no 2,11 līdz 15,1 t C ha⁻¹, ar vidējo vērtību 9,9 t C ha⁻¹. Turpmākajos gados SOC krājumi turpina pieaugt ar ātrumu 0,038–0,062 t C ha⁻¹ gad⁻¹ (Att. 10).



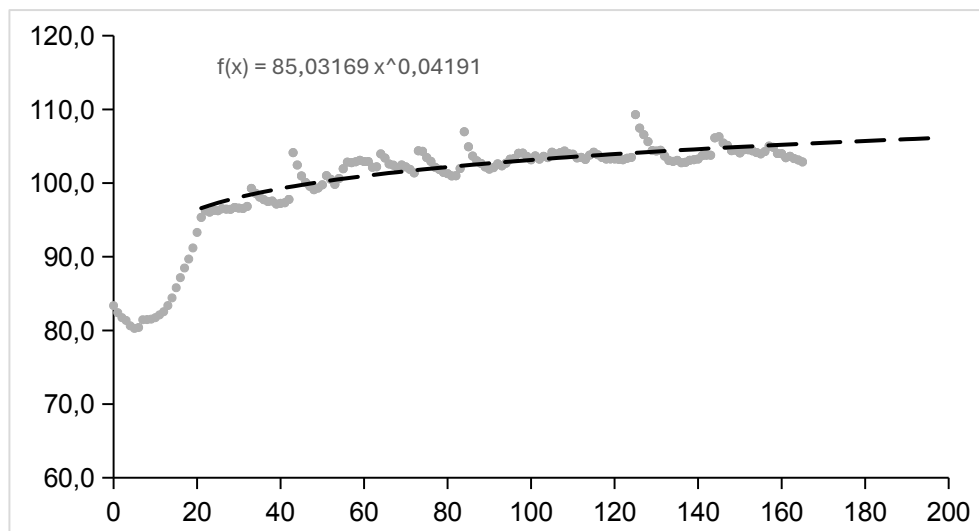
Att. 10. Augsnes organiskā oglekļa krāja (y ass) aramzemē, kas apmežota ar dažādām koku sugām (x ass: gadi kopš apmežošanas).

Prognozes rāda, ka vislielāko augsnes oglekļa krājumu pieaugumu nodrošina apmežošana ar priedi. Šādā scenārijā SOC turpina palielināties visā 200 gadu modelēšanas periodā, sasniedzot vidēji 113,9 t C ha⁻¹. Augsto oglekļa ieplūžu dēļ apmežošana ar apsēm rada SOC ilgtermiņa uzkrāšanās trajektoriju, kas ir līdzīga priedes gadījumam. Līdz ar to ilgtermiņā apses un egles audzēs SOC krājumi konverģē uz līdzīgu līmeni – aptuveni 104 t C ha⁻¹ (Att. 11).



Att. 11. Prognozēto augsnes oglekļa krājumu (y ass, t C ha⁻¹) salīdzinājums pa gadiem pēc apmežošanas (x ass) aramzemes apmežošanas scenārijiem. B – bērzs, Ba – baltalksnis, E – egle, Ma – melnalksnis, P – priede, A – apse.

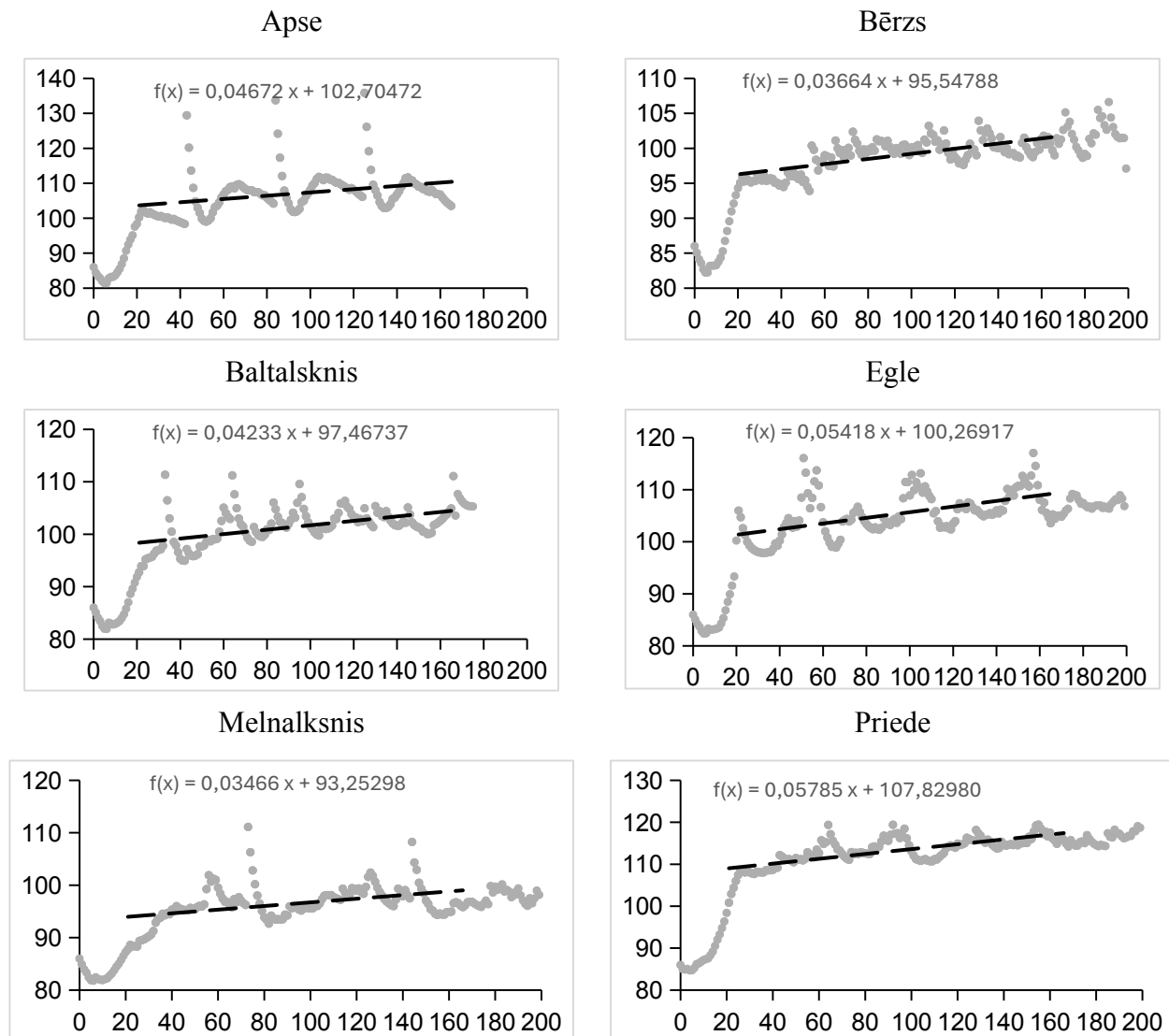
Visos scenārijos rezultāti rāda, ka aramzemes apmežošana pirmajos 20 gados palielina augsnes oglekļa krājumus par 9,9 t C ha⁻¹, kas atbilst 0,50 t C ha⁻¹ gad⁻¹, un SOC krājumi sasniedz vidēji 93,3 t C ha⁻¹. Turpmākajos gados SOC turpina pieaugt ar vidējo ātrumu 0,077 t C ha⁻¹ gad⁻¹. Uzkrāšanās trajektorijas liecina, ka aptuveni 100 gadus pēc apmežošanas ar dažādām koku sugām augsnē stabilizējas SOC krājums ap 104 t C ha⁻¹ (Att. 12).



Att. 12. Augsnes oglekļa krājumu vidējais rezultāts (y ass, t C ha⁻¹) pa gadiem pēc apmežošanas (x ass) aramzemes apmežošanas scenārijiem

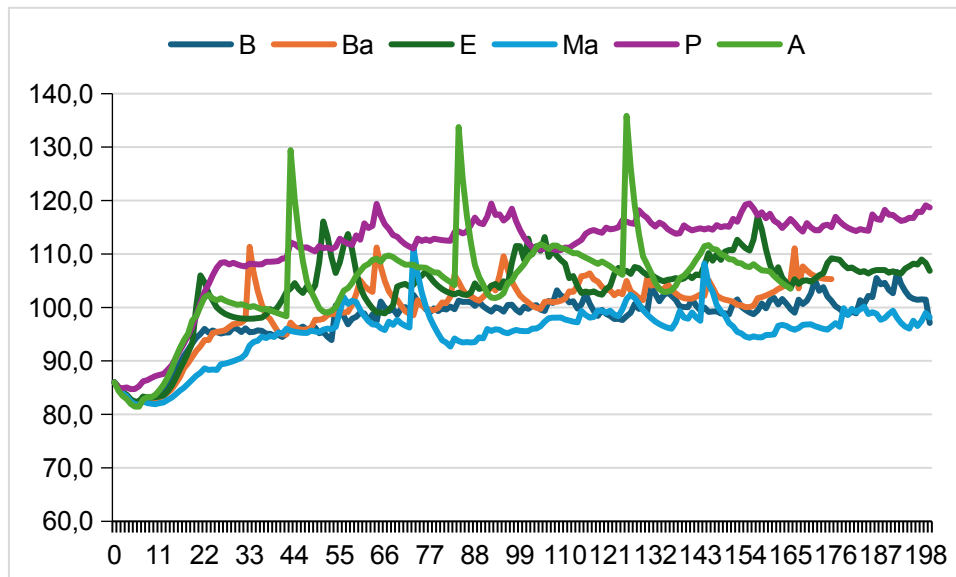
Pirmajos 20 gados pēc apmežošanas prognozētais vidējais ikgadējais augsnes oglekļa krājumu pieaugums zālajos svārstās no 0,06 līdz 0,71 t C ha⁻¹ gad⁻¹, ar vidējo vērtību

0,45 t C ha⁻¹ gad⁻¹. Šajā 20 gadu periodā prognozētais SOC krājums sasniedz 87,2–100,2 t C ha⁻¹, ar vidējo vērtību 95,1 t C ha⁻¹. Tādējādi kopējais SOC pieaugums pirmajos 20 gados ir robežās no 1,2 līdz 14,2 t C ha⁻¹, ar vidējo vērtību 9,1 t C ha⁻¹. Turpmākajos gados SOC krājumi turpina pieaugt ar ātrumu 0,037–0,058 t C ha⁻¹ gad⁻¹ (Att. 13).



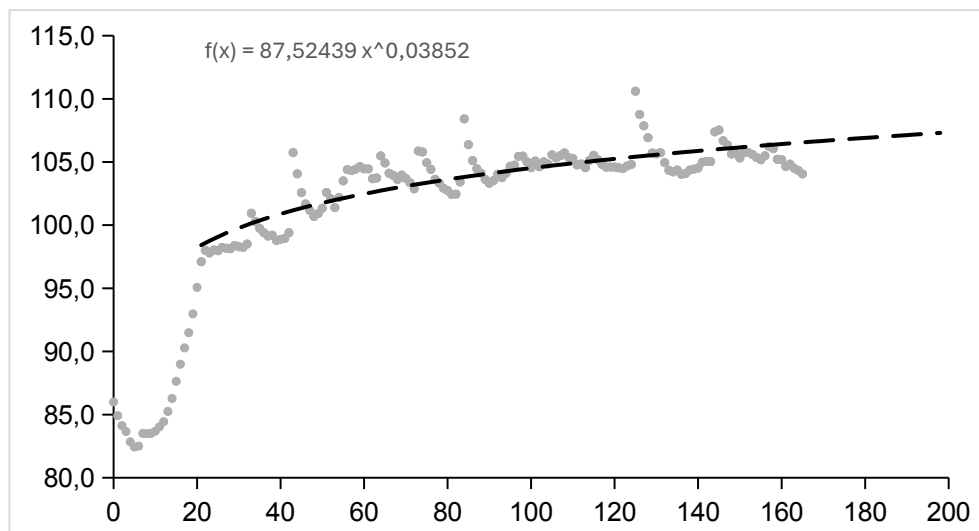
Att. 13. Augsnes organiskā oglekļa krāja (y ass) zālajos, kas apmežoti ar dažādām koku sugām (x ass: gadi kopš apmežošanas).

Līdzīgs sākotnējais augsnes oglekļa krājums kā aramzemēs nosaka līdzīgas SOC uzkrāšanās trajektorijas arī zālajos. Platībās, ko apmežo ar priedi, SOC turpina pieaugt visā 200 gadu prognožu periodā, sasniedzot vidēji 115,2 t C ha⁻¹. Pārējos scenārijos SOC stabilizējas aptuveni 103 t C ha⁻¹ līmenī (Att. 14).



Att. 14. Prognozēto augsnes oglekļa krājumu (y ass, $t\ C\ ha^{-1}$) salīdzinājums pa gadiem pēc apmežošanas (x ass) zālāju apmežošanas scenārijiem. B – bērzs, Ba – baltalksnis, E – egle, Ma – melnalksnis, P – priede, A – apse.

Visos scenārijos rezultāti rāda, ka zālāju apmežošana pirmajos 20 gados palielina augsnes oglekļa krājumus par $9,1\ t\ C\ ha^{-1}$, kas atbilst $0,45\ t\ C\ ha^{-1}\ gad^{-1}$, un SOC krājumi sasniedz vidēji $95,1\ t\ C\ ha^{-1}$. Turpmākajos gados SOC turpina pieaugt ar vidējo ātrumu $0,073\ t\ C\ ha^{-1}\ gad^{-1}$. Uzkrāšanās trajektorijas liecina, ka aptuveni 100 gadus pēc apmežošanas ar dažādām koku sugām augsnē stabilizējas SOC krājums ap $105\ t\ C\ ha^{-1}$ (Att. 15).



Att. 15. Vidējais augsnes oglekļa krājas rezultāts (y ass, $t\ C\ ha^{-1}$) pa gadiem pēc apmežošanas (x ass) zālāju apmežošanas scenārijiem

Balstoties uz Yasso20 simulāciju rezultātiem un pašreizējo izpratni par oglekļa ienesēm augsnē lauksaimniecības zemēs, ieteicamā pieeja apmežošanas ietekmes uz augsnes oglekļa krājumiem novērtēšanai ir noteikt sākotnējo SOC krājumu apmežotajās zemēs,

izmantojot tiešos mērījumus (B pieeja), nevis modelēt sākotnējo SOC krājumu (A pieeja). Saskaņā ar modeļa rezultātiem lielāko augsnes organiskā oglekļa pieaugumu pirmajos 20 gados var sagaidīt apmežošanas gadījumā ar apsēm, melnalkšņiem vai priedēm, SOC krājumiem sasniedzot 96,6–100,2 t C ha⁻¹ (Tab. 7). Salīdzinoši lielo SOC uzkrāšanos apses audzēs nodrošina lielākas oglekļa ieplūdes augsnē, savukārt skuju koku audzēs papildu devu nodrošina augu atlieku sastāvs, kas ietver organisko vielu ar lēnāku noārdīšanās ātrumu.

Tab. 7. Augsnes organiskā oglekļa krāja (t C ha⁻¹) pirms apmežošanas un 20 gadus pēc apmežošanas

Zemes izmantošana	Metode	Befor afforestation	Apse	Bērzs	Baltalksnis	Egle	Melnalksnis	Prides	Vidēji
		87,0	98,2	94,3	91,9	100,6	87,6	98,7	95,2
Zālājs		65,9	84,4	80,5	78,1	86,7	73,7	84,9	81,4
Aramzeme	B	83,3	96,6	92,5	90,1	98,5	85,5	96,6	93,3
Zālājs		86,0	98,4	94,3	91,9	100,2	87,2	98,4	95,1

Sugu specifiskie SOC krājumu izmaiņu faktori, kas iegūti atsevišķos scenārijos, raksturo modeļa jutību. Nacionālajā SEG inventarizācijā abām zemes kategorijām, kas apmežotas pirms 20 gadiem vai agrāk, jāizmanto vidējie gada SOC krājumu izmaiņu faktori (Tab. 8). Fiksētos faktoros, kas raksturo lineāru SOC uzkrāšanās ātrumu, ir lietderīgi piemērot arī platībām, kuras apmežojusi pēdējo 20 gadu laikā, jo modelētā nelielā SOC samazināšanās tūlīt pēc apmežošanas, visticamāk, nav realistiska.

Tab. 8. Augsnes organiskā oglekļa krājas ikgadējās izmaiņas (t C ha⁻¹ g⁻¹) apmežotajā zemē

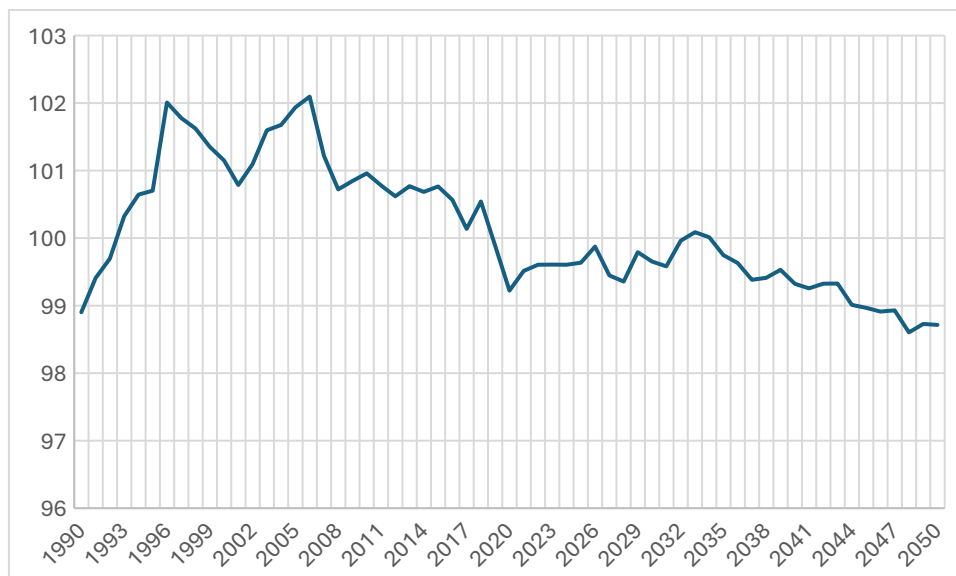
Zemes izmantošana	Metode	Audzes vecums	Augsnes organiskā oglekļa krājas ikgadējās izmaiņas (t C ha ⁻¹ g ⁻¹)						
			Apse	Bērzs	Baltalksnis	Egle	Melnalksnis	Prides	Vidēji
Aramzeme	A	≤20	0,56	0,37	0,25	0,68	0,03	0,58	0,41
		>20	0,049	0,040	0,045	0,056	0,036	0,060	0,078
Zālājs		≤20	0,92	0,73	0,61	1,04	0,39	0,95	0,77
		>20	0,0079	0,068	0,073	0,074	0,065	0,088	0,11
Aramzeme	B	≤20	0,66	0,46	0,34	0,76	0,11	0,66	0,50
		>20	0,051	0,040	0,046	0,058	0,038	0,062	0,077
Zālājs		≤20	0,62	0,42	0,29	0,71	0,06	0,62	0,45
		>20	0,047	0,037	0,042	0,054	0,035	0,058	0,073

Tā kā Latvijā veiktie mērījumi nav uzrādījuši būtiskas atšķirības augsnes organiskā oglekļa (SOC) krājumos starp aramzemēm un zālājiem (kā ziņots 2024. gada iesniegumā), un tā kā Yasso20 abos apmežošanas gadījumos prognozē līdzīgu SOC krājumu dinamiku, Yasso20 aprēķinātos vidējos SOC krājumu izmaiņu lielumus var izmantot nacionālajā SEG inventarizācijā. Lai nodrošinātu augstāku precizitāti, ieteicams izmantot B pieejas rezultātus. Attiecīgi SOC krājumu izmaiņu faktori lauksaimniecības zemju apmežošanai, ko paredzēts lietot SEG inventarizācijā, ir 0,48 t

C ha⁻¹ gad⁻¹ kategorijai “Zemes, kas pārvērstas meža zemēs” un 0,075 t C ha⁻¹ gad⁻¹ kategorijai “Meža zeme, kas saglabā meža zemes statusu”. Koku sugu specifisku SOC krājumu izmaiņu faktoru izmantošanu neatbalsta tiešie mērījumi, kuros nav konstatēta statistiski nozīmīga dominējošās koku sugas ietekme uz augsnes organiskā oglekļa krājumiem (Ķēniņa u.c., 2025).

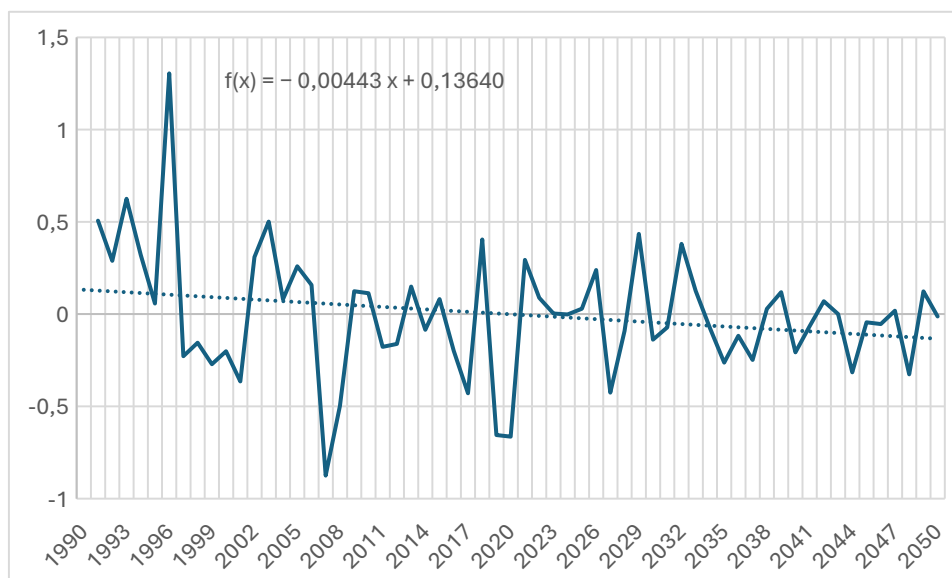
Fiksētu faktoru izmantošana kategorijai “Meža zeme, kas saglabā meža zemes statusu” ir pamatota, jo modeļa rezultāti rāda, ka SOC krājumi var turpināt pieaugt vismaz 200 gadus pēc apmežošanas. Ņemot vērā, ka Latvijas mežu platība kopš 20. gadsimta sākuma ir vairāk nekā divkāršojusies, lielāko daļu pašreizējo meža zemju ir apmežojusi pēdējo 200 gadu laikā.

Laika periodā no 1990. līdz 2050. gadam Yasso20 prognozē, ka lauksaimniecības zemju augsnes organiskā oglekļa (SOC) krājumi saglabājas tuvu līdzsvara stāvoklim, ar vidējo vērtību 100,1 ± 0,9 t C ha⁻¹. Periodam 2006–2025, kurā SOC krājumus mērīja Biosoil parauglaukumos (vidējā vērtība: 128 t C ha⁻¹), Yasso20 prognozētā SOC krājumu vidējā vērtība ir 100,4 t C ha⁻¹, un to pavada neliela samazinājuma tendence –0,11 t C ha⁻¹ gad⁻¹. (Att. 16).



Att. 16. Oglekļa uzkrājuma prognoze lauksaimniecībā izmantojamās zemēs.

Visā laika rindā prognozētās ikgadējās SOC krājumu izmaiņas lauksaimniecības zemēs svārstās ap līdzsvara stāvokli, robežās no –0,87 līdz +1,30 t C ha⁻¹ gad⁻¹. Tāpēc šo precīzo ikgadējo vērtību tieša izmantošana SEG inventarizācijā radītu nepārbaudītu gadskārtējo “troksni”, nevis atspoguļotu būtiskas ilgtermiņa izmaiņas. Tā kā ilgtermiņa vidējā SOC izmaiņa ir tikai 0,003 t C ha⁻¹ gad⁻¹, inventarizācijas vajadzībām ir lietderīgāk analizēt kopējās tendences datu kopā, nevis atsevišķus gada rādītājus.



Att. 17. Lineārā regresija, kas raksturo oglekļa uzkrājuma izmaiņas.

Lineārā regresija, kas piemērota pilnām laika rindām, norāda uz vidējām ikgadējām SOC krājumu izmaiņām $-0,0044 \text{ t C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ (Att. 17), kas ir nozīmīgākais ilgtermiņa SOC izmaiņu novērtējums lauksaimniecības minerālaugsnēm.

Tab. 9. AWNH attiecības, lai raksturotu oglekļa ienesi ar dažādām kultūrām

Crop code	A	W	E	N	H
111	0,71	0,08	0,03	0,18	0
112	0,71	0,08	0,03	0,18	0
113	0,71	0,08	0,03	0,18	0
115	0,71	0,08	0,03	0,18	0
116	0,71	0,08	0,03	0,18	0
121	0,71	0,08	0,03	0,18	0
122	0,71	0,08	0,03	0,18	0
123	0,71	0,08	0,03	0,18	0
131	0,71	0,08	0,03	0,18	0
132	0,71	0,08	0,03	0,18	0
133	0,71	0,08	0,03	0,18	0
140	0,71	0,08	0,03	0,18	0
141	0,71	0,08	0,03	0,18	0
150	0,71	0,08	0,03	0,18	0
151	0,71	0,08	0,03	0,18	0
152	0,71	0,08	0,03	0,18	0
160	0,71	0,08	0,03	0,18	0
161	0,71	0,08	0,03	0,18	0
170	0,46	0,32	0,04	0,18	0

Latvijas zemes izmantošanas, zemes izmantošanas maiņas un mežsaimniecības (ZIZIMM) sektora klimata pārmaiņu mazināšanas mērķu sasniegšanai īstenojamo darbību siltumnīcefekta gāzu (SEG) emisiju mazināšanai un oglekļa dioksīda (CO2) piesaistes veicināšanai meža apsaimniekošanā sociāli ekonomiskais vērtējums

Crop code	A	W	E	N	H
211	0,41	0,31	0,04	0,25	0
212	0,41	0,31	0,04	0,25	0
213	0,41	0,31	0,04	0,25	0
214	0,41	0,31	0,04	0,25	0
215	0,46	0,32	0,04	0,18	0
216	0,46	0,32	0,04	0,18	0
330	0,46	0,32	0,04	0,18	0
410	0,46	0,32	0,04	0,18	0
420	0,63	0,14	0,02	0,21	0
430	0,46	0,32	0,04	0,18	0
441	0,46	0,32	0,04	0,18	0
442	0,46	0,32	0,04	0,18	0
443	0,46	0,32	0,04	0,18	0
445	0,71	0,08	0,03	0,18	0
446	0,71	0,08	0,03	0,18	0
610	0,46	0,32	0,04	0,18	0
619	0,46	0,32	0,04	0,18	0
620	0,46	0,32	0,04	0,18	0
640	0,31	0,165	0,165	0,36	0
641	0,46	0,32	0,04	0,18	0
644	0,31	0,165	0,165	0,36	0
645	0,31	0,165	0,165	0,36	0
646	0,31	0,165	0,165	0,36	0
710	0,46	0,32	0,04	0,18	0
713	0,46	0,32	0,04	0,18	0
714	0,46	0,32	0,04	0,18	0
715	0,46	0,32	0,04	0,18	0
716	0,46	0,32	0,04	0,18	0
720	0,46	0,32	0,04	0,18	0
723	0,46	0,32	0,04	0,18	0
724	0,46	0,32	0,04	0,18	0
725	0,46	0,32	0,04	0,18	0
726	0,46	0,32	0,04	0,18	0
727	0,46	0,32	0,04	0,18	0
728	0,46	0,32	0,04	0,18	0
729	0,46	0,32	0,04	0,18	0
731	0,46	0,32	0,04	0,18	0
732	0,46	0,32	0,04	0,18	0

Latvijas zemes izmantošanas, zemes izmantošanas maiņas un mežsaimniecības (ZIZIMM) sektora klimata pārmaiņu mazināšanas mērķu sasniegšanai īstenojamo darbību siltumnīcefekta gāzu (SEG) emisiju mazināšanai un oglekļa dioksīda (CO₂) piesaistes veicināšanai meža apsaimniekošanā sociāli ekonomiskais vērtējums

Crop code	A	W	E	N	H
733	0,46	0,32	0,04	0,18	0
734	0,46	0,32	0,04	0,18	0
735	0,46	0,32	0,04	0,18	0
736	0,46	0,32	0,04	0,18	0
737	0,46	0,32	0,04	0,18	0
738	0,46	0,32	0,04	0,18	0
739	0,46	0,32	0,04	0,18	0
741	0,46	0,32	0,04	0,18	0
760	0,46	0,32	0,04	0,18	0
761	0,46	0,32	0,04	0,18	0
791	0,46	0,32	0,04	0,18	0
792	0,46	0,32	0,04	0,18	0
811	0,46	0,32	0,04	0,18	0
820	0,23	0,48	0,05	0,24	0
821	0,23	0,48	0,05	0,24	0
825	0,23	0,48	0,05	0,24	0
826	0,23	0,48	0,05	0,24	0
831	0,23	0,48	0,05	0,24	0
842	0,23	0,48	0,05	0,24	0
843	0,23	0,48	0,05	0,24	0
844	0,23	0,48	0,05	0,24	0
845	0,23	0,48	0,05	0,24	0
846	0,23	0,48	0,05	0,24	0
847	0,23	0,48	0,05	0,24	0
848	0,23	0,48	0,05	0,24	0
849	0,23	0,48	0,05	0,24	0
851	0,23	0,48	0,05	0,24	0
852	0,23	0,48	0,05	0,24	0
853	0,23	0,48	0,05	0,24	0
854	0,23	0,48	0,05	0,24	0
856	0,23	0,48	0,05	0,24	0
857	0,23	0,48	0,05	0,24	0
858	0,23	0,48	0,05	0,24	0
859	0,63	0,14	0,02	0,21	0
860	0,46	0,32	0,04	0,18	0
861	0,46	0,32	0,04	0,18	0
862	0,46	0,32	0,04	0,18	0
863	0,46	0,32	0,04	0,18	0

Latvijas zemes izmantošanas, zemes izmantošanas maiņas un mežsaimniecības (ZIZIMM) sektora klimata pārmaiņu mazināšanas mērķu sasniegšanai īstenojamo darbību siltumnīcefekta gāzu (SEG) emisiju mazināšanai un oglekļa dioksīda (CO2) piesaistes veicināšanai meža apsaimniekošanā sociāli ekonomiskais vērtējums

Crop code	A	W	E	N	H
864	0,46	0,32	0,04	0,18	0
865	0,46	0,32	0,04	0,18	0
869	0,46	0,32	0,04	0,18	0
870	0,23	0,48	0,05	0,24	0
871	0,23	0,48	0,05	0,24	0
872	0,46	0,32	0,04	0,18	0
873	0,46	0,32	0,04	0,18	0
874	0,46	0,32	0,04	0,18	0
877	0,46	0,32	0,04	0,18	0
878	0,46	0,32	0,04	0,18	0
879	0,46	0,32	0,04	0,18	0
881	0,46	0,32	0,04	0,18	0
882	0,46	0,32	0,04	0,18	0
884	0,46	0,32	0,04	0,18	0
885	0,46	0,32	0,04	0,18	0
911	0,31	0,165	0,165	0,36	0
912	0,31	0,165	0,165	0,36	0
914	0,31	0,165	0,165	0,36	0
915	0,31	0,165	0,165	0,36	0
918	0,31	0,165	0,165	0,36	0
919	0,31	0,165	0,165	0,36	0
921	0,31	0,165	0,165	0,36	0
922	0,31	0,165	0,165	0,36	0
924	0,31	0,165	0,165	0,36	0
926	0,31	0,165	0,165	0,36	0
927	0,31	0,165	0,165	0,36	0
928	0,31	0,165	0,165	0,36	0
929	0,31	0,165	0,165	0,36	0
930	0,46	0,32	0,04	0,18	0
931	0,31	0,165	0,165	0,36	0
932	0,31	0,165	0,165	0,36	0
933	0,31	0,165	0,165	0,36	0
934	0,31	0,165	0,165	0,36	0
935	0,31	0,165	0,165	0,36	0
937	0,31	0,165	0,165	0,36	0
938	0,31	0,165	0,165	0,36	0
939	0,31	0,165	0,165	0,36	0
950	0,31	0,165	0,165	0,36	0

Latvijas zemes izmantošanas, zemes izmantošanas maiņas un mežsaimniecības (ZIZIMM) sektora klimata pārmaiņu mazināšanas mērķu sasniegšanai īstenojamo darbību siltumnīcefekta gāzu (SEG) emisiju mazināšanai un oglekļa dioksīda (CO₂) piesaistes veicināšanai meža apsaimniekošanā sociāli ekonomiskais vērtējums

Crop code	A	W	E	N	H
952	0,31	0,165	0,165	0,36	0

Tab. 10. Vidējā produkcija (t d.m. ha⁻¹) un ikgadējā oglekļa ienese augsnē ar augu atliekām (t C ha⁻¹)

Kultūras kods	Ražība	Virszemes nobiras	Pazemes nobiras	Sīksaknes
111	3,797	0,452	0,114	0,046
112	4,520	0,704	0,122	0,050
113	4,700	0,298	0,114	0,170
121	3,957	0,876	0,193	0,057
131	4,965	0,406	0,072	0,029
132	4,514	0,804	0,124	0,051
133	3,400	0,382	0,303	0,170
140	3,813	0,724	0,164	0,048
141	2,860	0,565	0,167	0,069
150	2,442	1,134	0,211	0,086
151	4,795	0,812	0,139	0,057
152	3,700	0,541	0,310	0,170
160	1,800	1,461	0,166	0,068
170	0,596	7,550	0,916	0,376
211	1,708	2,548	0,295	0,121
212	3,420	2,121	0,245	0,101
214	1,158	4,385	0,507	0,208
310	2,362	0,000	0,071	0,029
330	0,884	2,563	0,189	0,077
410	2,790	1,114	0,083	0,034
420	2,885	1,000	0,067	0,027
430	0,936	3,320	0,247	0,101
441	0,898	3,460	0,258	0,106
445	2,090	1,497	0,190	0,078
641	8,000	0,000	0,066	0,056
710	11,400	0,000	0,100	0,067
720	7,570	0,000	0,124	0,104
723	11,070	0,000	0,061	0,051
724	6,000	0,000	0,131	0,110
725	6,000	0,000	0,131	0,110
726	15,960	0,000	0,088	0,074
727	10,000	0,000	0,140	0,118
728	5,000	0,000	0,280	0,235
729	8,000	0,000	0,175	0,147

Latvijas zemes izmantošanas, zemes izmantošanas maiņas un mežsaimniecības (ZIZIMM) sektora klimata pārmaiņu mazināšanas mērķu sasniegšanai īstenojamo darbību siltumnīcefekta gāzu (SEG) emisiju mazināšanai un oglekļa dioksīda (CO2) piesaistes veicināšanai meža apsaimniekošanā sociāli ekonomiskais vērtējums

Kultūras kods	Ražība	Virszemes nobiras	Pazemes nobiras	Sīksaknes
731	0,800	3,938	1,116	0,937
732	0,900	3,500	0,992	0,833
733	1,200	3,375	0,744	0,625
734	1,200	3,000	0,744	0,625
735	1,000	2,700	0,893	0,750
736	1,200	3,000	0,744	0,625
737	1,400	2,893	0,638	0,536
738	0,500	4,500	1,785	1,500
739	0,800	4,500	1,116	0,937
791	13,720	0,000	0,052	0,022
820	23,540	0,048	0,007	0,003
821	16,478	0,069	0,010	0,004
825	23,540	0,048	0,007	0,003
826	6,290	0,181	0,026	0,011
831	26,800	0,083	0,006	0,002
842	4,100	0,439	0,082	0,034
843	22,760	0,059	0,007	0,003
844	24,500	0,091	0,006	0,003
845	9,940	0,129	0,016	0,007
846	16,500	0,055	0,010	0,004
847	2,540	0,354	0,064	0,026
848	0,314	7,166	1,338	0,548
849	9,420	0,048	0,017	0,007
851	23,540	0,094	0,007	0,003
852	9,420	0,096	0,017	0,007
853	9,420	0,236	0,016	0,007
854	5,410	0,083	0,029	0,012
855	22,760	0,097	0,007	0,003
856	24,500	0,091	0,006	0,003
857	8,750	0,254	0,018	0,007
858	8,750	0,254	0,018	0,007
859	1,920	1,155	0,081	0,033
860	5,410	0,166	0,029	0,012
861	9,420	0,096	0,054	0,045
862	5,410	0,410	0,029	0,012
863	2,290	0,393	0,147	0,060
864	5,410	0,000	0,029	0,012
865	23,540	0,153	0,007	0,003

Latvijas zemes izmantošanas, zemes izmantošanas maiņas un mežsaimniecības (ZIZIMM) sektora klimata pārmaiņu mazināšanas mērķu sasniegšanai īstenojamo darbību siltumnīcefekta gāzu (SEG) emisiju mazināšanai un oglekļa dioksīda (CO2) piesaistes veicināšanai meža apsaimniekošanā sociāli ekonomiskais vērtējums

Kultūras kods	Ražība	Virszemes nobiras	Pazemes nobiras	Sīksaknes
867	3,145	0,406	0,052	0,021
868	9,940	0,129	0,016	0,007
869	9,420	0,239	0,054	0,022
870	4,510	0,200	0,112	0,046
878	0,458	4,913	0,642	0,263
924	0,940	2,394	1,464	1,230
926	2,120	0,425	0,713	0,300
934	2,290	0,393	0,220	0,092

Biomases pieauguma modeļu izstrādāšana, balstoties uz divu ciklu aerolāzerskenēšanas (ALS) datiem

Meži ir lielākais sauszemes oglekļa piesaistītājs, uzglabājot aptuveni 72% no Zemes sauszemes oglekļa augsnē un biomasā (Malhi u.c., 2002), padarot precīzu oglekļa novērtējumu būtisku klimata pārmaiņu mazināšanai, mežu apsaimniekošanai un oglekļa tirgum (Nink u.c., 2019). Precīza oglekļa apjoma novērtēšana ir īpaši aktuāla hemiboreālajā zonā, kur pārejas joslas mežiem ir raksturīga augsta sugu un strukturālā daudzveidība. Šāda neviendabība ietekmē mežu produktivitāti, konkurenci un oglekļa piesaistes spēju. Tā kā sugu identitāte vien nav pietiekama, telpiskās variācijas iekļaušana uzlabo meža struktūras un biomasas modeļus (Luo u.c., 2020) un atbalsta bioloģiskās daudzveidības monitoringu, traucējumu noteikšanu un oglekļa uzskaiti (Ballanti u.c., 2016; Pimple u.c., 2017; Shen u.c., 2023; Wallis u.c., 2017).

Tradicionālā uz lauka balstītā biomasas novērtēšana ir precīza, bet dārga un laikietilpīga (Song u.c., 2007), ierobežojot tās lietderību liela mēroga lietojumos. Nacionālās meža resursu monitorings (MRM) piedāvā augstas kvalitātes lauka datus, taču tie joprojām ir telpiski ierobežoti (Tomppo u.c., 2010). MRM integrēšana ar attālās izpētes datiem, kā aerolāzerskenēšanu (ALS) un multispektrālajiem satelītattēliem ļauj veikt ainavas līmeņa oglekļa kartēšanu, kalibrējot attālinātos signālus lauka parauglaukumos (Breidenbach, Waser, u.c., 2021; Gleason & Im, 2011). Jo īpaši ALS nodrošina detalizētu 3D vainaga struktūru, kas ir cieši saistīta ar biomasu (Salas u.c., 2010; Zhao u.c., 2009). Tīkmēr Sentinel-2 un Landsat attēli var ar augstu precizitāti atšķirt koku sugas (Bolyn u.c., 2018; Grabska u.c., 2020; Hościło & Lewandowska, 2019), īpaši, ja ir iekļauta fenoloģiskā informācija (Key, 2001).

Latvija ir labā pozīcijā liela mēroga mežu oglekļa kartēšanai. Viens pilns ALS pārklājums jau ir pabeigts, un otrs pārklājums tiek gatavots. Šie atkārtotie ieguvumi paplašina iespējas detalizētai strukturālai modelēšanai, laika izmaiņu analīzei un mežu oglekļa aprēķinu uzlabotai kalibrēšanai visā valstī.

Lai gan parametriskās regresijas metodes jau sen tiek izmantotas, lai saistītu tālizpētes datus ar meža inventarizācijas parametriem (Kulawardhana u.c., 2014; Sheridan u.c., 2014), mūsdienu pētījumi arvien vairāk balstās uz mašīnmācīšanos. Tādi algoritmi kā Random Forest, SVM, KNN, Deep Learning un XGBoost uztver sarežģītas, nelineāras attiecības un apstrādā augstas dimensijas datu kopas, kas ir izplatītas multispektrālos un multitemporālos attēlos (Durbha u.c., 2007; Hudak u.c., 2008; Illarionova u.c., 2024; Keskes u.c., 2025; Wang u.c., 2024). Šīs metodes ir standarta metodes veģetācijas klasifikācijā un oglekļa modelēšanā (Fassnacht u.c., 2016; Georganos u.c., 2018). Šī

pētījuma mērķis ir izstrādāt modeļus, lai novērtētu meža virszemes oglekļa krājumus integrējot ALS, MRM datus un Sentinel multispektrālos satelītattēlus. Pētījuma ietvaros uzsākta telpiski precīzu oglekļa uzkrājuma karšu veidošana, lai atbalstītu ilgtspējīgu apsaimniekošanu, oglekļa uzskaiti un klimata pārmaiņu mazināšanas centienus.

Pētījums aptver visu Latvijas teritoriju un tā mērķis ir izveidot augstas izšķirtspējas virszemes biomasas (AGB) un virszemes oglekļa (AGC) kartes, integrējot MRM lauka datus, divus aerolāzerskenēšanas (ALS) pārklājumus un Sentinel-2 satelītattēlus. Latvijai pašlaik ir viens pilnīgs nacionālais ALS datu kopums (iegūts laikā no 2013. līdz 2019. gadam) un otrs, notiekošs ALS pārklājums, kas uzsākts 2022. gadā. Nepilnīgie 2022. gada dati iekļauti, lai pārbaudītu modeļa pārnesamību un novērtētu agrīnas strukturālo izmaiņu pazīmes mežaudzēs.

Lai definētu zemes segumu un meža struktūru, izmantots plašs telpisko datu kopu klāsts, tostarp meža nogabali (LVM), lauksaimniecības lauki (LAD), kūdrāju poligoni (LIFE ReStore) un ūdenstilpju dati (LGIA). Līdzās jauniem mežiem un jauktām audzēm tika iegūta karte sešu galveno koku sugu izplatības novērtēšanai – priedes, egles, bērza, melnalkšņa, baltalkšņa un apses dominējošās audzes.

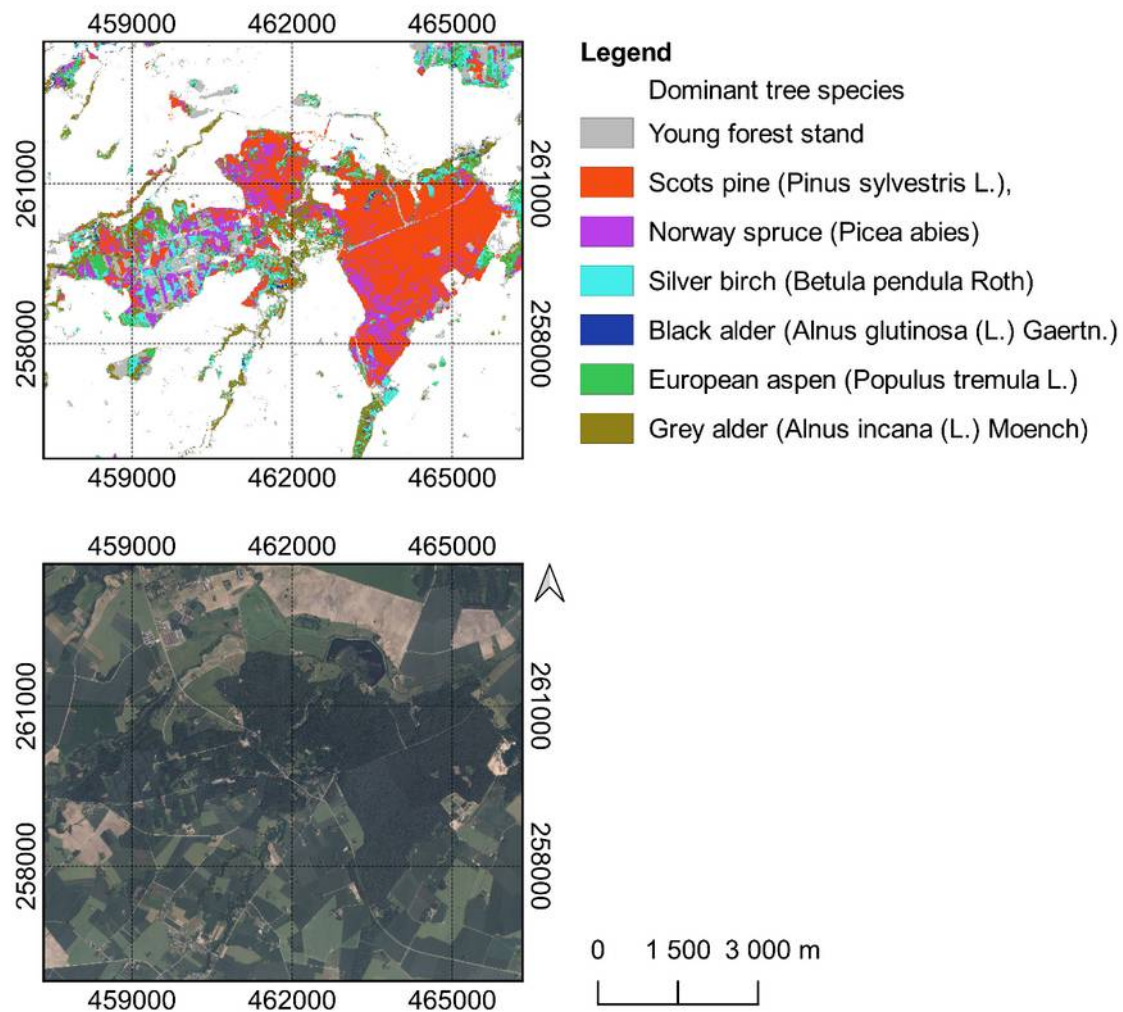
Tika sagatavoti divi primārie datu kopumi: meža/nemeža klasifikācijas kopa (24134 paraugi) un sugu līmeņa klasifikācijas kopa (6194 paraugi). Sezonālie Sentinel-2 kompozīti (pavasaris, vasara, rudens, 2024. gads) izveidoti, izmantojot s2cloudless algoritmu, radot 10 m horizontālās izšķirtspējas mozaīkas, kas satur vidējo atstarošanas vērtību pa 12 spektrālajām joslām. Katrs punkts tika ņemts paraugā visos spektrālajos slāņos un papildināts ar vides prognozētājiem, tostarp reljefa datiem, slīpumu, normalizēto augstumu, kontinentalitāti, gruntsūdens līmeņa dziļumu (DTW) un mitruma indeksiem (WAM).

Zemes seguma un sugu klasifikācijas modelētas R vidē, izmantojot xgbTree algoritmu Caret bibliotēkas ietvaros, piemērojot 80/20 treniņdatu kopas un validācijas datu kopas sadalījumu. Sugu prognozes vēlāk tika izmantotas kā kategoriski prognozētāji oglekļa modelēšanā.

Virszemes oglekļa modeļi izveidoti, apvienojot MRM parauglaukumu datus ar ALS atvasinātiem strukturāliem rādītājiem no abiem ALS pārklājumiem. Tika izmantoti tikai tie MRM parauglaukumu dati, kas izmērīti ± 2 gadu laikā pēc ALS iegūšanas. Oglekļa modeļa apmācīšanai, kas balstās uz pirmo ALS pārklājumu izmantoti 4644 MRM parauglaukumi, savukārt modelim, kas balstās uz otro ALS ciklu, izmantots 531 parauglaukums. ALS punktu mākoņi normalizēti un apstrādāti, izmantojot FUSION, lai iegūtu vainaga augstuma rādītājus (P50–P99, vidējais augstums, augstuma dispersija). Katram parauglaukumam tika pievienoti vides mainīgie (DTW, WAM, DEM, kontinentalitāte) un prognozētās dominējošās sugas. Virszemes ogleklis ($t\ ha^{-1}$) modelēts, izmantojot xgbTree ar 80/20 treniņa-testa sadalījumu. Modeļa precizitāte novērtēta, izmantojot RMSE, MAE un R^2 , un galīgās prognozes telpiski kartētas visā Latvijā, izmantojot ALS atkarīgos modeļa ievades datus.

Meža maskas klasifikācija. Izmantojot sezonālās Sentinel-2 mozaīkas un xgbTree algoritmu, tika ģenerēta nacionāla 10 m meža maska. Pēc klašu līdzsvarošanas ar upSampling un modeļa apmācības 80% paraugu (8000 punkti katrā klasē), šķērsvalidācija identificēja optimālos parametrus max_depth = 4 un nrounds = 500. Iegūtais zemes seguma klasifikators sasniedza kopējo precizitāti 0,95 un Kappa 0,92. Meža platības tika klasificētas ar precizitāti 0,96, savukārt lauksaimniecības zeme un ūdenstilpes sasniedza attiecīgi 0,98 un 0,91. Mitrāji bija sarežģītāki spektrālās pārklāšanās dēļ ar mitrajām mežaudzēm, sasniedzot precizitāti 0,57.

Koku sugu klasifikācija. Sugu klasifikācijas modeļa izveidei tika izmantoti kopumā 6174 meža parauglaukumi. Priedei, eglei un bērzam bija pieejamas vismaz 1000 augstas pakāpes tīraudzes, savukārt melnalksnim, baltalksnim un apsei bija mazākas paraugu kopas. Pēc augšupējās paraugu ņemšanas (*Upsampling*) treniņdatu kopā, lai līdzsvarotu klases (800 paraugi katrai sugai), optimālā modeļa konfigurācija bija max_depth = 3 un nrounds = 1000. Galīgais modelis sasniedza kopējo precizitāti 0,84 un Kappa 0,81. Priede (0,92) un jaunaudzes (0,88) uzrādīja visaugstāko klasēm raksturīgo precizitāti, savukārt baltalksnim bija viszemākā (0,69), kas atspoguļo tā spektrālo līdzību ar citām platlapju sugām (Tab. 11). Iegūtā 10 m sugu karte (Att. 18) nodrošina nepārtrauktas koku sugu prognozes visās meža teritorijās.



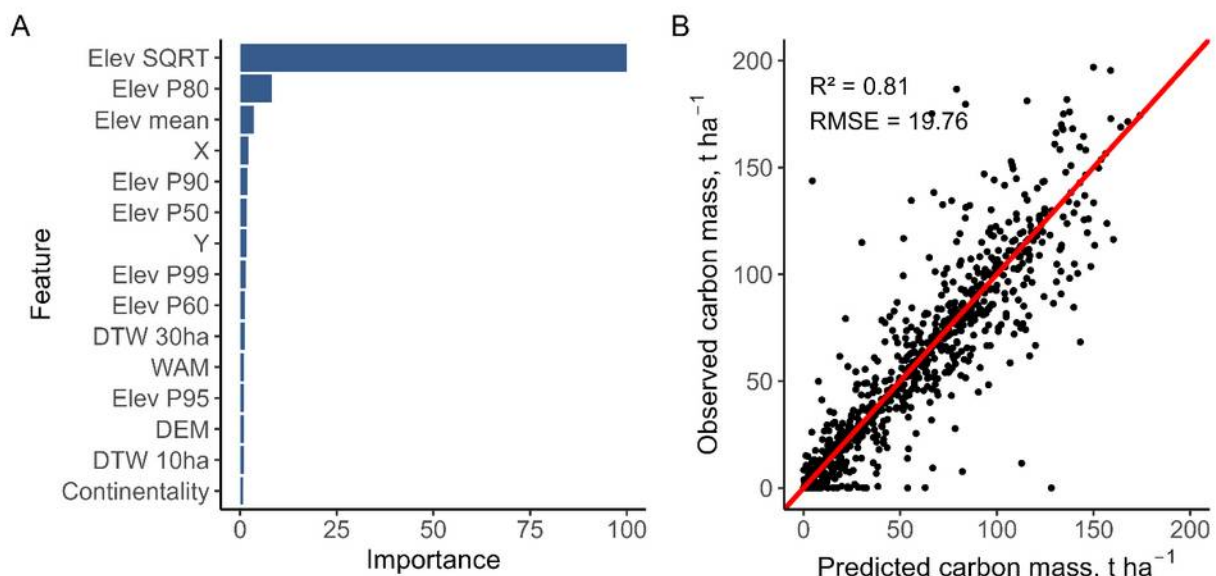
Att. 18. Dominējošo koku sugu kartes fragments.

Tab. 11. Koku sugu prognozēšanas precizitāte

Klase	Klases precizitāte
Jaunaudze	0,88
Priede (<i>Pinus sylvestris</i> L.)	0,92
Egle (<i>Picea abies</i> (L.) H. Karst.)	0,84
Bērze (<i>Betula pendula</i> Roth)	0,79
Melnalksnis (<i>Alnus glutinosa</i> (L.) Gaertn.)	0,79
Apse (<i>Populus tremula</i> L.)	0,80
Baltalksnis (<i>Alnus incana</i> (L.) Moench)	0,69

Virszemes oglekļa modelēšana. Virszemes oglekļa (AGC) daudzums tika aprēķināts, izmantojot 4644 MRM parauglaukumu datus, kas saistīti ar no ALS iegūtiem mežaudzes vainaga rādītājiem un vides prognozētājiem. Mašīnmācīšanās procesā izmantotie xgbTree modeļi, kas balstījās uz pirmā ALS pārklājumu uzrādīja spēcīgu paredzamo veikspēju AGC, sasniedzot RMSE = 19,76 t · ha⁻¹, R² = 0,81 un MAE =

12,91 t · ha⁻¹ (Att. 19). Mežaudzes vainagu strukturālie mainīgie dominēja modeļa nozīmīgumā: Kvadrātiskais ALS punktu augstums, 80. augstuma procentile (P80) un vidējais vainaga augstums bija spēcīgākie prognozētāji, kas atspoguļo augstu nobriedušu koku ietekmi uz oglekļa uzkrāšanos. Vides mainīgie, piemēram, dziļums līdz gruntsūdens līmenim, augstums virs jūras līmeņa, kontinentalitāte un prognozētās koku sugas, sniedza papildu skaidrojošo vērtību. Modelim, kas balstās uz nepilnajiem otrā ALS pārklājuma datiem prognožu precizitāte saistībā ar salīdzinoši zemo pārklājuma platību bija zemāka, attiecīgi RMSE = 27,23 t · ha⁻¹, R² = 0,59 un MAE = 20,01 t · ha⁻¹.



Att. 19. Vieszemes oglekļa prognožu modeļa novērtējums (pirmais ALS cikls)

Mūsu pētījums apstiprina, ka xgbTree sniedz skaidras priekšrocības virszemes oglekļa modelēšanā, pateicoties tā spējai uztvert sarežģītas, nelineāras mijiedarbības starp no ALS atvasinātiem prognozētājiem (Zhao u.c., 2009). Spēcīgākie prognozētāji mūsu modeļos bija strukturālie mežaudzes vainaga rādītāji, piemēram, vidējais augstums un augšējās procentiles augstuma vērtības (70.–80. procentile), kas atspoguļo vertikālo sarežģītību un tādējādi cieši korelē ar virszemes biomasas blīvumu (Heiskanen u.c., 2019; Zhang u.c., 2019). Tomēr, neskatoties uz šīm stiprajām pusēm, modelis, kas balstīts uz otro ALS pārklājumu, sasniedza ievērojami mazāku precizitāti (RMSE = 27,23 t ha⁻¹, R² = 0,59, MAE = 20,01 t ha⁻¹). Starptautiskos pētījumos bieži ziņots par R² vērtībām 0,70-0,90 virszemes oglekļa modelēšanai boreālajās sistēmās (Breidenbach, Waser, u.c., 2021; Mohd Zaki u.c., 2018), uzsverot, ka mūsu zemākos rezultātus mazāk nosaka metodoloģiskas problēmas un vairāk datu pieejamība.

Šie modelēšanas rezultāti joprojām ir vērtīgi valsts mēroga oglekļa monitoringam, kur uz ALS balstīti visaptveroši produkti arvien vairāk tiek iekļauti ES ZIZIMM ziņošanas un līdzīgās sistēmās (Choi u.c., 2023; Heinrich u.c., 2023; Park u.c., 2018). ALS

integrācija ar Sentinel-2 nodrošina veidu, kā apvienot augstas izšķirtspējas strukturālos datus ar biežām satelītu atkārtotām, ļaujot regulāri atjaunināt virszemes oglekļa kartes (Suárez-Fernández u.c., 2025). Tomēr joprojām pastāv galvenie ierobežojumi, tostarp ļoti augsta oglekļa satura parauglūkumu trūkums, mērena Sentinel-2 telpiskā izšķirtspēja, kas sarežģī dominējošo sugu noteikšanu jauktās audzēs, un pilnīgu atkārtotu ALS pārklājumu trūkums, kas tieši ietekmē virszemes oglekļa satura prognožu izmaiņu modelēšanu (Grabska-Szwagrzyk u.c., 2024; Strīmbu u.c., 2023).

Pētījumā, izmantojot Sentinel-2 mozaīkas, veiksmīgi izveidota detalizēta meža maska un dominējošo koku sugu meža karte, sasniedzot augstu klasifikācijas precizitāti (kopumā 95%, Kappa 0,92). Meža platības, tostarp kailcirtes un jaunaudzes, kartētas ar 96% precizitāti, savukārt dominējošo koku sugu klasifikācija sasniedza kopējo precizitāti 84% (Kappa 0,81). Visdrošāk tika identificētas priedes, egles un jaunaudzes, savukārt lapu koku audzes tika klasificēti ar zemāku precizitāti to lielākās spektrālās mainības un ierobežoto apmācības paraugu dēļ. Galīgā dominējošo koku sugu karte sastāvēja no septiņām klasēm, kas pārstāvēja dominējošās sugu grupas un jaunās/atjaunotās audzes.

Aerolāzerskenēšana bija galvenais prognozēšanas avots virszemes oglekļa novērtēšanā, un tādi rādītāji kā vidējais augstums un 70.–80. procentīlu augstumi pastāvīgi uzrādīja vispēcīgāko ietekmi uz modeļa veikspēju. Izmantojot pirmo nacionālo ALS kampaņu, xgbTree modelis sasniedza augstu prognozēšanas precizitāti ($R^2 \approx 0,80$; $RMSE \approx 18,7 \text{ t ha}^{-1}$; $MAE \approx 12,9 \text{ t ha}^{-1}$). Kad modelis piemērots, izmantojot otro ALS kampaņu, rezultāti bija ievērojami sliktāki ($R^2 = 0,59$; $RMSE = 27,23 \text{ t ha}^{-1}$; $MAE = 20,01 \text{ t ha}^{-1}$), visticamāk, atspoguļojot nepilnīgu nacionālo aptvērumu. Neskatoties uz šo samazinājumu, prognozes no abiem ALS datu kopumiem kopumā sekoja tendencei 1:1, ar sistemātisku nepietiekamu novērtēšanu audzēs ar lielu biomasu. Kopumā pirmā uz ALS balstītā modeļa spēcīgā veikspēja apstiprina xgbTree piemērotību liela mēroga virszemes oglekļa kartēšanai, savukārt otrās kampaņas samazinātā precizitāte uzsver konsekvētu iegūšanas standartu nozīmi valsts mežu monitoringā.

Meža apsaimniekošanas ietekmes uz SEG emisijām scenāriju un prognožu pārrēķini

2025. gadā netika definēti jauni pasākumu scenārijiem, taču sakarā ar SEG emisiju uzskaites metožu pilnveidošanu aktualizēts pasākumu ietekmes aprēķins, kā arī noteikts pasākumu aizstāšanas efekts enerģētikas sektorā un ietekme uz SEG emisijām lauksaimniecības sektorā.

Koksnes pelnu izmantošana meža mēslošanai

Pelnu izmantošana meža mēslošanai ir mežsaimniecības augsnes ielabošanas pasākums, kas galvenokārt paredzēts nabadzīgām minerālaugsnēm skujkoku (egles, priedes) un daļēji arī lapu koku audzēs. Ekonomiskais mērķis ir veicināt koksnes papildpieaugumu un palielināt apaļo kokmateriālu un meža biokurināmā iznākumu. Klimata mērķis ir palielināt CO₂ piesaisti meža zemēs, veicinot oglekļa uzkrājumu dzīvajā biomasā, zemsegā un koksnes produktos, kā arī nodrošinot papildu aizstāšanas efektu enerģētikas sektorā, aizstājot fosilos kurināmos ar ilgtspējīgu biokurināmo.

Pasākuma efektivitātes un izmaksu aprēķini balstīti uz vienas meža apsaimniekošanas aprites cikla ilgumu 60 gadiem, pieņemot, ka pelni tiek ievesti mežaudzē devā 3–5 t ha⁻¹ (atsevišķos gadījumos līdz 10 t ha⁻¹), ar iespējamu atkārtotu pielietojumu ik pēc 15–20 gadiem pēc kopšanas cirtēm. SEG emisiju balance vērtēta kā starpība starp pasākuma scenāriju (mēslošana ar koksnes pelniem) un bāzes scenāriju bez mēslošanas, ietverot CO₂ piesaistes pieaugumu koksne un augsne. Ekonomiskajā analīzē izmaksas uz 1 ha (pelnu sagatavošana, transportēšana un izkliešana, nepieciešamās analīzes) pārrēķinātas uz kopējo platību; šajā scenārijā pieņemts, ka pasākums tiek ieviests 21 500 ha platībā 5 gadu periodā, sākot ar 2026. gadu.

Meža augsnes ielabošana ar koksnes pelniem rada būtisku papildpieaugumu, kas vienā 60 gadu apsaimniekošanas ciklā var nodrošināt līdz aptuveni 60 t CO₂ ha⁻¹ papildu oglekļa uzkrājumu, galvenokārt koksnes biomasā. Vidēji tas atbilst aptuveni 1 t CO₂ ha⁻¹ gadā, taču faktiskais profils ir nevienmērīgs, jo lielākā daļa efekta realizējas vēlākās aprites fāzēs, kad audze sasniedz lielāku krāju. Papildus CO₂ piesaistei pelnu izmantošana var mazināt CH₄ un N₂O emisijas no augsnes, uzlabojot aerācijas apstākļus un stabilizējot slāpekļa apriti, lai gan Latvijā šobrīd nav pilnībā izstrādātas metodes šo efektu kvantitatīvai novērtēšanai inventarizācijas līmenī. Ja koksnes pelnu mēslošana tiek īstenota 21000 ha platībā, kumulatīvais SEG emisiju samazinājums vai papildu oglekļa uzkrājums 60 gadu periodā sasniedz aptuveni 1,29 milj. t CO₂. Šis efekts ir sasniedzams, nepalielinot mežizstrādes intensitāti uz citu zemes lietojuma kategoriju rēķina, bet uzlabojot ražību esošajās meža zemēs.

Pelnu izkliedēšanas izmaksas 2023. gada cenās ir ap 120 € ha⁻¹ vienai pielietošanas reizei, ieskaitot pelnu apstrādi un transportēšanu. Ieskaitot visu pasākuma īstenošanai nepieciešamo darbību kopumu vienā 60 gadu aprites ciklā, kopējās izmaksas uz 1 ha sasniedz aptuveni 400 € ha⁻¹. Galvenā tiešo izmaksu pozīcija ir pelnu izkliedēšana; papildus izmaksas ražošanas apstākļos veidotu lapotnes analīžu veikšana, lai novērtētu nodrošinājumu ar barības vielām. Pārreķinot uz 21000 ha scenāriju, kopējās investīcijas vienam apsaimniekošanas ciklam ir aptuveni 8,6 milj. €. Vienlaikus pasākums ģenerē būtiskus papildus ienākumus no palielinātā apaļkoksnes un meža biokurināmā iznākuma – tīrie ienākumi vienā aprites ciklā ir ap 3,7 tūkst. € ha⁻¹, kas kopā veido ap 79,6 milj. € papildus ienākumu minētajā platībā. Tātad neto ekonomiskais ieguvums (ieņēmumi mīnus izmaksas) ir aptuveni 71 milj. € vienā 60 gadu ciklā.

Ja vērtē tikai pasākuma izmaksas bez ienākumu salīdzināšanas, CO₂ piesaistes izmaksas uz 1 ha ir aptuveni 400 € par 60 t CO₂ jeb ap 7 € t⁻¹ CO₂. Šādā interpretācijā pasākums ir zemu izmaksu klimata pārmaiņu mazināšanas instruments. Ņemot vērā arī papildus ienākumus no koksnes un biokurināmā pārdošanas, SEG emisiju samazinājuma vienības izmaksas kļūst negatīvas, t. i., pasākums sniedz finanšu ieguvumu. Aprēķinot (izmaksas – ieņēmumi) uz vienu samazināto CO₂ tonnu 21 500 ha scenārijam, iegūstamas aptuveni –55 € t⁻¹ CO₂, kas raksturo šī pasākuma augsto izmaksu efektivitāti.

Koksnes pelnu izmantošana mežā veicina barības elementu (īpaši fosfora un kālija) atgriešanos ekosistēmā, samazina augsnes paskābināšanos un uzlabo augšanas apstākļus nabadzīgās minerālaugsnēs. Tas var izraisīt izmaiņas zemsedzes veģetācijas struktūrā un īslaicīgu CO₂ emisiju palielinājumu no augsnes, kas saistīts ar paaugstinātu mikrobioloģisko aktivitāti, tomēr ilgtermiņā šis efekts tiek kompensēts ar lielāku oglekļa uzkrājumu koksnē un augsnē. No vides riskiem jāņem vērā smago metālu saturs pelnos un nepieciešamība ievērot normatīvos ierobežojumus, kā arī pareizu devu izvēli, lai izvairītos no pārmēru straujas ķīmisko īpašību maiņas.

Enerģētikas sektorā pasākums veicina aprites ekonomiku: katlumāju pelni no biokurināmā sadedzināšanas tiek izmantoti kā mēslojums, samazinot pelnu deponēšanas izmaksas un vienlaikus palielinot nākotnē pieejamo biokurināmā apjomu ražīgāku mežaudžu dēļ. Tādējādi pasākums palielina atjaunojamo energoresursu pieejamību ilgtermiņā. Lauksaimniecības sektoram pasākums tieši nekonkurē par zemes resursiem (atšķirībā no meža ieaudzēšanas lauksaimniecības zemēs), gluži pretēji – palielinot koksnes ieguvu uz esošajām meža platībām, tas mazina spiedienu pārvērst lauksaimniecībā izmantojamo zemi mežā klimata mērķu sasniegšanai. Potenciāli var mazināties pelnu pieejamība lauksaimniecības zemju kalķošanai, taču Latvijas apstākļos šobrīd galvenā problēma ir pelnu kā atkrituma apsaimniekošana, nevis pelnu deficīts.

Kopsavilkums. Koksnes pelnu izmantošana meža mēslošanai ir tehnoloģiski viegli realizējams un klimata ziņā efektīvs pasākums, kas ļauj palielināt CO₂ piesaisti meža ekosistēmās par aptuveni 60 t CO₂ ha⁻¹ 60 gadu aprites ciklā un nodrošina būtisku

papildu koksnes un biokurināmā iznākumu. Izmaksas uz 1 ha ir salīdzinoši nelielas (ap 400 € ha⁻¹ aprites ciklā), savukārt neto ienākumi un negatīvās CO₂ vienības izmaksas norāda, ka pasākums ir ekonomiski pievilcīgs gan meža īpašniekiem, gan enerģētikas sektoram. Pasākumu ieteicams prioritāri īstenot nabadzīgās skujkoku audzēs ar minerālaugsnēm, kur papildpieauguma potenciāls ir vislielākais un kur pelnu ieneses ietekme uz produktivitāti un biokurināmā pieejamību ir izteiktākā. Vienlaikus nepieciešama stingra kvalitātes kontrole (pelnu ķīmiskais sastāvs, devas un sadales vienmērīgums) un regulāra monitoringa sistēma, lai kvantitatīvi vērtētu pasākuma ietekmi uz SEG emisijām, augsnes īpašībām un ekosistēmu ilgtspēju.

Minerālmēslojuma izmantošana meža mēslošanai

Minerālmēslojuma izmantošana mežā ir meža augsnes ielabošanas pasākums, kas galvenokārt paredzēts nabadzīgām minerālaugsnēm skujkoku (īpaši egles un priedes) un daļā lapu koku audžu, kurās augšanas apstākļus ierobežo barības elementu trūkums. Ekonomiskais mērķis ir palielināt koksnes pieaugumu un kokmateriālu ražu uz jau esošajām meža platībām, tādējādi uzlabojot mežsaimniecības rentabilitāti. Klimata mērķis ir palielināt CO₂ piesaisti meža ekosistēmā, veicinot oglekļa uzkrājumu dzīvajā biomasā un koksnes produktos, kā arī netieši palielinot potenciāli pieejamo biokurināmā apjomu enerģētikas sektoram.

Pasākuma efektivitātes un izmaksu aprēķini balstīti uz vienas meža apsaimniekošanas aprites ciklu 60 gadu garumā. Aprēķinos pieņemts, ka minerālmēslojums tiek iestrādāts mežaudzē vienreiz, agrīnā vai vidējā vecumā, izmantojot tipisku devu, kas pielāgota konkrētajam meža tipam un augsnes auglībai. SEG emisiju bilance noteikta kā starpība starp pasākuma scenāriju (egles audze ar minerālmēslojumu) un bāzes scenāriju bez šāda mēslošanas pasākuma, ietverot CO₂ piesaistes izmaiņas koksnes biomasā un koksnes produktos. Kopējais emisiju samazinājums vienā 60 gadu aprites ciklā tiek izteikts kā kumulatīvs efekts uz 1 ha un tālāk pārrēķināts uz kopējo plānoto ieviešanas platību – 21500 ha, pieņemot, ka pasākums tiek ieviests pakāpeniski 5 gadu periodā, sākot ar 2026. gadu.

Aprēķini rāda, ka minerālmēslojuma izmantošana mežā nodrošina mērenu, bet stabilu klimata pārmaiņu mazināšanas efektu. Neto SEG emisijas pasākuma scenārijā ir ap -2,1 t CO₂ ekv. ha⁻¹ gadā salīdzinājumā ar bāzes scenāriju, kas atspoguļo lielāku oglekļa piesaisti koksnes biomasā. Kumulatīvais SEG emisiju samazinājums 60 gadu periodā, iekļaujot koksnes produktus, sasniedz aptuveni 21 t CO₂ ekv. ha⁻¹, kas vidēji atbilst ap 0,35 t CO₂ ekv. ha⁻¹ gadā. Šis efekts ir koncentrēts uz periodu, kad mēslošanas rezultātā palielinātais pieaugums visvairāk ietekmē krāju un ciršanas apjomu. Pārrēķinot uz 21500 ha platību, kumulatīvais SEG emisiju samazinājums neskaitot aizstāšanas efektu enerģētikā sasniedz aptuveni 451500 t CO₂ ekv. 60 gadu laikā.

Minerālmēslojuma izmaksas ietver mēslojuma iegādi, transportēšanu un izkliedēšanu mežaudzē. Aprēķinos kopējās izmaksas uz 1 ha ir 420 € vienam mēslošanas ciklam, un šīs izmaksas koncentrējas pasākuma ieviešanas sākuma posmā. Nav iekļauti tiešie ieņēmumi no papildu koksnes ieguves, tādēļ ekonomiskā analīze atspoguļo konservatīvu skatījumu, kur pasākums tiek vērtēts kā “tīrs” klimata pārmaiņu mazināšanas instruments bez tirgus ienākumu integrēšanas. Pārrēķinot uz 21500 ha scenāriju, kopējās investīcijas vienam aprites ciklam sasniedz aptuveni 9,03 milj. €.

CO₂ vienības izmaksas minerālmēslojuma izmantošanas gadījumā ir relatīvi zemas. Dalot kopējās izmaksas uz 1 ha ar kumulatīvo SEG emisiju samazinājumu 21 t CO₂ ekv. ha⁻¹, iegūst, ka pasākuma izmaksas bez diskontēšanas ir aptuveni 20 € t⁻¹ CO₂ ekv. Diskontējot naudas plūsmu, SEG emisiju samazinājuma izmaksas pakāpeniski samazinās – pie 2,5–10% diskonta likmes tās svārstās aptuveni 15–19 € t⁻¹ CO₂ ekv. Tas ļauj klasificēt minerālmēslojuma izmantošanu mežā kā izmaksu ziņā efektīvu klimata pārmaiņu mazināšanas pasākumu, īpaši salīdzinot ar citām nozarēm raksturīgajām emisiju samazināšanas izmaksām.

No vides aspektu viedokļa minerālmēslojums līdzīgi kā koksnes pelni uzlabo barības elementu nodrošinājumu, veicina koku pieaugumu un palielina oglekļa piesaisti. Tomēr atšķirībā no pelniem, kas atgriež ekosistēmā sadedzinātajos biokurināmā resursos esošās minerālvielas, minerālmēslojums ir ārējs resursu avots, kura ražošana pati par sevi saistīta ar SEG emisijām un energoresursu patēriņu. Turklāt slāpekļa mēslojuma izmantošana var palielināt N₂O emisiju risku un potenciāli veicināt barības vielu noplūdi ūdeņos, ja mēslojums tiek lietots pārmērīgās devās vai nepiemērotos apstākļos. Tādēļ pasākums būtu īstenojams tikai tur, kur sagaidāms izteikts pieauguma pieaugums un kur iespējams nodrošināt labu apsaimniekošanas praksi, ierobežojot negatīvos blakus efektus.

Enerģētikas sektorā minerālmēslojuma izmantošana netieši palielina atjaunojamās biomasas potenciālu, jo ražīgāku mežaudžu dēļ ilgtermiņā pieaug gan apaļkoksnes, gan meža biokurināmā resursu pieejamība. Šis pieaugums aprēķinos tieši netiek atspoguļots kā aizstāšanas efekts, tomēr praktiskā apsaimniekošanā tas var dot papildu piensumu fosilo kurināmo aizstāšanai. Lauksaimniecības sektoram pasākums nekonkurē par zemes resursiem, jo tiek īstenots uz jau esošajām meža platībām. Palielinot koksnes iznākumu uz meža zemēm, samazinās nepieciešamība veidot jaunas meža platības uz lauksaimniecības zemju rēķina klimata politikas mērķu sasniegšanai, tādējādi mazinot potenciālos konfliktus starp biomasas ražošanu enerģijai, pārtikas ražošanu un citiem lauksaimniecības uzdevumiem. Vienlaikus nelielā mērā var palielināties konkurence par minerālmēslojuma resursiem starp mežsaimniecību un lauksaimniecību, tomēr Latvijas apstākļos šobrīd būtiskāks ierobežojums ir ekonomiskā motivācija un vides regulējums, nevis mēslojuma fiziskais deficīts.

Kopsavilkums. Minerālmēslojuma izmantošana mežā ir mērens, bet salīdzinoši lēts klimata pārmaiņu mazināšanas pasākums, kas vienā 60 gadu aprites ciklā nodrošina

kumulatīvu SEG emisiju samazinājumu aptuveni 21 t CO₂ ekv. ha⁻¹ un kopējo emisiju samazinājumu ap 451500 t CO₂ ekv. 21 500 ha platībā. Kopējās izmaksas 420 € ha⁻¹ un CO₂ vienības izmaksas ap 20 € t⁻¹ CO₂ ekv. norāda, ka pasākums ir izmaksu ziņā efektīvs un piemērots iekļaušanai ZIZIMM sektora klimata politikas pasākumu portfelī, īpaši nabadzīgās minerālaugsnes, kur minerālmēslu ietekme uz pieaugumu ir nozīmīga. Lai nodrošinātu ilgtspējīgu ietekmi, nepieciešama rūpīga devu plānošana, vides risku izvērtēšana un monitorings, iekļaujot gan augsnes un ūdeņu kvalitātes, gan SEG emisiju ilgtermiņa novērtējumu.

Hidroloģiskā režīma uzlabošana mežos ar pārmitrām minerālaugsnēm

Hidroloģiskā režīma uzlabošana mežos ar pārmitrām minerālaugsnēm ir mežsaimniecības pasākums, kura mērķis ir samazināt pārmērīgu augsnes piesātinājumu ar ūdeni un stabilizēt gruntsūdens līmeni optimālā diapazonā koku augšanai. Tas ietver esošo meliorācijas sistēmu atjaunošanu, grāvju tīrīšanu, lokālu grāvju izbūvi, caurteku un citu inženiertehnisko elementu ierīkošanu, kas uzlabo ūdens novadi, vienlaikus saglabājot pietiekamu mitrumu meža ekosistēmas funkcionēšanai. Pasākuma ekonomiskais mērķis ir palielināt koksnes ražību un uzlabot resursu pieejamību pārmitros nogabalos, savukārt klimata mērķis ir palielināt CO₂ piesaisti dzīvajā biomasā un koksnes produktos, kā arī stabilizēt oglekļa apriti augsnē.

Pasākuma efektivitātes un izmaksu analīze balstīta uz meža apsaimniekošanas aprites ciklu 60 gadu garumā, pieņemot, ka hidroloģiskā režīma sakārtošana tiek veikta cikla sākumā vai pirmajās desmitgadēs un turpmāk uzturēta ar periodisku grāvju tīrīšanu. SEG emisiju balance tiek vērtēta kā starpība starp pasākuma scenāriju (hidroloģiski sakārtots pārmitrs mežs uz minerālaugsnes) un bāzes scenāriju (turpinās pārmitri apstākļi ar pazeminātu pieaugumu un periodisku skābekļa deficītu sakņu zonā). Aprēķinos ietverta CO₂ piesaistes izmaiņa koksnes biomasā un koksnes produktos, kā arī netiešas izmaiņas augsnes GHG plūsmās, kas saistītas ar aerācijas uzlabošanu.

Hidroloģiskā režīma uzlabošana pārmitrās minerālaugsnēs palielina koku pieaugumu, mazina nokaltušu koku īpatsvaru un samazina sakņu bojājumus, kas raksturīgi ilgstoši pārmēru mitriem apstākļiem. Tā rezultātā viena apsaimniekošanas cikla laikā veidojas būtiski lielāks oglekļa uzkrājums koksnes biomasā un attiecīgi arī koksnes produktos. Kumulatīvi tas izpaužas kā vairāku desmitu t CO₂ ekv. ha⁻¹ SEG emisiju samazinājums 60 gadu periodā, salīdzinot ar stāvokli, kad hidroloģiskais režīms netiek uzlabots. Efekts nav lineārs laikā – pieauguma pieaugums ir izteiktāks vidējā un vēlīnā aprites posmā, kad audze sasniedz lielāku krāju un realizējas paaugstinātā pieauguma potenciāls. Atkarībā no īstenošanas mēroga šis efekts, pārrēķinot uz kopējo pasākuma platību, nodrošina ievērojamu kumulatīvu SEG emisiju samazinājumu ZIZIMM sektorā.

Ekonomiskajā analīzē hidroloģiskā režīma uzlabošanas izmaksas uz 1 ha ietver projektēšanu, būvdarbus (grāvju rakšana vai tīrīšana, caurteku izbūve, piebraucamo ceļu lokāla uzlabošana), kā arī turpmāko uzturēšanu. Šīs izmaksas koncentrējas pasākuma īstenošanas sākumposmā, savukārt ieguvumi – palielināts pieaugums, labāka piekļuve cirsām, mazāki mežizstrādes izdevumi un augstāka koksnes raža – izpaužas pakāpeniski visa aprites cikla garumā. Pārreķinot izmaksas un oglekļa efektu uz CO₂ vienības izmaksām, pasākums atbilst zemu līdz vidēju izmaksu klimata pārmaiņu mazināšanas pasākumiem: kumulatīvās izmaksas uz 1 ha sadalītas ar kumulatīvo SEG emisiju samazinājumu dod rādītāju, kas ir salīdzināms vai zemāks par daudzām alternatīvām iespējām citos sektoros. Ja tiek ņemti vērā arī papildu ienākumi no palielinātās koksnes ražas, SEG samazinājuma izmaksas var būt ļoti zemas vai pat negatīvas, norādot, ka pasākums ir ekonomiski pievilcīgs arī bez specifiska klimata atbalsta instrumenta.

Hidroloģiskā režīma uzlabošanai ir virkne papildu vides un sociālekonomisku efektu. No pozitīvajiem aspektiem jāmin mežaudžu vitalitātes pieaugums un augstāka noturība pret vējgāzēm. Sakārtots hidroloģiskais režīms samazina ilgstoša skābekļa deficīta un toksisku reducēto savienojumu veidošanās risku sakņu zonā, tādējādi stabilizējot oglekļa apriti un barības elementu izmantošanu. Tomēr jāņem vērā, ka pārmērīga gruntsūdens līmeņa pazemināšana var palielināt organiskās vielas mineralizāciju un CO₂ emisijas no augsnes, īpaši nogabalos ar biežāku organisko vielu kārtu. Tādēļ pasākums jāplāno tā, lai ūdens līmenis tiktu regulēts līdz optimālam, nevis ekstremāli sausam stāvoklim, un nepieciešamības gadījumā jāizmanto ūdens regulācijas elementi, kas ļauj elastīgi pārvaldīt noteci.

Enerģētikas sektoram hidroloģiskā režīma uzlabošana pārmitros mežos dod netiešu, bet nozīmīgu ieguvumu – lielāku un stabilāku koksnes un meža biokurināmā pieejamību. Palielinātais pieaugums, kā arī uzlabotā pieejamība (īpaši ziemas periodā) ļauj efektīvāk izmantot esošo meža fondu biomasas ieguvei, nepalielinot meža platības uz citu zemes lietojuma kategoriju rēķina. Līdz ar to pasākums stiprina atjaunojamo energoresursu bāzi un veicina fosilo kurināmo aizstāšanu ilgtermiņā. Lauksaimniecības sektoram šis pasākums tieši nekonkurē par zemes resursiem, jo tiek īstenots uz jau mežā esošām minerālaugsnēm. Tomēr baseinu līmenī hidroloģiskā režīma izmaiņas mežos var ietekmēt virszemes un gruntsūdeņu plūsmu režīmu, kas savukārt var ietekmēt mitruma režīmu lauksaimniecības zemēs – daļā gadījumu tos uzlabojot (mazāks applūšanas risks), daļā – mainot plūdu pīķu dinamiku. Tādēļ pasākums jāintegrē kompleksā baseinu mēroga ūdens apsaimniekošanas plānošanā.

Kopsavilkums. Hidroloģiskā režīma uzlabošana mežos ar pārmitrām minerālaugsnēm ir mežsaimniecības pasākums, kas ļauj stabilizēt augsnes mitruma apstākļus, palielināt koku pieaugumu un uzkrāto oglekļa daudzumu biomasā un koksnes produktos. Kumulatīvais SEG emisiju samazinājums uz 1 ha ir mērāms vairākos desmitos t CO₂ ekv. vienā 60 gadu aprites ciklā, savukārt izmaksas uz CO₂ vienību ir zemas vai vidējas,

īpaši, ja ņem vērā papildu ienākumus no palielinātās koksnes ražas. Pasākumu ieteicams prioritāri īstenot nogabalos, kur hidroloģiskais režīms pašlaik būtiski ierobežo pieaugumu, vienlaikus izvairoties no pārmērīgas nosusināšanas un ņemot vērā baseinu mēroga ūdens apsaimniekošanas un dabas aizsardzības prasības. Integrēts plānojums un monitorings ir būtiski priekšnoteikumi, lai nodrošinātu gan klimata, gan ekonomisko un ekosistēmu ieguvumu ilgtspēju.

Mazvērtīgo lapu koku audžu nomaiņa

Mazvērtīgo lapu koku audžu nomaiņa ir meža resursu kvalitātes uzlabošanas pasākums, kas paredzēts mazražīgām vai strukturāli degradētām bērza, apšu, baltalkšņa un citu lapu koku audzēm, kuras nespēj nodrošināt ilgtspējīgu koksnes ražu un oglekļa uzkrājumu. Esošās audzes tiek nocirstas un aizstātas ar produktīvām skujkoku (piemēram, priedes, egles) vai kvalitatīvām lapu koku audzēm, kas labāk atbilst konkrētā augšanas apstākļa potenciālam. Ekonomiskais mērķis ir palielināt koksnes ražu un ieņēmumus no mežsaimniecības, savukārt klimata mērķis – būtiski palielināt ilgtermiņa CO₂ piesaisti biomasā un koksnes produktos, vienlaikus nodrošinot ievērojamu biokurināmā un apaļkoksnes resursu pieejamības pieaugumu.

Pasākuma efektivitātes un izmaksu aprēķini balstīti uz pilnu meža apsaimniekošanas aprites ciklu (ap 60 gadi), salīdzinot divus scenārijus: bāzes scenāriju, kur mazvērtīgā lapu koku audze turpina attīstīties bez būtiskām uzlabošanas darbībām, un projekta scenāriju, kur audze tiek nocirsta un atjaunota ar augstražīgu sugu sastāvu. SEG emisiju bilance tiek vērtēta kā kumulatīva CO₂ ekv. starpība starp šiem scenārijiem, iekļaujot oglekļa uzkrājumu mežaudzē, koksnes produktos un daļēji arī augsnē, kā arī ņemot vērā īstermiņa emisijas no ciršanas atliekām. Ekonomiskajā analīzē uz 1 ha tiek iekļautas ciršanas, sagatavošanas, augsnes sagatavošanas, stādāmā materiāla, stādīšanas un agrotehniskās kopšanas izmaksas, kas pēc tam, izmantojot naudas plūsmas aprēķinu, tiek pārrēķinātas uz kopējo plānoto pasākuma platību un visa aprites cikla garumu.

No klimata skatpunkta mazvērtīgo lapkoku audžu nomaiņa nodrošina salīdzinoši lēnāku, bet ļoti nozīmīgu kumulatīvu SEG emisiju samazinājumu. Pēc īstermiņa emisiju palielinājuma ciršanas un atlieku sadalīšanās posmā, augstražīgās audzes pieaugums nodrošina strauju oglekļa uzkrājuma pieaugumu stumbrā un saknēs, kā arī attiecīgajos koksnes produktos. Kumulatīvi viena aprites cikla laikā oglekļa uzkrājums projektā scenārijā pārsniedz bāzes scenāriju par vairākām desmitām līdz virs simt t CO₂ ekv. ha⁻¹, atkarībā no sākotnējās audzes stāvokļa un izvēlētajām mērķsugām. Pārrēķinot šo efektu uz visu pasākuma ieviešanas platību, iegūstama būtiska SEG emisiju samazināšana ZIZIMM sektorā, kas salīdzināma ar intensīviem meža ražības uzlabošanas pasākumiem.

Ekonomiski mazvērtīgo audžu nomaiņa ir kapitālietilpīgs pasākums ar lielām sākotnējām izmaksām un ieguvumiem, kas realizējas vēlākā aprites posmā. Izmaksas uz

1 ha ietver ne tikai mežizstrādi, bet arī kvalitatīva stādāmā materiāla iegādi, augšes sagatavošanu, stādīšanu un kopšanu pirmajos gados. Naudas plūsmas aprēķinos šīs izmaksas tiek salīdzinātas ar sagaidāmajiem ieņēmumiem no paaugstinātās koksnes krājas, virzot koksni gan uz augstvērtīgiem zāgmateriāliem, gan enerģētiku. Rezultātā čirīie ienākumi projektā scenārijā ievērojami pārsniedz bāzes scenāriju, un vienas t CO₂ ekv. samazinājuma izmaksas, ņemot vērā diskontētas naudas plūsmas, saglabājas vidējā vai pat zemā līmenī. Ja aprēķinos pilnībā iekļauj papildu ienākumus, SEG emisiju samazinājuma vienības izmaksas var būt ļoti zemas vai negatīvas, kas norāda uz augstu izmaksu efektivitāti.

Mazvērtīgo lapkoku audžu nomaiņai piemīt vairākas būtiskas blakus ietekmes. No ekoloģiskā viedokļa pasākums var samazināt noteiktu sugu un biotopu daudzveidību, īpaši, ja tiek aizstātas dabiskas vai daļēji dabiskas lapu koku audzes, tādēļ pasākums jāīsteno selektīvi, izvairoties no augstas dabas vērtības platībām. Vienlaikus izteikti degradētu, pāraugušu un slikti atjaunotu audžu nomaiņa var uzlabot meža veselības stāvokli, samazināt bojāto koku īpatsvaru, palielināt pretestību kaitēkļiem un vējgāzēm. Oglekļa bilances ziņā nozīmīga ir arī koksnes izmantošanas struktūra – jo lielāka daļa jaunradītās koksnes nonāk ilgdzīvojošos produktos un enerģētikā, jo spēcīgāks ir klimata pārmaiņu mazināšanas efekts.

Enerģētikas sektorā šis pasākums sniedz būtisku pienesumu. Mazvērtīgo audžu nomaiņas cīsmās iegūtā koksne (īpaši zemas kvalitātes apaļkoksne un zari) tiek izmantota kā biokurināmais, tieši aizstājot fosilos kurināmos. Turpmākajā apsaimniekošanas periodā augstražīgās audzes nodrošina lielāku biokurināmā ieguvu uz hektāru, palielinot atjaunojamo energoresursu pieejamību. Lauksaimniecības sektoram pasākums tieši nekonkurē par zemes resursiem, jo tiek īstenots esošajās meža zemēs. Palielinot koksnes un enerģētiskās biomasas iznākumu uz meža platībām, tiek mazināta nepieciešamība papildus ieaudzēt mežu uz lauksaimniecības zemes klimata mērķu sasniegšanai, līdz ar to samazinot potenciālos konfliktus ar pārtikas un lopbarības ražošanas funkcijām.

Kopsavilkums. Mazvērtīgo lapkoku audžu nomaiņa ir stratēģisks mežsaimniecības klimata pārmaiņu mazināšanas pasākums, kas apvieno būtisku oglekļa piesaistes pieaugumu ar ilgtermiņa ekonomisko ieguvumu. Viena aprites cikla laikā tas nodrošina salīdzināmi lielu vai pat lielāku kumulatīvu SEG emisiju samazinājumu nekā mēslošanas pasākumi, bet pie augstākām sākotnējām izmaksām. Pasākumu ieteicams īstenot nogabalos, kur lapu koku audzes ir strukturāli degradētas un kur ir skaidrs ražības uzlabošanas potenciāls, izvairoties no augstas dabas vērtības platībām. Integrēts plānojums, HWP un enerģētiskās izmantošanas optimizēšana, kā arī ekoloģisko ierobežojumu ievērošana ir būtiski nosacījumi, lai pilnībā realizētu pasākuma klimata, ekonomisko un enerģētikas potenciālu.

Dabiskas, pārslapinātas meža ekosistēmas atjaunošana organiskās augsnēs lauksaimniecībā izmantojamās zemēs

Dabiskas, pārslapinātas meža ekosistēmas atjaunošana organiskās augsnēs lauksaimniecībā izmantojamās zemēs ir zemes izmantošanas maiņas pasākums, kurā meliorētas kūdras augsnes ar zemu lauksaimniecisko produktivitāti pakāpeniski tiek pārveidotas par mitriem mežiem (purvaiņiem). Praktiski tas nozīmē lauksaimnieciskās izmantošanas pārtraukšanu, meliorācijas sistēmu darbības ierobežošanu vai pārstrukturēšanu un meža veģetācijas attīstības veicināšanu, līdz hidroloģiskais režīms pietuvojās dabiskam pārslapinātas meža ekosistēmas stāvoklim. Ekonomiskais mērķis ir aizstāt zemas efektivitātes un augstu uzturēšanas izmaksu lauksaimniecisko izmantošanu ar stabilāku, uz mežsaimniecību un ekosistēmu pakalpojumiem balstītu ienākumu struktūru. Klimata mērķis ir būtiski mazināt CO₂ emisijas no meliorētām kūdras augsnēm, vienlaikus palielinot oglekļa uzkrājumu virszemes un pazemes biomasā un stabilizējot oglekļa krājumus kūdras slānī.

Pasākuma efektivitātes un izmaksu aprēķini veikti, izmantojot divus scenārijus: bāzes scenāriju ar turpmāku lauksaimniecisko izmantošanu organiskajās augsnēs un projekta scenāriju, kur šīs platības tiek pārveidotas par pārslapinātām meža ekosistēmām. Vienas platības ilgtermiņa SEG bilance modelēta 120 gadu periodam, aprēķinot kumulatīvo starpību starp abiem scenārijiem. Rezultāti rāda, ka vienā šādā ciklā SEG emisiju samazinājums, neskaitot aizstāšanas efektu, sasniedz aptuveni 248 t CO₂ ekv. ha⁻¹, kas vidēji atbilst ap 2,1 t CO₂ ekv. ha⁻¹ gadā. Aprēķinos pieņemtajā piemēra scenārijā, pasākumu pakāpeniski ieviešot 40000 hektāru organisko augšņu platībās 5 gadu periodā, sākot ar 2026. gadu, kumulatīvais SEG emisiju samazinājums 25 gadu periodā sasniedz ap 6,29 milj. t CO₂ ekv. valsts mērogā. Šajā gadījumā aizstāšanas efekts, kas saistīts ar biokurināmā izmantošanu, praktiski netiek ņemts vērā, un galvenais klimata ieguvums ir tieši CO₂ emisiju samazinājums no kūdras mineralizācijas.

Izmaksu struktūrā dominē hidroloģiskā režīma atjaunošanas un platību pārstrukturēšanas izmaksas. Tās var vairākkārtīgi atšķirties, atkarībā no lokālajiem apstākļiem. Vienai platībai kopējās tiešās izmaksas (meliorācijas sistēmu pārveidošana, hidrotehnisko būvju izveide vai aizdambēšana, apmežošanas un dabiskās atjaunošanās veicināšanas pasākumi, sākotnējais monitorings) sasniedz aptuveni 3,8 tūkst. € ha⁻¹ visā pasākuma ciklā. Valsts mērogā aprēķinu scenārijā kopējās investīcijas pasākuma ieviešanai laika posmā no 2026. līdz 2033. gadam sasniedz ap 151,4 milj. €, un šajā periodā netiek paredzēti būtiski tiešie tirgus ieņēmumi no koksnes ieguves, jo mērķis ir primāri klimata un ekosistēmu funkciju atjaunošana. Diskontējot naudas plūsmu un dalot ar kumulatīvo SEG emisiju samazinājumu, iegūst, ka SEG emisiju samazinājuma izmaksas ir aptuveni 30 € t⁻¹ CO₂ ekv. pie 0% diskonta un samazinās līdz ap 22 € t⁻¹ CO₂ ekv. pie 5% diskonta un ap 18 € t⁻¹ CO₂ ekv. pie 10% diskonta. Tādējādi pasākums klasificējams kā vidēju izmaksu, bet klimatiskā ziņā efektīvs SEG emisiju

samazināšanas instruments, īpaši ņemot vērā augsto emisiju fonu no meliorētām kūdras augsnēm.

No vides skatpunkta pasākums būtiski maina ekosistēmas struktūru un funkcijas. Pārslapinot organiskās augsnes, samazinās aerācijas dziļums un līdz ar to CO₂ emisijas no kūdras sadalīšanās, taču vienlaikus palielinās CH₄ emisiju potenciāls, īpaši vietās ar ilgstošu virszemes applūšanu. Modelēšanas rezultāti, kas integrē CO₂, CH₄ un N₂O plūsmas, parāda, ka kopējā SEG balance vidējā un ilgtermiņā ir pozitīva – CO₂ emisiju samazinājums no kūdras un oglekļa uzkrājums jaunizveidotajā meža biomasā kompensē iespējamo CH₄ emisiju pieaugumu. Papildus klimata efektam pasākums veicina hidroloģisko funkciju un bioloģiskās daudzveidības atjaunošanu, tai skaitā mitro mežu un pārejas purvu biotopu veidošanos, kas Latvijā ir īpaši nozīmīgi no dabas aizsardzības viedokļa.

No enerģētikas sektora skatpunkta dabiskas, pārslapinātas meža ekosistēmas atjaunošana nav orientēta uz maksimālu biomasas ieguvu, un aprēķinu scenārijā pa tiešo netiek iekļauts biokurināmā aizstāšanas efekts. Koksnes raža šādās ekosistēmās ir zemāka un nestabilāka nekā labi drenētās, efektīvi apsaimniekotās mežaudzēs, turklāt daļa biomasas tiek atstāta ekosistēmā oglekļa krājuma uzturēšanai un bioloģiskās daudzveidības nodrošināšanai. Tomēr noteiktos apsaimniekošanas modeļos (piemēram, paludikultūra ar baltalkšņa audzēm) ir iespējams veidot nelielu, bet stabilu biokurināmā plūsmu, nepārkāpjot klimata un ekosistēmu aizsardzības mērķus.

Lauksaimniecības sektoram šis pasākums nozīmē organisko augšņu lauksaimnieciskās izmantošanas pakāpenisku samazināšanu. Īstermiņā tas var radīt saražotās produkcijas kritumu attiecīgajās platībās un nepieciešamību ražošanu pārorientēt uz minerālaugsnēm ar būtiski zemākiem emisiju faktoriem. Vienlaikus tiek mazinātas meliorācijas uzturēšanas izmaksas, kā arī regulāras kaļķošanas minerālmēslojuma ieneses izmaksas). Ja klimata politikas un KLP instrumenti nodrošina adekvātu kompensāciju par organisko augšņu lauksaimnieciskās izmantošanas samazināšanu, pasākums zemes īpašniekiem kļūst ekonomiski pieņemams kā ilgtermiņa risinājums ar augstu klimata un ekosistēmu pakalpojumu pievienoto vērtību.

Kopsavilkums. Dabiskas, pārslapinātas meža ekosistēmas atjaunošana organiskajās augsnēs lauksaimniecībā izmantojamās zemēs ir stratēģisks klimata politikas pasākums, kas ļauj samazināt SEG emisijas no meliorētām kūdras augsnēm. Vienā ciklā tas nodrošina kumulatīvu emisiju samazinājumu ap 248 t CO₂ ekv. ha⁻¹, bet valsts mērogā aprēķinu scenārijā – ap 6,29 milj. t CO₂ ekv. 25 gadu periodā, ar kopējām investīcijām ap 151 milj. €. SEG emisiju samazinājuma izmaksas atkarībā no izvēlētajā diskonta likmes svārstās aptuveni 20–30 € t⁻¹ CO₂ ekv., kas klimata ziņā augsta efekta pasākumam ir uzskatāms par vidēju izmaksu līmeni. Pasākumu ieteicams fokusēt uz degradētām organiskajām augsnēm ar zemu lauksaimniecisko produktivitāti un augstu emisiju fonu, integrējot to ar dabas aizsardzības un ūdens apsaimniekošanas mērķiem un nodrošinot atbilstošus kompensācijas mehānismus lauksaimniecības sektoram.

Meža ieaudzēšana lauksaimniecībā izmantojamās zemēs ar organiskām augsnēm

Meža ieaudzēšana lauksaimniecībā izmantojamās zemēs ar organiskām augsnēm ir zemes izmantošanas maiņas pasākums, kurā nosusinātas kūdras augsnes ar zemu lauksaimniecisko produktivitāti tiek pārveidotas par meža zemēm. Praktiski tas nozīmē lauksaimnieciskās izmantošanas pārtraukšanu, meliorācijas sistēmu darbības pārstrukturēšanu un koku audžu izveidi, nodrošinot mežam raksturīgu veģetāciju uz organiskām augsnēm. Ekonomiskais mērķis ir aizstāt zemas atdeves lauksaimniecisko izmantošanu ar stabilāku, mežsaimniecībā balstītu ienākumu struktūru, savukārt klimata mērķis ir būtiski samazināt SEG emisijas no nosusinātām kūdras augsnēm un palielināt CO₂ piesaisti meža biomasā un koksnes produktos.

Pasākuma efektivitātes un izmaksu aprēķini balstīti uz ilgtermiņa modelēšanu līdz 120 gadiem, salīdzinot bāzes scenāriju, kur organiskā augsne turpina tikt izmantota lauksaimniecībā, ar projekta scenāriju, kur šī pati platība tiek apmežota. Alternatīvajā scenārijā neto SEG emisijas sasniedz 10,54 t CO₂ ekv. ha⁻¹ gadā, savukārt pasākuma scenārijā sākotnējos gados emisijas ir līdzīgā līmenī, bet audzei attīstoties tās pakāpeniski samazinās un vēlākā periodā pārvēršas par neto oglekļa piesaisti. Kumulatīvi 120 gadu periodā SEG emisiju samazinājums, neskaitot meža biokurināmā aizstāšanas efektu, sasniedz aptuveni 1607 t CO₂ ekv. ha⁻¹, bet kopā ar koksnes biokurināmā devumu – ap 1785 t CO₂ ekv. ha⁻¹. Vidēji tas atbilst aptuveni 13–15 t CO₂ ekv. ha⁻¹ gadā, kas ir būtiski augstāks klimata pārmaiņu mazināšanas efekts nekā lielākajai daļai pasākumu minerālaugsnēs.

Aprēķinu failā izmantotajā ieviešanas scenārijā pieņemts, ka pasākums tiek īstenots 40000 ha platībā, sadalot apmežojamo platību vienādās daļās piecu gadu periodā no 2026. gada (katru gadu apmežojot 8000 ha). Šādā gadījumā kumulatīvais SEG emisiju samazinājums 25 gadu periodā, neskaitot aizstāšanas efektu, sasniedz aptuveni 10,44 milj. t CO₂ ekv., bet kopā ar meža biokurināmā aizstāšanas efektu – 10,51 milj. t CO₂ ekv. Aizstāšanas efekta piensums ir aptuveni 70 tūkst. t CO₂ ekv. 25 gados, tātad galvenais klimata ieguvums saistīts tieši ar CO₂ emisiju samazinājumu no kūdras mineralizācijas un oglekļa uzkrājumu meža biomasā.

Izmaksu struktūrā dominē meliorācijas sistēmu pārveidošanas un apmežošanas izmaksas: grāvju aizdambēšana vai regulēšana, hidrotehnisko būvju izveide, augsnes sagatavošana, stādāmā materiāla iegāde un stādīšana, kā arī jaunizveidoto audžu agrotehniskā kopšana. Uz 1 ha nediskontētas kopējās izmaksas pilnā ilgtermiņa periodā sasniedz ap 21000 € ha⁻¹, jo daļa izmaksu (piemēram, nodokļi, apsaimniekošana) atkārtojas arī vēlākos gados, bet ieņēmumi – 58000 € ha⁻¹. Ja skatās uz 25 gadu periodu un dalot kopējās izmaksas ar pasākuma platību, diskontētā finanšu plūsma pie 0% diskonta likmes ir ap –1200 € ha⁻¹, pie 2,5% – ap –1600 € ha⁻¹ un pie 5% – ap –1700 €

ha⁻¹. Šie lielumi atspoguļo to, ka pasākums ir kapitālietilpīgs un ka finanšu ieņēmumi no koksnes ieguves šajā periodā ir ierobežoti.

SEG emisiju samazinājuma vienības izmaksas, ņemot vērā diskontēto naudas plūsmu 25 gadu periodā un kumulatīvo emisiju samazinājumu 10,44 milj. t CO₂ ekv., ir ap 4,8 € t⁻¹ CO₂ ekv. pie 0% diskonta, 6,1 € t⁻¹ CO₂ ekv. pie 2,5% un 6,7 € t⁻¹ CO₂ ekv. pie 5% diskonta likmes. Ja aprēķinā iekļauj arī koksnes biokurināmā aizstāšanas efektu, izmaksas nedaudz samazinās līdz aptuveni 4,7; 6,0 un 6,6 € t⁻¹ CO₂ ekv. attiecīgi. Šie rādītāji parāda, ka, neraugoties uz relatīvi lielām absolūtajām investīcijām, meža ieaudzēšana organiskajās lauksaimniecības zemēs ir izmaksu ziņā efektīvs klimata pārmaiņu mazināšanas pasākums, ja skatās uz vienu samazināto CO₂ ekvivalenta tonnu.

No klimata un vides viedokļa meža ieaudzēšana organiskajās augsnēs būtiski samazina CO₂ emisijas no kūdras sadalīšanās, vienlaikus veidojot virszemes un pazemes biomasas oglekļa rezerves. Atšķirībā no pārslapinātas meža ekosistēmas atjaunošanas šeit hidroloģiskais režīms tiek regulēts tā, lai nodrošinātu mežaudzes produktivitāti, kas var nozīmēt mazāku CO₂ emisiju samazinājumu no augsnēs nekā pilnīgas pārslapināšanas gadījumā, taču arī mazākas CH₄ emisijas un lielāku koksnes ražu un līdz ar to lielāku aizstāšanas potenciālu enerģētikā nākotnē. Tomēr mēreni mitrs, nevis dziļi drenēts režīms joprojām ļauj būtiski samazināt emisijas, salīdzinot ar intensīvu lauksaimniecisko izmantošanu uz nosusinātām kūdras augsnēm.

Enerģētikas sektorā pasākums vidējā un ilgtermiņā palielina atjaunojamo biomasas resursu piedāvājumu – mežaudžu kopšanas cirtēs un galvenajās cirtēs iegūtais koksnes biokurinamais dod papildu aizstāšanas efektu, kas aprēķinu scenārijā 25 gadu periodā sasniedz aptuveni 70 tūkst. t CO₂ ekv. Lai gan šis pienesums ir salīdzinoši neliels uz kopējā emisiju samazinājuma fona, tas stiprina enerģētiskās neatkarības un fosilo kurināmo aizstāšanas iespējas. Lauksaimniecības sektoram pasākums nozīmē organisko augšņu lauksaimnieciskās izmantošanas samazinājumu par 40000 ha, kas īstermiņā var radīt saražotās produkcijas kritumu šajās platībās un nepieciešamību ražošanu pārorientēt uz minerālaugsnēm ar mazākiem emisiju faktoriem. Tomēr tas arī samazina meliorēšanas un augsnēs ielabošanas un ir saskaņojams ar KLP un klimata politikas virzienu par emisiju mazināšanu organiskajās augsnēs.

Kopsavilkumā meža ieaudzēšana lauksaimniecībā izmantojamās zemēs ar organiskām augsnēm ir augsta klimata efektivitātes pasākums, kas vienā ilgtermiņa periodā nodrošina kumulatīvu SEG emisiju samazinājumu vairāk nekā 1600 t CO₂ ekv. ha⁻¹, bet 25 gadu periodā valsts mērogā – aptuveni 10,4 milj. t CO₂ ekv. ar vienības izmaksām ap 6,6-10,3 € t⁻¹ CO₂ ekv. Pasākumu ieteicams prioritāri īstenot degradētās, zemas produktivitātes organiskajās lauksaimniecības zemēs ar augstu emisiju fonu, integrējot to ar atbilstošiem kompensāciju un atbalsta instrumentiem lauksaimniekiem un sinhronizējot ar dabas aizsardzības un enerģētikas politikas mērķiem.

Meža ieaudzēšana lauksaimniecībā izmantojamās zemēs ar organiskām augsnēm

Meža ieaudzēšana mazāk vērtīgās lauksaimniecībā izmantojamās zemēs ar minerālaugsnēm ir zemes lietojuma maiņas pasākums, kurā zemas ražības aramzemes vai ilggadīgie zālāji tiek pārveidoti par meža zemēm. Praktiski tas nozīmē lauksaimnieciskās izmantošanas pārtraukšanu attiecīgajās platībās, augsnes sagatavošanu un mežaudžu ierīkošanu, izmantojot konkrētajam augšanas apstākļu tipam piemērotas koku sugas (parasti priedi, egli vai kvalitatīvus lapu kokus). Ekonomiskais mērķis ir aizstāt zemas atdeves lauksaimniecisko izmantošanu ar stabilāku, mežsaimniecībā balstītu ienākumu struktūru, savukārt klimata mērķis – palielināt CO₂ piesaisti biomasā un koksnes produktos, vienlaikus mazinot SEG emisijas no lauksaimnieciskās zemes apsaimniekošanas.

Pasākuma efektivitātes un izmaksu aprēķini veikti, salīdzinot bāzes scenāriju, kur mazvērtīgā lauksaimniecības zeme turpina tikt izmantota līdzšinējā veidā, ar projekta scenāriju, kur tā tiek apmežota. Modelēšana veikta 25 gadu periodam, kas izmantots kumulatīvās SEG bilances un ekonomisko rādītāju izvērtēšanai. Aprēķinu failā pieņemts, ka pasākums tiek ieviests 75000 ha platībā, vienmērīgi sadalot apmežošanu 5 gadu periodā, sākot ar 2026. gadu (katru gadu apmežojot 15000 ha). SEG emisiju bilance vērtēta kā starpība starp pasākuma scenāriju (egles audze uz minerālaugsnes) un bāzes scenāriju (zālājs uz minerālaugsnes), ietverot CO₂ plūsmas biomasā, augsnē un koksnes produktos, kā arī aizstāšanas efektu no biokurināmā izmantošanas.

Uz 1 ha pasākuma scenārijā neto SEG plūsma pēc apmežošanas kļūst negatīva, sasniedzot ap -1,9 līdz -3,4 t CO₂ ekv. ha⁻¹ gadā atkarībā no audzes vecuma, t.i., lauksaimniecībā izmantotā platība ar relatīvi nelielu emisiju fonu pārvēršas par pastāvīgu oglekļa piesaistes avotu. Kumulatīvi 25 gadu periodā SEG emisiju samazinājums, neskaitot aizstāšanas efektu, sasniedz aptuveni 257 t CO₂ ekv. ha⁻¹, bet kopā ar meža biokurināmā aizstāšanas efektu – ap 261 t CO₂ ekv. ha⁻¹. Pārreķinot uz kopējo scenārijā pieņemto platību 75000 ha, kumulatīvais emisiju samazinājums 25 gadu periodā ir aptuveni 19,3 milj. t CO₂ ekv. bez aizstāšanas efekta un ap 19,6 milj. t CO₂ ekv. ieskaitot biokurināmā devumu. Lielākā daļa šī efekta saistīta ar oglekļa uzkrājumu augošajās mežaudzes biomasā un koksnes produktos, savukārt augsnes SEG plūsmas uz minerālaugsnēm salīdzinoši ir nelielas un stabilas.

Izmaksu struktūrā dominē apmežošanas sākotnējās investīcijas – augsnes sagatavošana, stādāmā materiāla iegāde, stādīšana un agrotehniskā kopšana pirmajos gados – kā arī noteiktos termiņos paredzētie kopšanas pasākumi un mežsaimniecības operācijas. Uz 1 ha kopējās tiešās izmaksas pirmajā 25 gadu periodā sasniedz aptuveni 3716 € ha⁻¹, savukārt ieņēmumi no agrinām kopšanas cirtēm šajā pašā periodā ir ap 2487 € ha⁻¹. Līdz ar to neto izmaksas (izmaksas mīnus ieņēmumi) 25 gadu periodā veido ap 1229 € ha⁻¹. Pārreķinot uz 75 000 ha, kopējās investīcijas pasākuma ieviešanai pirmajos 25

gados sasniedz ap 278,7 milj. €, kopējie ieņēmumi – ap 186,5 milj. €, bet neto izmaksas – aptuveni 92,2 milj. €.

SEG emisiju samazinājuma vienības izmaksas, aprēķinot kā diskontēto neto izmaksu attiecību pret kumulatīvo emisiju samazinājumu uz 1 ha, ir salīdzinoši zemas. Pie 0% diskonta likmes tās ir ap 4,7 € t⁻¹ CO₂ ekv., pie 2,5% – ap 6,0 € t⁻¹ CO₂ ekv., pie 5% – ap 6,6 € t⁻¹ CO₂ ekv. Tas nozīmē, ka meža ieaudzēšana mazāk vērtīgās lauksaimniecības zemēs ar minerālaugsnēm ir zemu līdz vidēju izmaksu klimata pārmaiņu mazināšanas pasākums, kura SEG vienības izmaksas ir konkurētspējīgas salīdzinājumā ar daudziem emisiju samazināšanas pasākumiem enerģētikas un transporta sektorā.

No vides viedokļa pasākums nodrošina stabilu oglekļa uzkrājuma pieaugumu meža biomasā un koksnes produktos, vienlaikus veicinot arī augsnes oglekļa akumulatora lēnu palielināšanos, jo mežaudzēs parasti ir lielāka virszemes un sakņu atliekas, kas nonāk augsnē. Minerālaugsnēs CH₄ un N₂O emisiju plūsmas ir salīdzinoši zemas, līdz ar to kopējā SEG bilance ir labvēlīga un prognozējama. Jāņem vērā, ka zemes izmantošanas maiņa var ietekmēt bioloģisko daudzveidību, tādēļ pasākums jāplāno prioritāri mazvērtīgās un intensīvi apsaimniekotās lauksaimniecības zemēs, izvairoties no platībām ar augstām dabas vērtībām.

Enerģētikas sektoram pasākums vidējā un ilgtermiņā nodrošina papildu meža biokurināmā resursu avotu: kopšanas cirtēs un galvenajās cirtēs iegūtā zemas kvalitātes koksne un ciršanas atliekas tiek izmantotas kā biokurināmais, veidojot papildus aizstāšanas efektu fosilo kurināmo vietā (25 gadu periodā tas veido dažu simtu tūkstošu t CO₂ ekv. apmēru valsts mērogā). Vienlaikus pieaug augstvērtīgas apaļkoksnes iznākums, kas dod papildu ieņēmumus un palielina ilgdzīvojošo koksnes produktu oglekļa krājumus. Lauksaimniecības sektorā pasākums nozīmē mazāk vērtīgu lauksaimniecības zemju platību samazināšanu par 75 000 ha, kas īstermiņā var mazināt produkcijas apjomu šajās teritorijās, taču ilgtermiņā veicina ražošanas koncentrāciju uz auglīgākām, klimatiskā ziņā efektīvākām minerālaugsnēm un samazina nepieciešamību sasniegt klimata mērķus ar augstām vienības izmaksām uz zemas ražības zemēm.

Kopsavilkums. Meža ieaudzēšana mazāk vērtīgās lauksaimniecībā izmantojamās zemēs ar minerālaugsnēm ir strukturāls klimata un zemes politikas instruments, kas 25 gadu periodā nodrošina kumulatīvu SEG emisiju samazinājumu ap 257 t CO₂ ekv. ha⁻¹ (ap 261 t CO₂ ekv. ha⁻¹, ieskaitot biokurināmā aizstāšanas efektu) un valsts mērogā – aptuveni 19–20 milj. t CO₂ ekv. apjomā, ja pasākums tiek ieviests 75 000 ha platībā. Vienības izmaksas robežās ap 5–7 € t⁻¹ CO₂ ekv. norāda uz augstu izmaksu efektivitāti. Pasākumu ieteicams prioritāri īstenot zemas produktivitātes un mazāk stratēģiski nozīmīgās lauksaimniecības zemēs ar minerālaugsnēm, vienlaikus nodrošinot piemērotus kompensācijas un atbalsta instrumentus lauksaimniekiem un saskaņojot to ar pārtikas nodrošinājuma un atjaunojamo energoresursu politikas mērķiem.

Vienlaidus ātraudzīgu kokaugu stādījumi lauksaimniecībā izmantojamās zemēs

Vienlaidus ātraudzīgu kokaugu stādījumi lauksaimniecībā izmantojamās zemēs ir zemes izmantošanas maiņas pasākums, kur mazāk vērtīgas aramzemes un zālāji uz minerālaugsnēm tiek pārveidoti par intensīvi apsaimniekotiem koksnes stādījumiem (piemēram, apsei, ātraudzīgām lapu kokiem vai hibrīdapses/alkšņa stādījumiem). Ekonomiskais mērķis ir palielināt koksnes un biokurināmā produkciju uz zemas ražības lauksaimniecības zemēm, nodrošinot stabilākus un ilgtermiņā augstākus ienākumus nekā lauksaimnieciskajā izmantošanā. Klimata mērķis ir palielināt CO₂ piesaisti biomasā un koksnes produktos un nodrošināt būtisku fosilo kurināmo aizstāšanas efektu enerģētikas sektorā.

Pasākuma efektivitātes un izmaksu aprēķini veikti, salīdzinot bāzes scenāriju – zālājs uz minerālaugsnis ar praktiski neitrālu neto SEG bilanci – ar pasākuma scenāriju, kur šī pati platība tiek pārveidota par vienlaidus ātraudzīgu kokaugu stādījumiem. SEG emisiju bilance modelēta 25 gadu periodam, aprēķinot kumulatīvo starpību starp abiem scenārijiem. Uz 1 ha kumulatīvais SEG emisiju samazinājums 25 gadu periodā ir aptuveni 401 t CO₂ ekv. ha⁻¹, neskaitot aizstāšanas efektu, un ap 578 t CO₂ ekv. ha⁻¹, ja iekļauj meža biokurināmā radīto fosilo kurināmo aizstāšanu (aizstāšanas efekta devums ir ap 177 t CO₂ ekv. ha⁻¹). Aprēķinu scenārijā pieņemts, ka pasākums tiek ieviests 22000 ha platībā, vienmērīgi sadalot stādījumus 5 gadu periodā, sākot ar 2026. gadu. Šādā gadījumā kumulatīvais SEG emisiju samazinājums 25 gadu periodā sasniedz aptuveni 9,0 milj. t CO₂ ekv. bez aizstāšanas efekta un ap 12,8 milj. t CO₂ ekv. ieskaitot biokurināmā aizstāšanas efektu, no kuriem ap 3,8 milj. t CO₂ ekv. ir tieši enerģētikas sektorā realizētais aizstāšanas efekts.

Ekonomiskajā analīzē uz 1 ha nediskontētās izmaksas 25 gadu periodā (augsnis sagatavošana, stādījumu ierīkošana, kopšana, apsaimniekošana) sasniedz aptuveni 16,0 tūkst. € ha⁻¹, savukārt ieņēmumi no koksnes ieguves un biokurināmā realizācijas – aptuveni 21,2 tūkst. € ha⁻¹. Līdz ar to neto ienākumi 25 gadu periodā ir ap 5,2 tūkst. € ha⁻¹. Diskontējot finanšu plūsmu, diskontētā finanšu plūsma uz 1 ha ir ap 5,2 tūkst. € pie 0% diskonta, ap 2,0 tūkst. € pie 2,5% un praktiski nulle (ap 64 € ha⁻¹) pie 5% diskonta; pie 7,5–10% diskonta pasākums kļūst finansiāli nepievilcīgs (diskontētā finanšu plūsma attiecīgi ap –1,0 un –1,7 tūkst. € ha⁻¹). Projekta mērogā 22 000 ha platībā diskontētā finanšu plūsma 120 gadu periodā sasniedz aptuveni 137 milj. € pie 0% diskonta, 52,6 milj. € pie 2,5% un 7,3 milj. € pie 5% diskonta, bet kļūst negatīva pie augstākām diskonta likmēm.

SEG emisiju samazinājuma vienības izmaksas, aprēķinot kā diskontēto naudas plūsmu uz vienu samazināto CO₂ ekvivalenta tonnu, ir ļoti zemas vai pat negatīvas. Neskaitot aizstāšanas efektu, izmaksas ir ap –15,3 € t⁻¹ CO₂ ekv. pie 0% diskonta, –5,8 € t⁻¹ pie 2,5%, –0,8 € t⁻¹ pie 5% un tikai pie 7,5% kļūst pozitīvas (ap 1,9 € t⁻¹ CO₂ ekv.).

Iekļaujot meža biokurināmā aizstāšanas efektu, SEG samazinājuma izmaksas ir ap –10,7 € t⁻¹ CO₂ ekv. pie 0% diskonta, –4,1 € t⁻¹ pie 2,5%, –0,6 € t⁻¹ pie 5% un ap 1,3 € t⁻¹ pie 7,5% diskonta likmes. Tas nozīmē, ka pie mērenām diskonta likmēm pasākums ne tikai ir zemu izmaksu klimata pārmaiņu mazināšanas instruments, bet pat rada tīru finansiālu ieguvumu uz katru samazināto CO₂ ekvivalenta tonnu.

No vides skatpunkta vienlaidus ātraudzīgu kokaugu stādījumi nodrošina strauju oglekļa uzkrājuma pieaugumu virszemes biomasā un koksnes produktos, vienlaikus būtiski nemainot SEG plūsmas no augsnes, jo radikālas izmaiņas augsnes mitruma režīmā vai organiskās vielas krājumos uz minerālaugsnēm nav gaidāmas. Intensīvā apsaimniekošana un īsākas aprites cikli nozīmē, ka lielāka daļa oglekļa tiek regulāri novadīta koksnes produktos un enerģētikā, kas klimata bilancē ir labvēlīgi, ja vien koksne pārsvarā aizstāj fosilos kurināmos un oglekļa rezidences laiks produktos ir pietiekami ilgs. Ekoloģiski svarīgi pasākumu fokusēt intensīvi apsaimniekotās lauksaimniecības zemēs, izvairoties no teritorijām ar augstu bioloģisko daudzveidību.

Enerģētikas sektorā šis pasākums ir viens no nozīmīgākajiem ilgtspējīga biokurināmā piegādes avotiem: ātraudzīgie stādījumi nodrošina lielu un samērā prognozējamu šķeldas un citas enerģētiskās koksnes iznākumu uz hektāru, kas aprēķinu scenārijā 25 gadu periodā dod ap 3,8 milj. t CO₂ ekv. aizstāšanas efektu valstī. Tas tieši palielina atjaunojamo energoresursu pieejamību un samazina atkarību no fosilajiem kurināmajiem. Lauksaimniecības sektorā šis pasākums nozīmē 22000 ha lauksaimniecības zemju pārstrukturēšanu, samazinot pārtikas un lopbarības ražošanas potenciālu šajās platībās, bet vienlaikus ļaujot koncentrēt lauksaimniecisko ražošanu uz auglīgākām minerālaugsnēm ar zemākiem emisiju faktoriem. Klimatpolitikas skatījumā šāda zemes izmantošanas pārstrukturēšana ir racionāla, ja tiek piemēroti atbilstoši kompensācijas un atbalsta instrumenti lauksaimniekiem un nodrošināta ilgtermiņa stabilitāte biokurināmā tirgū.

Kopsavilkumā vienlaidus ātraudzīgu kokaugu stādījumi lauksaimniecībā izmantojamās zemēs ir augstas klimata efektivitātes un salīdzinoši zemu izmaksu pasākums, kas 25 gadu periodā nodrošina aptuveni 401 t CO₂ ekv. samazinājumu uz 1 ha (aptuveni 578 t CO₂ ekv. ieskaitot aizstāšanas efektu) un valsts mērogā – ap 9–13 milj. t CO₂ ekv. emisiju samazinājumu 22 000 ha platībā. Nelielās vai negatīvās izmaksas uz vienu CO₂ ekvivalenta tonnu kopā ar būtisko biokurināmā potenciālu padara šo pasākumu par īpaši pievilcīgu instrumentu klimata un enerģētikas politikas integrētai īstenošanai.

Atvasāji notekūdeņu dūņu izmantošanai lauksaimniecībā izmantojamās zemēs

Atvasāju stādījumi notekūdeņu dūņu izmantošanai lauksaimniecībā izmantojamās zemēs ir zemes izmantošanas un apsaimniekošanas maiņas pasākums, kur mazāk vērtīgas lauksaimniecības platības ar minerālaugsnēm tiek pārveidotas par intensīvi

apsaimniekotiem ātraudzīgo lapu koku (parasti vītoli, apšu u. c.) atvasāju stādījumiem. Šajās platībās kontrolēti tiek iestrādātas attīrīšanas iekārtu notekūdeņu dūņas, aizstājot daļu minerālmēslojuma un nodrošinot slāpekļa, fosfora un citu barības elementu recirkulāciju. Ekonomiskais mērķis ir palielināt biomasas un biokurināmā ražu uz zemas ražības lauksaimniecības zemēm un vienlaikus samazināt notekūdeņu dūņu apsaimniekošanas izmaksas. Klimata mērķis ir palielināt CO₂ piesaisti biomasā, nodrošināt būtisku fosilo kurināmo aizstāšanas efektu enerģētikas sektorā un mazināt SEG emisijas, kas saistītas ar dūņu apstrādi un minerālmēslojuma ražošanu.

Pasākuma efektivitātes un izmaksu aprēķini veikti, salīdzinot bāzes scenāriju – zālājs uz minerālaugsnes ar nenozīmīgu neto SEG bilanci (0 t CO₂ ekv. ha⁻¹ gadā) – ar pasākuma scenāriju, kur šī pati platība tiek pārveidota par atvasāju stādījumu. Modelēšanas laika horizonts ir 25 gadi. Atvasāju stādījumu scenārijā neto SEG plūsma uz 1 ha sasniedz – 11,73 t CO₂ ekv. ha⁻¹ gadā, t. i., zālājs ar tuvu neitrālu bilanci tiek pārvērsts par stabilu oglekļa piesaistes avotu. Kumulatīvi 25 gadu periodā SEG emisiju samazinājums uz 1 ha, neskaitot aizstāšanas efektu, ir 59,77 t CO₂ ekv. ha⁻¹, savukārt kopējais emisiju samazinājums, iekļaujot biokurināmā aizstāšanas efektu, sasniedz 201,96 t CO₂ ekv. ha⁻¹. No šī apjoma aptuveni 142,19 t CO₂ ekv. ha⁻¹ veido aizstāšanas efekts, izmantojot iegūto biomasu fosilo kurināmo aizstāšanai enerģētikā.

Aprēķinu scenārijā pieņemts, ka pasākums tiek ieviests 15000 ha platībā, sadalot stādījumu ierīkošanu piecos gados, sākot ar 2026. gadu (ik gadu ierīkojot 3000 ha). Šādā gadījumā kumulatīvais SEG emisiju samazinājums 25 gadu periodā, neskaitot aizstāšanas efektu, sasniedz 1,05 milj. t CO₂ ekv., bet kopējais samazinājums ar aizstāšanas efektu – 2,87 milj. t CO₂ ekv.; no tiem 1,81 milj. t CO₂ ekv. tieši attiecas uz fosilo kurināmo aizstāšanu ar biokurināmo, kas iegūts atvasāju cirtes biomasā. Līdz ar to pasākums ir nozīmīgs ieguldījums nacionālajā ZIZIMM bilanci un enerģētikas dekarbonizācijā.

Ekonomiskajā analīzē iekļautas augsnes sagatavošanas, stādījumu ierīkošanas, kopšanas un apsaimniekošanas izmaksas, kā arī ieņēmumi no biomasas realizācijas vairākos atvasāju rotācijas ciklos 25 gadu periodā. Uz 1 ha nediskontētās kopējās izmaksas šajā periodā veido ap 7093 € ha⁻¹, savukārt kopējie ieņēmumi – ap 12 285 € ha⁻¹, kas dod neto ienākumu ap 5190 € ha⁻¹. Standarta aprēķina variantā (viena pilna 25 gadu cikla ietvaros) diskontētā finanšu plūsma uz 1 ha pie 0 % diskonta likmes ir ap 5890 € ha⁻¹. Pārreķinot uz scenārijā pieņemto 15 000 ha platību, kopējās investīcijas 25 gadu laikā sasniedz ap 106,4 milj. €, kopējie ieņēmumi – ap 184,3 milj. €, bet neto ekonomiskais ieguvums – ap 77,9 milj. €. Tādējādi pasākums ne tikai nodrošina būtisku emisiju samazinājumu, bet arī rada pozitīvu naudas plūsmu zemes īpašniekam un notekūdeņu dūņu piegādātājam.

SEG emisiju samazinājuma vienības izmaksas ir negatīvas, kas nozīmē, ka katra papildu samazinātā CO₂ ekvivalenta tonna dod finansiālu ieguvumu. Aprēķinot izmaksas uz samazināto emisiju tonnu, neskaitot aizstāšanas efektu, iegūst –98,6 € t⁻¹ CO₂ ekv. pie

0 % diskonta, $-60,9 \text{ € t}^{-1}$ pie 2,5 % un $-36,4 \text{ € t}^{-1}$ pie 5 % diskonta likmes. Iekļaujot aizstāšanas efektu, emisiju samazinājuma vienības izmaksas svārstās ap $-29,2 \text{ € t}^{-1} \text{ CO}_2$ ekv. pie 0 % diskonta, $-18,0 \text{ € t}^{-1}$ pie 2,5 % un $-10,8 \text{ € t}^{-1}$ pie 5 % diskonta. Šie rādītāji raksturo atvasāju stādījumu notekūdeņu dūņu izmantošanai kā ļoti izmaksu efektīvu klimata pārmaiņu mazināšanas instrumentu – pasākums vienlaikus samazina emisijas un nodrošina pozitīvu finanšu atdevi.

No vides un lauksaimniecības skatpunkta pasākums nozīmē mazāk vērtīgu lauksaimniecības zemju pārstrukturēšanu. Īstermiņā tas samazina pārtikas un lopbarības ražošanas potenciālu šajās platībās, taču, tā kā parasti tiek izmantotas zemas ražības teritorijas, ietekme uz kopējo produkcijas apjomu ir neliela un ražošanu var pārorientēt uz auglīgākām minerālaugsnēm. Tajā pašā laikā notekūdeņu dūņu izmantošana atvasāju stādījumos samazina nepieciešamību tās deponēt vai dedzināt, kā arī ļauj aizstāt daļu minerālmēslojuma, tādējādi netieši mazina emisijas, kas saistītas ar minerālmēslu ražošanu un dūņu apsaimniekošanu.

Enerģētikas sektoram šis pasākums ir īpaši nozīmīgs, jo atvasāju stādījumi nodrošina lielu, regulāru un prognozējamu biokurināmā plūsmu. Koksnes šķelda un cita enerģētiskā biomasa, kas iegūta atvasāju rotācijas cirtēs, tieši aizstāj fosilos kurināmos un veido minēto aizstāšanas efektu $142 \text{ t CO}_2 \text{ ekv. ha}^{-1}$ jeb 1,81 milj. t CO₂ ekv. 15 000 ha scenārijā. Tas stiprina atjaunojamo energoresursu pieejamību un samazina atkarību no fosilajiem kurināmajiem, vienlaikus mazinot atkritumu apsaimniekošanas slodzi notekūdeņu attīrīšanas iekārtām.

Kopsavilkumā atvasāju stādījumi notekūdeņu dūņu izmantošanai lauksaimniecībā izmantojamās zemēs ir integrēts klimata, atkritumu apsaimniekošanas un enerģētikas politikas pasākums. Uz 1 ha 25 gadu periodā tie nodrošina ap 60 t CO₂ ekv. emisiju samazinājumu bez aizstāšanas efekta un aptuveni 202 t CO₂ ekv. ar aizstāšanas efektu, bet valsts mērogā 15000 ha scenārijā – attiecīgi ap 1,05 un 2,87 milj. t CO₂ ekv. Pasākumam raksturīgas negatīvas SEG vienības izmaksas (līdz pat $-99 \text{ € t}^{-1} \text{ CO}_2$ ekv.), kas apliecina augstu izmaksu efektivitāti. To ieteicams īstenot mazvērtīgās lauksaimniecības zemēs ar minerālaugsnēm, vienlaikus nodrošinot stingru notekūdeņu dūņu kvalitātes kontroli un monitoringu, lai mazinātu potenciālos vides un veselības riskus un pilnībā izmantotu pasākuma klimata un ekonomisko potenciālu.

Par 0,1 ha mazāku koku grupu ierīkošana ganībās

Par 0,1 ha mazāku koku grupu ierīkošana ganībās ir zemes izmantošanas un apsaimniekošanas pasākums, kur daļa ganību platības tiek pārveidota par nelielām, telpiski izklīdētām koku grupām, saglabājot ganīšanas funkciju pārējā platībā. Praktiski tas nozīmē mazāku koku saliņu ($<0,1 \text{ ha}$ katra) ierīkošanu ganībās, kur koki nodrošina papildu koksnes un oglekļa krājumu, uzlabo mikroklimatu un palielina ainavas un bioloģiskās daudzveidības vērtību, vienlaikus saglabājot pamatfunkciju – zālāju

izmantošanu lopkopībā. Ekonomiskais mērķis ir ar salīdzinoši nelielām investīcijām palielināt koksnes resursu un potenciālo ieņēmumu avotu ganību zemēs, savukārt klimata mērķis – palielināt CO₂ piesaisti meža biomasā un koksnes produktos, neizslēdzot platības no lauksaimnieciskās izmantošanas.

Aprēķini veikti, salīdzinot bāzes scenāriju “ganības ar minerālaugsnī” ar praktiski neitrālu neto SEG bilanci (0 t CO₂ ekv. ha⁻¹ gadā) un pasākuma scenāriju, kur ganībās tiek ierīkotas koku grupas. Modeļa laika horizonts ir 25 gadi, un aprēķini uz 1 ha atspoguļo vienu pilnu ciklu, sākot ar koku grupas ierīkošanu. Vienā 25 gadu periodā kumulatīvais SEG emisiju samazinājums ar koksnes produktiem un biokurināmo sasniedz aptuveni 25,7 t CO₂ ekv. ha⁻¹, kas atbilst vidēji ap 1,0 t CO₂ ekv. ha⁻¹ gadā. Atšķirība starp aprēķinu variantiem ar un bez biokurināmā ir niecīga – aizstāšanas efekts veido tikai ap 0,2 % no kopējā SEG samazinājuma, tātad pasākuma klimata ieguvums gandrīz pilnībā saistīts ar oglekļa uzkrājumu koku biomasā un koksnes produktos, nevis enerģētikā. Ilgtermiņā situācija mainās, un pieaug biokurināmā loma.

Pasākuma ieviešanas scenārijā pieņemts, ka koku grupu ierīkošana pakāpeniski tiek veikta 5 gadu laikā, sākot ar 2025. gadu, kopumā aptverot 150 000 ha ganību platību. Šādā gadījumā kumulatīvais SEG emisiju samazinājums valsts mērogā līdz 2049. gadam sasniedz aptuveni 3,38 milj. t CO₂ ekv. jeb vidēji ap 0,9 t CO₂ ekv. ha⁻¹ gadā, ņemot vērā, ka daļa platību pasākuma perioda sākumā vēl atrodas bāzes stāvoklī un koku grupas tiek ieviestas pakāpeniski.

Izmaksu struktūrā dominē koku grupu ierīkošanas un apsaimniekošanas izmaksas – augsnes sagatavošana, stādāmā materiāla iegāde un stādīšana, nepieciešamās kopšanas darbības un vēlākā periodā koku kopšana un cirtes. Uz 1 ha pilnā 25 gadu ciklā kopējās izmaksas sasniedz aptuveni 390 € ha⁻¹, savukārt kumulatīvie ieņēmumi no koksnes izmantošanas ir ap 308 € ha⁻¹. Tādējādi neto izmaksas (izmaksas mīnus ieņēmumi) uz 1 ha ir ap 82 € 25 gadu periodā. Attiecinot šīs izmaksas uz SEG emisiju samazinājumu vienā hektārā, iegūst, ka CO₂ emisiju samazinājuma vienības izmaksas, ņemot vērā diskontēšanu, ir ap 3,2 € t⁻¹ CO₂ ekv.

Valsts mērogā aprēķinu scenārijā kopējās investīcijas koku grupu ierīkošanai 150000 ha ganību platībās 25 gadu periodā sasniedz ap 3,45 milj. €. Tajā pašā laikā no koksnes izmantošanas iegūtie ieņēmumi kumulatīvi sasniedz ap 9,24 milj. €, un neto ekonomiskais ieguvums ir ap 5,8 milj. €. Ja SEG emisiju samazinājuma vienības izmaksas aprēķina, ņemot vērā tikai pasākuma izmaksas, tās ir ap 1,0 € t⁻¹ CO₂ ekv., bet, iekļaujot arī koksnes ieņēmumus, SEG vienības izmaksas kļūst negatīvas – aptuveni -1,7 € t⁻¹ CO₂ ekv. Tas nozīmē, ka pasākums funkcionē kā zemu izmaksu vai pat finansiāli izdevīgs klimata pārmaiņu mazināšanas instruments.

No vides skatpunkta koku grupu ierīkošana ganībās veicina oglekļa uzkrājumu virszemes un pazemes biomasā, uzlabo ainavas struktūru un palielina biotopu dažādību, radot mikrobiotopus putniem, bezmugurkaulniekiem un apputeksnētājiem. Tiek uzlabots mikroklimats – koku grupas nodrošina ēnu un vēja aizsardzību, kas pozitīvi

ietekmē ganību dzīvnieku labturību un samazina karstuma stresa risku. SEG plūsmas no minerālaugšnes būtiski nemainās, jo augšanas apstākļi netiek mainīti, un pasākuma klimata bilance galvenokārt saistīta ar virszemes oglekļa krājumu pieaugumu. No riskiem jāmin potenciāla konkurence ar zālāju produktivitāti tieši koku grupu tuvumā, taču, pareizi izvēloties koku grupu izvietojumu un lielumu, šo efektu iespējams minimizēt.

Lauksaimniecības sektorā pasākums ir relatīvi viegli integrējams, jo tas neprasa pilnīgu ganību izslēgšanu no izmantošanas, bet gan nelielu daļēju pārveidošanu, saglabājot ganīšanas funkciju. Kopējais pārtikas un lopbarības ražošanas potenciāla samazinājums ir neliels, salīdzinot ar platībām, kuras pilnībā tiek apmežotas, bet klimata ieguvums uz vienu investēto eiro ir salīdzinoši augsts. Pareiza telpiskā plānošana (koku grupu izvietošana mazāk produktīvās vai erozijai pakļautās ganību daļās) ļauj pat uzlabot saimniecisko efektivitāti. Enerģētikas sektoram šis pasākums netieši nodrošina nelielu, bet papildus biokurināmā resursu plūsmu no koku retināšanas un atjaunošanas circes, tomēr aizstāšanas efekts SEG bilanci ir mazs salīdzinājumā ar biomasas oglekļa uzkrājumu. Līdz ar to pasākuma loma enerģētikas politikā ir sekundāra, bet tas labi papildina citus biomasas palielināšanas pasākumus.

Kopsavilkumā par 0,1 ha mazāku koku grupu ierīkošana ganībās ir klimata un lauksaimniecības zemes apsaimniekošanas pasākums ar salīdzinoši nelielu zemes lietojuma intensitātes maiņu, bet būtisku kumulatīvu CO₂ piesaistes efektu. Vienā 25 gadu ciklā uz 1 ha tiek samazinātas emisijas par ap 25–26 t CO₂ ekv., savukārt valsts mērogā 150000 ha scenārijā kumulatīvais emisiju samazinājums sasniedz ap 3,4 milj. t CO₂ ekv., ar tiešajām izmaksām ap 3,5 milj. € un neto ekonomisko ieguvumu ap 5,8 milj. €. Zemo vai pat negatīvo CO₂ vienības izmaksu dēļ šis pasākums ir rekomendējams kā viens no izmaksu ziņā efektīvākajiem veidiem, kā integrēt mežaudžu un koksnes resursu palielināšanu ganību ainavā, vienlaikus atbalstot klimata politikas un ekosistēmu pakalpojumu mērķus.

Kokaugu joslu stādījumi gar meliorācijas sistēmām un ceļu nodalošajām joslām

Kokaugu joslu stādījumi gar meliorācijas sistēmām un ceļu nodalošajām joslām ir agro-mežsaimniecības pasākums, kurā gar grāvjiem, novadgrāvjiem un ceļu malām lauksaimniecībā izmantojamās zemēs tiek ierīkotas lineāras ātraudzīgu koku un krūmu joslas. Praktiski tas nozīmē, ka daļa lauka malas tiek pārveidota par kokaudžiem, saglabājot lauksaimniecisko izmantošanu lielākajā daļā lauka platības. Ekonomiskais mērķis ir palielināt koksnes un biokurināmā ieguvu, vienlaikus uzlabojot meliorācijas sistēmu stabilitāti un lauku ainavas ekoloģisko kvalitāti. Klimata mērķis ir palielināt CO₂ piesaisti virszemes un pazemes biomasā un koksnes produktos, kā arī nodrošināt

papildus aizstāšanas efektu enerģētikas sektorā, izmantojot iegūto biomasu fosilo kurināmo vietā.

Pasākuma efektivitātes un izmaksu aprēķini veikti 25 gadu periodam, salīdzinot bāzes scenāriju – zālāju vai lauksaimniecības zemju izmantošanu uz minerālaugsnēm ar praktiski neitrālu neto SEG bilanci (0 t CO₂ ekv. ha⁻¹ gadā) – ar pasākuma scenāriju, kur šajās pašās platībās tiek ierīkotas kokaugu joslas. Modelēšanas rezultāti rāda, ka pasākuma scenārijā neto SEG emisijas 25. gadā sasniedz apmēram -2,2 t CO₂ ekv. ha⁻¹ gadā, t. i., ganību vai aramzemes platība tiek pārvērsta par stabilu oglekļa piesaistes avotu. Kumulatīvi 25 gadu periodā SEG emisiju samazinājums uz 1 ha, neskaitot meža biokurināmā aizstāšanas efektu, ir aptuveni 401 t CO₂ ekv. ha⁻¹, savukārt kopā ar biokurināmā aizstāšanu – ap 578 t CO₂ ekv. ha⁻¹. No šī apjoma ap 177 t CO₂ ekv. ha⁻¹ veido aizstāšanas efekts enerģētikā. Aprēķinu scenārijā pieņemts, ka pasākums tiek īstenots 22000 ha lauksaimniecībā izmantojamās zemēs, pakāpeniski ierīkojot kokaugu joslas piecu gadu periodā, sākot ar 2026. gadu. Šādā gadījumā kumulatīvais SEG emisiju samazinājums 25 gados sasniedz aptuveni 8,8 milj. t CO₂ ekv. (tikai biomasas un koksnes produktu efekts) un ap 12,7 milj. t CO₂ ekv., ieskaitot biokurināmā aizstāšanu; no tā ap 3,9 milj. t CO₂ ekv. ir tieši aizstāšanas efekts enerģētikas sektorā.

Izmaksu struktūrā dominē stādījumu ierīkošanas izmaksas – augsnes sagatavošana, stādāmā materiāla iegāde, stādīšana, kā arī pirmo gadu kopšana. Uz 1 ha kokaugu joslu platības kopējās izmaksas 25 gadu periodā sasniedz aptuveni 3326 € ha⁻¹, no kurām ap 2486 € ha⁻¹ ir vienreizējas ierīkošanas izmaksas, bet ap 840 € ha⁻¹ – atkārtotas kopšanas izmaksas pirmajos gados. Tā kā joslas aizņem tikai daļu no lauka platības, pārrēķinot uz visu pasākuma skarto lauksaimniecības platību vidējās izmaksas ir ap 665 € ha⁻¹. Scenārijā uz 22 000 ha kopējās investīcijas stādījumu ierīkošanai un uzturēšanai sasniedz ap 14,6 milj. €, un papildu izmaksas pēc astotā–devītā gada praktiski vairs neveidojas.

SEG emisiju samazinājuma vienības izmaksas ir zemas un, pie mērenām diskonta likmēm, kļūst negatīvas, kas nozīmē, ka pasākums ilgtermiņā atmaksājas. Aprēķinot izmaksas uz vienu samazināto CO₂ ekvivalenta tonnu, pie 0 % diskonta likmes tās ir ap -13 € t⁻¹ CO₂ ekv. (neskaitot aizstāšanas efektu) un ap -9 € t⁻¹ CO₂ ekv. (ieskaitot biokurināmo). Pie 2,5 % diskonta likmes izmaksas ir attiecīgi ap -4,9 un -3,4 € t⁻¹ CO₂ ekv., pie 5 % diskonta tās praktiski tuvojas nullei (aptuveni -0,16 un -0,11 € t⁻¹ CO₂ ekv.), savukārt pie 7,5–10 % diskonta likmēm SEG vienības izmaksas kļūst pozitīvas un sasniedz ap 2,6–4,2 € t⁻¹ CO₂ ekv. bez aizstāšanas un 1,8–2,9 € t⁻¹ CO₂ ekv. ar aizstāšanas efektu. Šie rādītāji liecina, ka pie reālistiskām diskonta likmēm pasākums funkcionē kā zemu izmaksu vai pat finanšu ziņā izdevīgs klimata pārmaiņu mazināšanas instruments.

No lauksaimniecības viedokļa kokaugu joslu ierīkošana ir salīdzinoši saudzīga zemes lietojuma maiņa. Tiek pārveidota tikai neliela daļa ganību vai aramzemes platības gar meliorācijas grāvjiem un ceļiem, bet pamatfunkcija – zālāju izmantošana lopkopībā vai

augu audzēšana – lielākajā daļā lauka saglabājas. Ražas potenciāls nedaudz samazinās tiešā koku joslu tuvumā, taču tas tiek kompensēts ar uzlabotu mikroklimatu (vēja aizsardzību, daļēju ēnojumu karstuma periodos), iespējamiem erozijas riska samazinājumiem un labākiem apstākļiem ganāmpulku labturībai. Turklāt joslas uzlabo ainavas struktūru un nozīmīgi palielina ekosistēmu pakalpojumus – biotopu daudzveidību, apputeksnētāju un dabisko kaitēkļu ienaidnieku klātbūtni, kā arī var mazināt piesārņojuma nonākšanu ūdensobjektos, jo notver daļu barības elementu no lauka virszemes noteces.

Enerģētikas sektorā kokaugu joslu stādījumi nodrošina papildu, regulāru biokurināmā resursu plūsmu no retināšanas un galīgajām cirtēm joslās. Aprēķinu scenārijā šis aizstāšanas efekts 25 gadu periodā veido ap 177 t CO₂ ekv. ha⁻¹ jeb ap 3,9 milj. t CO₂ ekv. visā 22 000 ha platībā, tieši aizstājot fosilos kurināmos centralizētās vai decentralizētās siltumapgādes sistēmās. Tādējādi pasākums vienlaikus stiprina atjaunojamo energoresursu pieejamību un samazina notekūdeņu un meliorācijas sistēmu uzturēšanas riskus (kokaudzes stabilizē nogāzes, samazina vēja un ūdens eroziju).

Kopsavilkumā kokaugu joslu stādījumi gar meliorācijas sistēmām un ceļu nodalošajām joslām ir strukturāls klimata un lauku ainavas apsaimniekošanas pasākums, kas ar salīdzinoši nelielu lauksaimniecības intensitātes samazinājumu nodrošina būtisku kumulatīvu CO₂ piesaisti. Uz 1 ha 25 gadu periodā emisijas tiek samazinātas par aptuveni 401 t CO₂ ekv. (ap 578 t CO₂ ekv. ar aizstāšanas efektu), bet valsts mērogā 22 000 ha scenārijā – par ap 8,8–12,7 milj. t CO₂ ekv. SEG vienības izmaksas robežās no negatīvām vērtībām līdz dažiem eiro par tonnu norāda, ka pasākums ir izmaksu ziņā ļoti efektīvs un piemērots iekļaušanai integrētā lauksaimniecības, mežsaimniecības un enerģētikas politikas instrumentu paketē, vienlaikus uzlabojot bioloģisko daudzveidību un ainavas kvalitāti.

Kūdras ieguves vietu rekultivācija

Kūdras ieguves vietu rekultivācija šajā pētījumā vērtēts kā zemes izmantošanas maiņas un ekosistēmas atjaunošanas pasākums, kurā pēc kūdras ieguves pamestas organiskās augsnes tiek pārveidotas par pārmitru, mežam raksturīgu ekosistēmu ar nabadzīgu organisko augsni. Praktiski tas nozīmē meliorācijas sistēmas darbības ierobežošanu (grāvju aizdambēšanu vai pārbūvi), virszemes un gruntsūdens līmeņa celšanu un mitra meža (parasti bērza vai jaukta skuju – lapu koku meža) ieaudzēšanu kūdras laukos. Ekonomiskais mērķis ir samazināt ilgtermiņa vides riskus pēc kūdras ieguves, vienlaikus izveidojot stabilu mežaudzi ar ierobežotu koksnes ražas potenciālu. Klimata mērķis ir būtiski samazināt CO₂ emisijas no nosusinātām kūdras augsnēm, vienlaikus nodrošinot papildu oglekļa uzkrājumu meža biomasā un koksnes produktos; daļa oglekļa plūsmas tiek kompensēta ar paaugstinātu CH₄ veidošanos pārslapinātos apstākļos, tomēr kopējā SEG balance ilgtermiņā uzlabojas.

SEG emisiju bilances un izmaksu aprēķini veikti 120 gadu periodam, salīdzinot bāzes scenāriju, kur pēc kūdras ieguves platības saglabājas kā lauksaimniecībā izmantojamas zemes ar organiskām augsnēm (piemēram, zālāji) ar vidējām neto emisijām ap 6,27 t CO₂ ekv. ha⁻¹ gadā, un pasākuma scenāriju, kur šīs platības tiek rekultivētas kā pārmitra meža ekosistēma. Rekultivācijas scenārijā pirmajās desmitgadēs neto SEG emisijas ir līdzīgas vai nedaudz augstākas (ap 10–11 t CO₂ ekv. ha⁻¹ gadā), jo mitrākos apstākļos palielinās CH₄ emisijas, taču audzei attīstoties un augsnes oglekļa zudumi samazinoties, vēlākās dekādēs emisijas pakāpeniski samazinās un perioda beigās sasniedz aptuveni –3,1 t CO₂ ekv. ha⁻¹ gadā, t. i., atjaunotā ekosistēma pārvēršas par neto oglekļa piesaistes avotu. Kumulatīvi 120 gadu periodā SEG emisiju samazinājums, salīdzinot ar bāzes scenāriju, sasniedz aptuveni 145 t CO₂ ekv. ha⁻¹, neskaitot biokurināmā ietekmi, un ap 250 t CO₂ ekv. ha⁻¹, iekļaujot iespējamo koksnes biokurināmā aizstāšanas efektu pasākuma perioda noslēgumā. Vidēji tas atbilst aptuveni 1,2–2,1 t CO₂ ekv. ha⁻¹ gadā. Pirmajās 25 gados efektivitāte ir salīdzinoši zema – emisiju kumulatīvais samazinājums šajā periodā sasniedz tikai ap 11,6 t CO₂ ekv. ha⁻¹, jo galvenais klimata ieguvums realizējas vēlāk, pēc pilnīgākas hidroloģiskā režīma stabilizēšanās un mežaudzes attīstības.

Izmaksu struktūrā dominē rekultivācijas sākotnējās investīcijas – meliorācijas sistēmu pārveidošana (grāvju aizsprostošana, regulējošo būvju izbūve), augsnes sagatavošana, stādāmo materiālu iegāde un meža ieaudzēšana, kā arī jaunizveidotās mežaudzes agrotehniskā kopšana pirmajos gados. Saskaņā ar aprēķinu failu kopējās nediskontētās izmaksas vienam rekultivētam hektāram 120 gadu periodā ir aptuveni 2150 € ha⁻¹, un būtiski tiešie ieņēmumi no koksnes ieguves netiek plānoti – pasākums funkcionē kā “tīro izmaksu” klimata mazināšanas instruments, kur prioritāte ir ekosistēmas atjaunošana nevis koksnes raža. Aprēķinu scenārijā pieņemts, ka rekultivācija tiek īstenota 6000 ha platībā piecu gadu laikā, sākot ar 2026. gadu. Šādā gadījumā kopējās nediskontētās investīcijas sasniedz aptuveni 12,9 milj. €, un diskontētā finanšu plūsma, atkarībā no izvēlētas diskonta likmes, svārstās ap –2,1 līdz –1,9 tūkst. € ha⁻¹, kas raksturo augstas vienreizējās sākotnējās izmaksas un minimālus ienākumus vēlāk.

Dalot uz 1 ha kopējās izmaksas ar kumulatīvo emisiju samazinājumu 120 gadu periodā, emisiju samazinājuma vienības izmaksas ir ap 15 € t⁻¹ CO₂ ekv., ja ņem vērā tikai biomasas un augsnes efektu (145 t CO₂ ekv. ha⁻¹), un ap 9 € t⁻¹ CO₂ ekv., ja aprēķinā iekļauj arī biokurināmā aizstāšanas efektu (250 t CO₂ ekv. ha⁻¹). Pārreķinot uz 6000 ha scenāriju, kopējais kumulatīvais SEG emisiju samazinājums 120 gadu periodā sasniedz ap 0,87 milj. t CO₂ ekv. (bez biokurināmā) un ap 1,5 milj. t CO₂ ekv. ar biokurināmā devumu. Tādējādi, neraugoties uz to, ka pasākums nesniedz tiešus ienākumus zemes īpašniekam, no klimata politikas skatpunkta tas ir vidēju izmaksu, bet salīdzinoši efektīvs SEG emisiju mazināšanas instruments, īpaši ņemot vērā nepieciešamību ilgtermiņā samazināt emisijas no organiskajām augsnēm.

Šis pasākumam neveidojas tiešā konkurence ar produktīvām aramzemēm vai zālājiem, un pasākums drīzāk mazina spiedienu nākotnē pārvērst augstvērtīgas lauksaimniecības zemes par meža vai mitrāju platībām klimata mērķu sasniegšanai. Enerģētikas sektorā rekultivētajās platībās potenciāli var iegūt nelielu koksnes daudzumu retināšanas vai atjaunošanas cirtes laikā, kas modelī iekļauts kā biokurināmā aizstāšanas efekts, palielinot kumulatīvo SEG emisiju samazinājumu par aptuveni 106 t CO₂ ekv. ha⁻¹ (jeb ap 0,63 milj. t CO₂ ekv. 6000 ha scenārijā). Tomēr biokurināmā devums šajā pasākumā ir sekundārs; primārais ieguvums ir emisiju samazināšana no kūdras mineralizācijas un oglekļa ilgtermiņa uzkrājums atjaunotajā meža–mitrāja ekosistēmā.

Kopsavilkumā kūdras ieguves vietu rekultivācija kā pārmitras meža ekosistēmas atjaunošana organiskās augsnēs ir ekoloģiski nepieciešams un klimata ziņā efektīvs pasākums. Tas nodrošina ilgtermiņa SEG emisiju samazinājumu aptuveni 145–250 t CO₂ ekv. ha⁻¹ 120 gadu periodā ar emisiju samazinājuma vienības izmaksām ap 9–15 € t⁻¹ CO₂ ekv., vienlaikus novēršot degradētu kūdras lauku emisijas nākotnē un atjaunojot ekosistēmu funkcijas. Pasākumu ieteicams prioritāri īstenot pamestās vai drīzumā izstrādājamās kūdras ieguves vietās, integrējot to ar kūdras nozares pārkārtošanu, dabas aizsardzības mērķiem un klimata politiku, kā arī paredzot atbilstošu publisko atbalstu, ņemot vērā, ka tieši tirgus ienākumi no šīm platībām ir ierobežoti.

Izmantotā literatūra

1. Ballanti, L., Blesius, L., Hines, E., & Kruse, B. (2016). Tree Species Classification Using Hyperspectral Imagery: A Comparison of Two Classifiers. *Remote Sensing*, 8(6), 445. <https://doi.org/10.3390/rs8060445>
2. Bārdule, A., Bāders, E., Stola, J., & Lazdiņš, A. (2009). Forest soil characteristic in Latvia according results of the demonstration project BioSoil (Latvijas meža augsņu īpašību raksturojums demonstrācijas projekta BioSoil rezultātu skatījumā). *Mežzinātne | Forest Science*, 20 (53), 105–124.
3. Bārdule, A., Laiho, R., Jauhiainen, J., Soosaar, K., Lazdiņš, A., Armolaitis, K., Butlers, A., Čiuldienē, D., Haberl, A., Kull, A., Muraškieņē, M., Ostonen, I., Rohula-Okunev, G., Kamil-Sardar, M., Schindler, T., Vahter, H., Vigricas, E., & Līcīte, I. (2025). Annual net CO₂ fluxes from drained organic soils used for agriculture in the hemiboreal region of Europe. *Biogeosciences*, 22(16), 4241–4259. <https://doi.org/10.5194/bg-22-4241-2025>
4. Bārdule, A., Melņiks, R. N., Zvaigzne, Z. A., Purviņa, D., Skranda, I., Prysiazniuk, O., Maliarenko, O., & Lazdiņš, A. (2025). *Carbon dioxide, methane and nitrous oxide fluxes from former peat extraction fields currently used for cranberry (Vaccinium macrocarpon) and highbush blueberry (Vaccinium corymbosum) plantations* (Nos. EGU25-15398). EGU25. Copernicus Meetings. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu25-15398>
5. Bārdule, A., Petaja, G., Butlers, A., Purviņa, D., & Lazdiņš, A. (2021). Estimation of litter input in hemi-boreal forests with drained organic soils for improvement of GHG inventories. *BALTIC FORESTRY*, 27(2), Article 2. <https://doi.org/10.46490/BF534>
6. Berglund, Ö., & Berglund, K. (2011). Influence of water table level and soil properties on emissions of greenhouse gases from cultivated peat soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 43(5), 923–931. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.01.002>
7. Byrne, K., Wilson, D., Alm, J., Laine, J., Farrell, E. P., & Tuittila, E. S. (2009). Rewetting of cutaway peatlands: Are we re-creating hotspots of methane emissions: Are we re-creating hot spots of methane emissions? *Restoration Ecology*, 17(6), 796–806. <https://doi.org/10.1111/j.1526-100X.2008.00416.x>
8. Bjarnadottir, B., Aslan Sungur, G., Sigurdsson, B. D., Kjartansson, B. T., Oskarsson, H., Oddsdottir, E. S., Gunnarsdottir, G. E., & Black, A. (2021). Carbon and water balance of an afforested shallow drained peatland in Iceland. *Forest Ecology and Management*, 482, 118861. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118861>
9. Bolyn, C., Michez, A., Gaucher, P., Lejeune, P., & Bonnet, S. (2018). Forest mapping and species composition using supervised per pixel classification of Sentinel-2 imagery. *BASE*, 172–187. <https://doi.org/10.25518/1780-4507.16524>
10. Breidenbach, J., Ivanovs, J., Kangas, A., Nord-Larsen, T., Nilsson, M., & Astrup, R. (2021). Improving living biomass C-stock loss estimates by combining optical satellite, airborne laser scanning, and NFI data. *Canadian Journal of Forest Research*, 51(10), 1472–1485. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2020-0518>
11. Breidenbach, J., Waser, L. T., Debella-Gilo, M., Schumacher, J., Rahlf, J., Hauglin, M., Puliti, S., & Astrup, R. (2021). National mapping and estimation of forest area by dominant tree species using Sentinel-2 data. *Canadian Journal of Forest Research*, 51(3), 365–379. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2020-0170>
12. Butlers, A., Laiho, R., Lazdiņš, A., Schindler, T., Soosaar, K., Jauhiainen, J., Bārdule, A., Kamil-Sardar, M., Līcīte, I., Samariķs, V., Haberl, A., Vahter, H., Čiuldienē, D., Anttila, J., & Armolaitis, K. (2025). Organic soils can be CO₂ sinks in both drained and undrained hemiboreal peatland forests. *Biogeosciences*, 22(18), 4627–4647. <https://doi.org/10.5194/bg-22-4627-2025>

13. 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>
14. 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>
15. Chiti, T., Rey, A., Abildtrup, J., Böttcher, H., Diaci, J., Frings, O., Lehtonen, A., Schindlbacher, A., & Zavala, M. A. (2024). *Carbon farming in the European forestry sector* (Nos. 978-952-7426-91-3). European Forest Institute.
16. Choi, S.-E., Hong, S., Song, C., Kim, J., Kim, W., Ha, R., & Lee, W.-K. (2023). Construction of land-use change matrix and estimation of greenhouse gas inventory focusing on settlements in South Korea. *Carbon Balance and Management*, 18(1), 4. <https://doi.org/10.1186/s13021-023-00223-3>
17. De Jong, M., Van Hal, O., Pijlman, J., Van Eekeren, N., & Junginger, M. (2021). Paludiculture as paludifuture on Dutch peatlands: An environmental and economic analysis of Typha cultivation and insulation production. *Science of The Total Environment*, 792, 148161. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148161>
18. Dostálová, A., Lang, M., Ivanovs, J., Waser, L. T., & Wagner, W. (2021). European Wide Forest Classification Based on Sentinel-1 Data. *Remote Sensing*, 13(3), Article 3. <https://doi.org/10.3390/rs13030337>
19. Drösler, M., Freibauer, A., Christensen, T. R., & Friborg, T. (2008). Observations and Status of Peatland Greenhouse Gas Emissions in Europe. No A. J. Dolman, R. Valentini, & A. Freibauer (Red.), *The Continental-Scale Greenhouse Gas Balance of Europe* (lpp. 243–261). Springer. https://doi.org/10.1007/978-0-387-76570-9_12
20. Dubra, S., Samariķs, V., Līcīte, I., Butlers, A., Purviņa, D., Lupiķis, A., & Jansons, Ā. (2023). Effects of Drainage on Carbon Stock in Hemiboreal Forests: Insights from a 54-Year Study. *Sustainability*, 15(24), Article 24. <https://doi.org/10.3390/su152416622>
21. 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>
22. ESCI. (2025, janvārī 7). Dr. Kalhori, can a rewetted wetland ever return to its original state? *Wethorizons*. <https://www.wethorizons.eu/dr-kalhori-can-a-rewetted-wetland-ever-return-to-its-original-state/>
23. Escobar, D., Belyazid, S., & Manzoni, S. (2022). Back to the Future: Restoring Northern Drained Forested Peatlands for Climate Change Mitigation. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 834371. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.834371>
24. Fabre, A., Pinay, G., & Ruffinoni, C. (1996). Seasonal changes in inorganic and organic phosphorus in the soil of a riparian forest. *Biogeochemistry*, 35(3), 419–432. <https://doi.org/10.1007/BF02183034>
25. Fassnacht, F. E., Latifi, H., Stereńczak, K., Modzelewska, A., Lefsky, M., Waser, L. T., Straub, C., & Ghosh, A. (2016). Review of studies on tree species classification from remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, 186, 64–87. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.08.013>
26. Friedrich, S., Gerner, A., Tarantik, M., Chiogna, G., & Disse, M. (2024). Assessment of rewetting scenarios under varying climate conditions in a partially restored raised bog in Bavaria, Germany. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 52, 101695. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2024.101695>
27. Georganos, S., Grippa, T., Vanhuysse, S., Lennert, M., Shimon, M., Kalogirou, S., & Wolff, E. (2018). Less is more: Optimizing classification performance through feature selection in a very-high-resolution remote sensing object-based urban application. *GIScience & Remote Sensing*, 55(2), 221–242. <https://doi.org/10.1080/15481603.2017.1408892>
28. Ghezelayagh, P., Oleszczuk, R., Stachowicz, M., Eini, M. R., Kamocki, A., Banaszuk, P., &

- Grygoruk, M. (2024). Developing a remote-sensing-based indicator for peat soil vertical displacement. A case study in the Biebrza Valley, Poland. *Ecological Indicators*, 166, 112305. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112305>
29. 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>
30. Grabska, E., Frantz, D., & Ostapowicz, K. (2020). Evaluation of machine learning algorithms for forest stand species mapping using Sentinel-2 imagery and environmental data in the Polish Carpathians. *Remote Sensing of Environment*, 251, 112103. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112103>
31. Grabska-Szwagrzyk, E., Tiede, D., Sudmanns, M., & Kozak, J. (2024). Map of forest tree species for Poland based on Sentinel-2 data. *Earth System Science Data*, 16(6), 2877–2891. <https://doi.org/10.5194/essd-16-2877-2024>
32. Günther, A., Böther, S., Couwenberg, J., Hüttel, S., & Jurasinski, G. (2018). Profitability of Direct Greenhouse Gas Measurements in Carbon Credit Schemes of Peatland Rewetting. *Ecological Economics*, 146, 766–771. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.12.025>
33. Günther, A., Jurasinski, G., Albrecht, K., Gaudig, G., Krebs, M., & Glatzel, S. (2017). Greenhouse gas balance of an establishing Sphagnum culture on a former bog grassland in Germany. *Mires and Peat*, 20, 02. <https://doi.org/10.19189/MAP.2015.OMB.210>
34. Heinrich, V., House, J., Gibbs, D. A., Harris, N., Herold, M., Grassi, G., Cantinho, R., Rosan, T. M., Zimbres, B., Shimbo, J. Z., Melo, J., Hales, T., Sitch, S., & Aragão, L. E. O. C. (2023). Mind the gap: Reconciling tropical forest carbon flux estimates from earth observation and national reporting requires transparency. *Carbon Balance and Management*, 18(1), 22. <https://doi.org/10.1186/s13021-023-00240-2>
35. Heiskanen, J., Adhikari, H., Piironen, R., Packalen, P., & Pellikka, P. K. E. (2019). Do airborne laser scanning biomass prediction models benefit from Landsat time series, hyperspectral data or forest classification in tropical mosaic landscapes? *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 81, 176–185. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.05.017>
36. Higgins, S., Morrison, S., & Watson, C. J. (2012). Effect of annual applications of pelletized dolomitic lime on soil chemical properties and grass productivity. *Soil Use and Management*, 28(1), 62–69. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2011.00380.x>
37. Hościło, A., & Lewandowska, A. (2019). Mapping Forest Type and Tree Species on a Regional Scale Using Multi-Temporal Sentinel-2 Data. *Remote Sensing*, 11(8), 929. <https://doi.org/10.3390/rs11080929>
38. 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>
39. Illarionova, S., Tregubova, P., Shukhratov, I., Shadrin, D., Efimov, A., & Burnaev, E. (2024). Advancing forest carbon stocks' mapping using a hierarchical approach with machine learning and satellite imagery. *Scientific Reports*, 14(1), 21032. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-71133-8>
40. Ivanovs, J., Haberl, A., & Melniks, R. (2024). Modeling Geospatial Distribution of Peat Layer Thickness Using Machine Learning and Aerial Laser Scanning Data. *Land*, 13(4), Article 4. <https://doi.org/10.3390/land13040466>
41. Ivanovs, J., Lazdins, A., & Lang, M. (2021). The Effect of Tree Species and Seasonality on Forest Height Measurements Using an Aerial Laser Scanner – A Case Study in Latvia. *Proceedings of the SilviLaser Conference 2021*, 253–254. <https://doi.org/10.34726/wim.2001>
42. Ivanovs, J., Lazdins, A., & Lang, M. (2023). The influence of forest tree species composition on the forest height predicted from airborne laser scanning data – A case study in Latvia. *Baltic Forestry*,

- 29(1). <https://doi.org/10.46490/BF663>
43. Jurasinski, G., Barthelmes, A., Byrne, K. A., Chojnicki, B. H., Christiansen, J. R., Decler, K., Fritz, C., Günther, A. B., Huth, V., Joosten, H., Juszczak, R., Juutinen, S., Kasimir, Å., Klemedtsson, L., Koebisch, F., Kotowski, W., Kull, A., Lamentowicz, M., Lindgren, A., ... Couwenberg, J. (2024). Active afforestation of drained peatlands is not a viable option under the EU Nature Restoration Law. *Ambio*, 53(7), 970–983. <https://doi.org/10.1007/s13280-024-02016-5>
44. Key, T. (2001). A Comparison of Multispectral and Multitemporal Information in High Spatial Resolution Imagery for Classification of Individual Tree Species in a Temperate Hardwood Forest. *Remote Sensing of Environment*, 75(1), 100–112. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(00\)00159-0](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(00)00159-0)
45. Keskes, M. I., Mohamed, A. H., Borz, S. A., & Niță, M. D. (2025). Improving National Forest Mapping in Romania Using Machine Learning and Sentinel-2 Multispectral Imagery. *Remote Sensing*, 17(4), 715. <https://doi.org/10.3390/rs17040715>
46. Kitson, E., & Bell, N. G. A. (2020). The Response of Microbial Communities to Peatland Drainage and Rewetting. A Review. *Frontiers in Microbiology*, 11, 582812. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.582812>
47. Komorovska, A., Lazdiņš, A., Bāders, E., & Martinsone, K. (2009). International programme "Forest Focus 2006" demonstration project BioSoil in Latvia. *Abstracts and programme of an International Conference at Koli National Park*, 70–71.
48. Krisāns, O. (2012). *Re: Par augšnes paraugu vākšanu BioSoil parauglaukumos*.
49. Krüger, J. P., Alewell, C., Minkinen, K., Szidat, S., & Leifeld, J. (2016). Calculating carbon changes in peat soils drained for forestry with four different profile-based methods. *Forest Ecology and Management*, 381, 29–36. <https://doi.org/10.1016/j.forest.2016.09.011>
50. Krūmiņš, J., Robalds, A., Purmalis, O., Ansons, L., Poršņovs, D., Kļaviņš, M., & Segliņš, V. (2014). Kūdras resursi un to izmantošanas iespējas. *Material Science and Applied Chemistry*, 29(29), 82. <https://doi.org/10.7250/msac.2013.025>
51. 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>
52. Kēniņa, L., Bārdule, A., Bičkovskis, K., Desaine, I., & Jansons, Ā. (2025). Preliminary assessment of stock of organic carbon in mineral soils of hemiboreal forests in Latvia. *Baltic Forestry*, 30(2), id776. <https://doi.org/10.46490/BF776>
53. Kēniņa, L., Zute, D., Jaunslaviete, I., Samariks, V., & Jansons, Ā. (2022). Old-Growth Coniferous Stands on Fertile Drained Organic Soil: First Results of Tree Biomass and Deadwood Carbon Stocks in Hemiboreal Latvia. *Forests*, 13(2), 279. <https://doi.org/10.3390/f13020279>
54. Laine, A. M., Ojanen, P., Lindroos, T., Koponen, K., Maanavilja, L., Lampela, M., Turunen, J., Minkinen, K., & Tolvanen, A. (2024). Climate change mitigation potential of restoration of boreal peatlands drained for forestry can be adjusted by site selection and restoration measures. *Restoration Ecology*, 32(7), e14213. <https://doi.org/10.1111/rec.14213>
55. Laudon, H., Järveoja, J., Ågren, A., Peichl, M., & Lindgren, A. (2025). Rewetting drained forested peatlands: A cornerstone of Sweden's climate change mitigation strategy. *Ambio*, 54(12), 2092–2104. <https://doi.org/10.1007/s13280-025-02220-x>
56. Launiainen, S., Ahtikoski, A., Rinne, J., Ojanen, P., & Hökkä, H. (2025). Rewetting drained boreal peatland forests does not mitigate climate warming in the twenty-first century. *Ambio*, 54(12), 2107–2117. <https://doi.org/10.1007/s13280-025-02225-6>
57. Lazdiņš, A. (2008). *Programmas „Forest Focus 2006” saistību (saskaņā ar normatīvajiem aktiem par I un ek līgumu izpilde meža augšņu inventarizācija starptautiskā projekta BioSoil ietvaros* (No. 070508/S149; lpp. 74). LVMI Silava.

58. Lazdiņš, A., Lupiķis, A., Polmanis, K., Bārdule, A., Butlers, A., & Kalēja, S. (2024). Carbon stock changes of drained nutrient-rich organic forest soils in Latvia. *Silva Fennica*, 58(1). <https://doi.org/10.14214/sf.22017>
59. Lee, S.-C., Christen, A., Black, A. T., Johnson, M. S., Jassal, R. S., Ketler, R., Nesic, Z., & Merkens, M. (2017). Annual greenhouse gas budget for a bog ecosystem undergoing restoration by rewetting. *Biogeosciences*, 14(11), 2799–2814. <https://doi.org/10.5194/bg-14-2799-2017>
60. Luo, Y., Wang, X., Ouyang, Z., Lu, F., Feng, L., & Tao, J. (2020). A review of biomass equations for China's tree species. *Earth System Science Data*, 12(1), 21–40. <https://doi.org/10.5194/essd-12-21-2020>
61. Maier, M., Weber, T. K. D., Fiedler, J., Fuß, R., Glatzel, S., Huth, V., Jordan, S., Jurasinski, G., Kutzbach, L., Schäfer, K., Weymann, D., & Hagemann, U. (2022). Introduction of a guideline for measurements of greenhouse gas fluxes from soils using non-steady-state chambers. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 185(4), 447–461. <https://doi.org/10.1002/jpln.202200199>
62. 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>
63. Maljanen, M., Sigurdsson, B. D., Guðmundsson, J., Óskarsson, H., Huttunen, J. T., & Martikainen, P. J. (2010). Greenhouse gas balances of managed peatlands in the Nordic countries – present knowledge and gaps. *Biogeosciences*, 7(9), 2711–2738. <https://doi.org/10.5194/bg-7-2711-2010>
64. Melniks, R., Ivanovs, J., & Lazdins, A. (2024). *Machine learning based classification of peat layer thickness in Latvia using national forest inventory data*. 39, 299–303. <https://doi.org/10.22616/RRD.30.2024.047>
65. Minkkinen, K., Ojanen, P., Penttilä, T., Aurela, M., Laurila, T., Tuovinen, J.-P., & Lohila, A. (2018). Persistent carbon sink at a boreal drained bog forest. *Biogeosciences*, 15(11), 3603–3624. <https://doi.org/10.5194/bg-15-3603-2018>
66. Mohd Zaki, N. A., Latif, Z. A., & Suratman, M. N. (2018). Modelling above-ground live trees biomass and carbon stock estimation of tropical lowland Dipterocarp forest: Integration of field-based and remotely sensed estimates. *International Journal of Remote Sensing*, 39(8), 2312–2340. <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1421793>
67. Nink, S., Hill, J., Stoffels, J., Buddenbaum, H., Frantz, D., & Langshausen, J. (2019). Using Landsat and Sentinel-2 Data for the Generation of Continuously Updated Forest Type Information Layers in a Cross-Border Region. *Remote Sensing*, 11(20), 2337. <https://doi.org/10.3390/rs11202337>
68. Ojanen, P., Minkkinen, K., & Penttilä, T. (2013). The current greenhouse gas impact of forestry-drained boreal peatlands. *Forest Ecology and Management*, 289, 201–208. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.10.008>
69. Park, E., Song, C., Ham, B., Kim, J., Lee, J., Choi, S.-E., & Lee, W.-K. (2018). Comparison of Sampling and Wall-to-Wall Methodologies for Reporting the GHG Inventory of the LULUCF Sector in Korea. *Journal of Climate Change Research*, 9(4), 385–398. <https://doi.org/10.15531/KSCCR.2018.9.4.385>
70. Pimple, U., Sitthi, A., Simonetti, D., Pungkul, S., Leadprathom, K., & Chidthaisong, A. (2017). Topographic Correction of Landsat TM-5 and Landsat OLI-8 Imagery to Improve the Performance of Forest Classification in the Mountainous Terrain of Northeast Thailand. *Sustainability*, 9(2), 258. <https://doi.org/10.3390/su9020258>
71. Purviņa, D., Zvaigzne, Z. A., Skrandā, I., Melņiks, R. N., Petaja, G., Līcīte, I., Butlers, A., & Bārdule, A. (2024). Impact of Soil Organic Layer Thickness on Soil-to-Atmosphere GHG Fluxes in Grassland in Latvia. *Agriculture*, 14(3), Article 3. <https://doi.org/10.3390/agriculture14030387>
72. Rancāne, S., Lazdiņš, A., Petaja, G., Purviņa, D., Zute, S., Jansone, I., Damškalne, M., & Putniece, G.

- (2025). *Carbon and nitrogen accumulation by agricultural crop residue under three cropping systems*. <https://doi.org/10.15159/ar.25.025>
73. Rancāne, S., Līcīte, I., Zuševica, A., Zute, S., Jansone, I., Damškalne, M., Zariņa, L., Koroļova, J., Putniece, G., & Prysiazniuk, L. (2023). Biomass of alternative species for traditional cereal crops in Latvia and their potential impact on the carbon cycle. *Zemdirbyste-Agriculture*, 110(3), 195–206. <https://doi.org/10.13080/z-a.2023.110.023>
74. 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>
75. Samariks, V., Lazdiņš, A., Bārdule, A., Kalēja, S., Butlers, A., Spalva, G., & Jansons, Ā. (2023). Impact of Former Peat Extraction Field Afforestation on Soil Greenhouse Gas Emissions in Hemiboreal Region. *Forests*, 14(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/f14020184>
76. Shen, Gatto, & Pagliacci. (2023). Unravelling-the-role-of-institutions-in-market-based-instruments-a-systematic-review-on-forest-carbon-mechanisms. *Forests*. <https://doi.org/10.3390/f14010136>
77. 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>
78. 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>
79. Strîmbu, V. F., Næsset, E., Ørka, H. O., Liski, J., Petersson, H., & Gobakken, T. (2023). Estimating biomass and soil carbon change at the level of forest stands using repeated forest surveys assisted by airborne laser scanner data. *Carbon Balance and Management*, 18(1), 10. <https://doi.org/10.1186/s13021-023-00222-4>
80. Suárez-Fernández, G. E., Martínez-Sánchez, J., & Arias, P. (2025). Enhancing carbon stock estimation in forests: Integrating multi-data predictors with random forest method. *Ecological Informatics*, 86, 102997. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2025.102997>
81. Tiemeyer, B., Freibauer, A., Borraz, E. A., Augustin, J., Bechtold, M., Beetz, S., Beyer, C., Ebli, M., Eickenscheidt, T., Fiedler, S., Förster, C., Gensior, A., Giebels, M., Glatzel, S., Heinichen, J., Hoffmann, M., Höper, H., Jurasinski, G., Laggner, A., ... Drösler, M. (2020). A new methodology for organic soils in national greenhouse gas inventories: Data synthesis, derivation and application. *Ecological Indicators*, 109, 105838. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105838>
82. Tomppo, E., Gschwantner, T., & Lawrence, M. (2010). *National Forest Inventories*. Springer Netherlands.
83. Vanselow-Algan, M., Schmidt, S. R., Greven, M., Fiencke, C., Kutzbach, L., & Pfeiffer, E.-M. (2015). High methane emissions dominated annual greenhouse gas balances 30 years after bog rewetting. *Biogeosciences*, 12(14), 4361–4371. <https://doi.org/10.5194/bg-12-4361-2015>
84. Viskari, T., Pusa, J., Fer, I., Repo, A., Vira, J., & Liski, J. (2022). Calibrating the soil organic carbon model Yasso20 with multiple datasets. *Geoscientific Model Development*, 15(4), 1735–1752. <https://doi.org/10.5194/gmd-15-1735-2022>
85. Wallis, C. I. B., Brehm, G., Donoso, D. A., Fiedler, K., Homeier, J., Paulsch, D., Süßenbach, D., Tiede, Y., Brandl, R., Farwig, N., & Bendix, J. (2017). Remote sensing improves prediction of tropical montane species diversity but performance differs among taxa. *Ecological Indicators*, 83, 538–549. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.01.022>
86. Wang, G. G., Lu, D., Gao, T., Zhang, J., Sun, Y., Teng, D., Yu, F., & Zhu, J. (2024). Climate-smart forestry: An AI-enabled sustainable forest management solution for climate change adaptation and

- mitigation. *Journal of Forestry Research*, 36(1), 7. <https://doi.org/10.1007/s11676-024-01802-x>
87. Zhang, R., Zhou, X., Ouyang, Z., Avitabile, V., Qi, J., Chen, J., & Giannico, V. (2019). Estimating aboveground biomass in subtropical forests of China by integrating multisource remote sensing and ground data. *Remote Sensing of Environment*, 232, 111341. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111341>
88. 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>
89. Zhu, T., Zhang, Y., Liu, Y., & Zhao, Z. (2021). Electrostimulation enhanced ammonium removal during Fe(III) reduction coupled with anaerobic ammonium oxidation (Feammox) process. *Science of The Total Environment*, 751, 141703. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141703>