

PĀRSKATS

PAR PĒTĪJUMA IZPILDI 2025. GADĀ

PĒTĪJUMA NOSAUKUMS: ARAMZEMES UN ILGGADĪGO ZĀLĀJU
APSAIMNIEKOŠANAS RADĪTO SILTUMNĪCEFEKTA
GĀZU (SEG) EMISIJU UN OGLEKĻA DIOKSĪDA (CO₂)
PIESAISTES UZSKAITES SISTĒMAS
PILNVEIDOŠANA UN ATBILSTOŠU METODISKO
RISINĀJUMU IZSTRĀDĀŠANA

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-S0INZ03-000026

PĒTĪJUMA ZINĀTNISKAIS ANDIS LAZDIŅŠ, LVMI SILAVA VADOŠAIS PĒTNIEKS
VADĪTĀJS:

Kopsavilkums

Saskaņā ar Eiropas Parlamenta un Padomes regulu (ES) 2023/839, ar ko groza Regulu (ES) 2018/841 attiecībā uz darbības jomu, ziņošanas un izpildes noteikumu vienkāršošanu un dalībvalstu 2030. gada mērķrādītāju noteikšanu un Regulu (ES) 2018/1999 attiecībā uz monitoringa, ziņošanas, progresu apsekošanas un izskatīšanas uzlabošanu, aramzemju un ilggadīgo zālāju apsaimniekošanas radīto SEG emisiju un CO₂ piesaistes ziņošana 2021.-2030. gadā ir obligāta un pēc 2025. gada aramzemju un ilggadīgo zālāju radītās SEG emisijas iekļautas kopīgā zemes izmantošanas, zemes izmantošanas maiņas un mežsaimniecības (ZIZIMM) sektora mērķī un visām oglekļa krātuvēm jānodrošina augstākā (tier 3) līmeņa SEG emisiju un CO₂ piesaistes aprēķinu metožu ieviešana. Jaunus izaicinājumus SEG inventarizācijas sistēmas pilnveidošanai nosaka Eiropas Parlamenta un Padomes regulas (ES) 2023/839 V pielikuma 3. daļa, kurā noteiktas jaunas zemes izmantošanas kategorijas SEG emisiju ziņošanai.

Iepriekšējos pētījuma etapos veicām empīrisko datu ieguvu, lai raksturotu daļējas augsnes apstrādes un dažādu pasējas augu ietekmi uz SEG emisijām no augsnes un oglekļa apriti, kā arī lai izstrādātu vienādojumus SEG emisiju raksturošanai no aluviālās augsnes zālajos un aramzemēs. Lai pilnveidotu jau izstrādātos aprēķinu vienādojumus un samazinātu to nenoteiktību, turpināta empīrisko datu ieguve un analīze. Pētījuma ietvaros risināti jautājumi, kas saistīti ar inventarizācijas un prognožu ziņojumu pilnveidošanu, izstrādājot un integrējot LVMI Silava sadarbībā ar Zemkopības ministriju, Latvijas Biozinātņu un tehnoloģiju universitāti un citām institūcijām gatavojamajos ziņojumos augsnes oglekļa uzkrājuma izmaiņu prognozes un ar tām saistītās N₂O un CH₄ emisijas no minerālaugsnēm un organiskajām augsnēm lauksaimniecībā izmantojamās zemēs, kā arī vērtētas brīvprātīgo oglekļa piesaistes vienību platformu ieviešanas iespējas un iespējamās konsekvences attiecībā uz SEG emisiju samazināšanas mērķu izpildi Latvijā.

Izmantotie saīsinājumi

C – ogleklis;

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

CH₄ – metāns;

CO₂ – oglekļa dioksīds;

EK – Eiropas Komisija;

ES – Eiropas Savienība

ETS – emisiju tirdzniecības sistēma

KLP – kopējā lauksaimniecība politika;

LVĢMC – Latvijas vides, ģeoloģijas un meteoroloģijas centrs;

MZV - monitorings, ziņošanas un verifikācija;

N – slāpeklis;

N₂O – dislāpekļa oksīds;

NH₃ – amonjaks;

NO – slāpekļa oksīds;

NO – slāpekļa oksīds;

NO₃ – nitrāti;

ppm – tilpuma miljondaļas;

SEG – siltumnīcefekta gāzes;

SOC – augsnes organiskais ogleklis.

UNFCCC - Apvienoto Nāciju Organizācija Vispārējai konvencijai par klimata pārmaiņām;

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

Saturs

Kopsavilkums.....	2
Izmantotie saīsinājumi.....	3
Saturs.....	4
Ievads.....	5
Pasējas auga izmantošanas ietekmes uz SEG emisijām novērtējums.....	14
Ievads.....	15
SEG emisijas no minerālaugsnes.....	16
Materiāli un metodes.....	20
Pētījuma objekta raksturojums.....	20
Mērījumu veikšana ar Picarro.....	27
Meteoroloģisko apstākļu raksturojums.....	30
Rezultāti.....	31
SEG mērījumu no augsnes rezultāti.....	32
Kultūraugu ietekme uz SEG emisijām no augsnes.....	33
Augsnes temperatūras un augsnes mitruma ietekme uz SEG emisijām.....	36
Lauksaimnieciskās darbības veida ietekme uz SEG emisijām no augsnes.....	37
Augsnes un audzējamo kultūraugu ietekme uz SEG emisijām.....	39
Sarkanā āboliņa iekļaušanas augu sekā ietekme uz SEG emisijām.....	41
Secinājumi.....	46
Organisko augšņu izplatības darbību datu lauksaimniecībā izmantojamām zemēm pilnveidošana.....	48
Ievads.....	49
Metodika.....	51
Rezultāti.....	55
Secinājumi.....	60
Augsnes heterotrofās elpošanas radītās CO₂, N₂O un CH₄ emisijas no aluviālajām augsnēm...	62
Ievads.....	62
Materiāli un metodes.....	64
Rezultāti.....	74
Izmēģinājumu objektu ierīkošana un empīrisku datu ieguve zemes izmantošanas un augsnes apstrādes metodes ietekmes uz CO₂, CH₄ un N₂O emisijām no organiskām augsnēm raksturošanai.....	81
Ievads.....	81
Metodika.....	85
Rezultāti.....	85
Secinājumi.....	91
Izmantotā literatūra.....	92

Ievads

Lauksaimniecības nozare, kas ietver gan aramzemju, gan ilggadīgo zālāju apsaimniekošanu, būtiski ietekmē siltumnīcefekta gāzu (SEG) emisijas un oglekļa piesaisti. Mūsdienu klimata politikas ietvaros arvien lielāka uzmanība tiek pievērsta precīziem SEG emisiju aprēķiniem un efektīvām emisiju mazināšanas metodēm, kas ļautu samazināt antropogēno ietekmi uz klimatu un nodrošināt ilgtspējīgu lauksaimniecības attīstību.

Šī pētījuma mērķis ir pilnveidot SEG emisiju uzskaites sistēmu un CO₂ piesaistes aprēķinu metodoloģiju, koncentrējoties uz aramzemju un ilggadīgo zālāju apsaimniekošanu. Pētījums nodrošinās jaunas, uz empīriskiem datiem balstītas pieejas, kas ļaus precīzāk noteikt SEG emisijas no dažādām zemes apsaimniekošanas praksēm un novērtēt to ietekmi uz klimatu.

Lai sasniegtu šo mērķi, tiks veikti plaši lauka pētījumi, analizējot dažādas augsnes apstrādes metodes, pasējas augu ietekmi uz oglekļa apriti un SEG emisijām, kā arī veicot SEG emisiju prognozēšanu, balstoties uz jauniem modelēšanas risinājumiem. Tiks izmantotas modernas mērījumu tehnoloģijas, piemēram, gāzu analizatori un jau esošas ilgtermiņa monitoringa sistēmas, kas nodrošinās detalizētu SEG emisiju datu bāzi, kas būs pielāgota Latvijas klimatiskajiem un agroekoloģiskajiem apstākļiem.

Pētījuma rezultātiem būs tieša praktiska nozīme vairākās jomās:

1. Nacionālās SEG inventarizācijas pilnveidošana – iegūtie dati un izstrādātās aprēķinu metodikas tiks izmantotas Latvijas SEG inventarizācijas uzlabošanai, nodrošinot precīzākus un zinātniski pamatotākus emisiju aprēķinus atbilstoši Eiropas Savienības un Apvienoto Nāciju Organizācijas (ANO) prasībām.
2. Lauksaimniecības ilgtspējas veicināšana – pētījumā izstrādātās un testētās SEG emisiju mazināšanas metodes ļaus lauksaimniekiem pielāgot savas apsaimniekošanas prakses, lai efektīvāk samazinātu SEG emisijas un palielinātu oglekļa piesaisti augsnē.
3. Regulas prasību izpilde – Eiropas Komisijas regulas nosaka nepieciešamību pāriet uz precīzākiem SEG emisiju uzskaites mehānismiem lauksaimniecības nozarē. Pētījuma rezultāti sniegs zinātnisko pamatojumu šādu prasību ieviešanai Latvijā, nodrošinot atbilstību Eiropas klimata politikas mērķiem.
4. Starptautisko klimata politikas saistību izpilde – pētījuma dati tiks integrēti starptautiskajos ziņojumos, kas sagatavoti atbilstoši Apvienoto Nāciju Organizācijas Vispārējās konvencijas par klimata pārmaiņām (UNFCCC) un Eiropas Komisijas regulatīvajiem dokumentiem.
5. Zinātnes attīstība un starptautiskā sadarbība – pētījums sniegs ieguldījumu SEG emisiju aprēķinu metodoloģijas attīstībā, stiprinot Latvijas zinātnisko kapacitāti

klimate pārmaiņu pētniecības jomā un sekmējot starptautisku sadarbību SEG emisiju uzskaites un modelēšanas jautājumos.

Pētījuma ietvaros īstenosim detalizētu lauku mērījumu programmu, kas ietvers SEG emisiju noteikšanu no aramzemēm un ilggadīgajiem zālājiem dažādos apsaimniekošanas scenārijos. Pētījumā analizēsīm arī dažādus augsnes apstrādes paņēmienus un to ietekmi uz SEG emisijām, īpašu uzmanību pievēršot aluviālajām augsnēm.

Turklāt pilnveidosim organisko augšņu izplatības darbību datus lauksaimniecībā izmantojamām zemēm atbilstoši jaunākajām pieejamajām zināšanām, tajā skaitā sagatavosim priekšlikumus darbību datu pārrēķiniem no 1990. gada, un novērtēsīm darbību datu izmaiņu iespējamo ietekmi uz SEG emisijām zemes izmantošanas, zemes izmantošanas un mežsaimniecības (ZIZIMM), kā arī lauksaimniecības sektorā nacionālajā SEG inventarizācijas ziņojumā, prognožu ziņojumos un to ietekmi uz saistību izpildi 2025. un 2030. gados.

Nozares attīstībai šis pētījums sniegs vairākus būtiskus ieguvumus:

- Precīzākus SEG emisiju aprēķinus, kas nodrošinās labāku izpratni par emisiju avotiem un to samazināšanas iespējām.
- Uzlabotu SEG emisiju uzskaites metodoloģiju, kas būs pielāgota Latvijas klimatiskajiem apstākļiem un ļaus efektīvāk plānot SEG emisiju samazināšanas pasākumus.
- Ilgtspējīgākas lauksaimniecības prakses, kas palīdzēs lauksaimniekiem pielāgot savas darbības, lai samazinātu SEG emisijas un palielinātu oglekļa piesaisti.
- Labāku datu bāzi un prognožu precizitāti, kas veicinās zinātniski pamatotu klimata politikas veidošanu un SEG emisiju mazināšanas pasākumu ieviešanu.

Lai nodrošinātu šo rezultātu sasniegšanu, pētījums tiks īstenots ciešā sadarbībā ar Latvijas Biozinātņu un tehnoloģiju universitāti (LBTU), Agrolesursu un ekonomikas institūtu (AREI) un Latvijas Valsts mežzinātnes institūtu "Silava" (LVMI Silava), kā arī citām zinātniskajām un nozares institūcijām. Plānotās aktivitātes ietver lauka eksperimentu veikšanu, empīrisko datu apkopošanu un modelēšanas rīku attīstīšanu, kas ļaus precīzāk prognozēt SEG emisiju un oglekļa piesaistes dinamiku dažādos lauksaimniecības apsaimniekošanas scenārijos.

Pētījuma praktiskais pielietojums nodrošinās tiešu labumu Latvijas lauksaimniekiem, klimata politikas veidotājiem un zinātniekiem, palīdzot izveidot efektīvākas un ilgtspējīgākas SEG emisiju uzskaites un mazināšanas stratēģijas.

Īstenotie 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. raksturota pasējas auga izmantošanas ietekme uz SEG emisijām (pētniecisko uzdevumu īsteno LBTU un LVMI Silava):
 - a) novērtētas CO₂, CH₄ un N₂O emisijas lauksaimniecībā izmantotajās zemēs, kur sarkanais āboliņš (*Trifolium repens* L.) izmantots augu rotācijā vai kā pasējas augs (divi saimniekošanas viedi un trīs kultūraugi), un ievākt virszemes biomasu mērījumu vietās, lai novērtētu oglekļa ienesi augsnē un to ietekmi uz SEG emisijām (biomasas paraugu sagatavošanu un analīzes veic LVMI Silava);
 - b) raksturota sarkanā āboliņa izmantošanas un izvēlēto kultūraugu ietekme uz SEG emisijām izpētes teritorijā, ko apsaimnieko AREI Stendes pētniecības centrs, tostarp novērtētas augsnes īpašību, augsnes mitruma, gaisa temperatūras, nokrišņu, mēslojuma izkliedēšanas un saimniekošanas veida ietekme uz SEG emisijām;
 - c) sagatavota nodaļa ziņojumā par pētījuma rezultātiem.
2. pilnveidoti organisko augšņu izplatības darbību dati lauksaimniecībā izmantojamām zemēm atbilstoši jaunākajām pieejamajām zināšanām, tajā skaitā sagatavoti priekšlikumi darbību datu pārreķiniem no 1990. gada, un novērtēta darbību datu izmaiņu iespējamā ietekme uz SEG emisijām zemes izmantošanas, zemes izmantošanas un mežsaimniecības (ZIZIMM), kā arī lauksaimniecības sektorā nacionālajā SEG inventarizācijas ziņojumā, prognožu ziņojumos un to ietekmi uz saistību izpildi 2025. un 2030. gados (pētniecisko uzdevumu veic LVMI Silava).
3. turpināti mērījumi, kas saistīti ar augsnes heterotrofās elpošanas ietekmes uz CO₂ apriti, SEG emisijām no augsnes un oglekļa ienesi ar augu atliekām raksturošanu aluviālās (palieņu) augsnēs aramzemēs (pētniecisko uzdevumu veic AREI):
 - a) turpināta empīrisku datu (SEG emisijas un augsnes heterotrofā elpošana) ieguve divās platībās aramzemēs;
 - b) sagatavots ziņojums par pētījuma rezultātiem.
4. ierīkoti izmēģinājumu objekti un uzsākta empīrisku datu ieguve zemes izmantošanas veida un augsnes apstrādes metodes ietekmes uz CO₂, CH₄ un N₂O emisijām no organiskām augsnēm raksturošanai (pētniecisko uzdevumu veic AREI):
 - a) ierīkoti izmēģinājumu objektu platībā ar organisku augsni, kurā turpmāko gadu laikā salīdzināsim SEG emisijas no sētā zālāja, kurā notiek periodiska augsnes apstrāde, vienlaidus arumā un diskotā platībā;
 - b) veikti gāzu apmaiņas mērījumi, periodiski (vismaz reizi mēnesī) nosakot CO₂, CH₄ un N₂O emisijas no augsnes;

c) sagatavota nodaļa ziņojumā par pētījuma rezultātiem.

Pētījuma 1. darba uzdevums. Pētījumā īpaša uzmanība pievērsta pasējas augu izmantošanai kā potenciālam SEG emisiju samazināšanas mehānismam. Starpkultūras, piemēram, sarkanais āboliņš, var samazināt CO₂ emisijas, uzlabojot augsnes organiskā oglekļa krājumus un pozitīvi ietekmējot dislāpekļa oksīda (N₂O) emisiju dinamiku. Šī darba uzdevuma ietvaros analizēta sarkanā āboliņa izmantošana lauksaimniecības zemēs kā pasējas auga un kā daļas no augu rotācijas sistēmas, lai izvērtētu tā ietekmi uz SEG emisijām. Pētījums ietver detalizētus lauka mērījumus un laboratoriskās analīzes, kas ļaus izprast sarkanā āboliņa lomu SEG emisiju regulēšanā un oglekļa plūsmu ietekmēšanā.

Darba uzdevuma CO₂, CH₄ un N₂O emisiju novērtējums lauksaimniecības zemēs ietvaros veikta CO₂, CH₄ un N₂O emisiju mērīšana divās dažādās saimniekošanas sistēmās, kurās izmantots sarkanais āboliņš. Pasējas auga izmantošana – sarkanais āboliņš iesēts kā starpkultūra starp pamata kultūraugiem, lai nodrošinātu nepārtrauktu augsnes segumu un uzlabotu augsnes auglību. Augu rotācijas sistēma – sarkanais āboliņš tiek audzēts kā daļa no kultūraugu rotācijas, nodrošinot slāpekļa piesaisti un organiskās vielas uzkrāšanos augsnē. Abos gadījumos tiks novērtētas SEG emisijas no trīs dažādiem kultūraugiem, kas audzēti izpētes teritorijās. SEG emisiju mērījumi veikti lauka apstākļos, izmantojot precīzas gāzu analīzes metodes.

Darba uzdevuma *Biomases ievākšana un oglekļa ieneses analīze* ietvaros, lai novērtētu oglekļa piesaisti un plūsmas starp atmosfēru un augsni, SEG emisiju mērījumu vietās veikta virszemes biomasas paraugu ievākšana. Biomasas paraugi analizēti LVMI Silava laboratorijā, nosakot oglekļa saturu un kopējo biomasu. Oglekļa ieneses izvērtējums ļauj precīzāk raksturot pasējas auga devumu SEG emisiju mazināšanā un oglekļa piesaistē.

Darba uzdevums *Sarkanā āboliņa un kultūraugu ietekmes raksturojums SEG emisiju kontekstā* īstenots izpētes teritorijā, ka atrodas AREI Stendes pētniecības centrā, kur veikti ilgtermiņa lauka eksperimenti dažādu apsaimniekošanas metožu ietekmes izvērtēšanai uz SEG emisijām. Darba uzdevuma ietvaros veikta detalizēta SEG emisiju analīze, ņemot vērā šādus faktorus:

- augsnes īpašības – analizējot organiskā un minerālā slāņa attiecību, fizikāli ķīmiskās īpašības un organiskā oglekļa saturu;
- augsnes mitrums – novērtējot mitruma svārstību ietekmi uz CH₄ un N₂O emisiju intensitāti dažādās apsaimniekošanas sistēmās;
- gaisa temperatūra un nokrišņi – apkārtnes klimata dati tiks izmantoti, lai analizētu meteoroloģisko faktoru ietekmi uz SEG emisiju dinamiku;
- mēslojuma izkliedēšanas efekts – izvērtējot dažādu mēslošanas stratēģiju ietekmi uz SEG emisijām un biomasas produktivitāti.

- saimniekošanas veida ietekme – salīdzinot dažādas apsaimniekošanas prakses un to efektivitāti SEG emisiju samazināšanā.

Iegūtie dati tiks, lai noteiktu, kurā apsaimniekošanas sistēmā SEG emisijas ir viszemākās un kā sarkanā āboliņa izmantošana ietekmē SEG emisiju līmeni ilgtermiņā. Iegūtos datus un secinājumus izmantosim gan nacionālās SEG inventarizācijas pilnveidošanai, gan Eiropas Komisijas un ANO prasību izpildei SEG emisiju uzskaites un mazināšanas politikas ietvaros.

Pētījuma 2. darba uzdevums. SEG emisiju aprēķinu precizitāte ir tieši atkarīga no ticamiem un detalizētiem darbību datiem par dažādu zemes izmantošanas veidu attīstību, īpaši attiecībā uz organiskajām augsnēm. Organisko augšņu degradācija ir viens no nozīmīgākajiem SEG emisiju avotiem lauksaimniecībā, jo tās satur lielus organiskā oglekļa krājumus, kuru izdalīšanās atmosfērā var būtiski ietekmēt valsts SEG emisiju bilanci.

Šī pētījuma uzdevums ir pilnveidot organisko augšņu izplatības un izmantošanas darbību datus lauksaimniecībā izmantojamās zemēs, izmantojot jaunākās pieejamās zināšanas un modernās tālīzpētes metodes. Šīs datu korekcijas un papildinājumi izmantoti, lai sagatavotu priekšlikumus darbību datu pārrēķiniem, sākot no 1990. gada, un novērtētu šo datu izmaiņu iespējamo ietekmi uz SEG emisijām gan Zemes izmantošanas, zemes izmantošanas maiņas un mežsaimniecības (ZIZIMM) sektorā, gan lauksaimniecības SEG emisiju aprēķinos.

Pētījuma pamatu veido jaunākie pētījumi, kuros izmantotas tālīzpētes metodes, tostarp augstas izšķirtspējas satelītattēlu analīze, lāzerskenēšanas dati un spektroskopiskās analīzes. Šo metožu integrācija ļauj iegūt detalizētāku un precīzāku organisko augšņu kartējumu, identificējot:

- organisko augšņu platības un to izmaiņas laikā – salīdzināti pašreizējie dati ar vēsturiskajiem satelītattēliem, lai novērtētu, kā organisko augšņu izmantošana ir mainījusies kopš 1990. gada;
- meliorēto un nemeliorēto organisko augšņu izplatību – analizēta meliorācijas sistēmu ietekme uz SEG emisijām;
- lauksaimniecībā izmantoto organisko augšņu apsaimniekošanas režīmus – apkopojot datus par zemes izmantošanu un zemes izmantošanas maiņu Meža resursu monitoringa parauglaukumos.

Līdz šim Latvijā izmantotā organisko augšņu uzskaitē lielā mērā balstījās uz vēsturiskiem datiem un pētījumiem, kas raksturo organisko augšņu faktisko izplatību, salīdzinot ar augšņu kartēšanas datiem. Tomēr iepriekšējā desmitgadē strauji attīstījušās tālīzpētes tehnoloģijas, kas sniedz iespēju precizēt organisko augšņu izplatības un apsaimniekošanas datus. Šajā pētījumā iegūtie uzlabotie dati ir nozīmīgi SEG emisiju aprēķinu uzlabošanai, ļaujot precīzāk plānot efektīvākas SEG emisiju samazināšanas stratēģijas.

Darbību datu pārrēķinu metodoloģija un priekšlikumi uzlabojumiem. Lai nodrošinātu SEG emisiju aprēķinu precizitāti ilgtermiņā, būtiski veikt vēsturisko darbību datu korekciju un pielāgošanu mūsdienu zinātniskajām atziņām. Pētījuma ietvaros tiks sagatavoti priekšlikumi darbību datu pārrēķiniem, aptverot laika periodu no 1990. gada līdz mūsdienām. Galvenie veicamie soļi darbību datu pārrēķinu procesā:

- esošo datu kvalitātes izvērtējums – analizēta līdz šim izmantoto organisko augšņu datu precizitāte un to atbilstība jaunākajām starptautiskajām vadlīnijām (Eggleston, Buendia, Miwa, Ngara, & Kiyoto, 2006; Hiraishi u.c., 2013);
- jauno datu integrācija – pamatojoties uz tālizpētes analīzi un lauka pētījumiem, veikta organisko augšņu platību un apsaimniekošanas datu precizēšana (Ivanovs u.c., 2024; Melniks u.c., 2024);
- emisiju faktoru korekcija – ņemot vērā jaunākos empīriskos datus par CO₂, CH₄ un N₂O emisijām no organiskajām augsnēm (MoCE, 2025), veikts SEG emisiju pārrēķins;
- vēsturisko SEG emisiju pārrēķins – izmantojot uzlabotos organisko augšņu datus, veikti pārrēķini par SEG emisiju apjomiem no lauksaimniecībā izmantotajām organiskajām augsnēm kopš 1990. gada.

Pētījuma rezultāti ļauj izstrādāt zinātniski pamatotus priekšlikumus, kas ļaus precīzāk novērtēt lauksaimniecības ietekmi uz SEG emisijām un oglekļa piesaisti.

SEG emisiju ietekmes novērtējums un saistību izpilde 2025. un 2030. gadā. Uzlabotie darbību dati un SEG emisiju pārrēķini izmantoti, lai novērtētu iespējamo ietekmi uz:

- Nacionālo SEG inventarizāciju – nodrošinot precīzākus aprēķinus par SEG emisijām no organiskajām augsnēm un pilnveidojot ZIZIMM sektora emisiju novērtējumu;
- SEG emisiju prognožu ziņojumiem – veicot jaunu emisiju scenāriju modelēšanu, kas ņem vērā precīzētos organisko augšņu apsaimniekošanas datus;
- Latvijas saistību izpildi ES klimata politikā – uzlabotie dati sniedz precīzāku priekšstatu par to, vai Latvija spēs izpildīt SEG emisiju samazināšanas mērķus 2025. un 2030. gadā.

Praktiskais ieguvums un nozīme lauksaimniecības un klimata politikas attīstībā. Pētījuma rezultāti tieši izmantojami klimata politikas veidošanā un SEG emisiju pārvaldībā, sniedzot šādus ieguvumus:

- precīzāka organisko augšņu izplatības kartēšana, kas ļauj efektīvāk plānot SEG emisiju mazināšanas pasākumus;
- uzlaboti SEG emisiju aprēķini, kas nodrošina lielāku datu ticamību un pielāgotību Eiropas Komisijas prasībām SEG emisiju uzskaitēm no organiskām augsnēm (European Commission, 2023);

- ilgtermiņa SEG emisiju samazināšanas stratēģiju izstrāde, balstoties uz precīzākām prognozēm un apsaimniekošanas datiem.

Šī pētījuma rezultāti sniedz būtisku ieguldījumu Latvijas klimata politikas un SEG emisiju pārvaldības pilnveidē, nodrošinot ilgtspējīgākas lauksaimniecības attīstības iespējas un veicinot efektīvu dabas resursu apsaimniekošanu.

Pētījuma 3. darba uzdevums. Augsnes heterotrofā elpošana būtiski ietekmē SEG emisiju bilanci un oglekļa piesaistes spēju lauksaimniecības augsnēs, īpaši aluviālajās augsnēs, kur skābekļa pieejamība, liels mitruma un organiskās vielas saturs palielina heterotrofās elpošanas intensitāti. Pētījuma mērķis ir turpināt datu ieguvu augsnēs heterotrofās elpošanas ietekmes uz CO₂ apriti un SEG emisijām no augsnēs aluviālajās aramzemēs raksturošanai, kā arī novērtēt oglekļa ienesi augsnē ar augu atliekām. Tas ļaus padziļināti izprast SEG emisiju veidošanās mehānismus šajās augsnēs un sniegt zinātniski pamatotus priekšlikumus SEG emisiju samazināšanas stratēģijām lauksaimniecībā.

Empīrisku datu iegūšana un mērījumu metodoloģija. Pētījuma ietvaros turpinās empīrisku datu ieguve divās izpētes platībās, kas atrodas aluviālajās augsnēs aramzemēs. Šīs platības raksturo:

- liels organiskās vielas saturs, kas palielina mikrobioloģiskās aktivitātes intensitāti un CO₂ emisijas no augsnēs, kā to demonstrēja 2024. gadā iegūtie dati;
- mitruma režīma svārstības, kas var būtiski mainīt heterotrofās elpošanas intensitāti un kopējās SEG emisijas.

Pētījumā izmantotas SEG emisiju un augsnēs heterotrofās elpošanas mērīšanas metodes, kas nodrošina gāzu hromatogrāfijas metodei pielīdzināmu precizitāti un salīdzināmību ar iepriekš publicētiem datiem.

Galvenie mērījumu parametri:

- CO₂ emisijas mērījumi – tiks veikta periodiska CO₂ emisiju monitorēšana, izmantojot kameras metodi un gāzu analizatorus, kas ļaus precīzi noteikt augsnēs heterotrofās elpošanas ietekmi uz kopējo SEG emisiju dinamiku;
- augsnēs mitrums un temperatūra – paralēli SEG emisiju mērījumiem fiksēti mitruma un temperatūras dati, kas palīdz izprast šo faktoru ietekmi uz CO₂ emisijām;
- oglekļa ienese augsnē ar augu atliekām – novērtēta augu atlieku uzkrāšanās un noārdīšanās intensitāte, lai noteiktu, cik lielā mērā tās veicina vai kompensē SEG emisijas.

Pētījuma nozīme un rezultātu izmantošana. Iegūtie rezultāti ļauj detalizēti raksturot aluviālo augšņu SEG emisiju veidošanās mehānismus un sniegs vērtīgas atziņas par

oglekļa aprites dinamiku šāda veida aramzemēs. Šī informācija būs būtiska vairākiem aspektiem:

- SEG inventarizācijas uzlabošanai – precīzāki dati par CO₂ emisijām no aluviālajām augsnēm izmantojami nacionālās SEG inventarizācijas pilnveidošanā;
- lauksaimniecības ilgtspējas veicināšanai – pētījuma rezultāti palīdzēs izstrādāt ieteikumus SEG emisiju mazināšanas pasākumiem, piemēram, pielāgojot augsnes apstrādes metodes vai organisko vielu apsaimniekošanas stratēģijas;
- klimata politikas attīstībai – iegūtā informācija noderīga politikas veidotājiem, plānojot SEG emisiju samazināšanas pasākumus un novērtējot lauksaimniecības sektora ietekmi uz klimatu.

Pētījuma 4. darba uzdevums. SEG emisiju apjoms un dinamika no organiskajām augsnēm ir tieši atkarīga no zemes izmantošanas veida un pielietotās augsnes apstrādes metodes. Ilgtspējīga organisko augšņu apsaimniekošana lauksaimniecībā ir būtisks aspekts SEG emisiju samazināšanai un klimata politikas mērķu sasniegšanai. Šī pētījuma uzdevums ir ierīkot izmēģinājumu objektu organiskā augsnē un iegūt empīriskos datus par trīs zemes apsaimniekošanas metožu ietekmi uz SEG emisijām. Pētījuma laikā tiks analizēta CO₂, CH₄ un N₂O emisiju intensitāte dažādās apsaimniekošanas sistēmās, sniedzot jaunas zināšanas par efektīvākajām SEG emisiju samazināšanas stratēģijām lauksaimniecībā.

Izmēģinājumu objekta izveide un pētījuma metodoloģija. Lai nodrošinātu ticamus un salīdzināmus datus par SEG emisijām no organiskajām augsnēm, tiks ierīkots izmēģinājumu objekts ar trīs dažādiem apsaimniekošanas scenārijiem. Šī pieeja ļaus analizēt, kā dažādas augsnes apstrādes metodes ietekmē SEG emisiju intensitāti un dinamiku. Izmēģinājumu objektā tiks iekļautas trīs dažādas apsaimniekošanas sistēmas:

- sēts zālājs ar periodisku augsnes apstrādi – šajā scenārijā zālāju apsaimnieko, ar noteiktu laika intervālu (7 gadi) veicot aršanu, lai novērtētu, kā šādas iejaukšanās ietekmē SEG emisijas ilgtermiņā;
- vienlaidus arums – novērtētas SEG emisijas no regulāri artām organiskajām augsnēm, kas var būtiski palielināt CO₂ un N₂O emisijas, vienlaikus nodrošinot lielāku oglekļa ienesi augsnē ar kultūraugu atliekām;
- diskotā platība – pētījumā analizēts, vai diskošana, kas ir mazāk agresīva augsnes apstrādes metode nekā aršana, samazina SEG emisijas.

Šis pētījuma dizains ļauj kvantitatīvi novērtēt, kura no šīm metodēm ir klimatam draudzīgākā un piemērotākā organisko lauksaimniecības augšņu apsaimniekošanai Latvijā.

SEG emisiju monitorings un analīze. Pētījuma ietvaros veikti gāzu apmaiņas mērījumi, kas ļauj noteikt SEG emisiju svārstības dažādos laika apstākļos un sezonālajās fāzēs. Galvenie SEG emisiju mērīšanas parametri:

- CO₂ emisijas – tiek mērītas kā indikators augsnes elpošanas un organiskā oglekļa zuduma intensitātei;
- CH₄ emisijas – tiek analizētas, jo mitrās organiskās augsnēs var veidoties metāns, kas ir spēcīga siltumnīcefekta gāze;
- N₂O emisijas – tiek novērtētas, jo augsnes apstrāde un slāpekļa cikla traucējumi var veicināt augstas N₂O emisijas, kas būtiski ietekmē SEG bilanci.

Gāzu apmaiņas mērījumi veikti vismaz reizi mēnesī, izmantojot gāzu analizatorus un slēgtās kameras metodi, kas nodrošina precīzu SEG emisiju kvantifikāciju dažādās apsaimniekošanas sistēmās. Paralēli SEG emisiju mērījumiem tiks veikti arī papildus dati:

- augsnes mitruma un temperatūras monitorings – šie faktori būtiski ietekmē mikroorganismu aktivitāti un SEG emisiju veidošanos;
- augsnes fizikāli ķīmisko īpašību analīze – noteikts augsnes organiskā oglekļa saturs, slāpekļa pieejamība un citas īpašības, kas var ietekmēt SEG emisiju dinamiku.
- lauksaimniecības darbību dokumentēšana – reģistrēti visi lauksaimniecības darbi, lai novērtētu to ietekmi uz SEG emisiju intensitāti.

Sagaidāmie rezultāti un to praktiskais pielietojums. Šī pētījuma rezultāti nodrošina būtisku ieguldījumu organisko augšņu SEG emisiju uzskaitē un sniedz praktiski izmantojamus datus lauksaimniecības sektora ilgtspējīgai attīstībai, lai arī praktiski pielietojamu modelēšanas instrumentu izstrādāšanai pētījumi jāturpina vēl vismaz 5 gadus un jāmērogo, ietverot lielāku audzējamo kultūru skaitu un augšanas apstākļus. Galvenie sagaidāmie ieguvumi:

- detalizēts emisiju raksturojums dažādām apsaimniekošanas metodēm – salīdzinoša SEG emisiju analīze starp sētu zālāju, apartu un diskotu platību;
- dati par ilgtspējīgām organisko augšņu apsaimniekošanas metodēm – šie dati palīdz lauksaimniekiem un politikas veidotājiem pieņemt informētus lēmumus par efektīvākajām SEG emisiju mazināšanas metodēm;
- ieteikumi SEG emisiju samazināšanas pasākumiem – balstoties uz empīriskajiem datiem, mēs varēsim izstrādāt rekomendācijas, kādas augsnes apstrādes metodes un zemes izmantošanas veidi ir visefektīvākie SEG emisiju samazināšanai organiskās augsnēs;
- datu integrācija nacionālajā SEG inventarizācijā – iegūtos rezultātus varēs izmantoti, lai pilnveidotu SEG emisiju uzskaiti Latvijas SEG inventarizācijas ziņojumos un veicinātu precīzāku emisiju modelēšanu.

Pasējas auga izmantošanas ietekmes uz SEG emisijām novērtējums

Nodaļa sagatavota, izmantojot Latvijas Biozinātņu un tehnoloģiju universitātes (LBTU) sagatavoto pārskatu “Aramzemes un ilggadīgo zālāju apsaimniekošanas radīto siltumnīcefekta gāzu (SEG) emisiju un oglekļa dioksīda (CO₂) piesaistes uzskaites sistēmas pilnveidošana un atbilstošu metodisko risinājumu izstrādāšana”. Pārskata autori Kristīne Bīlande, Olga Šķiste, Kristaps Siltumēns, Lidija Vojevoda, Rēzija Paeglīte, Annija Straume. Projekta vadītāja LBTU Ainis Lagzdīņš.

Pētījuma pārskatā analizēti lauka mērījumu rezultāti, kas raksturo SEG plūsmas minerālaugsnēs un atsevišķi organiskās augsnes Stendes pētniecības centrā, kur 2021.-2025. gadā ar slēgtās kameras metodi un Picarro G2508 analizatoru kvantificētas CO₂, N₂O un CH₄ emisijas dažādu kultūru un saimniekošanas prakšu apstākļos. Mērķis bija novērtēt pasējas (ar īpašu uzsvāru uz sarkano āboliņu) un augseku kā vadības instrumentu ietekmi uz augsnes SEG plūsmām, integrējot meteoroloģisko fonu un augsnes parametrus, kā arī izstrādājot aprēķinu algoritmu datu transformācijai no koncentrācijām uz plūsmām. Kopumā veikti 1566 mērījumi (analīzē iekļauti 1553; 13 izslēgti kvalitātes apsvērumu dēļ), 2025. gadā rīkojot 14 mērījumu sērijas laukos ar auzām, griķiem, daudzgadīgo zālāju, vasaras un ziemas kviešiem, vasaras miežiem, zaļmēslojumu, kartupeļiem, ziemas rudziem un ziemas ripsi, kas audzēti bioloģiskā un integrētā režīmā.

Metodikā aprakstīta plūsmas iegūšana no koncentrāciju datu laika rindām, izmantojot lineāro regresiju un ideālās gāzes stāvokļa vienādojumu, nodrošinot vienotu mērvienību sistēmu un aprēķina reproducējamību. Kameru ģeometrija, sensoru konfigurācija un mērījumu biežums ļāva iegūt sekundes izšķirtspējas datus piecos gāzu kanālos; mērījumi veikti trīs atkārtojumos katrā punktā ar paralēliem augsnes mitruma un temperatūras pierakstiem.

Aprakstošā statistika 2025. gadā iegūtajiem datiem liecina par izteikti asimetrisku N₂O sadalījumu: vidējā vērtība 3,8 g N₂O ha⁻¹ d⁻¹ pārsniedz mediānu 1,5 g ha⁻¹ d⁻¹, kas norāda uz īslaicīgiem pīķiem, iespējams, pēc mēslojuma ieneses vai mitruma izmaiņām. CO₂ plūsmas bija 132,2 kg ha⁻¹ d⁻¹ (mediāna 98,1 kg ha⁻¹ d⁻¹), savukārt CH₄ vidēji -5,4 g ha⁻¹ d⁻¹, kas raksturo minerālaugsnī kā neto metāna patērētāju.

Kultūru griezumā minimālās N₂O emisijas konstatētas ziemas kviešos un ziemas rudzos, bet maksimālās – kartupeļos un vasaras miežos; konvencionālajos laukos ar minerālmēslojumu tika novērota augstāka N₂O emisiju intensitāte, īpaši kartupeļos, kamēr bioloģiskajos sējumos ar tauriņziežu pasēju emisijas biežāk bija zemākas vai ar mazāku variabilitāti. Starpkultūras un pasēja, jo īpaši sarkanais āboliņš, mazināja N pieejamības svārstību radītos impulsus un stabilizēja plūsmas, vienlaikus nodrošinot

lielāku organiskā oglekļa ienesi. Statistisko testu rezultāti (Kruskal-Wallis) apstiprina vairākas nozīmīgas atšķirības starp kultūrām un pārvaldības veidiem.

Meteoroloģiskais fons 2025. gada veģetācijas periodā (vidējā $T = 12,3\text{ }^{\circ}\text{C}$; nokrišņu summa = 467,5 mm) raksturojas ar izteikti mitru jūliju, kas var būt saistīts ar novērotajiem N₂O emisiju pīķiem denitrifikācijas aktivizēšanās rezultātā. Mēnešu griezumā analīze apliecina plūsmas jutīgumu pret mitrumu un temperatūru, kas saskan ar literatūrā aprakstītajiem procesiem.

Pasējas un augsekas optimizēšana (tauriņzieži, zaļmēslojums) kombinācijā ar pielāgotām mēslošanas praksēm spēj mazināt N₂O emisiju risku, saglabājot CO₂ plūsmas ekosistēmas oglekļa bilances ietvaros un nepalielinot CH₄ emisijas; līdz ar to pasēja ir efektīvs instruments SEG mazināšanai minerālaugsnēs mērenajā klimata joslā. Iegūtie dati ir integrējami prognožu un inventarizācijas pilnveidošanā, īpaši attiecībā uz aramzemju un zālāju kategorijām.

Ievads

Saskaņā ar Kioto protokolu un Līgumslēdzēju pušu konferences lēmumu Nr. 2/CMP.6 otrajā saistību izpildes periodā (2013.-2020. gads) aramzemju un ilggadīgo zālāju apsaimniekošanas radīto SEG emisiju un CO₂ piesaistes ziņošana ir brīvprātīga. Latvija nav izvēlējusies gatavot ziņojumus par SEG emisijām un CO₂ piesaisti šajās Kioto protokola 3. panta 4. punktā uzskaitītajās aktivitātēs. Ziņošanas procedūra un iespēja izvēlēties ziņojamās aktivitātes brīvprātīgi noteikta Līgumslēdzēju pušu konferences lēmumā Nr. 2/CMP.7. Paredzams, ka pēc 2020. gada ilggadīgo zālāju un aramzemju apsaimniekošanas radīto SEG emisiju un CO₂ piesaistes ziņošana kļūs obligāta Kioto protokola 1. pielikumā uzskaitītajām valstīm, tajā skaitā Latvijai.

Par uzskaites periodu, kas sākas 2021. gada 1. janvārī, Latvijai būs jā sagatavo un jā uztur ikgadēja uzskaitē, kurā pareizi jāatspoguļo visas emisijas un piesaiste, kas to teritorijā rodas darbībās, kuras ietilpst šādās kategorijās: aramzemes apsaimniekošana un ganību apsaimniekošana.

SEG emisiju prognožu dati zemes izmantošanas, zemes izmantošanas un mežsaimniecības sektorā iekļaujami “Divgadu ziņojumā un nacionālajā ziņojumā”, kas sagatavojams atbilstoši EK Regulas 749/2014 18. pantu; Līgumslēdzēju pušu konferences lēmumu COP 2/CP.17 un UNFCCC 12. pantu; “Ziņojumā par politiku un pasākumiem”, kas sagatavojams saskaņā ar Eiropas Komisijas un Parlamenta Regulas 525/2013 13. pantu; “Ziņojums, kurā aprakstīts zemes izmantošanas, zemes izmantošanas maiņas un mežsaimniecības darbību īstenošanā panāktais progress” saskaņā ar regulas 529/2013 10. pantu un citos ziņojumos, kas izriet no prasībām nacionālā SEG inventarizācijas ziņojuma sagatavošanai un dažādos ziņojumos iesniedzamo datu integritātes nodrošināšanai.

Pētījuma ietvaros tiek risināti jautājumus, kas saistīti ar prognožu ziņojumu pilnveidošanu, izstrādājot un integrējot LVMI Silava sadarbībā ar Zemkopības ministriju, Latvijas Biozinātņu un tehnoloģiju universitāti un citām institūcijām gatavojamajos ziņojumos augsnes oglekļa uzkrājuma izmaiņu prognozes un ar tām saistītās N₂O emisijas no minerālaugsnēm lauksaimniecībā izmantojamās zemēs.

Izmantojot projekta gaitā iegūtos rezultātus, ir sagatavota un publicēta zinātniskā publikācija “The role of red clover (*Trifolium pratense* L.) in mitigating greenhouse gas emissions: Insights from a temperate agricultural ecosystem” žurnālā *Agriculture, Ecosystems & Environment*.

SEG emisijas no minerālaugsnēs

Siltumnīcefekta gāzu (SEG) emisijas no minerālaugsnēm lauksaimniecībā ir atkarīgas no dažādiem biofizikāliem procesiem, kas saistīti ar organisko vielu uzņemšanu un sadalīšanos augsnē. Nozīmīgākās SEG, kas izdalās no augsnēm, ir oglekļa dioksīds (CO₂), metāns (CH₄) un dislāpekļa oksīds (N₂O). Šīs emisijas ietekmē vairāki faktori, piemēram, augsnes temperatūra, mitrums, mikroorganismu aktivitāte, augsnes struktūra, kā arī izmantotie lauksaimniecības zemju apstrādes paņēmieni un agronomiskās darbības. Lauksaimniecība rada gandrīz 12% no pasaules antropogēnajām SEG emisijām.

CO₂ emisijas no augsnēm galvenokārt rodas mikrobioloģisko procesu rezultātā, kad mikroorganismi sadala organisko vielu aerobos apstākļos. CO₂ emisijas var ietekmēt arī augu atliekas un augsnes pH līmenis. Piemēram, neitrāls augsnes pH līmenis veicina augstākas CO₂ emisijas (Čuhel u.c., 2010). Auglīgāka augsne ar lielāku organiskās vielas saturu un mikroorganismu aktivitāti var radīt lielāku CO₂ izdalīšanos (Ferdush u.c., 2023; Kuzyakov, 2006).

CH₄ emisijas galvenokārt rodas anaerobos apstākļos, kur metanogēnas baktērijas ražo metānu. Šie apstākļi bieži rodas ūdenī piesātinātās augsnēs, piemēram, purvos vai applūdušās lauksaimniecības zemēs. Tādēļ CH₄ emisijas pozitīvi korelē ar augsnes mitruma līmeni (Conrad, 2020; Le Mer & Roger, 2001).

N₂O emisijas rodas nitrifikācijas un denitrifikācijas procesu rezultātā. Nitrifikācija notiek aerobos apstākļos, kad mikroorganismi pārvērš amonija formā esošo slāpekli nitrātu formā, bet denitrifikācija - anaerobos apstākļos, kad slāpekļis no nitrātu formas tiek reducēts līdz dislāpekļa oksīdam vai slāpekļa gāzei. N₂O emisijas var palielināties, ja pēc sausuma periodiem seko augsnes samitrināšanās, kā arī pēc mēslojuma lietošanas, jo tas palielina pieejamo minerālo slāpekli (Butterbach-Bahl u.c., 2013; Oertel u.c., 2016).

Bioloģiskās un konvencionālās lauksaimniecības ietekme uz SEG emisijām no augsnes

Lielākā daļa lauksaimniecības zemju tiek apstrādātas, izmantojot konvencionālās metodes, kurās galvenā loma ir sintētiski ražotiem minerālmēsliem un ķīmiskiem augu aizsardzības līdzekļiem. Šāda pieeja ir izteikti mehanizēta, kas

samazina nepieciešamību pēc manuāla darbaspēka. Konvencionālajā saimniekošanā iegūtā pārtika ir ekonomiski izdevīga, jo tā nodrošina augstākas ražas uz vienu platības vienību, padarot ražošanu efektīvāku un mazāk izmaksu ietilpīgu, salīdzinot ar citām metodēm. Konvencionālā lauksaimniecības sistēmā dabas procesu un cilvēku darbības rezultātā tiek veicinātas augsnes auglības izmaiņas:

1. Lietojot minerālmēslus, tiek veicināta augsnes paskābināšanās. Tīrums, dārzeņi, pļavās un ganībās ir sastopamas augsnes ar zemu pH līmeni, tās ir augsnes, kurās ir nepietiekams kalcija saturs. Papildu augsnes paskābināšanos veicina arī skābie lieti, kas veidojas fosilā kurināmā sadedzināšanas rezultātā. Lai regulētu augsnes pH līmeni, ir nepieciešams augsnes kaļķot;
2. Ja papildus netiek pievadītas organiskas izcelsmes augu barības vielas, notiek organiskās vielas satura samazināšanās. Organiskā viela augsnē rodas no trūdošām augu atliekām un citiem atmirušiem organismiem, un to noārdīšanās nodrošina barības vielas augu attīstībai un uzlabo augsnes auglību. Lai uzlabotu organiskās vielas saturu augsnē, jālieto organiskais mēslojums, jāaudzē un augsnē jāiestrādā zaļmēslojuma augi;
3. Konvencionālā saimniecībā audzēto kultūraugu skaits ir neliels, tāpēc augu maiņa ir vienveidīga un, lai nodrošinātu kultūraugiem nepieciešamās barības vielas, lieto minerālmēslus. Lai tos lietojot nepiesārņotu vidi, ir jāievēro mēslojuma izkliedes laiks un devas (Grantina u.c., 2011).

Bioloģiskā lauksaimniecība ir kļuvusi arvien populārāka, jo tā sniedz ilgtermiņa ieguvumus videi. Bioloģiskā lauksaimniecība ir saimniekošanas sistēma, kurā lauksaimniecības produkcija tiek iegūta, saimniekojot ar videi draudzīgām metodēm, nelietojot minerālmēslus un ķīmiskos augu aizsardzības līdzekļus. Bioloģiskā lauksaimniecība samazina enerģijas patēriņu minerālmēslu un ķīmisko augu aizsardzības līdzekļu ražošanas procesā, bet nezāles, kaitēkļus un sīkbūtnes iznīcina ar bioloģiskām vai mehāniskām metodēm, un kultūraugu ražību nodrošina, veidojot veselīgu augsni. Bioloģiskā lauksaimniecības sistēmā ražas palielināšanai nevis pievada papildu minerālmēslus, bet ar dažādiem paņēmieniem rosina dzīvības procesus augsnē, piemēram:

- augu maiņā obligāti iekļauj augus, kas spēj piesaistīt slāpekli no gaisa (gadā tauriņzieži spēj piesaistīt 200-300 kg slāpekļa uz vienu ha lauksaimniecības zemes);

- barības vielas augiem nodrošina ar organisko mēslojumu (pakaišu kūtsmēsli, virca u.c.) un zaļmēslojuma augu audzēšanu un iestrādi augsnē (āboliņš, eļļas rutks, sinepes u.c.);
- lieto mikroorganismu darbību veicinošus augsnes apstrādes paņēmienus (augšņu apvēršanu, dziļirdināšanu) (Grantina u.c., 2011).

Augsnes mikroorganismiem ir svarīga loma barības vielu apritē un organiskās vielas sadalīšanā, kas ir cieši saistīta ar siltumnīcefekta gāzu, tostarp CO₂, N₂O un CH₄, emisijām. Organisko savienojumu sadalīšanās rezultātā mikroorganismi izdala CO₂, N₂O un CH₄. Amonijs tiek nitrificēts, izraisot dislāpekļa oksīda zudumu nitrifikācijas laikā, un nitrātu slāpekli var denitrificēt anaerobos apstākļos, kā rezultātā rodas papildu dislāpekļa oksīda un slāpekļa gāzes emisijas. Metānu ražo metogēnas baktērijas un oksidē augsnē esošās metanotrofās baktērijas. Anaerobos apstākļos metanoģenēze pārsniedz metanotrofiju, kā rezultātā rodas metāna emisijas (Zhao u.c., 2024).

Tradicionālās lauksaimniecības sistēmas parasti ir ļoti produktīvas, nodrošinot augstu ražu, lai saražotu pietiekamu pārtikas apjomu pastāvīgi pieaugošajam pasaules iedzīvotāju skaitam, taču ar ievērojamu ietekmi uz vidi. Turpretim bioloģiskā lauksaimniecība tiek uztverta kā ilgtspējīga lauksaimniecības iespēja, tomēr bieži tiek kritizēta par zemāku ražu sasniegšanu, tāpēc, ņemot vērā šo faktoru, bieži tiek apšaubītas tās priekšrocības (Boschiero u.c., 2023).

Bioloģiskā lauksaimniecība var samazināt SEG emisijas, samazinot sintētisko mēslošanas līdzekļu un augu aizsardzības līdzekļu patēriņu un ražošanu, ieviešot starpkultūras, kultūraugu rotāciju un komposta izmantošanu, tādējādi palielinot oglekļa uzkrāšanos, samazinot ūdens noteci un uzlabojot augsnes auglību (Squalli & Adamkiewicz, 2018). Tomēr ir pētījumi, kas parāda, ka SEG emisijas no augsnes ir augstākas tieši bioloģiski apstrādātiem laukiem, salīdzinot ar konvencionāli apstrādātiem laukiem. Piemēram, Somijā veiktajā pētījumā, kur SEG emisijas tika mērītas bioloģiski un konvencionāli apsaimniekotos zālajos un konvencionāli apsaimniekotos graudaugos, statistiski nozīmīgas koncentrāciju atšķirības netika novērotas (Syväsalu u.c., 2006), bet Anglijā veiktajā pētījumā secināts, ka SEG emisijas konvencionāli apsaimniekotos laukos uz hektāru ir ievērojami augstākas (Cooper u.c., 2011).

Salīdzinot abas lauksaimniecības sistēmas pēc dzīves cikla novērtējuma (t.sk. laistīšana, tehnikas izmantošana un mēslošana), bioloģiskā lauksaimniecība ir videi draudzīgāka, salīdzinot ar konvencionālo saimniekošanas metodi, ja salīdzinājums ir veikts uz platības vienību (1 ha). Savukārt, ja salīdzinājums ir izteikts uz produkta vienību (1 tonna), tad konvencionālā lauksaimniecība uzrāda labākus vides rādītājus. Rezultāti liecināja, ka bioloģiskās audzēšanas sistēma uz hektāru radīja par 11% mazāku ekoloģisko nospiedumu un par 15% mazākas CO₂ emisijas, salīdzinot ar konvencionālo sistēmu (Foteinis & Chatzisyneon, 2016).

Pasējas ietekme uz SEG emisijām no augsnes

Pasējas augu izmantošana sniedz vairākus būtiskus agronomiskus un vides uzlabojumus. Tā veicina oglekļa uzkrāšanos augsnē (Padarian u.c., 2022), uzlabo ūdens infiltrāciju, samazina eroziju un barības vielu zudumus, kā arī uzlabo augsnes struktūru un auglību. Pasēja ļauj samazināt minerālmēslu izmantošanu un palīdz kontrolēt nezāļu izplatību laukos (Hartwig & Hoffman, 1975).

Pākšaugi pasējā īpaši labi attīstās pie zemāka slāpekļa satura augsnē, salīdzinot ar galveno kultūru. Ja slāpekļa saturs ir augsts, galvenā kultūra izkonkurē pākšaugus, kas apliecina slāpekļa koncentrācijas būtisko regulējošo lomu. Liela pākšaugu biomasa liecina par zemu nitrātu slāpekļa izskalošanās risku un augstu nepieciešamību pēc slāpekļa piesaistes, savukārt galvenās kultūras dominēšana norāda uz augstu izskalošanās potenciālu un nepieciešamību pēc slāpekļa aiztures (De Notaris u.c., 2021).

Meta-analīzes liecina, ka pasēja palielina N₂O emisijas par 49% un CO₂ emisijas par 46%, salīdzinot ar papuvi. To skaidro pastiprināta organisko atlieku sadalīšanās mikroorganismu aktivitātes dēļ. Tomēr, pateicoties ražas palielinājumam, globālais sasilšanas potenciāls uz saražotās produkcijas vienību ir līdzīgs vai pat zemāks nekā bez pasējas (Daryanto u.c., 2018; Gougoulas u.c., 2014).

Galvenie faktori, kas nosaka N₂O emisiju, ir pasējas augu veids, saražotās biomasas apjoms, lignīna saturs un C/N attiecība augu atliekās (Li u.c., 2023). Ja biomasa ir liela un agroklimatiskie apstākļi labvēlīgi, N₂O emisija samazinās, jo aktīvi augoši augi uzņem nitrātu slāpekli un ūdeni, radot nelabvēlīgus apstākļus denitrifikācijas procesa norisei. Savukārt, ja pasējas augu augšana ir ierobežota, uzņemšana samazinās un emisijas palielinās. Pētījumi liecina, ka siltākās ziemās pasējas augi uzņem vairāk slāpekļa, mazinot N₂O emisiju risku (Behnke & Villamil, 2019). Augsta oglekļa ienese no netauriņziežu pasējas var stimulēt N₂O emisijas (Kaye & Quemada, 2017).

CO₂ emisijas no augsnes ir atkarīgas no vairākiem faktoriem – ne tikai pasējas auga veida, bet arī klimata, mikroorganismu aktivitātes un paraugu ievākšanas laika (Nguyen & Kravchenko, 2021). Piemēram, ziemas starpkultūru laukos mazākās CO₂ koncentrācijas novērotas jūnijā, kad nokrišņu daudzums ir vismazākais (Baril u.c., 2022). Savukārt CH₄ emisijas pasēju sistēmās būtiski nepalielinās, un daudzos gadījumos tās pat darbojas kā absorbētājs (Kaye & Quemada, 2017).

Pākšaugu kultūras var uzskatīt par stratēģiju N₂O emisiju samazināšanai, jo to audzēšanas laikā nav nepieciešams slāpekļa mēslojums. Tomēr jāņem vērā, ka pākšaugu attīstības laikā sakņu zonā notiek slāpekļa izdalīšanās, kas pēc augu novākšanas atkal nonāk aprites ciklā (Guardia u.c., 2016). Pētījumi rāda, ka pākšaugi, augot monokultūrā, var radīt augstākas emisijas pastiprinātas denitrifikācijas dēļ (Lebender u.c., 2014).

Starpkultūrām ir būtiska loma ilgtspējīgā augsekā – tās nodrošina veģetācijas nepārtrauktību, samazina nitrātu slāpekļa zudumus un veicina oglekļa piesaisti. Pētījumi rāda, ka āboliņa starpkultūra spēj samazināt N₂O emisijas par 40% salīdzinājumā ar

minerālmēsļu lietošanu (Abagandura u.c., 2020). Jauktas starpkultūras ar pākšaugiem var samazināt N₂O emisijas par 35%, salīdzinot ar augstražīgām monokultūrām, kurām nepieciešams liels mēslojums, piemēram, kukurūza (Senbayram u.c., 2015).

Lucerna kā daudzgadīgs tauriņziežu augs satur vairāk slāpekļa nekā zālāji, un pēc tās iearšanas nitrātu emisiju risks ir augsts. Savukārt lucernas un zālāju attīstītās sakņu sistēmas veicina nitrātu uzņemšanu, samazinot emisiju risku (Sadeghpour u.c., 2016).

Starpkultūras palielina biomasu un līdz ar to arī CO₂ emisijas, taču tās vienlaikus nodrošina lielāku organiskā oglekļa un slāpekļa uzkrājumu, kas ilgtermiņā uzlabo augsnes auglību (Muhammad u.c., 2019). Piemēram, miežu starpkultūra kukurūzai palielina CO₂ emisijas par 44% pirms iestrādes, kamēr rapša pasēja būtisku efektu nerada (Sanz-Cobena u.c., 2014).

Mērenajā klimata joslā apsaimniekotas lauksaimniecības platības var būt CH₄ absorbētāji. Rapša un miežu starpkultūras darbojas kā CH₄ piesaistītāji un neveicina emisijas (Sanz-Cobena u.c., 2014). Lielākā daļa pētījumu norāda, ka lauksaimniecības platības, izņemot rīsu laukus, nav nozīmīgi CH₄ emisiju avoti, tāpēc šie rādītāji bieži netiek mērīti (Yao u.c., 2023; Walter u.c., 2015).

Materiāli un metodes

Pētījuma objekta raksturojums

Laika posmā no 2021. līdz 2025. gadam, projekta ietvaros, lauka apstākļos tika veikti N₂O, CH₄, CO₂ un NH₃ mērījumi Stendes pētniecības centrā. Šajā centrā lauksaimniecības darbības pārsvarā gadījumu notiek minerālaugsnēs, lai gan atsevišķos laukos sastopamas arī organiskās augsnes. SEG emisiju mērījumu vietas ir attēlotas Att. 1, lauksaimniecības prakses un augsnes veidi ir raksturoti Tab. 1, savukārt no Tab. 3 līdz Tab. 15 ir sniegts apraksts par katrā laukā veiktajām agronomiskajām darbībām.



Att. 1. SEG emisiju no augsnes mērījumu vietas Stendes pētījumu stacijā.

Tab. 1. Augsnes veids un apstrāde mērījumu veikšanas laukos (skaitlis norāda uz lauka atrašanās vietu Att. 1)

Mērījuma vieta	2025. gads	Saīsinājums	Saimniekošana	Augsne
1	Auzas	A	Biol	Min
2	Auzas	A	Biol	Org
3	Griķi	G	Biol	Min
4	Daudzgadīgais zālājs	DZ	Biol	Org
5	Vasaras mieži	VM	Konv	Min
6	Vasaras kvieši	VK	Biol	Min
7	Atmata	AT	Konv	Min
8	Zaļmēslojums	ZM	Biol	Min
9	Kartupeļi	K	Konv	Min

Aramzemes un ilggadīgo zālāju apsaimniekošanas radīto siltumnīcefekta gāzu (SEG) emisiju un oglekļa dioksīda (CO₂) piesaistes uzskaites sistēmas pilnveidošana un atbilstošu metodisko risinājumu izstrādāšana

Mērījuma vieta	2025. gads	Saīsinājums	Saimniekošana	Augsne
10	Ziemas ripsis	ZRI	Biol	Min
11	-	-	Konv	Min
12	Ziemas kvieši	ZK	Biol	Min
13	Ziemas rudzi	ZRU	Biol	Org
14	Auzas	A	Konv	Min

Tab. 2. Augu seka mērījumu laukos

Mērījuma vieta	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
1	ZK	A	G	VK	VM	SĀ	ZK	A
2	ZK	A	G	VK	VM	SĀ	ZK	A
3	A	G	VK	VM	SĀ	ZK	A	G
4	A	G	VK	VM	SĀ	ZK	A	DZ
5	A	GP	ZK	VM	Z	VK	K	VM
6	GP	VK	VM	SĀ	ZK	A	G	VK
7	GP	ZK	VM	SĀ	VK	K	VM	AT
8	VK	VM	SĀ	ZK	A	G	VK	ZM
9	K	A	GP	ZK	VM	SĀ	A	K
10	-	-	-	VKP	P	Z	RP	ZRI
11	ZR	ZK	A	P	GZ	ZR	ZK	-
12	SĀ	ZK	AZP	G	VK	VMP	SĀ	ZK
13	-	-	-	-	-	VMP	SĀ	ZRU
14	ZK	K	ASP	G	ZK	VMP	SĀ	A

Tab. 3. Agronomiskās darbības 1. laukā

Auzas, 2025	
Lauksaimniecības veids	Bioloģiska
Priekšsargs	Griķi sēklai (šķ. Aiva) (2020), V.kvieši (šķ. ‘‘Uffo’’ (2021), V.mieži +s.āboliņš (2022), s.āboliņš (2023) z.kvieši (2024)
Augsne	pH-6,8, VG, mS, P ₂ O ₅ -23mg kg ⁻¹ ; K ₂ O-66 mg kg ⁻¹ , organiskā viela-4,2%
Augsnes apstrāde	Aršana 30.09.2024, šļūķšana 25.03.25, ecēšana 21.05.25
Pamatmēslojums	-
Sēkla	PB2 šķirne Stendes Lote
Izsējas norma	235 kg ha ⁻¹
Sējas laiks	03.04.25
Papildmēslojums	-
Smidzinājumi	-

Tab. 4. Agronomiskās darbības 2. laukā

Auzas, 2025	
Lauksaimniecības veids	Bioloģiska
Priekšaug	Griķi sēklai (šķ. Aiva) (2020), V.kvieši (šķ. "Uffo") (2021), v.mieži (2022), s.āboliņš (2023), z.kvieši (2024)
Augsne	pH-6,8, VG, mS, P ₂ O ₅ -23mg kg ⁻¹ ; K ₂ O-66 mg kg ⁻¹ , organiskā viela-4,2%
Augsnes apstrāde	Aršana 30.09.2024, šļūkšana 25.03.25, ecēšana 21.05.25
Pamatmēslojums	-
Sēkla	PB2 kategorija šķirne Stendes Lote
Izsējas norma	235 kg ha ⁻¹
Sējas laiks	03.04.25
Papildmēslojums	-
Smidzinājumi	-

Tab. 5. Agronomiskās darbības 3. laukā

Griķi, 2025	
Lauksaimniecības veids	Bioloģiska
Priekšaug	v. kvieši (šķ. Uffo) (2020), mieži (šķ. "Austri") (2021), s.āboliņš (2022), z.kvieši (2023), auzas (2024)
Augsne	pH-6,7, VG, mS, P ₂ O ₅ -39mg kg ⁻¹ ; K ₂ O-66 mg kg ⁻¹ , organiskā viela-4,5%
Augsnes apstrāde	10.10.24, šļūkšana 01.04.25, kultivācija 12.05.25
Pamatmēslojums	-
Sēkla	B kategorija šķirne Aiva
Izsējas norma	75 kg ha ⁻¹
Sējas laiks	28.05.25
Papildmēslojums	-
Smidzinājumi	-

Tab. 6. Agronomiskās darbības 4. laukā

Daudzgadīgais zālājs, 2025	
Lauksaimniecības veids	Bioloģiska
Priekšaug	v. kvieši (šķ. Uffo) (2020), mieži (šķ. "Austri") (2021), s.āboliņš (2022), z.kvieši (2023), auzas (2024)
Augsne	pH-6,9, VGT, mS, P ₂ O ₅ -14mg kg ⁻¹ ; K ₂ O-95 mg kg ⁻¹ , organiskā viela-34,8%
Augsnes apstrāde	10.10.24 aršana, šļūkšana 01.14.25, kultivācija 12.05.25
Pamatmēslojums	-
Sēkla	izmēģinājums
Izsējas norma	10-20 kg ha ⁻¹
Sējas laiks	
Papildmēslojums	-
Smidzinājumi	-

Tab. 7. Agronomiskās darbības 5. laukā

Vasaras mieži, 2025	
Lauksaimniecības veids	Konvencionāla
Priekšaugi	z.kvieši (2020), mieži (šķ. Didzis) (2021), zirņi (2022), v.kvieši (2023), kartupeļi (2024)
Augsne	pH-5,7, Pv mS, P ₂ O ₅ -133mg kg ⁻¹ ; K ₂ O-119 mg kg ⁻¹ , organiskā viela-1,6%
Augsnes apstrāde	
Pamatmēslojums	NPK 15-15-15 300 kg ha ⁻¹ -14.04.25 Axan 27-4 150 kg ha ⁻¹ -14.04.2025
Sēkla	Miežu selekcija
Izsējas norma	200-230 kg ha ⁻¹ (atkarībā no šķirnes)
Vasaras mieži, 2025	
Sējas laiks	18.04.25
Papildmēslojums	
Smidzinājumi	Saracen 0,1 L ha ⁻¹ +Nuance 75 WG 0,015 kg ha ⁻¹ 23.05.25

Tab. 8. Agronomiskās darbības 6. laukā

Vasaras kvieši, 2025	
Lauksaimniecības veids	Bioloģiska
Priekšaugi	v.kvieši (2019), v.mieži (2020), āboliņš (šķ. Dižstende) (2021), z.kvieši (2022), auzas (2023), griķi (2024)
Augsne	pH-6,7, VG, mS, P ₂ O ₅ -39mg kg ⁻¹ ; K ₂ O-66 mg kg ⁻¹ , organiskā viela-4,5%
Augsnes apstrāde	Aršana 12.10.24, šļūkšana 01.04.25, ecēšana 12.05.25, 23.05.25
Pamatmēslojums	-
Sēkla	v.kvieši Robijs PB2 kategorija
Izsējas norma	221 kg ha ⁻¹
Sējas laiks	19.04.25
Papildmēslojums	-
Smidzinājumi	-

Tab. 9. Agronomiskās darbības 7. laukā

Atmata, 2025	
Lauksaimniecības veids	Konvencionāla
Priekšaugi	z.kvieši (2019), v.mieži (2020), āboliņš (šķ. Dižstende sēklai) (2021), v.kvieši (2022), kartupeļi (2023), v.mieži (2024)
Augsne	pH – 6,2, Pv, sM3, P ₂ O ₅ -135 mg kg ⁻¹ , K ₂ O – 133 mg kg ⁻¹ , organiskā viela - 2,1%
Augsnes apstrāde	Aršana 29.05.25, šļūkšana 02.06.25
Pamatmēslojums	-
Sēkla	Zaļmēslojums (griķi+zirņi)
Izsējas norma	(75kg+ 50 kg)
Sējas laiks	04.06.25

Atmata, 2025	
Papildmēslojums	-
Smidzinājumi	Glifosāts 3 L ha ⁻¹ 06.05.25

Tab. 10. Agronomiskās darbības 8. laukā

Zaļmēslojums, 2025	
Lauksaimniecības veids	Bioloģiska
Priekšaugš	s.āboliņš (2020), Ziemas kvieši (šķ. Edvins) (2021), auzas (2022), griķi (2023), v.kvieši(2024)
Augsne	pH-7,0, VG, mS, P ₂ O ₅ -14mg kg ⁻¹ ; K ₂ O-49 mg kg ⁻¹ , organiskā viela-4,6%
Augsnes apstrāde	Aršana 20.10.24, šļūkšana 01.04.25, kultivācija 06.06.25; 20.05.25.
Pamatmēslojums	-
Sēkla	Sinepes+vīķi+griķi
Izsējas norma	85 kg ha ⁻¹
Sējas laiks	04.06.25
Papildmēslojums	-
Smidzinājumi	-

Tab. 11. Agronomiskās darbības 9. laukā

Kartupeļi, 2025	
Lauksaimniecības veids	Konvencionāla
Priekšaugš	Griķi zaļmēslojums (2020), z.kvieši (šķ. Edvins) (2021), v.mieži (2022), s.āboliņš (2023), auzas (2024)
Augsne	pH-5,8, Pv, mS, P ₂ O ₅ -137 mg kg ⁻¹ ; K ₂ O-98 mg kg ⁻¹ , organiskā viela-2,0%
Augsnes apstrāde	Aršana 20.03.25, šļūkšana 27.03, dziļjirdināšana
Pamatmēslojums	NPK 12-11-18 350kg ha ⁻¹
Sēkla	šķirne Vineta, A kategorijas sēkla
Izsējas norma	3 t/ha
Sējas laiks	13-14.05.25
Papildmēslojums	Multiple 0,5L ha ⁻¹ , Nitross 3 L ha ⁻¹ - 02.07.25
Smidzinājumi	AGILS 1 L ha ⁻¹ -29.05.25 Titus 25 D0,05 L ha ⁻¹ +Contakt 0,2 L ha ⁻¹ -21.06.25, "Infinito-, 1,5 L ha ⁻¹ -2,07 Infinito 1,2 l ha-12.07.25; 1,2 l ha- 22.07.25; 1,0 L ha ⁻¹ -02.08.25 Conclude 0,5 L ha ⁻¹ -02.08.25 Carnadine(0,12 L ha ⁻¹ -2.07.25

Tab. 12. Agronomiskās darbības 10. laukā (A. Zaziša lauks)

Ziemas ripsis, 2025	
Lauksaimniecības veids	Bioloģiska
Priekšaugš	v.kvieši ar s.āboliņa pasēju (2021), pupas (2022), zirņi (2023), rudzi ar s.āboliņa pasēju (2024)
Augsne	
Augsnes apstrāde	
Pamatmēslojums	-

Ziemas ripsis, 2025	
Sēkla	
Izsējas norma	
Sējas laiks	
Papildmēslojums	-
Smidzinājumi	-

Tab. 13. Agronomiskās darbības 12. laukā

Ziemas kvieši, 2025	
Lauksaimniecības veids	Bioloģiska
Priekšaug	Auzas+zirņi (2020), griķi (2021), v.kvieši (2022), v.mieži ar s.āboliņa pasēju (2023), s.āboliņš (2024)
Augsne	pH-6,8, VG, mS, P ₂ O ₅ -21mg kg ⁻¹ ; K ₂ O-61 mg kg ⁻¹ , organiskā viela-6,8%
Augsnes apstrāde	Aršana 20.08.24, kultivācija 10.09.24, ecēšana 06.05.25, 21.05.25
Pamatmēslojums	-
Sēkla	Izmēģinājums šķirne Fredis
Izsējas norma	250 kg ha ⁻¹
Sējas laiks	18.09.24
Papildmēslojums	-
Smidzinājumi	-

Tab. 14. Agronomiskās darbības 13. laukā

Ziemas rudzi, 2025	
Lauksaimniecības veids	Bioloģiska
Priekšaug	V.mieži ar s.āboliņa pasēju (2023), s.āboliņš (2024)
Augsne	pH-6,8, VG, mS, P ₂ O ₅ -21mg kg ⁻¹ ; K ₂ O-61 mg kg ⁻¹ , organiskā viela-6,8%
Augsnes apstrāde	Aršana 20.08.24, kultivācija 10.09.24, ecēšana 06.05.25, 21.05.25
Pamatmēslojums	-
Ziemas rudzi, 2025	
Sēkla	Šķirne Stendes II
Izsējas norma	170 kg ha ⁻¹
Sējas laiks	18.09.25
Papildmēslojums	-
Smidzinājumi	-

Tab. 15. Agronomiskās darbības 14. laukā

Auzas, 2025	
Lauksaimniecības veids	Konvencionāla
Priekšaug	Auzas/sinapes(2020), griķi (2021), z.kvieši (2022), v.mieži ar s.āboliņa pasēju (2023), s.āboliņš (2024)
Augsne	pH-5,2, Pv, mS, P ₂ O ₅ -143mg kg ⁻¹ ; K ₂ O-109 mg kg ⁻¹ , organiskā viela-1,0%
Augsnes apstrāde	Aršana 10.10.24, šļūķšana 01.04.25

Auzas, 2025	
Pamatmēslojums	NPK 15-15-15 350 kg ha ⁻¹ AXAN 27-4 150 kg ha ⁻¹
Sēkla	Šķirne Stendes Emilija
Izsējas norma	251 kg ha ⁻¹
Sējas laiks	9-10.04.2025
Papildmēslojums	-
Smidzinājumi	Arrat(250,0 g kg ⁻¹ tritosulfurons, 500,0 g kg ⁻¹ dikamba) 0,2 L ha ⁻¹ +Contakt 0,05 L ha ⁻¹ -21.05; Medax Max (kalcijs proheksadions - 50 g kg ⁻¹ , etil-trineksapaks - 75 g kg ⁻¹) 0,3L ha ⁻¹ -14.06.25; Delmetros 0,05L ha ⁻¹ -21.05.25

Mērījumu veikšana ar Picarro

Nodaļā apkopota informācija par projektā izmantotajām iekārtām un aprīkojumu, kā arī datu analizēšanas metodēm, sniegts meteoroloģisko apstākļu raksturojums.

Iekārtas un aprīkojums

Lauksaimniecības augsnēs emitēto gāzu mērījumus veica izmantojot mobilo spektrofotometru Picarro G2508 (Att. 2), kas ļauj vienlaikus reģistrēt piecas gāzes - N₂O, CH₄, CO₂, NH₃, un H₂O ar vienas sekundes intervālu. Katrā izpētes vietā tika veikti mērījumi trīs atkārtojumos. Iekārtas tehniskie parametri un pielietošanas iespējas ir aprakstītas Fleck u.c. (2013) pētījumā. Mērījumiem izmantoja necaurspīdīgas kameras, kuru pamatnes diametrs ir 23 cm un tilpums 3 litri (Att. 3). Pamatne ir veidota no metāla, un tās apakšējā mala ir noasināta, lai to būtu vieglāk ievietot augsnē. Uz pamatnes novieto necaurspīdīgu kupolu. Blīvējumu starp pamatni un kupolu nodrošināja rūpnieciski uzstādīta gumijas blīve. Gāzu savākšana notika, izmantojot nerūsējošā tērauda savienojumus un 9 metrus garu teflona cauruli, kuras iekšējais diametrs ir 1/16 collas un ārējais 1/8 collas, savienotu ar kameru, izmantojot ātro savienojumu ar gumijas izolāciju.



Att. 2. Picarro G2508 gāzu analizators (autors: K. Bīlande).



Att. 3. Kamera gāzu mērījumu veikšanai (autors: K. Bīlande).

Pirms augsnes gāzu emisiju mērījumiem tika veikti augsnes mitruma un temperatūras mērījumi, izmantojot mitruma mērītāju gruntīm Ivy Garden (IVY- SO6IN1) un temperatūra un augsnes mitruma metrs STEP Systems Combi 5000, kas veic augsnes mitruma un temperatūras mērījumus augsnes virsējā slānī. Augsnes mitruma dati tika fiksēti datu nolasīšanas iekārtā un ierakstīti datu lapās.

Gaisa temperatūras un gaisa spiediena mērījumus kamerā veic, izmantojot barometriskā spiediena mērītājus Diver DI 500, Eijkelkamp, kur mērītājs ir novietots kamerā tieši pirms kupola nostiprināšanas.

Datu analīzes metodes

Lai iekārtas Picarro G2508 koncentrācijas mērījumus transformētu siltumnīcas efekta gāzu emisijās no hektāra, aprēķinam tika izmantots vairāku pakāpju algoritms (Att. 4).



Att. 4. Gāzu koncentrāciju mērījumu transformācijas aprēķina algoritma shematisks attēlojums.

Emisiju koeficienta aprēķins

Siltumnīcas efekta gāzu emisiju raksturo koncentrācijas izmaiņas ātrums un virziens izolētā kamerā. Emisiju koeficienta aprēķina pamatā ir lineārā regresija (1. formula), izmantojot mazāko kvadrātu metodi, kur emisiju apjomu raksturo regresijas koeficients (2. formula), savukārt brīvais loceklis (3. formula) raksturo mērījumu sākuma koncentrāciju. Precizitāti raksturo determinācijas koeficients R^2 (4. formula). Lineārās regresijas aprēķinam tika izmantotas četras mērījumu minūtes.

$$y = mx + b, \text{ kur} \quad (1)$$

y – koncentrācija ppm/s;
x – laiks sekundēs;
m – regresijas koeficients;
b – brīvais loceklis.

$$m = \frac{n \sum (xy) - \sum x \sum y}{n \sum (x^2) - (\sum x)^2}, \text{ kur} \quad (2)$$

m – regresijas koeficients;
y – koncentrācija ppm/s;
x – laiks sekundēs;
n – mērījumu skaits.

$$b = \frac{\sum y - m \sum x}{n}, \text{ kur} \quad (3)$$

b – brīvais loceklis;
y – koncentrācija;
x – laiks sekundēs;
m – regresijas koeficients;
n – mērījumu skaits.

$$R^2 = \left(\frac{n \sum (xy) - \sum x \sum y}{\sqrt{[n \sum (x^2) - (\sum x)^2][n \sum (y^2) - (\sum y)^2]}} \right)^2, \text{ kur} \quad (4)$$

R^2 – determinācijas koeficients;
y – koncentrācija;
x – laiks sekundēs;
n – mērījumu skaits.

Emisijas koeficienta transformācijas

Emisiju koeficienta pārrēķinam uz koncentrāciju diennaktī no hektāra tika izmantots ideālās gāzes stāvokļa vienādojums (5. formula).

$$F = p * \frac{V}{A} * \frac{\Delta c}{\Delta T} * \frac{273}{T + 273}, \text{ kur} \quad (5)$$

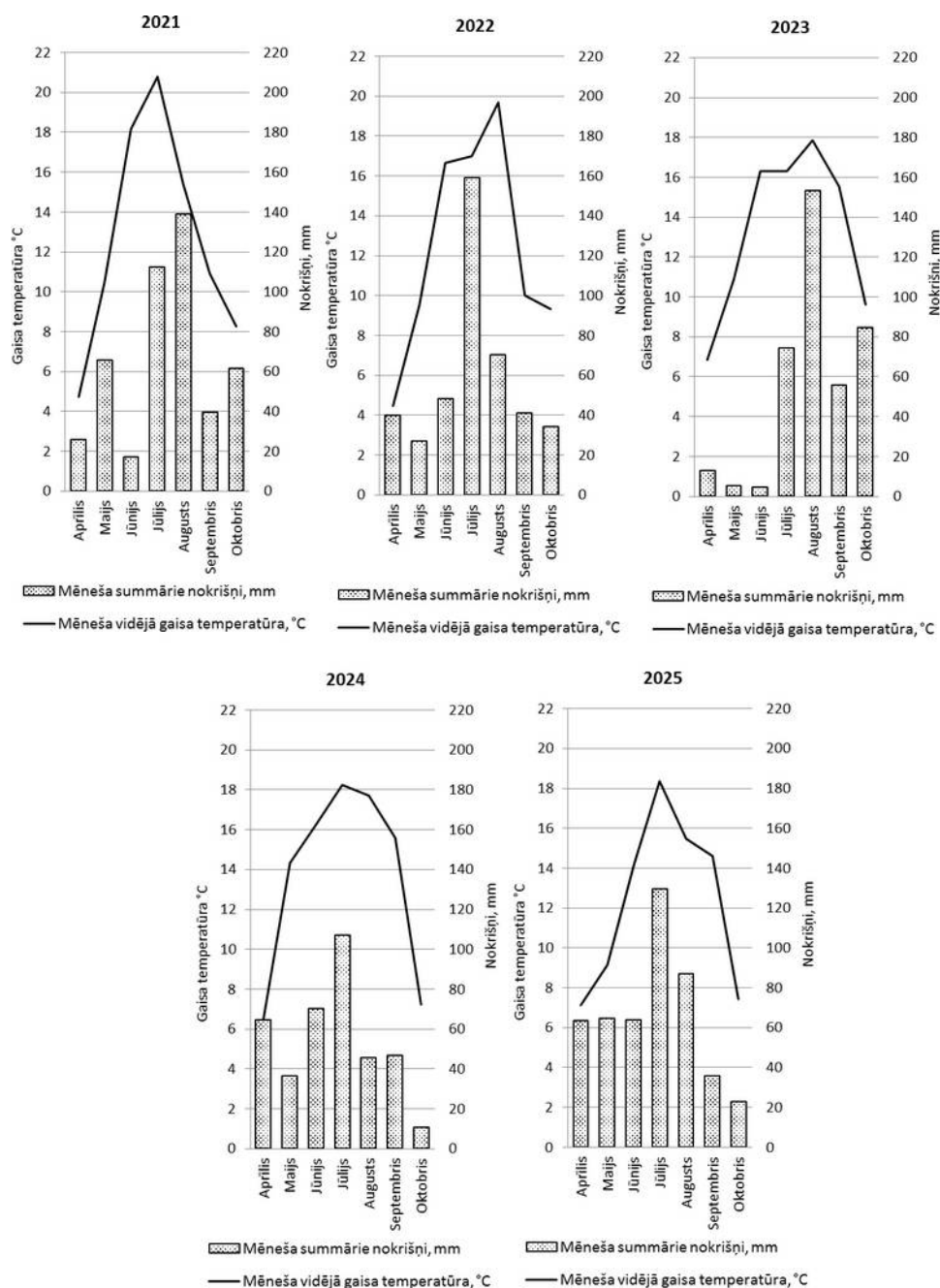
F – emisijas apjoms no augsnes (g ha⁻¹ dnn⁻¹);
p – gāzes blīvums mg m⁻³;
V – kameras tilpums m³;
A – kameras laukums m²;
 $\Delta c / \Delta T$ – vidējā koncentrācijas izmaiņa laikā ppm s⁻¹;
T – kameras temperatūra OC.

Veicot transformācijas, ir ļoti būtiski saglabāt vienotu mērvienību sistēmu. Picarro G2508 dod gāzu molārās koncentrācijas, tādēļ jāveic pāreja no molārās koncentrācijas uz masas koncentrāciju.

Meteoroloģisko apstākļu raksturojums

LVGMC meteoroloģiskajā novērojumu stacijā “Stende” 2025. gada veģetācijas periodā nokrišņu summa bija 467,5 mm, bet vidējā gaisa temperatūra šajā periodā bija 12,3 °C. Vismazāk nokrišņu ir novērots septembrī (35,8 mm), bet visvairāk jūlijā (129,7 mm) (Att. 5).

Aprīlī vidējā gaisa temperatūra Stendē bija 1,3 °C virs 1991.-2020. gada mēneša normas (5,8 °C) un nokrišņu daudzums par 25,5 mm lielāks nekā 1991.- 2020. gada mēneša norma (38,1 mm). Maijā vidējā gaisa temperatūra Stendē bija 2,0 °C zem 1991.-2020. gada mēneša normas (11,1 °C) un nokrišņu daudzums par 18,5 mm lielāks nekā 1991.-2020. gada mēneša norma (46,0 mm). Jūnijā vidējā gaisa temperatūra Stendē bija 0,6 °C zem 1991.-2020. gada mēneša normas (14,7 °C) un nokrišņu daudzums par 7,5 mm mazāks nekā 1991.-2020. gada mēneša norma (71,4 mm). Jūlijā vidējā gaisa temperatūra Stendē bija 1,1 °C virs 1991.- 2020. gada mēneša normas (17,3 °C) un nokrišņu daudzums 51,6 mm virs 1991.-2020. gada mēneša normas (78,1 mm). Augusta vidējā gaisa temperatūra Stendē bija 1,1 °C zem 1991.-2020. gada mēneša normas (16,6 °C) un nokrišņu daudzums par 3,6 mm lielāks nekā 1991.-2020. gada mēneša norma (83,4 mm). Septembrī vidējā gaisa temperatūra Stendē bija 2,5 °C virs 1991.-2020. gada mēneša normas (12,1 °C) un nokrišņu daudzums par 28,2 mm mazāks nekā 1991.-2020. gada mēneša norma (64,0 mm) (LVGMC, 2025).



Att. 5. Mēneša vidējās gaisa temperatūras un mēneša nokrišņu summa LVĢMC Stendes novērojumu stacijā veģetācijas periodā no 2021. līdz 2025. gadam (LVĢMC, 2025).

Rezultāti

Rezultātu nodaļas pirmajā apakšnodaļā ir apkopoti SEG mērījumu rezultāti 2025. gadā, kur sniegts ieskaits N₂O, CO₂ un CH₄ emisiju no augsnes apjomu raksturojošajos rādītājos, un otrajā apakšnodaļā ir analizēta audzēto kultūru ietekme, trešajā apakšnodaļā izvērtēta augsnes temperatūras un augsnes mitruma ietekme, ceturtajā apakšnodaļā analizēta lauksaimnieciskās darbības veidu (bioloģiskā un konvencionālā) ietekme, bet piektajā apakšnodaļā ir analizēta bioloģiski apstrādātu lauku audzējamās

kultūras un augsnes (minerālaugsne un organiskā augsne) ietekme, bet sestajā apakšnodaļā ir skatīta sarkanā āboliņa ietekme uz N₂O, CO₂ un CH₄ emisiju apjomu.

SEG mērījumu no augsnes rezultāti

Līdz 2025. gada 31. oktobrim Stendē veiktas 14 mērījumu kampaņas, kas ietver auzu, griķu, daudzgadīgā zālāja, vasaras un ziemas kviešu, vasaras miežu, zaļmēslojuma, kartupeļu, ziemas rudzu un ziemas rīpša kultūraugu laukos, kuros izmantotas bioloģiskās un konvencionālās saimniekošanas metodes, kā arī atsevišķos laukos ir sastopama organiskā augsne. Katrā objektā tika veikti N₂O, CO₂ un CH₄ mērījumi 3 atkārtojumos, augsnes mitruma un augsnes temperatūras mērījumi. Kopā Stendē ir veikti 1566 mērījumi, no kuriem analizē ir izmantoti 1553 mērījumi. Trīspadsmit mērījumi atšķīrās no citiem tajā pašā dienā veiktajiem mērījumiem un nav iespējams noteikt atšķirību iemeslu, tāpēc šie mērījumi tika izslēgti no tālākās analīzes. 2025. gada mērījumu rezultātos ir vērojama līdzīga tendence kā 2024. gadā, kur N₂O emisijas vidējā vērtība (3,8 g N₂O ha⁻¹ dnn⁻¹) būtiski pārsniedz mediānu (1,5 g N₂O ha⁻¹ dnn⁻¹), norādot uz emisiju mainīgo raksturu un iespējamus īslaicīgus emisiju maksimumus. Iegūto datu aprakstošās statistiskās analīzes rezultāti attēloti Tab. 16.

Tab. 16. N₂O, CO₂ un CH₄ emisiju no augsnes statistiskie rādītāji 2025. gadā

Variables		N ₂ O, g ha ⁻¹ dnn ⁻¹	CO ₂ , g ha ⁻¹ dnn ⁻¹	CH ₄ , g ha ⁻¹ dnn ⁻¹
N	Valid	1553	1553	1553
	Missing	0	0	0
Variables		N ₂ O, g ha ⁻¹ dnn ⁻¹	CO ₂ , g ha ⁻¹ dnn ⁻¹	CH ₄ , g ha ⁻¹ dnn ⁻¹
Mean		3,8	132,2	-5,4
Std. Error of Mean		0,2	3,3	0,2
Median		1,5	98,1	-4,1
Std. Deviation		9,7	131,4	7,8
Variance		92,7	17273,5	61,2
Minimum		-42,6	6,7	-45,6
Maximum		88,2	1121,8	33,8
Percentiles	25	-0,5	58,2	-8,2
	50	1,5	98,1	-4,1
	75	4,6	156,7	-1,2

Lai veicinātu izpratni par gāzu emisiju dabu un izprastu katras gāzes emisiju atšķirības audzējamo kultūraugu, saimniekošanas veidu un augšņu īpašību kontekstā, SEG emisijas no augsnes tiek analizētas audzējamās kultūras kontekstā (auzas, griķi, daudzgadīgais zālājs, vasaras un ziemas kvieši, vasaras mieži, zaļmēslojums, kartupeļi, ziemas rudzi un ziemas rīpsis), lauksaimnieciskās darbības veida (bioloģiski: auzas,

griķi, daudzgadīgais zālājs, vasaras kvieši, zaļmēslojums, ziemas ripsis, ziemas kvieši, ziemas rudzi; konvencionāli: vasaras mieži, atmata, kartupeļi, auzas) un augsnes veida un audzējāmā kultūrauga griezumā (auzas, griķi un daudzgadīgais zālājs, ziemas kvieši un ziemas rudzi uz minerālaugsnī un organisko augsni).

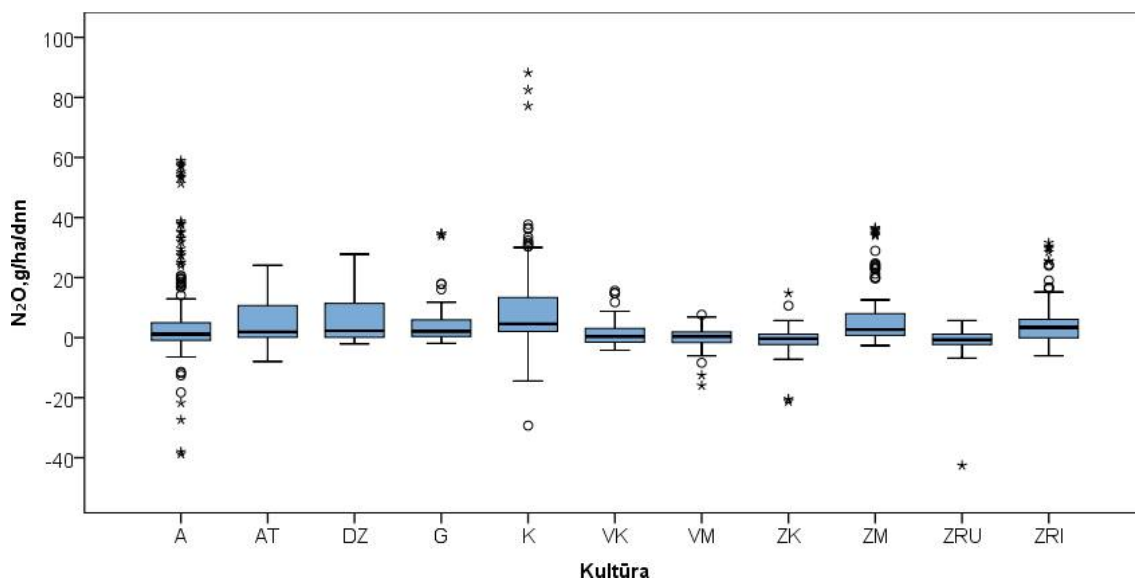
Kultūraugu ietekme uz SEG emisijām no augsnes

Vismazākās vidējās vērtības N₂O emisijai no augsnes ir novērotas ziemas kviešu un ziemas rudzu laukos, bet maksimālās N₂O emisijas ir novērotas kartupeļu un ziemas miežu laukos (Tab. 17 un Att. 6). Kartupeļu un vasaras miežu, laukos ir veikta mēslošana ar minerālmēsliem. No mēslotajiem laukos, kurā novērota palielināta N₂O emisija, ir kartupeļu lauks. Saskaņā ar Kruskal-Wallis testu, 2025. gadā statistiski nozīmīgas atšķirības N₂O emisijai ir ziemas rudziem ar vasaras kviešiem, auzām, atmatu, ziemas ripsi, griķiem, daudzgadīgajiem zālājiem, ziemas miežiem un kartupeļiem; ziemas kviešiem ar auzām, atmatu, ziemas ripsi, griķiem, daudzgadīgajiem zālājiem, ziemas miežiem un kartupeļiem; vasaras miežiem ar auzām, atmatu, ziemas ripsi, griķiem, daudzgadīgajiem zālājiem, ziemas miežiem un kartupeļiem; vasaras kviešiem ar atmatu, ziemas ripsi, griķiem, daudzgadīgajiem

zālājiem, ziemas miežiem un kartupeļiem; auzām ar daudzgadīgajiem zālājiem, ziemas miežiem un kartupeļiem; atmatai ar kartupeļiem, kā arī starp ziemas ripsi un kartupeļiem (p>0,05).

Tab. 17. N₂O emisijas no augsnes statistiskie rādītāji 2025. gadā.

N ₂ O, g ha ⁻¹ dnn ⁻¹		Auzas	Atmata	Daudzgadīgie zālāji	Griķi	Kartupeļi	Vasaras kvieši	Vasaras mieži	Ziemas kvieši	Ziemas mieži	Ziemas rudzi	Ziemas ripsis
N	Valid	362	126	117	126	111	126	117	117	117	117	117
	Missing	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mean		4,4	5,0	6,0	4,1	10,4	1,3	0,1	-0,7	7,2	-0,9	4,8
Std. Error of Mean		0,6	0,7	0,7	0,6	1,6	0,3	0,3	0,4	0,9	0,4	0,8
Median		1,1	1,9	2,3	2,1	4,6	0,4	0,4	-0,3	2,7	-0,8	3,4
Std. Deviation		12,0	7,5	7,9	6,2	16,5	3,8	3,3	4,5	10,3	4,6	8,3
Variance		144,5	56,6	62,8	38,9	273,8	14,3	10,7	20,6	105,3	20,8	69,0
Minimum		-38,8	-8,0	-2,1	-1,9	-29,3	-4,2	-16,0	-21,3	-2,7	-42,6	-6,1
Maximum		58,9	24,1	27,8	34,6	88,2	15,6	7,6	14,8	36,5	5,7	31,6
Perce ntiles	25	-0,9	0,1	0,1	0,4	2,0	-1,5	-1,7	-2,3	0,8	-2,3	-0,1
	50	1,1	1,9	2,3	2,1	4,6	0,4	0,4	-0,3	2,7	-0,8	3,4
	75	5,0	10,7	11,8	6,0	14,1	3,0	1,9	1,1	8,0	1,1	6,3



Att. 6. N₂O emisija no augsnes atkarībā no audzētā kultūrauga 2025. gadā¹.

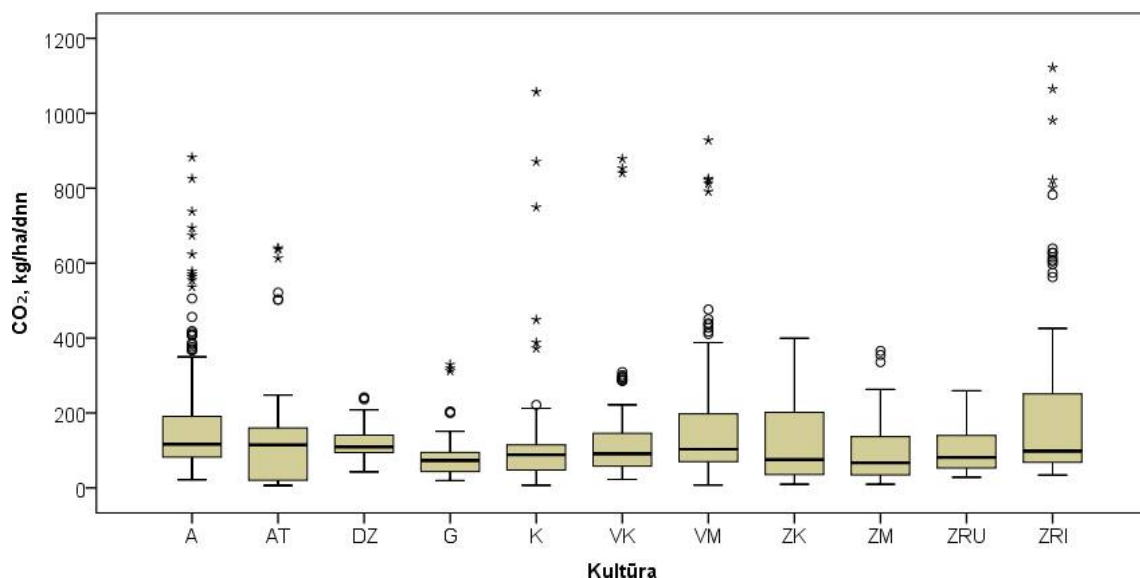
Griķu, ziemas miežu un ziemas rudzu laukos vidējā CO₂ emisija no augsnes ir mazāka, salīdzinot ar pārējiem laukiem, bet visaugstākā vidējā vērtība ir ziemas ripsa, vasaras miežu un auzu laukos (Att. 7 un Tab. 18). Statistiski nozīmīgas atšķirības CO₂ emisijai ir griķiem ar vasaras kviešiem, daudzgadīgo zālāju, vasaras miežiem, auzām un ziemas ripsi; ziemas miežiem ar daudzgadīgo zālāju, vasaras miežiem, auzām un ziemas ripsi; kartupeļiem ar daudzgadīgo zālāju, vasaras miežiem, auzām un ziemas ripsi; ziemas rudziem ar vasaras miežiem, auzām un ziemas ripsi; atmatai ar vasaras miežiem, auzām un ziemas ripsi; ziemas kviešiem ar vasaras miežiem, auzām un ziemas ripsi, kā arī starp vasaras kviešiem un auzām ($p < 0,05$).

Tab. 18. CO₂ emisijas no augsnes statistiskie rādītāji 2025. gadā

CO ₂ , g ha ⁻¹ dnn ⁻¹		Auzas	Atmata	Daudzgadīgie zālāji	Griķi	Kartupeļi	Vasaras kvieši	Vasaras mieži	Ziemas kvieši	Ziemas mieži	Ziemas rudzi	Ziemas ripsis
N	Valid	362	126	117	126	111	126	117	117	117	117	117
	Missing	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mean		153,4	118,1	116,0	79,8	116,6	125,3	172,5	123,4	97,3	98,3	213,8
Std. Error of Mean		6,5	11,0	4,0	4,7	14,2	12,0	16,1	10,2	7,3	5,4	21,4
Median		116,6	114,8	109,4	73,3	88,2	91,3	103,1	75,5	67,0	81,1	98,3
Std. Deviation		123,0	123,9	42,7	53,0	150,0	134,3	174,3	110,2	79,5	58,0	231,7
Variance		15141	15355	1828	2809	22478	18048	30368	12141	6313	3368	53668
Minimum		21,8	6,7	42,9	19,6	6,8	22,8	7,6	9,8	9,5	28,3	34,2

¹ A – auzas; AT – atmata; DZ – daudzgadīgie zālāji; G – griķi; K – kartupeļi; VK – vasaras kvieši; VM – vasaras mieži; ZK – ziemas kvieši; ZM – ziemas mieži; ZRU – ziemas rudzi; ZRI – ziemas ripsis.

CO ₂ , g ha ⁻¹ dnn ⁻¹		Auzas	Atmata	Daudzgadīgie zālāji	Griķi	Kartupeļi	Vasaras kvieši	Vasaras mieži	Ziemas kvieši	Ziemas mieži	Ziemas rudzi	Ziemas ripsis
Maximum		882,2	640,4	241,8	329,3	1057,3	878,4	927,9	399,3	365,4	259,3	1121,8
Percentiles	25	81,7	20,1	93,5	43,4	47,2	58,2	70,0	34,3	34,4	50,8	67,4
	50	116,6	114,8	109,4	73,3	88,2	91,3	103,1	75,5	67,0	81,1	98,3
	75	191,0	160,2	140,6	95,0	116,7	145,6	197,7	202,5	138,2	140,0	250,9



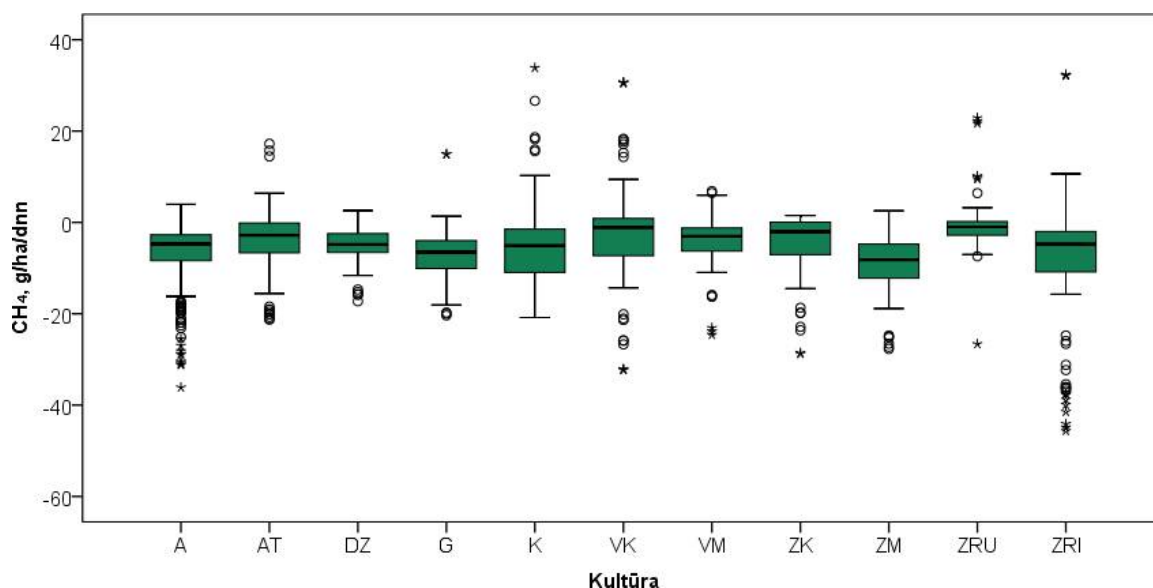
Att. 7. CO₂ emisija no augsnes atkarībā no audzētā kultūrauga 2025. gadā².

Analizējot CH₄ emisijas no augsnes, ir vērojama piesaiste un tikai atsevišķos gadījumos veidojas CH₄ emisijas (Att. 8). Vislielāko CH₄ piesaisti vidēji veido ziemas ripsa un ziemas miežu lauki, bet vismazāko ziemas rudzu un vasaras kviešu lauki (Tab. 19). Statiski nozīmīgas atšķirības novērotas ziemas miežiem ar auzām, daudzgadīgo zālāju, vasaras miežiem, atmatu, ziemas kviešiem, vasaras kviešiem, ziemas rudziem, griķiem ar vasaras miežiem, atmatu, ziemas kviešiem, vasaras kviešiem un ziemas rudziem; ziemas ripsim ar atmatu, ziemas kviešiem, vasaras kviešiem, ziemas rudziem; auzām ar atmatu, ziemas kviešiem, vasaras kviešiem un ziemas rudziem; kartupeļiem ar atmatu, ziemas kviešiem, vasaras kviešiem un ziemas rudziem; daudzgadīgajam zālājam ar vasaras kviešiem un ziemas rudziem, kā arī starp ziemas rudziem un vasaras miežiem, atmatu, ziemas kviešiem (p<0,05).

² A – auzas; AT – atmata; DZ – daudzgadīgie zālāji; G – griķi; K – kartupeļi; VK – vasaras kvieši; VM – vasaras mieži; ZK – ziemas kvieši; ZM – ziemas mieži; ZRU – ziemas rudzi; ZRI – ziemas ripsis.

Tab. 19. CH₄ emisijas no augsnes statistiskie rādītāji 2025. gadā

CH ₄ , g ha ⁻¹ dnn ⁻¹		Aužas	Atmata	Daudzgadīgie zālāji	Griķi	Kartupeļi	Vasaras kvieši	Vasaras mieži	Ziemas kvieši	Ziemas mieži	Ziemas rudzi	Ziemas ripsis
N	Valid	362	126	117	126	111	126	117	117	117	117	117
	Missing	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mean		-6,6	-3,8	-5,0	-6,9	-5,5	-2,3	-4,4	-4,2	-8,8	-0,8	-8,7
Std. Error of Mean		0,3	0,6	0,3	0,5	0,9	0,9	0,5	0,6	0,6	0,5	1,3
Median		-4,7	-2,8	-4,8	-6,5	-5,1	-1,1	-3,0	-2,0	-8,2	-1,0	-4,8
Std. Deviation		6,3	6,9	3,7	5,3	9,2	10,6	5,0	6,1	6,4	5,4	14,2
Variance		39,9	47,2	14,0	28,0	83,9	112,0	25,1	36,9	41,3	29,3	200,4
Minimum		-36,1	-21,3	-17,3	-20,3	-20,8	-32,3	-24,6	-28,8	-27,7	-26,6	-45,6
Maximum		4,0	17,2	2,6	14,9	33,8	30,7	6,8	1,5	2,5	22,9	32,4
Percent tiles	25	-8,4	-6,7	-6,6	-10,2	-11,0	-7,3	-6,3	-7,1	-12,2	-2,9	-11,0
	50	-4,7	-2,8	-4,8	-6,5	-5,1	-1,1	-3,0	-2,0	-8,2	-1,0	-4,8
	75	-2,7	-0,1	-2,4	-4,0	-1,4	0,9	-1,2	0,1	-4,5	0,2	-2,0



Att. 8. CH₄ emisija no augsnes atkarībā no audzētā kultūrauga 2025. gadā³.

Augsnes temperatūras un augsnes mitruma ietekme uz SEG emisijām

Gāzu savstarpējā sakarība, un sakarība starp gāzēm un augsnes mitrumu un gāzēm un augsnes temperatūru tika noteikta, izmantojot Kendala korelācijas koeficientu (P. Y.

³ A – aužas; AT – atmata; DZ – daudzgadīgie zālāji; G – griķi; K – kartupeļi; VK – vasaras kvieši; VM – vasaras mieži; ZK – ziemas kvieši; ZM – ziemas mieži; ZRU – ziemas rudzi; ZRI – ziemas ripsis.

Chen & Popovich, 2002; Coffman u.c., 2008) visiem mērījumu rezultātiem 2025. gadā (Tab. 20).

Stendes pētniecības centrā dominē mālsmilts un smilšmāla augsnes, kas nodrošina labu ūdens un gaisa režīma mainīgumu. 2025. gadā reģistrētā vidējā gaisa temperatūra un salīdzinoši augstais nokrišņu daudzums liecina par mēreni mitriem un siltiem apstākļiem. Kendala korelācijas analīze apstiprina statistiski nozīmīgu saistību starp augsnes temperatūru un mitrumu, kā arī šo parametru ietekmi uz SEG emisijām no augsnes. Augsnes temperatūra pozitīvi korelē ar CO₂ emisiju un negatīvi ar CH₄ emisiju, kas norāda, ka, paaugstinoties temperatūrai, pastiprinās heterotrofā elpošana, bet samazinās metāna uzkrāšanās potenciāls. Savukārt augsnes mitrums negatīvi korelē ar N₂O emisiju, bet pozitīvi ar CO₂ emisiju, apstiprinot, ka mitrākos apstākļos aktivizējas mikrobioloģiskie procesi, kas veicina CO₂ izdalīšanos.

Kendala korelācijas koeficienti parāda, ka augsnes temperatūra un mitrums ir nozīmīgi regulējošie faktori SEG emisiju dinamikā, ko apstiprina arī Wang u.c. (2023) pētījums.

Tab. 20. Kendala korelācijas koeficienti 2025. gadā⁴

Emisiju koeficienti	Augsnes temperatūra, °C	Augsnes mitrums, %	N ₂ O, g ha ⁻¹ dnn ⁻¹	CO ₂ , g ha ⁻¹ dnn ⁻¹	CH ₄ , g ha ⁻¹ dnn ⁻¹
Augsnes temperatūra, °C	1	0,162**	0,033	0,295**	-0,156**
Augsnes mitrums, %	0,162**	1	-0,179*	0,075**	0,021
N ₂ O, g ha ⁻¹ dnn ⁻¹	0,033	-0,179**	1	0,015	-0,114**
CO ₂ , g ha ⁻¹ dnn ⁻¹	0,295**	0,075**	0,015	1	-0,358**
CH ₄ , g ha ⁻¹ dnn ⁻¹	-0,156**	0,021	-0,114**	-0,358**	1

Lauksaimnieciskās darbības veida ietekme uz SEG emisijām no augsnes

Lai sniegtu priekšstatu par lauksaimnieciskās darbības veida ietekmi uz SEG emisijām no augsnes, ir analizēti konvencionāli un bioloģiski apstrādātos laukos veiktie mērījumi (Att. 9). Pēc Mann-Whitney U testa N₂O, CO₂ un CH₄ emisijas 2025. gadā statistiski būtiski atšķiras starp bioloģisko un konvencionālo lauksaimniecības veidu (p<0,05).

Vidējā N₂O emisija bioloģiski apstrādātos laukos bija 2,72 g N₂O ha⁻¹ dnn⁻¹, kas ir aptuveni par 58% mazāka nekā konvencionālajos laukos (6,44 g N₂O ha⁻¹ dnn⁻¹). Tas liecina, ka bioloģiskā saimniekošana samazina dislāpekļa oksīda emisijas, iespējams, mazākas minerālmēsli lietošanas un lēnākas mineralizācijas dēļ.

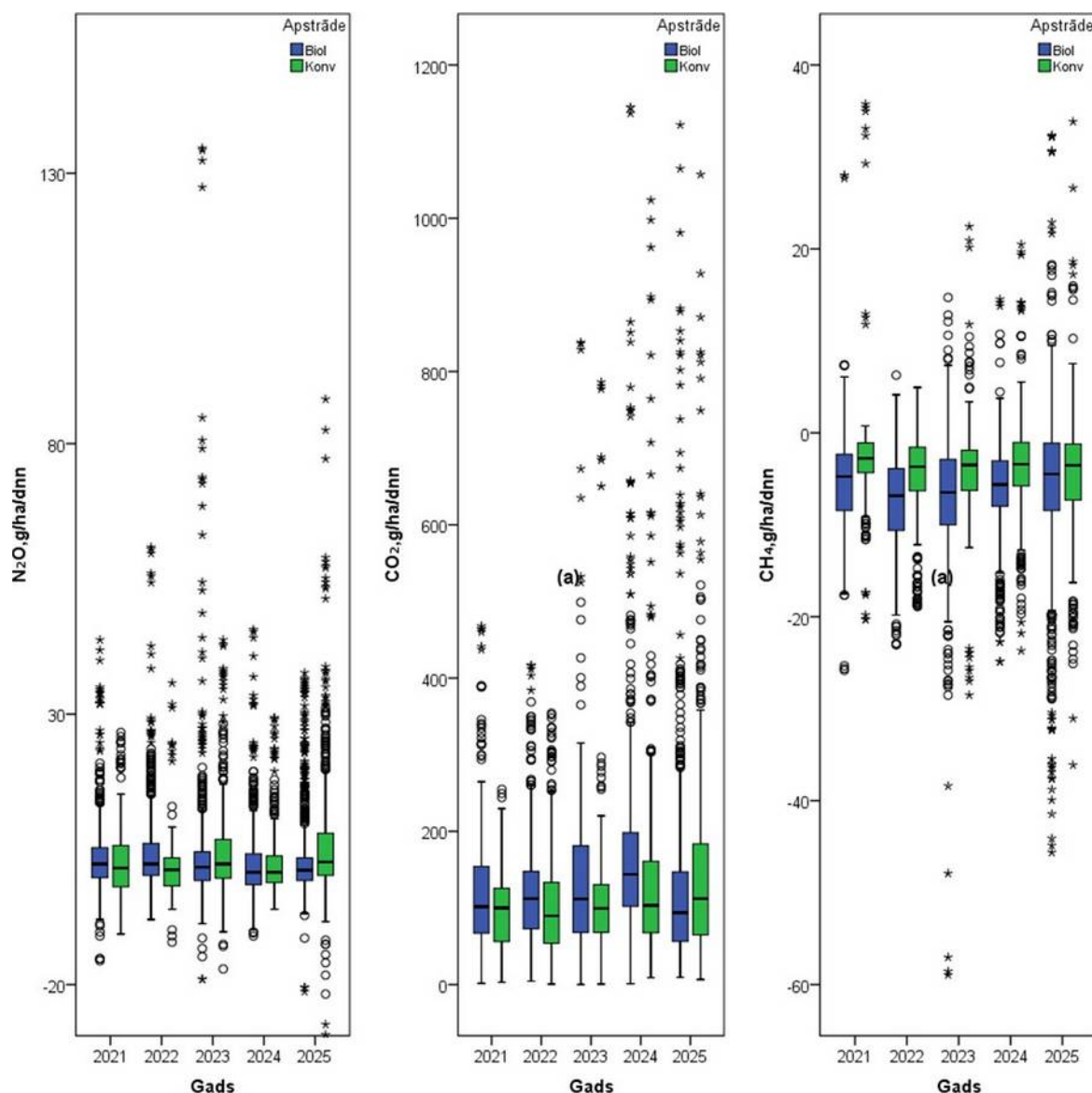
CO₂ emisijas no augsnes bija nedaudz zemākas bioloģiski apstrādātajos laukos (125,44 kg CO₂ ha⁻¹ dnn⁻¹) salīdzinājumā ar konvencionālajiem (147,60 kg CO₂ ha⁻¹ dnn⁻¹), kas norāda uz aptuveni 15% zemāku elpošanas intensitāti. Tas var būt saistīts ar

⁴ ** p vērtība <0.01; * p vērtība <0.05.

atšķirīgu organiskās vielas sadalīšanās ātrumu un atšķirīgu mikrobioloģisko aktivitāti augsnē.

Bioloģiski apsaimniekotās augsnēs ir lielāka CH₄ asimilācija (-5,71 g CH₄ ha⁻¹ dnn⁻¹) nekā konvencionāli apstrādātajās (-4,70 g CH₄ ha⁻¹ dnn⁻¹). Tas liecina, ka bioloģiskās saimniekošanas sistēmās dominē apstākļi, kas veicina oksidējošu mikroorganismu aktivitāti un mazina metāna emisiju.

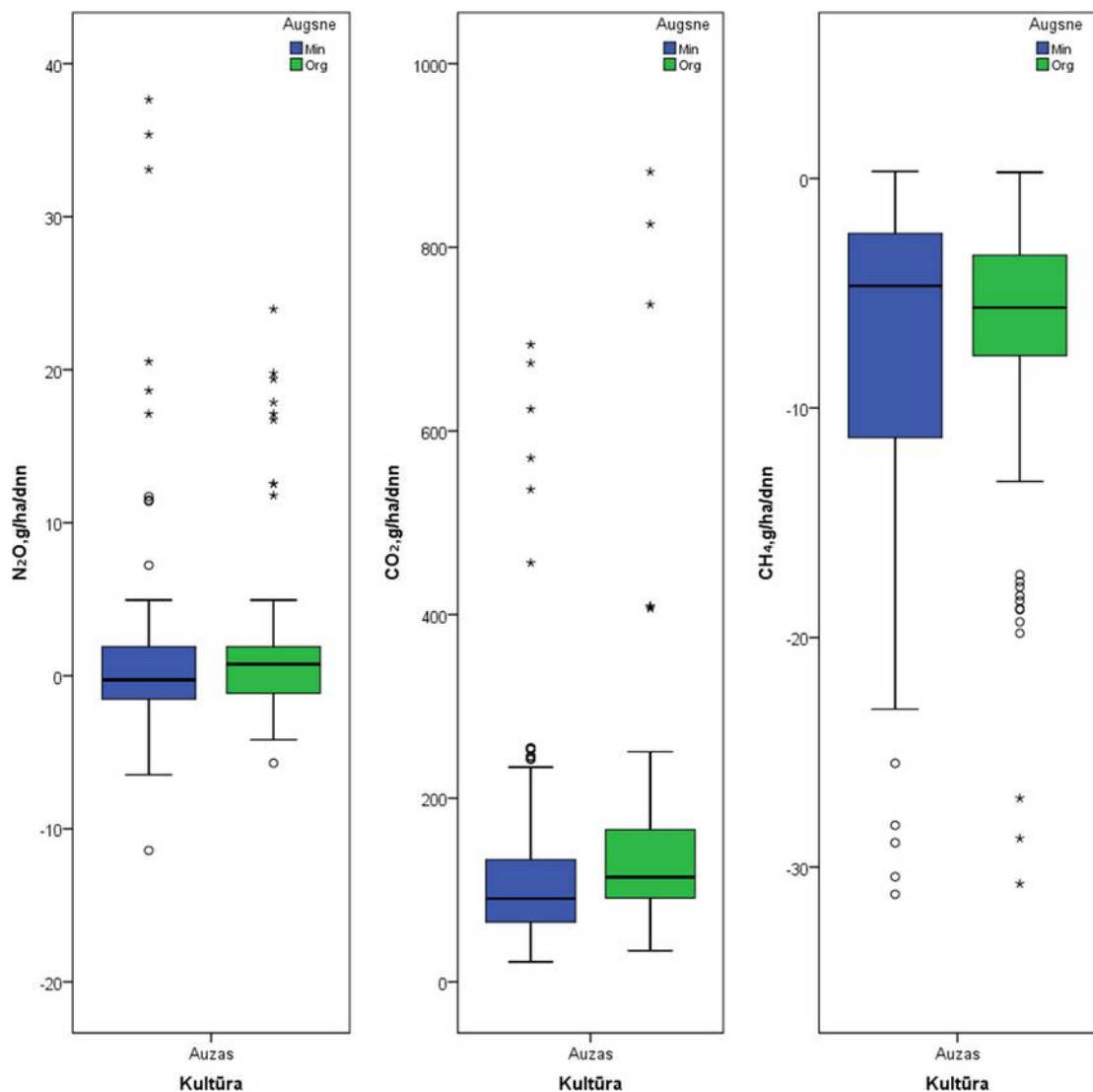
Salīdzinot ar 2024. gadu, kopējās tendences saglabājas, jo konvencionāli apstrādātajiem laukiem arī 2025. gadā raksturīgas augstākas N₂O emisijas un zemāka CH₄ asimilācija, savukārt CO₂ emisiju svārstību amplitūda abos saimniekošanas veidos ir līdzīga. Tas liecina, ka atšķirības SEG plūsmās ir strukturālas un saistītas ar ilgtermiņa apsaimniekošanas prakses ietekmi uz augsnes bioloģisko aktivitāti un gāzu apmaiņas režīmu.



Att. 9. SEG emisiju no augsnes salīdzinājums no 2021. līdz 2025. gadam pēc lauksaimnieciskās darbības veida (Biol – bioloģiskā lauksaimniecība, Konv – konvencionālā lauksaimniecība).

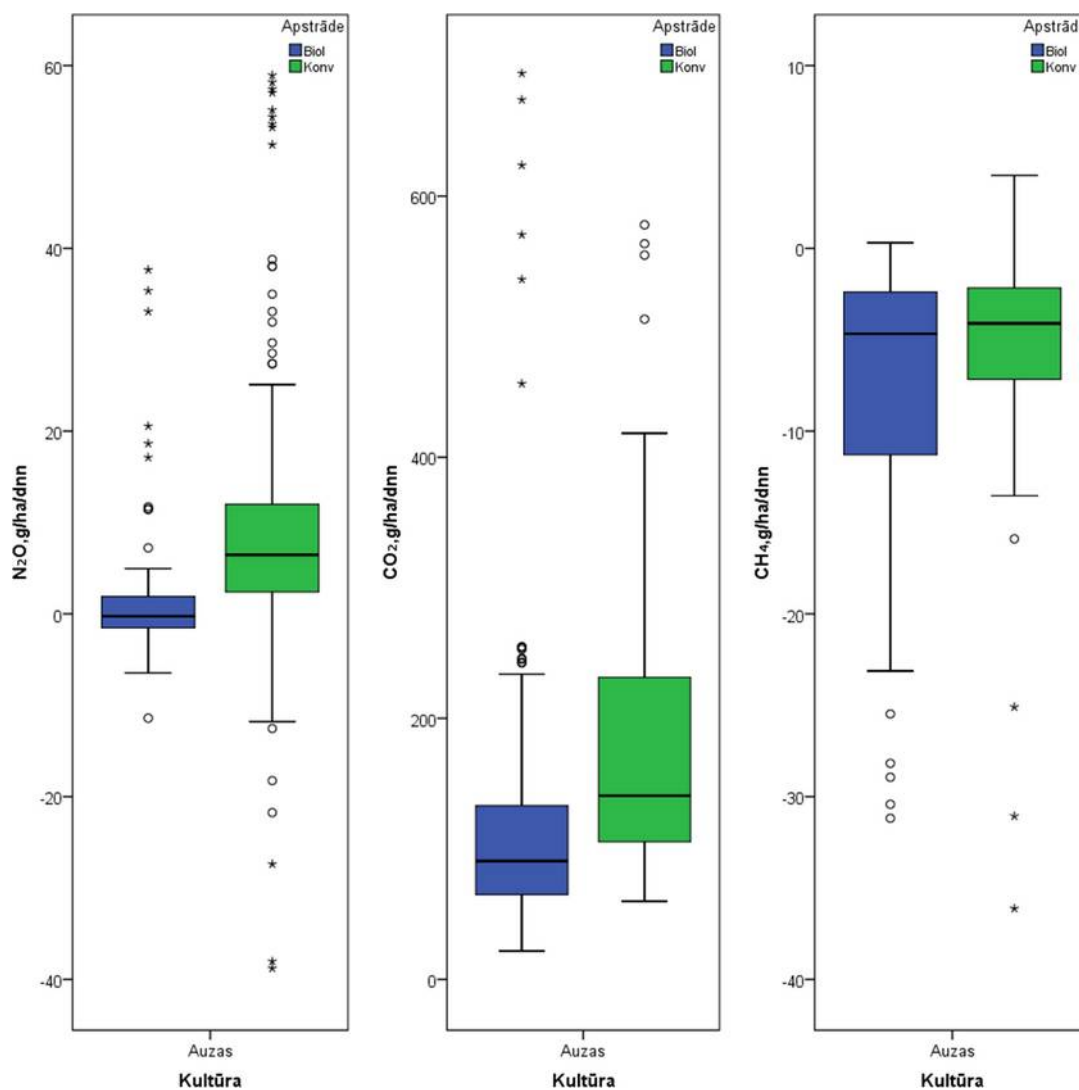
Augsnes un audzējamo kultūraugu ietekme uz SEG emisijām

Bioloģiski apstrādā auzu laukā lauka vienā pusē ir sastopama organiskā augsne (1. un 2. lauks), tāpēc 2025. gada SEG emisiju datiem ir veikts salīdzinājums šīm mērījumu vietām (Att. 10). Mann-Whitney U tests parāda, ka 2025. gadā ir statistiski nozīmīga atšķirība starp minerālaugsnī un organisko augsni CO₂ emisijām šajos laukos ($p=0,08$). Auzu laukā organiskā augsne 2025. gada veģetācijas periodā ir izdalījusi vidēji par 21% vairāk N₂O, par 14% vairāk CO₂, bet asimilējusi par 11% mazāk CH₄ nekā minerālaugsne.



Att. 10. SEG emisiju no augsnes salīdzinājums 2025. gadam bioloģiski apstrādātā auzu laukā ar minerālaugsnī un organisko augsni.

Lai noteiktu lauksaimnieciskās darbības veida ietekmi uz SEG emisijām, ir salīdzināti 1. un 14. lauks, kur abos ir audzētas auzas uz minerālaugsnī 2025. gadā, un 1. laukā ir izmantas bioloģiskās saimniekošanas metodes, bet 14. laukā konvencionālās (Att. 11). Mann-Whitney U tests parāda, ka 2025. gadā ir statistiski nozīmīga atšķirība starp bioloģisko un konvencionālo saimniekošanas metodi šajos laukos gan N₂O, gan CO₂, gan CH₄ emisijām ($p < 0,05$). Auzu laukā konvencionāli apsaimniekotā augsne 2025. gada veģetācijas periodā izdalīja aptuveni 8 reizes vairāk N₂O un par 41% vairāk CO₂, bet asimilēja par 33% mazāk CH₄ nekā bioloģiski apsaimniekotā augsne.



Att. 11. SEG emisiju no augsnes salīdzinājums 2025. gadam bioloģiski un konvencionāli apstrādātā auzu laukā ar minerālaugsnī.

Sarkanā āboliņa iekļaušanas augu sekā ietekme uz SEG emisijām

Sarkanais āboliņš ir viena no visbiežāk izmantotajām tauriņziežu kultūrām Latvijā, kas tiek audzēta, lai uzlabotu slāpekļa pieejamību augsnē un samazinātu minerālmēsli izmantošanu, tāpēc veicām 2021.-2025. gada SEG emisiju no augsnēm lauka mērījumu datu statistisko analīzi, lai noskaidrotu, kā sarkanā āboliņa iekļaušana augu sekā pa gadiem ietekmē SEG emisijas no augsnes.

Visos laukos, izņemot 5. lauku un 11. lauku, kopš 2018. gada ir audzēts sarkanais āboliņš vai graudaugi ar sarkanā āboliņa pasēju. Vislielākā N₂O emisija ir laukam, kur 2025. gadā ir bijusi atmata (5,33 g N₂O ha⁻¹ dnn⁻¹), kas ir vidēji 1,95 kg no hektāra gadā un iepriekšējā gadā šajā laukā bija vasaras mieži. Vismazākā emisija ir bioloģiski apsaimniekotam laukam, kur 2025. gadā ir bijuši ziemas rudzi un 2024. gadā sarkanais āboliņš (0,78 g N₂O ha⁻¹ dnn⁻¹ jeb 0,28 kg gadā no hektāra), kas parāda to, ka sarkanā

āboliņa uzkrātais slāpeklis augsnē ir efektīvi izmantots (Tab. 21). Lauki ar minimālajām N₂O vērtībām būtiski atšķiras no laukiem ar maksimālajām N₂O vērtībām ($p < 0,05$).

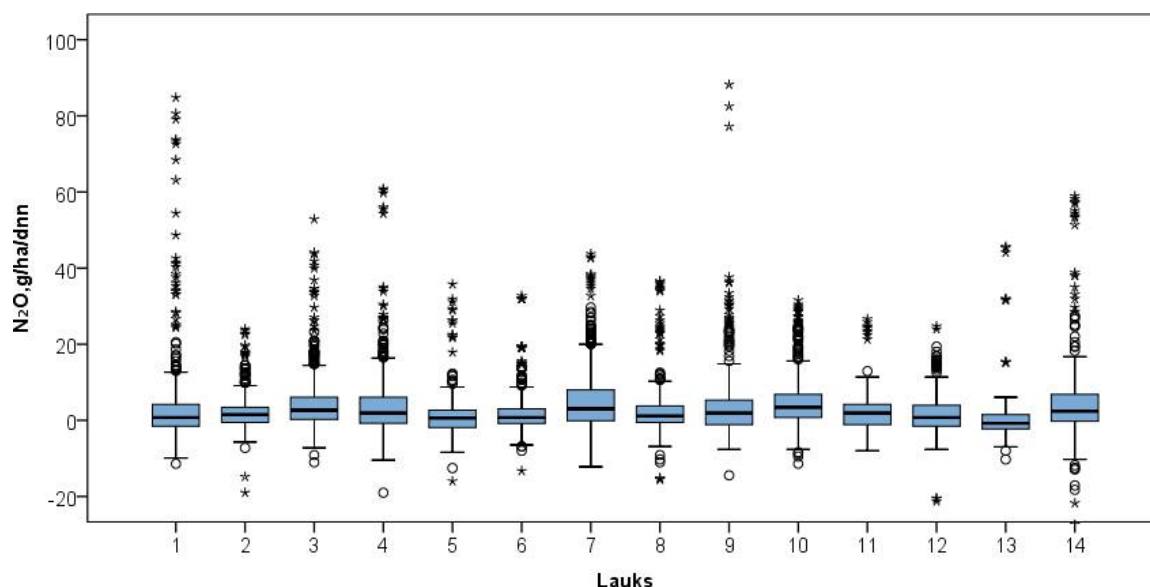
Vidēji visaugstākā CO₂ emisijas vērtība ir laukam, kur 2025. gada sezonā ir iesēts daudzgadīgais zālājs, bet 2024. gadā ir bijušas auzas, bet sarkanais āboliņš 2022. gadā (167,00 kg CO₂ ha⁻¹ dnn⁻¹ jeb 60,96 t gadā no hektāra), ko izskaidro organiskās vielas saturs šajā laukā, kas ir 34,8%. Minimālajām CO₂ vērtībām ir nozīmīga atšķirība no maksimālajām vērtībām ($p < 0,05$).

Vislielākā metāna piesaiste ir laukam, kur ir visaugstākās CO₂ emisijas (-7,69 g CH₄ ha⁻¹ dnn⁻¹ jeb 2,81 kg gadā no hektāra), bet vismazākā piesaiste ir bioloģiski apsaimniekotam organiskās augsnes laukam, kur 2025. gadā ir novērota arī vismazākā N₂O emisija.

Tab. 21. N₂O, CO₂ un CH₄ emisiju no augsnes vidējās vērtības un standartklūda lauku griezumā (2021.-2025. gads)

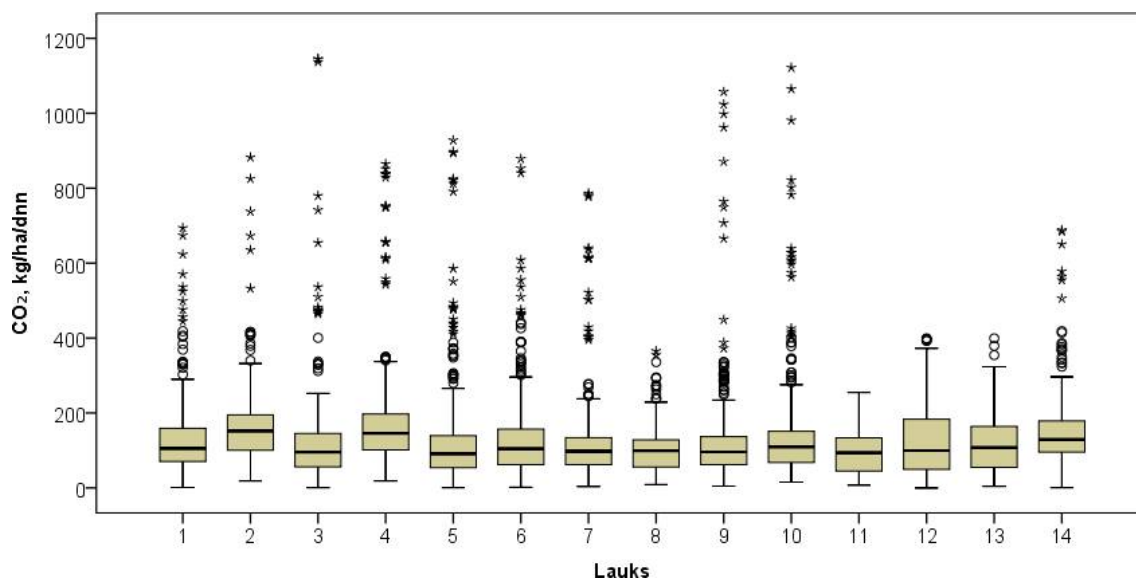
Lauks	N ₂ O, g ha ⁻¹ dnn ⁻¹	SE	CO ₂ , g ha ⁻¹ dnn ⁻¹	SE	CH ₄ , g ha ⁻¹ dnn ⁻¹	SE
1	3,59	0,49	128,04	3,84	-6,93	0,25
2	3,96	0,88	157,84	4,08	-7,44	0,19
3	5,18	0,51	116,76	4,93	-6,92	0,26
4	3,99	0,48	167,00	5,35	-7,69	0,28
5	1,11	0,23	124,40	5,51	-3,79	0,20
6	1,86	0,23	130,20	4,63	-4,78	0,30
7	5,33	0,37	112,63	4,31	-2,57	0,29
8	2,74	0,34	100,43	2,86	-7,30	0,25
9	3,60	0,44	122,52	5,20	-5,55	0,26
10	4,99	0,32	135,06	5,53	-6,76	0,34
11	2,58	0,46	99,02	4,42	-3,84	0,24
12	1,71	0,30	122,60	4,68	-3,62	0,27
13	0,78	0,64	116,06	5,89	-1,27	0,36
14	5,04	0,68	150,65	5,48	-4,43	0,26

Analizējot N₂O emisiju no augsnes izkliedi visā mērījumu laikā no 2021. līdz 2025. gadam, ir redzams, ka visos laukos ir vērojamas pozitīvas ekstrēmās vērtības, tomēr visizteiktāk tās parādās laukos ar bioloģisko saimniekošanas veidu, kur iepriekšējos gados ir bijis sarkanais āboliņš (1., 2. un 3. laukos) un laukā ar konvencionālo saimniekošanu, kur 2025. gadā ir audzēti kartupeļi (9.lauks, Att. 12).



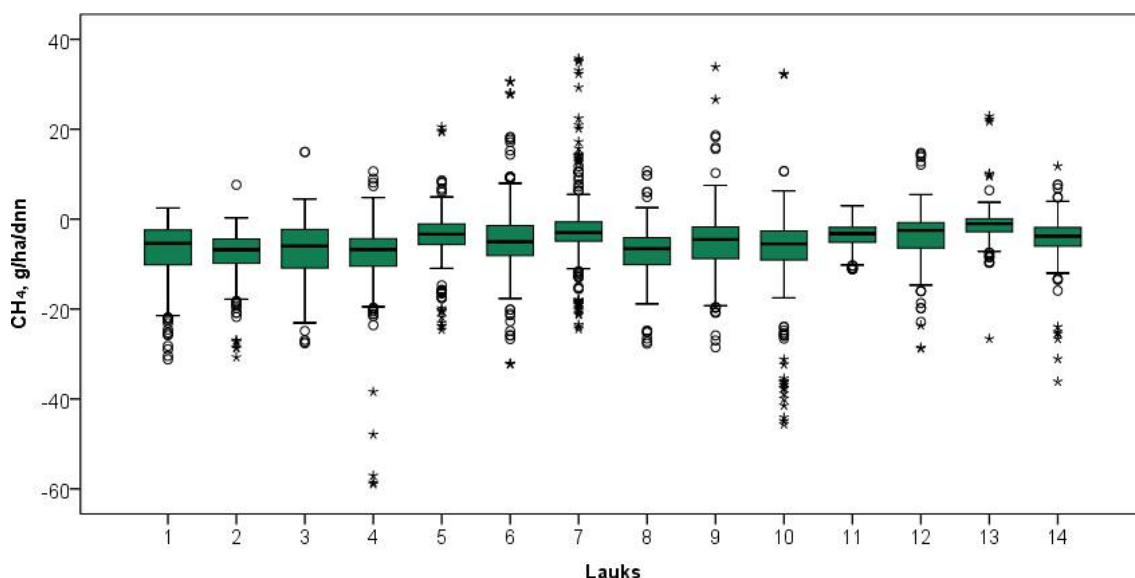
Att. 12. N₂O emisijas no augsnes salīdzinājums lauku griezumā (2021.-2025. gads).

Lauku griezumā CO₂ emisijas no augsnes 5 gadu mērījumu periodā ekstrēmās vērtības nav novērotas 11. laukā, kas ir konvencionāli apsaimniekots, tomēr jāņem vērā, ka 2025. gadā šajā laukā mērījumi netika veikti mainītās lauka konfigurācijas un tehnisko piekļuves ierobežojumu dēļ. Laukos ar organisko augsni (2. un 4. lauks), ir novērotas augstākas emisijas, salīdzinot ar citiem laukiem, bet 12. un 13. lauku CO₂ emisiju izkliedes amplitūdu varētu būt ietekmējušas bioloģiskās saimniekošanas metodes (Att. 13).



Att. 13. CO₂ emisijas no augsnes salīdzinājums lauku griezumā (2021.-2025. gads).

Metāna emisijas ar izteiktiem pozitīviem ekstrēmiem ir vērojamas 6., 7., 9. un laukā, no kuriem tieši konvencionāli apstrādātajā laukā ir novērotas visvairāk pozitīvas ekstrēmas vērtības (Att. 14).



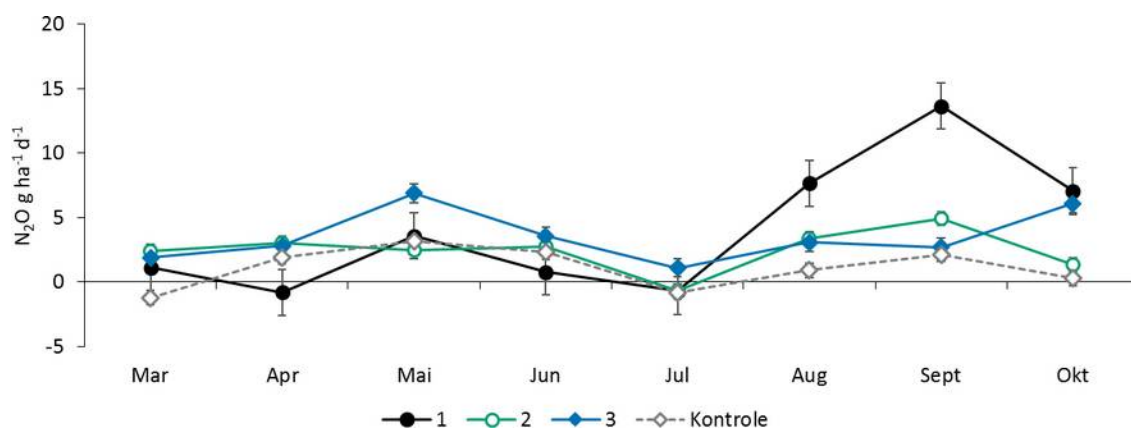
Att. 14. CH₄ emisijas no augsnes salīdzinājums lauku griezumā (2021.-2025. gads).

Sarkanā āboliņa iekļaušana augu maiņā ietekmē N₂O emisiju dinamiku, kas ir svārstīga gan pa mēnešiem, gan rotācijas gadiem (Att. 15). Sarkanā āboliņa sējas gadā emisijas ir salīdzinoši augstas maijā un no augusta līdz oktobrim,

sasniedzot maksimumu septembrī aptuveni 5 kg N₂O no hektāra gadā, kas liecina par pastiprinātu slāpekļa mineralizāciju un mikrobioloģisko aktivitāti siltā un mitrā periodā.

Pirmajā gadā pēc sarkanā āboliņa sējas emisijas samazinās, piemēram, septembrī līdz aptuveni 2 kg N₂O no hektāra gadā, taču saglabājas paaugstinātas vērtības vasaras mēnešos, kas norāda uz atlikušā organiskā slāpekļa ietekmi uz denitrifikācijas procesiem. Savukārt otrajā gadā pēc sarkanā āboliņa sējas emisijas atkal palielinās noteiktos periodos, īpaši maijā (aptuveni 2,5 kg N₂O no hektāra gadā) un oktobrī (aptuveni 2,2 kg N₂O no hektāra gadā), kas norāda uz ilgstošu sarkanā āboliņa ietekmi uz slāpekļa aprites procesiem augsnē.

Kontroles laukā, kur sarkanais āboliņš nav bijis rotācijā kopš 2018. gada, emisijas ir ievērojami zemākas visā veģetācijas periodā (no aptuveni 1,16 kg N₂O gadā maijā līdz aptuveni 0,1 kg N₂O no hektāra gadā oktobrī), kas norāda, ka N₂O emisiju intensitāte ir cieši saistīta ar bioloģiskās slāpekļa fiksācijas ietekmi un ilgtermiņa augsnes slāpekļa transformācijas procesiem pēc sarkanā āboliņa audzēšanas.



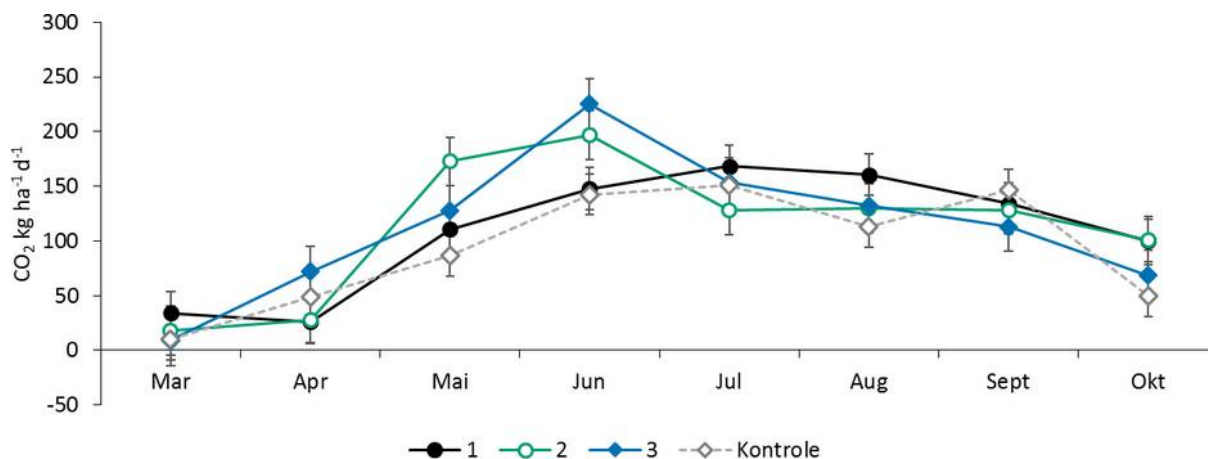
Att. 15. N₂O emisijas no augsnes salīdzinājums mēnešu griezumā (2021.-2025. gads).

Sarkanā āboliņa sējas gadā CO₂ emisijas pakāpeniski palielinās, sasniedzot augstāko līmeni jūlijā (168,2 kg CO₂ ha⁻¹ dnn⁻¹) un augustā (160,6 kg CO₂ ha⁻¹ dnn⁻¹, Att. 16). Šī tendence norāda uz pastiprinātu mikroorganismu elpošanu un organiskās vielas noārdīšanos siltā un mitrā periodā.

Pirmajā gadā pēc sarkanā āboliņa sējas emisijas kopumā ir vēl augstākas, ar maksimālajām vērtībām maijā (172,6 kg CO₂ ha⁻¹ dnn⁻¹) un jūnijā (196,9 kg CO₂ ha⁻¹ dnn⁻¹), kas liecina, ka pēc sarkanā āboliņa audzēšanas saglabājas nozīmīgs organiskās vielas un bioloģiski fiksētā slāpekļa sadalīšanās efekts.

Otrajā gadā pēc sarkanā āboliņa sējas emisijas samazinās, īpaši vasaras beigās un rudenī (piemēram, septembrī 113,1 kg CO₂ ha⁻¹ dnn⁻¹, oktobrī 68,6 kg CO₂ ha⁻¹ dnn⁻¹), kas norāda uz pakāpenisku organisko vielu krājumu samazināšanos augsnē un mazāku mikrobioloģisko aktivitāti.

Salīdzinājumam, kontrolē, kur sarkanais āboliņš nav bijis rotācijā kopš 2018. gada, CO₂ emisijas saglabājas zemākas visā sezonā (no 10,1 kg CO₂ ha⁻¹ dnn⁻¹ martā līdz 146,8 kg CO₂ ha⁻¹ dnn⁻¹ septembrī), norādīto, ka ilgtermiņā sarkanā āboliņa audzēšana palielina augsnes elpošanas intensitāti un oglekļa aprites aktivitāti vairākus gadus pēc tā iekļaušanas augu maiņā.



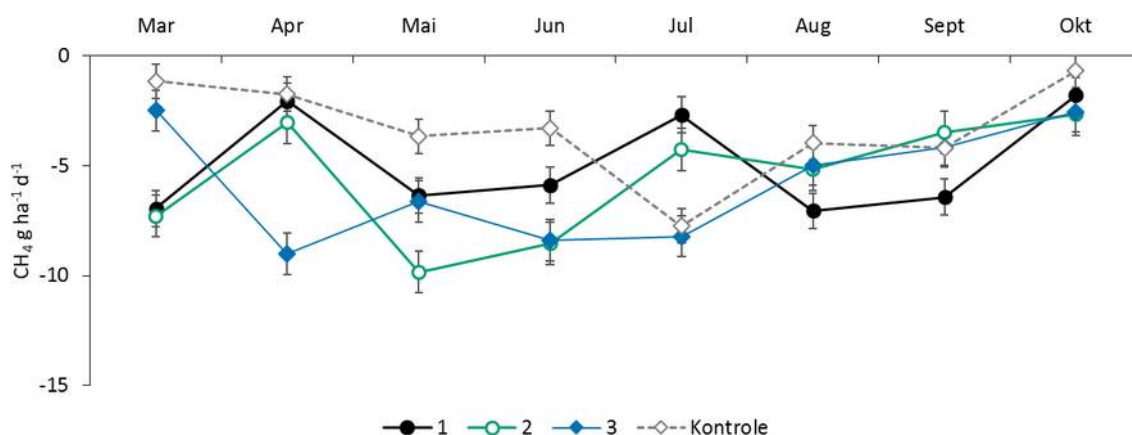
Att. 16. CO₂ emisijas no augsnes salīdzinājums mēnešu griezumā (2021.-2025. gads).

CH₄ plūsmas visos rotācijas gados ir negatīvas, kas liecina par metāna asimilāciju augsnē (skat. 17.att.). Sarkanā āboliņa sējas gadā CH₄ piesaiste svārstās no -6,95 g CH₄ ha⁻¹ dnn⁻¹ martā līdz -1,80 g CH₄ ha⁻¹ dnn⁻¹ oktobrī, ar izteiktāku aktivitāti pavasarī un vasaras vidū.

Pirmajā gadā pēc sarkanā āboliņa sējas metāna asimilācija bija intensīvāka, īpaši maijā (-9,84 g CH₄ ha⁻¹ dnn⁻¹) un jūnijā (-8,54 g CH₄ ha⁻¹ dnn⁻¹), kas var būt saistīts ar labvēlīgākiem aerācijas apstākļiem un aktīvāku metanotrofo baktēriju darbību pēc organiskās vielas uzkrāšanās no iepriekšējā gada.

Otrajā gadā pēc sarkanā āboliņa sējas metāna piesaiste saglabājās, bet ar samazinātu intensitāti, piemēram, -8,22 g CH₄ ha⁻¹ dnn⁻¹ jūlijā un -2,55 g CH₄ ha⁻¹ dnn⁻¹ oktobrī, kas norāda uz pakāpenisku bioloģiskās aktivitātes stabilizēšanos un organiskā vielas pieejamības samazināšanos.

Kontroles laukā, kur sarkanais āboliņš nav audzēts kopš 2018. gada, CH₄ asimilācija bija ievērojami mazāka visā veģetācijas periodā un tā svārstījās no -1,16 g CH₄ ha⁻¹ dnn⁻¹ martā līdz -4,19 g CH₄ ha⁻¹ dnn⁻¹ septembrī, apliecinot, ka sarkanā āboliņa iekļaušana augu maiņā ilgtermiņā pastiprina augsnes spēju oksidēt metānu un tādējādi mazina kopējās SEG emisijas no augsnes.



Att. 17. CH₄ emisijas no augsnes salīdzinājums mēnešu griezumā (2021.-2025. gads).

Secinājumi

1. SEG emisijas no augsnēm būtiski ietekmē klimata apstākļi konkrētajā gadā, SEG emisiju veidošanās tendences pie konkrētiem agrotehnikajiem pasākumiem, konkrētam augsnes tipam ir iespējams identificēt, tikai veicot ilgtermiņa monitoringu.
2. 2025. gadā mērījumu rezultāti rāda līdzīgas tendences kā 2024. gadā, kad N₂O un CH₄ emisiju vidējā vērtība pārsniedza mediānu, norādot uz emisiju mainīgo raksturu un īslaicīgiem emisiju maksimumiem. Augsnes temperatūra un mitrums ir nozīmīgi regulējošie faktori SEG emisiju dinamikā, kas ir atkarīgi no veģetācijas perioda meteoroloģiskiem apstākļiem.

3. Bioloģiski apstrādāti lauki 2025. gada veģetācijas periodā ir izdalījuši par 58% mazāk N₂O, par 15% vairāk CO₂ emisiju, bet par 21% vairāk asimilējuši CH₄, salīdzinot ar konvencionālo lauksaimniecību. Izmantojot bioloģiskās saimniekošanas metodes, augsnē palielinās mikrobioloģiskā aktivitāte, kas ir būtiski barības vielu apritē, organiskās vielas veidošanā un augsnes struktūras uzlabošanā, tāpēc ir būtiski arī uzturēt optimālu mitruma režīmu, kas veicinātu metāna piesaisti.
4. Pētījuma rezultāti rāda būtisku atšķirību starp minerālaugsnī un organisko augsni. Organiskā augsne 2025. gada veģetācijas periodā ir izdalījusi vidēji par 21% vairāk N₂O un par 14% vairāk CO₂, bet asimilējusi par 11% mazāk CH₄.
5. Sarkanā āboliņa iekļaušana augu sekā veicina mikrobioloģisko aktivitāti, kas var rezultēties paaugstinātās N₂O emisijās, bet vienlaikus sarkanā āboliņa iekļaušana augu sekā arī veicina CH₄ asimilāciju. Laukos, kur pētījuma īstenošanas laikā no 2021. līdz 2025. gadam augu sekā nav audzēts sarkanais āboliņš, uzrāda stabilākus un zemākus SEG emisiju rādītājus, bet ir jāņem vērā, ka augsta mikrobioloģiskā aktivitāte veicina augsnes auglību.
6. Sarkanā āboliņa ietekme uz N₂O emisijām saglabājas vairāku gadu garumā pēc tā iekļaušanas rotācijā, un šī ietekme ir īpaši izteikta vēlīnā vasaras un agrīnā rudens periodā, kad augsnē norit aktīvi organiskā slāpekļa transformācijas procesi.

Organisko augšņu izplatības darbību datu lauksaimniecībā izmantojamām zemēm pilnveidošana

Nodaļa sagatavota, balstoties uz Latvijas Valsts mežzinātnes institūta “Silava” pētījumu rezultātiem (Butlers & Ivanovs, 2018; Ivanovs u.c., 2024; Lazdiņš u.c., 2016; Melniks u.c., 2024; Petaja u.c., 2018). Nodaļas autori Emīls Mārtiņš Upenieks, Raitis Meļņiks, Andis Lazdiņš un Jānis Ivanovs.

Pētījumā aprobēta metodoloģiski konsekventa pieeja organisko augšņu izplatības un kūdras slāņa biezuma telpiskajai modelēšanai Latvijas teritorijā, apvienojot lauka mērījumus no nacionālās mežu monitoringa sistēmas ar gaisa lāzerskenēšanas (ALS) atvasinātiem topogrāfiskiem rādītājiem un citiem kartogrāfiskiem slāņiem. Datu bāzi veidoja 24129 kūdras slāņa biezuma mērījumi pastāvīgajos parauglaukumos; telpiskā prognoze veikta 5 m izšķirtspējā, klasificējot biežumu trīs klasēs: 0 cm, < 20 cm un > 20 cm. Galvenie kovariāti bija gruntsūdeņu dziļums (DTW), mitro teritoriju kartes (WAM), kontinentālitate, reljefs un ģeogrāfiskās koordinātas. Klasifikācijai izmantots gradienta pastiprināšanas kokiem radniecīgs *XGBoost* algoritms ar datu balansēšanu. Iegūtais modelis demonstrēja labu prognozēšanas kvalitāti (kopējā precizitāte 0,88; κ = 0,74) un parādīja, ka platības ar kūdras slāni > 20 cm sedz 15,6 % valsts teritorijas, bet ar slāni < 20 cm – vēl 7,6 %.

Iegūtie telpiskie rezultāti kalpoja par pamatu organisko augšņu izplatības novērtējumam meža monitoringa parauglaukumos ārpus meža zemēm, paplašinot analīzi arī uz aramzemēm un zālājiem Vienlaikus pētījuma ietvaros veikts zemes izmantošanas maiņas pārrēķins no 1990. gada, lai nodalītu antropogēnās pārmaiņas organisko augšņu telpiskajā dinamikā zemes izmantošanas maiņas rezultātā un ekstrapolētu datu rindas līdz 1990. gadam. Pētījumā izmantota konservatīva pieeja organisko augšņu izplatības raksturošanai, pieņemot, ka kopējā organisko augšņu platība no 2004. gada, kad uzsākts Meža resursu monitorings nav būtiski samazinājusies, bet pirms 2004. gada izmantoti iepriekšējos pētījumos iegūtie dati (Petaja u.c., 2018).

Metodika ir reproducējama un saderīga ar IPCC 2006/2013 prasībām organisko augšņu definīcijai, nodrošinot zinātniski pamatotu datu izmantošanu gan politikas dokumentos (zemes izmantošanas plānošana, atjaunošanas prioritizācija, paludikultūru potenciāla izvērtējums), gan SEG inventarizācijas uzlabojumiem. Iegūtie dati un to atvasinājumi ir paredzēti turpmākai papildināšanai ar jauniem un precīzākiem novērojumiem (piem., papildu treniņa datiem, hidroloģiskām metrikām, multispektrāliem un lāzerskenēšanas tālīzpētes indikatoriem), tādējādi nepārtraukti uzlabojot organisko augšņu izplatības novērtējumu mežu parauglaukumos, aramzemēs un zālājos, kā arī palielinot modeļa lietojamību SEG pārskatos un zemes izmantošanas scenāriju modelēšanā.

Ievads

Zināšanas par organisko augšņu telpisko izplatību ir viens no kritiskajiem priekšnoteikumiem oglekļa krājumu, SEG emisiju un apsaimniekošanas scenāriju izvērtējumam ZIZIMM sektorā. Organiskās augsnes veido nozīmīgu zemes oglekļa rezervuāru un regulē hidroloģiskos, biogeķīmiskos un ekoloģiskos procesus mežos, zālajos un aramzemēs. Vienlaikus šo augšņu izplatības un organiskām vielām bagātā slāņa precīza noteikšana joprojām ir izaicinājums, jo īpaši antropogēni pārveidotās ainavās. Šī pētījuma ietvaros mēs izmantojam nacionālās meža monitoringa sistēmas (MSI) lauka mērījumus un no gaisa lāzerskenēšanas (ALS) iegūtas reljefa atvasinātas metrikas, lai izstrādātu telpisku organisko augšņu kartējumu un kūdras slāņa biezuma klases visā Latvijas teritorijā. Šie dati ir integrēti meža monitoringa parauglaukumu analizē un ekstrapolēti uz aramzemēm un zālājiem, novērtējot organisko augšņu izplatību arī ārpus meža zemēm.

Pētījuma zinātniskais pamatojums balstās trīs apsvērumos. Pirmkārt, organisko augšņu telpiskā heterogenitāte un dinamika ir cieši saistīta ar mikro- un mezoreljefa īpašībām, virszemes/gruntsūdens mijiedarbību un teritorijas kontinentalitāti; šīs īpašības lielā telpiskā izšķirtspējā var raksturot ar ALS atvasinātām metrikām (DTW, WAM, TWI, slīpums u.c.). Otrajā solī ar mašīnmācīšanos (*XGBoost* algoritms) var atvasināt nelineāras sakarības starp reljefa, hidroloģijas, ģeoloģijas un klimata kovariātiem un kūdras slāņa biezumu; iepriekšējie rezultāti rāda, ka šāda pieeja Latvijā sniedz lielu klasifikācijas precizitāti (vidējā precizitāte $\approx 0,88$; $\kappa \approx 0,74$) trīs biezuma klasēm (0 cm; < 20 cm; > 20 cm). Treškārt, šāda karte nodrošina datus oglekļa krājumu un emisiju novērtējumam, tai skaitā atbalsta antropogēno un dabisko procesu atdalīšanu, analizējot zemes izmantošanas maiņu kopš 1990. gada un tās ietekmi uz organisko augšņu pārklājumu.

Līdzšinējie organisko augšņu izplatības pieņēmumi Latvijā balstījās vēsturiskās karšu kopās (purvu izplatība, meža augšanas apstākļi, licences purvu ieguvei u. tml.), kurās detalizēta kūdras slāņa biezuma informācija neietilpa vai arī nebija salīdzināma ar KPSP vadlīnijās izmantoto definīciju, bet telpiskā ģeometrija bieži neatspoguļoja lokālā mēroga hidroloģiskos procesus. Savukārt jaunizstrādātā pieeja izmanto MSI parauglaukumos veikto kūdras biezuma mērījumu kopu (24129 mērījumi) un 5 m izšķirtspējas ALS reljefa modeli ar verificētu vertikālo/horizontālo kļūdu (attiecīgi ~ 12 cm un ~ 36 cm), lai atvasinātu DTW (10-30 ha mēroga sateces baseinos), WAM, slīpuma un SAGA_TWI rādītājus; papildus ieviestie rādītāji ir ģeogrāfiskās koordinātas un kontinentalitāte, kā arī kvartāra nogulumu un ūdenstilpju tuvuma telpisko datu slāņi. Šo kovariātu kombinācija praksē atspoguļo gan ilgtermiņa mitruma režīmu, gan nogulumu uzbūvi – faktorus, kas tieši ietekmē kūdras uzkrāšanos un mineralizāciju.

Iepriekšējie pētījumi rāda, ka optiskie/sintētiskās apertūras radara attēli var sniegt plašas teritorijas pārklājumu, tomēr organiskās augsnes bieži slēpjas zem veģetācijas, kas nav

tieši saistīta ar kūdras veidošanās apstākļiem; līdz ar to uz veģetācijas tipiem balstīta atvasināšana bieži ir nepietiekama, it sevišķi degradēto jeb marginālo joslu kartējumā. ALS atvasinājumi, kas „redz” reljefa struktūru, ļauj konsekventāk identificēt vietas ar ilgstoši augstu mitruma režīmu, kur notikusi kūdras uzkrāšanās, un kopā ar mašīnmācīšanos būtiski uzlabo organisko augšņu izplatības prognozes. Salīdzinot ar vēsturiskajām kartēm, jaunā pieeja ne vien koriģē robežu ģeometriju, bet identificē arī iepriekš nenovērtētas organisko augšņu saliņas; tas gan palielina telpisko detalizāciju, gan norāda uz modelēšanas rezultātu validācijas nepieciešamību, izmantojot neatkarīgus mērījumus.

Metodikas ierobežojumi ir definēti iepriekšējos pētījumos un jāņem vērā, interpretējot rezultātus ārpus meža zemēm. MSI mērījumi veikti meža zemēs, tādēļ, lai gan telpiskā modelēšana aptver visu valsts teritoriju, prognožu kvalitāte apdzīvotās vietās un lauksaimniecības teritorijās var būt mazāka. Tas nosaka nepieciešamību paplašināt validācijas un kalibrācijas datu bāzi zālajos un aramzemēs un periodiski atjaunināt modeli ar jaunām novērojumu sērijām. Tāpat seklās kūdras klases jutība ir salīdzinoši mazāka, norādot uz nepieciešamību izmantot papildus kovariātus (piemēram, radiometriskos slāņus, ja pieejami) un uzlabotus apmācības algoritmus. Šajā pārskatā sagatavotie telpisko datu slāņi tieši tiek izmantoti organisko augšņu izplatības novērtēšanai meža parauglaukumos un to apkārtnē, iekļaujot arī aramzemes un zālājus, lai nodrošinātu salīdzināmu SEG uzskaites ietvaru visām zemes lietošanas kategorijām.

Uz šī fona pētījuma mērķi ir: (i) izstrādāt lauka mērījumos un ALS atvasinājumos balstītu, reproducējamu organisko augšņu un kūdras slāņa biezuma karti 5 m izšķirtspējā; (ii) validēt klasifikācijas kvalitāti neatkarīgā testkopā un salīdzinājumā ar vēsturiskajiem organisko augšņu slāņiem; (iii) izmantot iegūto kartējumu kopā ar oficiālajām zemes lietojuma laika rindām, lai rekonstruētu zemes izmantošanas maiņu kopš 1990. gada un kvantificētu tās ietekmi uz organisko augšņu pārklājumu mežā, aramzemēs un zālajos; (iv) nodrošināt ieejošos datus oglekļa krājumu un SEG bilances novērtējumiem, atbilstīgi KPSP vadlīnijām. Tādējādi pētījums vienlaikus risina zināšanu trūkumu par organisko augšņu reālo izplatību (it sevišķi seklajās klasēs) un sniedz praktisku instrumentu zemes izmantošanas plānošanai, atjaunošanas prioritizācijai un paludikultūru potenciāla izvērtējumam.

Pētījuma inovācija ir metodiskajā integrācijā: mēs apvienojam augstas izšķirtspējas reljefa indikatorus (DTW, WAM, TWI, slīpums), ģeogrāfiskos un klimatiskos kovariātus (kontinentalitāte, X/Y, augstums virs jūras līmeņa) un ģeoloģiskos slāņus (kvartāra nogulumu karte) ar mašīnmācīšanās modeļiem, kas apmācīti uz standartizētas MSI mērījumu bāzes. Šāda pieeja ir īpaši piemērota hemiboreālajiem apstākļiem, kur organisko augšņu telpiskos izplatību nosaka gan okeāniskās, gan kontinentālās gaisa masas un ūdens noteces plūsmas struktūra. Turklāt, izstrādājot detalizētāku apmācības metodiku (datu sadalīšana treniņa/testa kopa, datu balansēšana ar over-/under-sampling un SMOTE, parametru atlase ar režģmeklēšanu, 4-kārtu šķērsvalidācija), nodrošināta modeļa pārnesamība uz citām teritorijām un nākamajiem pārrēķinu cikliem. Visi iegūtie

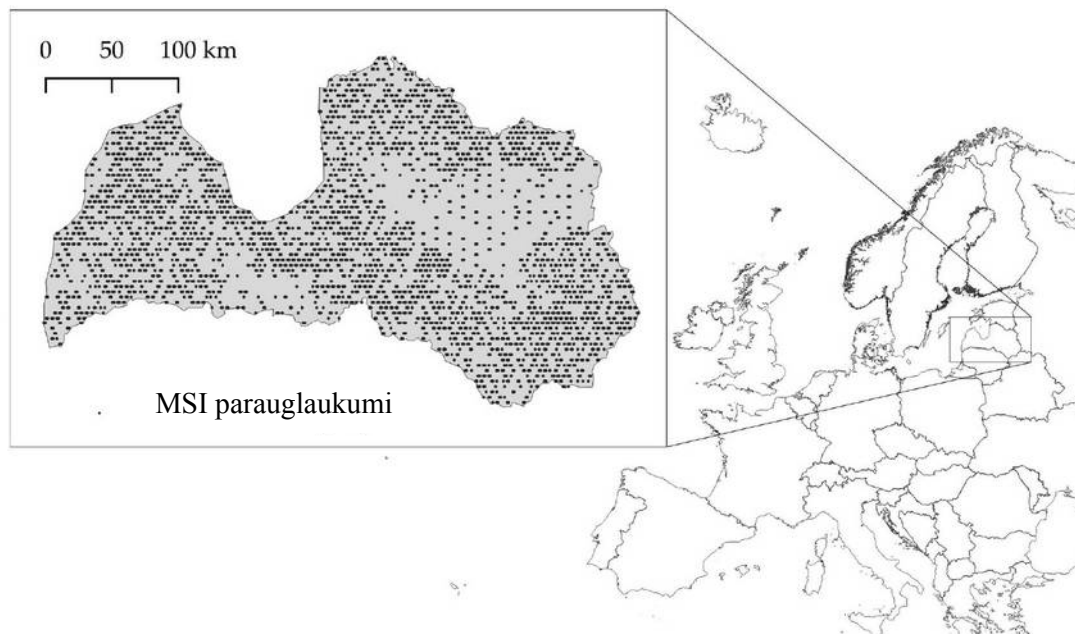
dati un to atvasinājumi šajā pārskatā izmantoti organisko augšņu izplatības novērtēšanai MSI parauglaukumos (punktveida dati), kā arī izveidots vienlaidus poligonu slānis.

Mūsu izstrādātā pieeja ne tikai uzlabo organisko augšņu izplatības un biezuma telpisko atainojumu (piemēram, Latvijā aprēķināti > 20 cm kūdras slāņi aptver ~15,6 % teritorijas, bet < 20 cm – vēl ~7,6 %), bet arī rada pamatu integrētai zemes lietojuma maiņas analīzei kopš 1990. gada, ļaujot sasaistīt organisko augšņu izplatības dinamiku ar antropogēnām ietekmēm un izvēlēto apsaimniekošanas pasākumu efektu. Šāda datu bāze ir nepieciešama, lai noteiktu mērķteritorijas atjaunošanai, precizētu emisiju faktorus un validētu politikas instrumentu ietekmi ZIZIMM sektorā, vienlaikus nodrošinot, ka analīze ietver meža parauglaukumu, aramzemju un zālāju organisko augšņu novērtējumu vienotā ietvarā.

Metodika

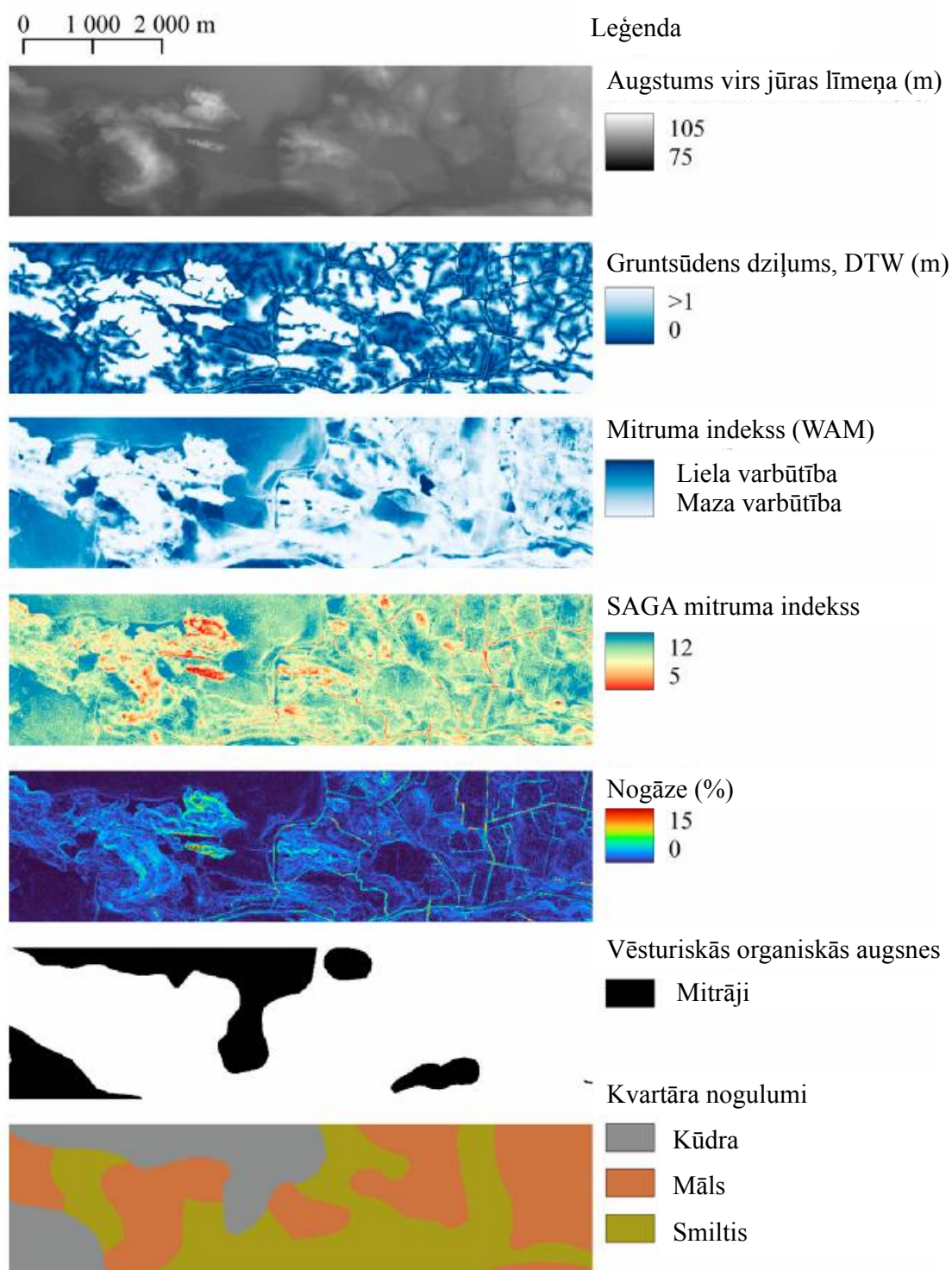
Metodikas mērķis ir prognozēt organisko augšņu (organiskām vielām bagāta slāņa) klātbūtni un slāņa biezuma klases, integrējot meža monitoringa parauglaukumu lauka mērījumus ar augstas izšķirtspējas reljefa datiem un citiem kartogrāfiskiem kovariātiem. Iegūtie telpiskie slāņi izmantoti organisko augšņu izplatības novērtēšanai MSI parauglaukumos un to apkārtnēs, konsekventi iekļaujot arī aramzemes un zālājus, lai nodrošinātu salīdzināmu SEG uzskaites ietvaru visām zemes lietošanas kategorijām atbilstoši KPSP vadlīnijām (Eggleston, Buendia, Miwa, Ngara, & Kiyoto, 2006; Hiraishi u.c., 2013).

Pastāvīgajos MSI parauglaukumos (Att. 18) kūdras slāņa biezums tika noteikts ar augsnes zondi četros virzienos 20 m no laukuma centra, veidojot mērījumu kopu, kuras koordinātu kļūda bija < 1 m. Analītiski izmantotas trīs klašu kategorijas: 0 cm (nav kūdras), ≤ 20 cm (sekla kūdra – kūdraina augsne) un > 20 cm (KPSP kritērijiem atbilstoša organiskā augsne, kur organiskām vielām bagātais augsnes slānis ir biezāks par 20 cm). Šie mērījumi kalpoja mašīnmācīšanās modeļu apmācībai un validācijai, vienlaikus nodrošinot atgriezenisko saiti par modeļu precizitāti atšķirīgos zemes izmantošanas veidos (aramzemes, zālāji, mežs).



Att. 18. Pētījuma teritorija un NFI parauglaukumu izvietojums.

Pētījumā izmantotais digitālais reljefs (DEM; 5 m izšķirtspēja) atvasināts no gaisa lāzerskenēšanas (ALS) datiem. No DEM aprēķināti dziļums līdz gruntsūdeņiem (DTW), mitro teritoriju indekss (WAM), slīpums un SAGA mitruma indekss (SAGA_TWI). DTW un WAM atspoguļo reljefa kontrolētu mitruma režīmu un ūdens plūsmas kanālu tīklu, kas ir tieši saistīts ar kūdras uzkrāšanās priekšnosacījumiem (Ivanovs & Lupikis, 2018; Murphy u.c., 2008). SAGA_TWI izmanto modificētu sateču aprēķinu, kas samazina piesātinājuma pārvērtēšanu uz nogāzēm esošās ieplakās salīdzinājumā ar klasisko TWI (Böhner & Selige, 2006). Papildu kovariāti: (i) attālums līdz virszemes ūdeņiem, (ii) kvartāra nogulumu/tekstūras karte, kas ataino substrāta hidroloģiskās īpašības (Meirons, 2002), (iii) kontinentalitāte (attālums līdz Baltijas jūrai) un ģeogrāfiskās koordinātas (X, Y), kas raksturo reģionālos klimatiskos gradientus hemiboreālajā zonā (Franzén, 2006), kā arī (iv) vēsturisko organisko augšņu izplatības slānis (HOS, Att. 20), kas kalpo par strukturējošu kontekstu robežu precizēšanai (Piirimäe u.c., 2020). Vizuali dažādu izmantoto datu kopu piemēri parādīti Att. 19.



Att. 19. Pētījumā izmantotie rādītāji un indeksi (DTW, WAM, slīpums, SAGA_TWI u.c.)

DTW aprēķina shēma. Dziļums līdz ūdenim aprēķināts divos sateču mērogos (10 un 30 ha), izmantojot „vislētākā ceļa” (least-cost) trajektoriju no zināma ūdensteču tīkla. Diskrēta formā:

$$DTW(m) = \left[\sum_i \frac{Dz}{Dx_i} a_i \right] x_c$$

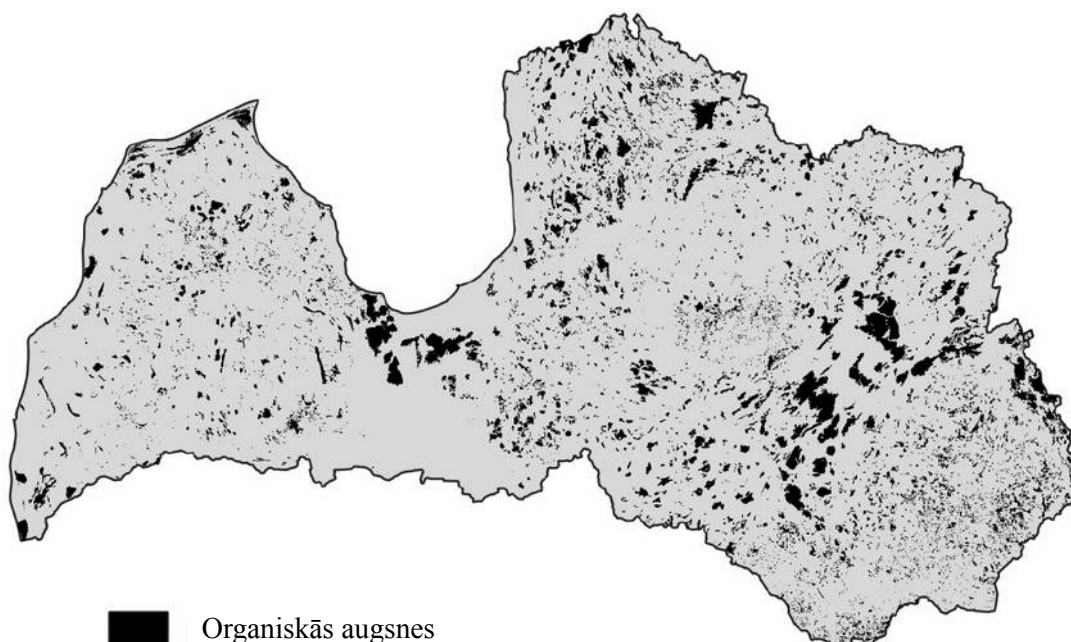
kur $\frac{Dz}{Dx_i}$ ir slīpums gar zemākās potenciālās enerģijas ceļu, $a_i=1$ kustībai paralēli šūnas malām un $a_i=\sqrt{2}$ diagonālai kustībai, x_c - šūnas izmērs (Murphy u.c., 2008). WAM tiek interpretēts 0–1 skalā (0 – sauss, 1 – slapjš), ar indikatora saturu, kas ietver kūdras klātbūtni un reduktimorfu pazīmju īpatsvaru profilā (Murphy u.c., 2008).

Klašu (0; ≤20; >20 cm) prognozēšanai izmantoti koku pastiprināšanas modeļi (*XGBoost*) ar nelineārām mijiedarbībām (T. Chen & Guestrin, 2016). Modeļu apmācību un hiperparametru atlasī nodrošināja *caret* pakotne ar 4-kārtu šķērsvalidāciju un režģmeklēšanu (Kuhn, 2008). Lai mazinātu klašu nelīdzsvaru (seklās kūdras retums, robežjoslu mozaīka), testētas *oversampling/undersampling* un SMOTE shēmas (Chawla u.c., 2002; Cordón u.c., 2018). Modeļu izvēlē galvenie kritēriji bija kopējā precizitāte un kappa indekss; papildus analizēta jutība klašu griezumā un sajukuma (*confusion*) matrica, ievērojot ieteikumus par telpisku šķērsvalidāciju un paraugošanas stratēģiju reģionāla mēroga klasifikāciju (A. Ramezan u.c., 2019).

Kovariātu informativitāte un interpretējamība vērtēta atbilstoši *gain* metrikai. Tipiski dominējošie kovariāti bija DTW (īpaši 10 ha mērogā), WAM, kontinentalitāte un HOS, kas kopumā atspoguļo reljefa – hidroloģijas vadītu kūdras uzkrāšanos un reģionālos klimata gradientus (Murphy u.c., 2008; Piirimäe u.c., 2020; Vasander & Kettunen, 2006).

Prognozes kvalitāte vērtēta, izmantojot neatkarīgu testa kopu, kurai noteikta kopējā precizitāte un kappa indekss; jutība/specifiskums pa klasēm ļāva identificēt kļūdaini negatīvos gadījumus seklās kūdras klasē, kur reljefa – hidroloģijas iezīmes pārklājas ar minerālaugsnēm mozaīkveida ainavās (A. Ramezan u.c., 2019). Turpmākas kvalitātes uzlabošanas virzieni ietver papildu informācijas slāņus (piem., aeroradiometriskie rādītāji) un papildus validāciju ar lauka mērījumu datiem ārpus meža zemēm. Līdzīgi pētījumi kūdras dziļuma kartēšanā ar LiDAR/radiometriskajiem datiem uzrāda būtisku precizitātes pieaugumu augstienēs un ielejās (Aitkenhead, 2017; Gatis u.c., 2019; Rudiyanto u.c., 2016).

Izstrādātie modeļi pielietoti 5 m rastra režģī visai teritorijai; rezultātā iegūta klašu karte (0; ≤20; >20 cm). Produkts telpiski savietots ar zemes lietošanas datiem, lai kvantitatīvi novērtētu organisko augšņu izplatību MSI parauglaukumos, analizējot arī aramzemes un zālājus. Salīdzinājums ar vēsturiskajām organisko augšņu kartēm (HOS) ļāva precizēt robežu ģeometriju un atklāt iepriekš nemarkētas „saliņas”, vienlaikus akcentējot validācijas nepieciešamību marginālajās joslās (Piirimäe u.c., 2020).



Att. 20. Vēsturiski kartēto organisko augšņu (HOS) izplatība.

Organisko augšņu klašu karte tika intersektēta ar zemes izmantošanas datu laika rindām (no 1990. gada), veidojot zemes izmantošanas maiņas matricas starp ZIZIMM kategorijām un interpretējot antropogēno ietekmi (transformācija mežs ↔ aramzeme ↔ zālājs) uz organisko augšņu izplatību, vienlaicīgi no 2004. gada pielietojot 2018. gadā publicētos vienādojumus (Petaja u.c., 2018), kas raksturo organisko augšņu platības samazināšanos (šajā gadījumā pieaugumu) no 2004. līdz 1990. gadam. Šī integrācija nodrošina saskaņotību ar oglekļa krājumu un emisiju uzskaiti, kā to nosaka KSPS metodika organiskajām augsnēm un zemes izmantošanas maiņai (Eggleston, Buendia, Miwa, Ngara, & Kiyoto, 2006), un ļauj konsekventi lietot rezultātus meža, aramzemju un zālāju raksturošanai visā laika rindā.

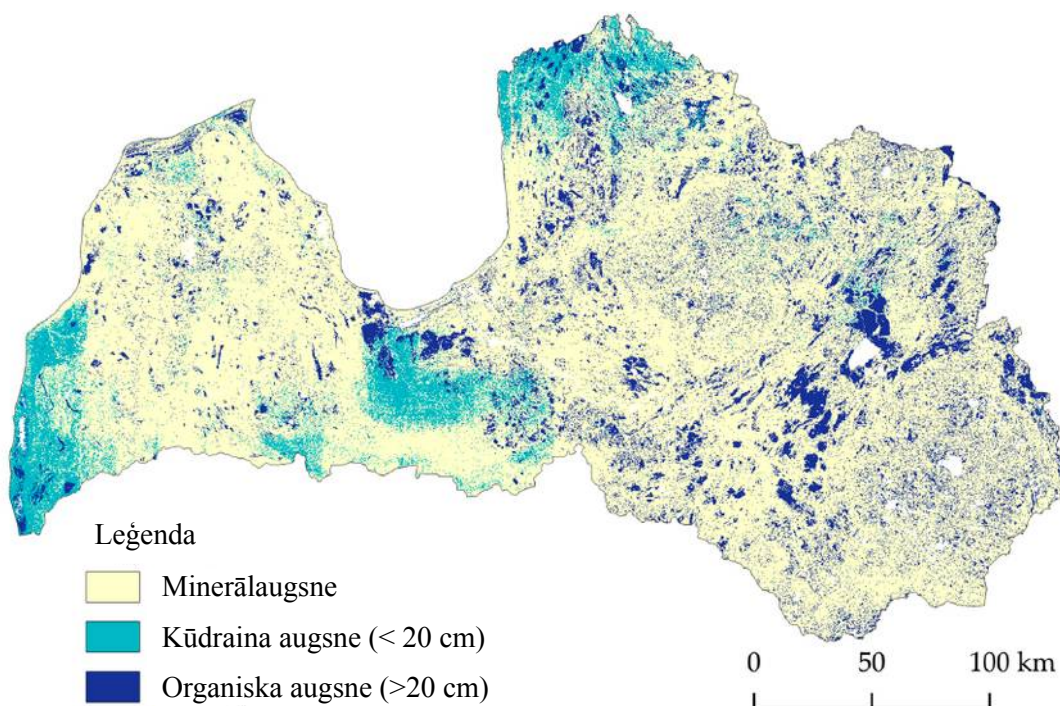
Pētījumā izmantotā pieeja saskan ar digitālās augsnes kartēšanas paradigmu, kur reljefa un klimata atvasinājumi kombinēti ar mašīnmācīšanos, lai prognozētu augsnes īpašības un krājumus dažādos mērogos (Adhikari u.c., 2014; Mulder u.c., 2016). Izmantotie indikatori (DTW, WAM, TWI) un prognožu modeļi (*XGBoost*) ir īpaši piemēroti, ja mērķlielums ir mitruma režīma un piesātinājuma ar ūdeni kontrolēts process, kāds ir kūdras veidošanās, un ja nepieciešama liela telpiskā izšķirtspēja politikas un pārvaldības vajadzībām (T. Chen & Guestrin, 2016; Murphy u.c., 2008).

Rezultāti

Mašīnmācīšanās klasifikators (*xgbTREE* ar *oversampling*) uzrādīja labāko precizitāti: kopējā precizitāte sasniedza 0,88, bet kappa indekss – 0,74-0,75. Klašu griezumā jutība/bija minerālaugsnēm 0,95/0,80; seklām kūdras (kūdrainām) augsnēm (≤ 20 cm) 0,62/0,97; organiskām augsnēm (> 20 cm) 0,82/0,96. Izklides (*confusion*) matrica

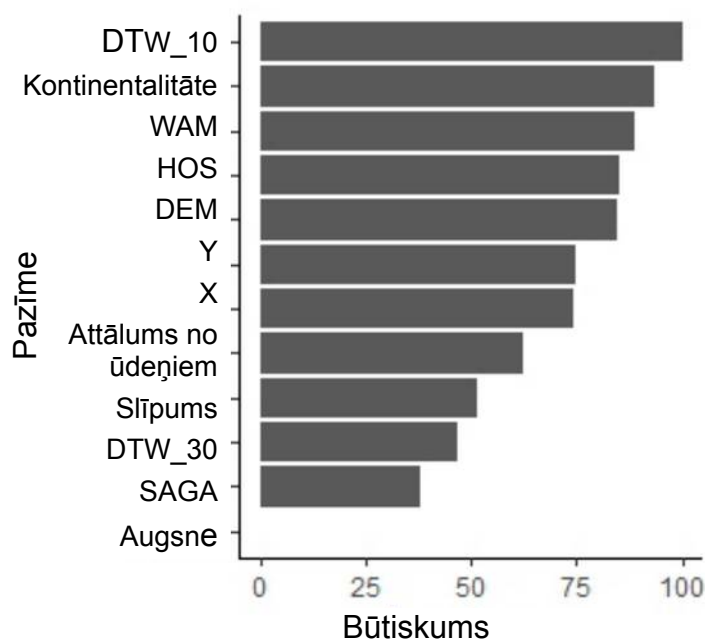
parādīja, ka kūdrainās augsnēs 38,6% gadījumu bija kļūdaini negatīvi; trīs ceturtdaļās šo gadījumu paraugi prognozēti kā “bez kūdras” (norādot uz topogrāfisko indikatoru līdzībām mozaīkveida ainavās).

Telpiski rezultāti atklāja, ka Latvijā augsnes ar organisko augsni (kūdras slānis > 20 cm) sedz ~15,6% (9760 km²) no sauszemes, bet augsnes ar kūdras slāni < 20 cm – vēl ~7,6% (4799 km²). Salīdzinājumā ar vēsturiskajām kartēm (organisko augšņu izplatība 10,8%) jaunā pieeja palielina atpazīto organisko augšņu daļu, kas skaidrojams ar augstāku izšķirtspēju un citu kļūdu struktūru. Vēsturisko organisko augšņu (HOS) slāņa precizitāte, salīdzinot ar NFI parauglaukumiem, sasniedza 0,76 (kappa 0,39), tātad izstrādātā telpisko datu kopa sniedz būtisku uzlabojumu organisko augšņu izplatības izpratnē. Izveidotā karte parāda atsevišķas kūdraino augšņu koncentrācijas vietas Latvijas dienvidrietumos, Zemgales līdzenumā, kā arī valsts ziemeļaustrumos. Organisko augšņu izplatība korelē ar vēsturisko organisko augšņu karti (Att. 21).



Att. 21. Kūdras slāņa biezuma klašu karte (0; ≤20; >20 cm).

Pazīmju nozīmīguma (*feature importance*) analīze parādīja, ka galvenie kovariāti bija DTW (10 ha sateces mērogs), kontinentalitāte, WAM un HOS, kam sekoja citi reljefa atvasinājumi (DEM slīpums, SAGA_TWI) un ģeogrāfiskās koordinātas (Att. 22). Tas apstiprina hipotēzi par reljefa – hidroloģisko procesu dominējošo ietekmi uz kūdras uzkrāšanās telpiskajiem rādītājiem hemiboreālajā joslā.



Att. 22. Iezīmju nozīmīgums prognožu modelī – DTW_10, kontinentalitāte, WAM, HOS u.c.

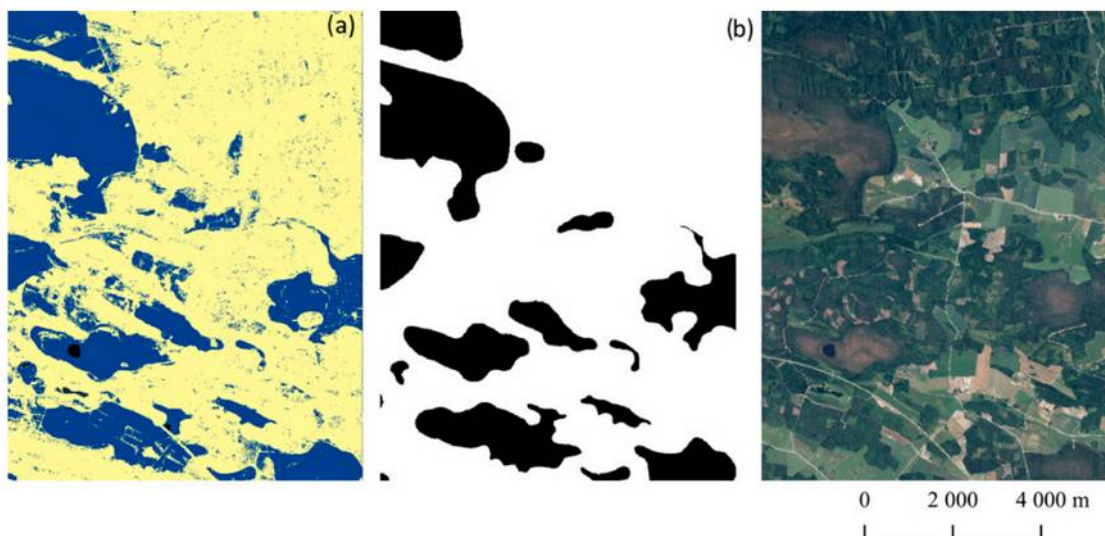
Izstrādātā karte (5 m režģis, ALS dati), pretstatā HOS, nodrošina detalizētāku robežu ģeometriju: dažviet vērojamas “izvirzījumu/iegrimšanas” korekcijas, atklātas iepriekš nemarkētas organisko augšņu “saliņas”, kā arī parādās lokāli, ļoti mazi organiskā horizonta plankumi (tuvāki “troksnim”), kas raksturīgs augstas izšķirtspējas produktiem. Šis efekts uzsvēr nepieciešamību pēc mērķētas validācijas marginālajās zonās, izmantojot papildus mērījumu datus.

Pētījumā konstatēts, ka precīza kūdras slāņa biezuma noteikšanu smalkā mērogā apgrūtina kvartāra nogulumu reljefa kartes lielais mērogs; tomēr ilgstoša pārmērīga mitruma indikatoru (DTW, WAM) izmantošana ļauj identificēt zonas ar noturīgu kūdras akumulāciju un lielāku slāņa biezumu. Pieejamo lauka datu specifika (maksimālais zondes dziļums 70 cm) ierobežoja klašu skaitu; dziļākas kūdras diferenciācija (piem., purvos) prasītu papildu datu avotus (hidrogrāfiju, radiometriskos slāņus u. c.), tomēr arī ar esošajiem datiem var izdalīt papildus kūdras slāņa biezuma klases, piemēram, vismaz 40 cm biezs kūdras slānis (Melniks u.c., 2024).

Salīdzinājums ar citiem pētījumiem parāda līdzvērtīgu vai labāku sniegumu: Zviedrijas meža ainavā, izmantojot ALS atvasinātus datus 10 m izšķirtspējā, organisko augšņu izplatības prognozes precizitāte sasniedza 0,89-0,91, savukārt Skotijā, lietojot Landsat-8 100 m izšķirtspējā, klasifikācijai “organiskā/neorganiskā” augsne precizitāte bija 0,864 (trīs klašu gadījumā – 0,698). Šie salīdzinājumi ilustrē izšķirtspējas un datu avotu ietekmi uz kartējuma kvalitāti.

Saistībā ar inventarizācijas un telpiskās plānošanas vajadzībām rezultātiem ir divas tūlītējas iegūto rezultātu pielietošanas iespējas. Pirmkārt, jaunais karšu slānis ļauj precīzāk noteikt organisko augšņu robežas meža monitoringa parauglaukumos, uzlabojot darbību datu kvalitāti SEG inventarizācijā. Otrkārt, salīdzinājums ar HOS

norāda uz vietām, kur varētu būt novērojama organisko augsņu izplatības pārspīlēšana vai nepietiekoša platības novērtēšana (Att. 23), kas jāņem vērā zemes izmantošanas maiņas (kopš 1990. gada) interpretācijā un atjaunošanas prioritizācijā.



Att. 23. Jaunās kartes (a) un HOS (b) salīdzinājums – robežu korekcijas un papildu zonas.

Nākošajā etapā veikta organisko augsņu platības noteikšana aramzemē un zālajos, izmantojot integrētu pieeju, kas apvieno vēsturisko datu rekonstrukciju un mūsdienīgu telpisko modelēšanu. Šāda kombinēta metode nodrošina konsekventu laika rindas izveidi atbilstoši IPCC labas prakses vadlīnijām un atspoguļo nacionālās datu pieejamības attīstību. Laika posmam līdz 2019. gadam organisko augsņu īpatsvars atvasināts no ilgtermiņa monitoringa un vēsturiskajiem augsnes karšu datiem (Petaja u.c., 2018), savukārt no 2020. gada aprēķini balstās uz mašīnmācīšanās tehnoloģijām, kas nodrošina telpiski eksplīcētu organisko augsņu identifikāciju (Ivanovs u.c., 2024).

Vēsturiskajā rekonstrukcijā izmantotie dati aptver periodu kopš 1983. gada, kad nacionālajos pētījumos un augsnes kartēs fiksētas organisko augsņu proporcijas aramzemē un ilggadīgajos zālajos (Petaja u.c., 2018). Lineārās regresijas modeļi ticami atspoguļo ilgtermiņa tendences – organisko augsņu samazināšanos līdz 2019. gadam, vienlaikus saglabājot sasaisti ar empīriski pārbaudītām vēsturiskajām un 2016.–2019. gada vērtībām. Aramzemē organisko augsņu daļa samazinās no 6,3% 1983. gadā līdz 4,1% 2016. gadā, bet zālajos – no 11,6% līdz 7,7%. Regresijas funkcijas, kas apraksta šo lejupslīdi, piemērotas proporciju aprēķinam konkrētajam gadam, bet aprēķinātās proporcijas tiek reizinātas ar attiecīgā gada kopējo aramzemes vai zālāju platību no oficiālās statistikas. Šādi iegūtie rezultāti nodrošina pilnīgu pārklājumu periodam līdz 2019. gadam, kad telpiskā informācija par organiskajām augsnēm joprojām bija nepietiekama pilnvērtīgai kartēšanai.

Sākot ar 2020. gadu, organisko augsņu platību noteikšanā izmantotas mašīnmācīšanās metodes, kas balstās uz daudzavotu tālīzpēti un ģeotelpisko informāciju (Ivanovs u.c., 2024; Melniks u.c., 2024). Darba gaita detalizēti aprakstīta nodaļā Metodika. Rezultātā

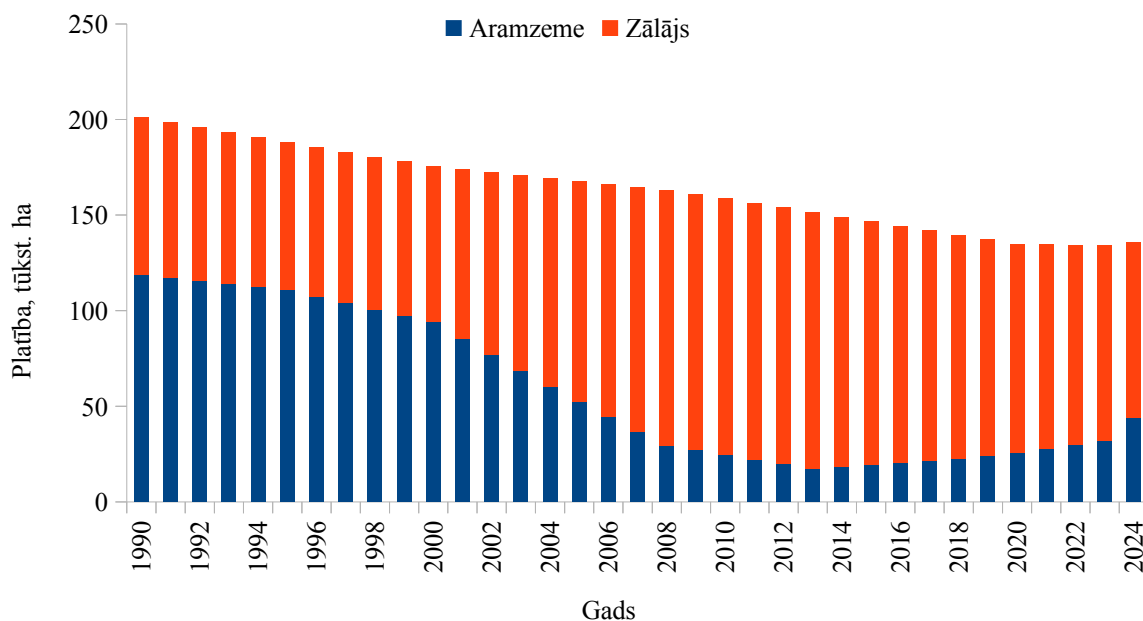
izveidots binārs organisko augsņu slānis, kas tiek krustots ar aramzemes un zālāju telpiskajām datu kopām, nodrošinot augstas izšķirtspējas organisko augsņu platību aprēķinu. Šajā posmā netiek veikta regresijas balstīta datu izlīdzināšana, saglabājot tiešu saikni ar faktiskajiem novērojumiem.

Metode nodrošina IPCC prasīto konsekvenci, jo tiek izmantots tikai viens metodoloģiskais pārejas gads: 2019. gada vēsturisko rekonstrukciju noslēdz, bet no 2020. gada tiek izmantoti tikai mašīnmācīšanās produkti. Regresijas modeļi ir enkuroti pie vēsturiski pārbaudītajām vērtībām, izslēdzot risku pārvērtēt vai nepietiekami novērtēt organisko augsņu izplatību. Savukārt mūsdienu telpiskie kartējumi netiek ekstrapolēti pagātnē, tādējādi izvairoties no neatbilstībām ar vēsturiskajiem augsnes datiem.

Aprēķinos izmantotā aktivitāšu informācija ietver ikgadējās aramzemes un zālāju platības no nacionālās statistikas, vēsturisko organisko augsņu daļu no augsnes karšu un monitoringa materiāliem (1990.-2019. gads) un organisko augsņu maskas no mašīnmācīšanās klasifikācijas (no 2020. gada). Organisko augsņu platība aprēķināta, reizinot attiecīgās zemes izmantošanas kategorijas kopējo platību ar organisko augsņu īpatsvaru.

Nenoteiktības analīze aptver gan regresijas modeļu nenoteiktību, gan klasifikācijas precizitāti, kas balstīta krustvalidācijā un lauka mērījumos. Kopējā nenoteiktība tiek propagēta atbilstoši IPCC 2006. gada vadlīnijām. Kvalitātes nodrošināšanā ietilpst ikgadēja regresijas rezultātu salīdzināšana ar vēsturiskajiem etalonpunktiem, mašīnmācīšanās datu manuāla pārbaude un atbilstības izvērtējums starp organisko augsņu kartēm un zemes izmantošanas slāņiem. Visi izmantotie modeļi, klasifikatori, treniņdati un telpiskās kartes tiek sistemātiski arhivētas institucionālajā datu krātuvē, nodrošinot reproducējamību un atbilstību datu pārvaldības standartiem. Izstrādāto metodi paredzēts iekļaut 2026. gada SEG inventarizācijas dokumentā.

Organisko augsņu platības izmaiņas aramzemēs un zālājos grafiski parādītas Att. 24. Kopējā organisko augsņu platība aramzemēs un zālājos samazinās no 201,1 tūkst. ha 1990. gadā līdz 135,6 tūkst. ha 2024. gadā. Salīdzinot ar SEG inventarizācijas dokumentā 2025. gadā ziņoto organisko augsņu platību, samazinājums ir 35,7 tūkst. ha (par 21%). Proporcioniāli samazināsies arī ziņotās SEG emisijas.



Att. 24. Organisko augšņu platības izmaiņas no 1990. gada.

Secinājumi

Šajā pētījumā izstrādāta augstas izšķirtspējas (5 m) organisko augšņu un kūdras slāņa biezuma karte trīs klasēs (0; ≤20; >20 cm), sasniedzot augstu kopējo precizitāti (0,88) un $\kappa = 0,74-0,75$. Iegūtie rezultāti parāda, ka >20 cm kūdra sedz apmēram 15,6 % Latvijas sauszemes, bet ≤20 cm – vēl ~7,6 %. Salīdzinājumā ar vēsturisko organisko augšņu kartējumu (HOS) jaunais produkts nodrošina būtiski precīzāku robežu ģeometriju un atklāj iepriekš nemarķētas organisko augšņu “saliņas”, vienlaikus uzrādot, ka HOS precizitāte pret parauglaukumiem ir zemāka (kopējā precizitāte ~0,76; $\kappa \sim 0,39$). Iezīmju nozīmīguma analīze apstiprina reljefa–hidroloģijas indikatoru dominanci: DTW (īpaši 10 ha sateces mērogā) un WAM kopā ar kontinentalitāti, kā arī papildinošiem reljefa atvasinājumiem (slīpums, SAGA_TWI) un ģeogrāfiskajām koordinātām nosaka prognožu kvalitāti.

Klasifikācijas vājākais posms ir seklās kūdras (≤20 cm) noteikšana (jutība ~0,62), kur biežāk novērojami kļūdaini negatīvi gadījumi, kas skaidrojami ar līdzīgām topogrāfiskām pazīmēm mozaikainās minerālaugsnēs un robežjoslās. Tas norāda uz nepieciešamību turpināt datu balansēšanu un paplašināt kovariātu telpu (piemēram, izmantojot radiometriskos rādītājus), kā arī stiprināt neatkarīgo validāciju ārpus meža zemēm. Vienlaikus jāņem vērā mērījumu instrumentālais ierobežojums (zondes garums 70 cm), kas neļauj detalizēti diferencēt dziļākās kūdras klases.

Iegūtā karte un statistika tieši izmantojama organisko augšņu izplatības novērtēšanai meža monitoringa parauglaukumos un to apkārtnēs, konsekventi iekļaujot aramzemes un zālājus. Savietojot telpiskos rezultātus ar zemes izmantošanas laika rindām kopš

1990. gada, iespējams šķirt antropogēno pārmaiņu ietekmi un uzlabot aktivitāšu datu kvalitāti SEG uzskaitē. Praktiskā nozīme izpaužas zemes izmantošanas plānošanā, atjaunošanas prioritizācijā un riska teritoriju noteikšanā, kā arī nacionālo aprēķinu saskaņošanā ar IPCC metodiku.

Kopumā pētījums demonstrē, ka ALS atvasinājumi un mašīnmācīšanās nodrošina robustu pamatu organisko augšņu kartēšanai hemiboreālajā zonā, ievērojami uzlabojot izplatības un biezuma novērtējumu salīdzinājumā ar vēsturiskajiem slāņiem. Tuvākajā perspektīvā ieteicama modeļa atjaunošana ar jauniem lauka mērījumiem dažādās zemes lietojuma kategorijās, papildu hidroloģiskiem un tālīzpētes kovariātiem un telpisku krustvalidāciju, lai paaugstinātu seklās kūdras atpazīšanu un nostiprinātu rezultātu lietojamību inventarizācijā un politikas lēmumu atbalstā.

Augsnes heterotrofās elpošanas radītās CO₂, N₂O un CH₄ emisijas no aluviālajām augsnēm

Pētījuma ietvaros turpināta empīriskus datu ieguve augsnes heterotrofās elpošanas radīto CO₂ emisiju no aluviālajām augsnēm raksturošanai ganībās vai aramzemes. Mērījumi aramzemēs uzsākti 2023. gadā. Pētījumus veicām 2 platībās aramzemēs. Pētījumā noteiktas augsnes heterotrofās elpošanas radītās CO₂ emisijas, kā arī CH₄ un N₂O emisijas no augsnes, augsnes temperatūra, mitruma saturs augsnes virskārtā, virszemes un pazemes biomasa un biomasas ieguve siena vai zaļbarības sagatavošanai. Gāzu apmaiņa mērīta veģetācijas sezonas laikā, 9 mēnešu ilgumā. Mērījumi veikti 9 pastāvīgos heterotrofās elpošanas laukumos katrā izmēģinājumu platībā, bet CH₄ un N₂O satura izmaiņas mērītas 6 kamerās katrā platībā. Mērījumu metodika harmonizēta ar Jauhiainen u.c. (2023) rekomendēto metodiku gāzu apmaiņas raksturošanai. Darba uzdevumu īstenoja AREI Stendes pētniecības centrs. Pārskata autori Inga Jansone, Sanita Zute un Arta Bārdule. Pētījuma rezultāti apkopoti rakstā “Greenhouse gas emissions from alluvial soils in grassland and cropland in northern part of Europe's temperate climate zone (Latvia)”, kas iesniegts publicēšanai žurnālā *Plant, Soil and Environment* (Q2). Salīdzinot ar iepriekšējo gadu, raksts papildināts ar 2024. gada mērījumu datiem.

Ievads

Alūvijs, aluviālo augšņu pamatmateriāls, ir nesaistīti nogulumi, ko nogulsņējušas upes, strauti un citas upju sistēmas (Boettinger, 2005; Thorp, 1968). Kopumā aluviālajām augsnēm ir liela nozīme daudzās ekosistēmās un lauksaimniecības ainavās to mitruma stāvokļa un augstās potenciālās produktivitātes dēļ. Tām ir būtiska nozīme arī daudzu upju ielejās esošo aizsargājamo dabisko un daļēji dabisko ekosistēmu funkcionēšanā (Kabaļa, 2022; Šeffers u.c., 2008). Piemēram, aluviālās pļavas gar Eiropas upēm, kurām raksturīgs dabisks applūšanas režīms, ir biotopu tips, kas iekļauts Eiropas Savienības (ES) Biotopu direktīvā (Council Directive 92/43/EEC of 21 May 1992 on the Conservation of Natural Habitats and of Wild Fauna and Flora, 1992). Turklāt nesen (2024. gada jūnijā) pieņemtā ES Regula 2024/1991, kas pazīstama kā Dabas atjaunošanas likums (Regulation (EU) 2024/1991 of the European Parliament and of the Council of 24 June 2024 on Nature Restoration and Amending Regulation (EU) 2022/869 (Text with EEA Relevance), 2024), papildus pievēršas upju dabiskās savienojamības un ar to saistīto palieņu dabisko funkciju atjaunošanai. Tādējādi palieņu ar aluviālajām augsnēm ilgtspējīgai apsaimniekošanai būtu jātiecas saskaņot gan dabas aizsardzības un atjaunošanas, gan zemes īpašnieku un apsaimniekotāju intereses (Donath u.c., 2015).

Aluviālās augsnes var atšķirties pēc sastāva un tekstūras, sākot no mālainiem un bagātīgām, smilšmālainām augsnēm līdz sanesuma smiltīm, kā arī var saturēt lielu daudzumu organisko vielu un tādējādi pat atbilst Klimata pārmaiņu starpvaldību padomes (IPCC) (Eggleston, Buendia, Miwa, Ngara, & Kiyoto, 2006; Hiraishi u.c., 2013) noteiktajai organiskās augsnes definīcijai, tostarp Histosols augsnes tipam (Food and Agriculture Organization, 2014). Aluviālās augsnes ir vienas no pasaulē visnoderīgākajām un produktīvākajām augsnēm (Boettinger, 2005). Tajā pašā laikā aluviālās augsnes var būt primāro siltumnīcefekta gāzu (SEG), tostarp oglekļa dioksīda (CO₂), slāpekļa oksīda (N₂O) un metāna (CH₄), emisiju avots (Oertel u.c., 2016). Papildus klimatiskajiem faktoriem un lauksaimnieciskajai darbībai, kas ietekmē gan veģetācijas augšanu, gan augsnes vidi un attiecīgi SEG apmaiņas apjomu (Basheer u.c., 2024; Chataut u.c., 2023), aluviālās augsnes upju palienēs ietekmē periodiska vai periodiska ūdens uzkrāšanās (Lin u.c., 2022). Tas bioģeoķīmiskās darbības un SEG apmaiņas dinamiku padara vēl sarežģītāku (Jansson & Hofmockel, 2020). Turklāt vairākos klimata pārmaiņu scenārijos ir prognozēts, ka spēcīgi nokrišņi var izraisīt ilgstošus plūdu periodus un pārmaiņus mitrus un sausus apstākļus lauksaimniecības augsnēs (Guo u.c., 2023; Tabari, 2020). Iepriekšējos pētījumos uzsvērts, ka nogulumi, kuros ir sausāki apstākļi, ir aktīvas SEG emisiju zonas, un lielākas SEG emisijas pārejas posmos starp sausumu un mitrumu ir novērotas jau iepriekš, parādot ūdens līmeņa svārstību efektu (Machado Dos Santos Pinto u.c., 2020). Šīs augsnes mitruma izmaiņas, ko izraisa ilgstoši plūdi un pārmaiņus plūdu un sausuma apstākļi, var vēl vairāk ietekmēt SEG plūsmu lielumu, potenciāli atšķirīgi ietekmējot aramzemes un zālājus (Guo u.c., 2023).

Aluviālajām augsnēm, kas veidojušās palienēs, ir vairākas kopīgas iezīmes ar organiskajām (kūdras) augsnēm, kas veidojušās mitrājos (kūdrājos). Abas augsnes var būt auglīgas un bagātas ar barības vielām, lai gan to avoti atšķiras. Aluviālās augsnes iegūst barības vielas no minerāldaļiņām un organiskām vielām, ko pārnes ūdens (Poff & Zimmerman, 2010), savukārt kūdras augsnes iegūst barības vielas no sadalījušās organiskās vielas (Lindsay, 2010). Aluviālās augsnes bieži satur ūdens atnesto organisko un minerālo materiālu maisījumu, savukārt kūdras augsnēs ir daudz organisko vielu, tomēr kūdras slānis lauksaimnieciski izmantojamās teritorijās ilgstošas lauksaimnieciskās darbības rezultātā var sajaukties ar zem tā esošo minerālo augsnes slāni (Łabaz & Kabala, 2016). Abi augsnes veidi veidojas dabisku procesu rezultātā, kuros iesaistīts ūdens. Aluviālās augsnes nogulsņējas upēs un strautos (Rydin & Jeglum, 2013), savukārt kūdras augsnes veidojas pārmitros apstākļos, kur augu materiāls lēni sadalās (Rydin & Jeglum, 2013). Abiem augsnes tiem ir labas ūdens aizturēšanas spējas. Aluviālās augsnes var aizturēt mitrumu, pateicoties to dažāda veida daļiņu izmēram un sastāvam (Hillel, 2003), bet kūdras augsnes ir ļoti absorbējošas, jo tajās ir augsts organisko vielu saturs (Mitsch & Gosselink, 2015). Abos augsnes tipos ir daudzveidīgas ekosistēmas, biotopi un unikālu augu un dzīvnieku sugu daudzveidība (Naiman & Décamps, 1997; Zerbe, 2023). Abus augsnes tipus izmanto arī lauksaimniecībā, taču tiem ir nepieciešama atšķirīga apsaimniekošanas prakse. Kūdras

augsnēm nepieciešama rūpīga ūdens apsaimniekošana, lai novērstu to izžūšanu un sadalīšanos, savukārt aluviālajām augsnēm nepieciešama aizsardzība pret eroziju un barības vielu zudumiem (Brady & Weil, 2014).

Kopumā nosusinātās organiskās augsnes, ko izmanto lauksaimniecībā, ir nozīmīgs SEG emisiju avots daudzās valstīs, tostarp Latvijā (Petaja u.c., 2018). Nosusinātās organiskās augsnes veido nelielu daļu no kopējās lauksaimniecībā izmantojamo zemju platības Latvijā (5,77 % aramzemē un 8,32 % zālajos 2021. gadā saskaņā ar Latvijas nacionālo SEG inventarizācijas ziņojumu, tomēr šīs augsnes ir atbildīgas par lielāko daļu no kopējām SEG emisijām, kas uzrādītas aramzemju un zālāju kategorijās zemes izmantošanas, zemes izmantošanas maiņas un mežsaimniecības (LULUCF) sektorā (Ministry of Climate and Energy, 2023). SEG emisiju samazināšana no nosusinātām organiskajām augsnēm ir kļuvusi par vienu no galvenajiem jautājumiem gan ar klimatu saistītās zinātnes aprindās, gan politikas veidotājos. Mitrāju atjaunošana, tostarp pārmitrināšana, kas ir process, kurā nosusinātās kūdras augsnes pārveido par mitru kūdras augsni (Regula (ES) 2024/1991), tiek uzskatīta par dabā balstītu risinājumu, kas var būtiski samazināt SEG emisijas no nosusinātām organiskām augsnēm (Mander u.c., 2023). Tomēr šī stratēģija var būt pretrunā ar sociālekonomiskajām vajadzībām saglabāt produktīvu zemes izmantošanu un aizsargāt nodrošinātību ar pārtiku, kā arī saskarties ar vairākām problēmām. Tāpēc ar organisko vielu bagāto lauksaimniecībā izmantojamo augšņu apsaimniekošanas stratēģijām ir jāpanāk līdzsvars starp SEG emisiju samazināšanu un zemes izmantošanas produktivitāti (Freeman u.c., 2022). Lai gan aluviālās augsnes var uzkrāt lielu organiskā oglekļa daudzumu un potenciāli var darboties arī kā SEG emisiju avots, apsaimniekoto aluviālo augšņu, kuras periodiski applūst, ieguldījums Latvijas SEG emisiju profilā LULUCF sektorā joprojām nav skaidrs. Uzlabojot zināšanas par SEG apmaiņu no aluviālajām augsnēm, var veicināt efektīvāku šo augšņu apsaimniekošanu, nodrošinot ilgtspējīgu lauksaimniecības praksi, vides aizsardzību un klimata pārmaiņu mazināšanu, ņemot vērā klimata ekstrēmos apstākļus un to ietekmi uz tīro nulles SEG emisiju ambīcijām (Guo u.c., 2023).

Šis pētījums ir vērsts uz apsaimniekotām sezonālām upju palienēm ar aluviālajām augsnēm, kas tiek izmantotas kā pļavas un aramzeme Abavas upes ielejā. Pētījuma mērķis ir i) aprakstīt augsnes fizikāli ķīmiskos mainīgos lielumus, ii) novērtēt SEG (CO₂, CH₄, N₂O) plūsmu lieluma izmaiņas un novērtēt ikgadējās SEG emisijas un iii) noteikt šo plūsmu virzītājspēkus.

Materiāli un metodes

Saimniecība Priednieki Pūres pag. izmēģinājums turpinās 3 gadu palieņu applūstošos laukos. Laukā 2024. gadā sēts āboliņš, CO₂ mērījumus veica trīs vietās, katrā vietā 3 atkārtojumos. Mērījumu vietu ģeogrāfiskās koordinātas uzrādītas Tab. 22.

Tab. 22. Ģeogrāfiskās koordinātas mērījumu un paraugu ņemšanu vietām saimniecības Priednieki laukā, 2025. gads

Vietas nr.	Platums	Garums
I	57.04852120	22.88243950
II	57.04877100	22.88235770
III	57.04891700	22.88171340

Saimniecība Lagzdiņi Pūres pag. izmēģinājums ir iekārtots trešo gadu paliņu applūstošos laukos. Izmēģinājums iekārtots laukā 2025. gadā sētas lauku pupas, CO₂ mērījumi veikti trīs vietas, katra vietā 3 atkārtojumos. Ģeogrāfiskās koordinātas uzrādītas Tab. 23. Mērījuma datumi uzskaitīti Tab. 25.

Lauku pupu raža Saimniecībā Lagzdiņi Pūres pagastā tika noteikta ņemot ražas kūļus pie CO₂ mērījuma vietām. Lauku pupu raža saimniecībā Lagzdiņi 2025. gada sezonā bija 5,12 t ha⁻¹, pie 14% mitruma.

Tab. 23. Ģeogrāfiskās koordinātas mērījumu un paraugu ņemšanu vietām saimniecības Lagzdiņi laukā, 2025. gads

Vietas nr.	Platums	Garums
I	57.04804850	22.88568190
II	57.04790670	22.88659300
III	57.04773860	22.88643400

Tab. 24. Ģeogrāfiskās koordinātas mērījumu un paraugu ņemšanu vietām AREI SPC BIO laukā, 2025. gads

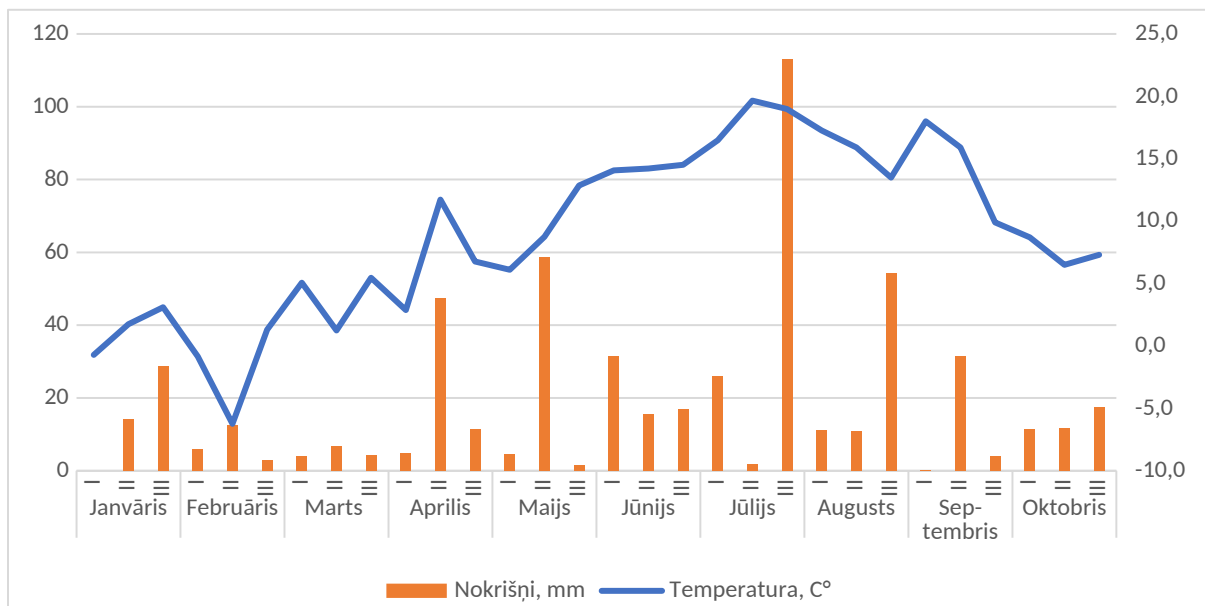
Apstrādes veids	Vieta	Platums	Garums
Daudzgadīgais zālājs	I	57.21431260	22.55348200
Daudzgadīgais zālājs	II	57.21406760	22.55319440
Daudzgadīgais zālājs	III	57.21387430	22.55299440
Arts	IV	57.21371810	22.55326470
Arts	V	57.21391300	22.55352260
Arts	VI	57.21413040	22.55382370
Diskots	VII	57.21394960	22.55418870
Diskots	VIII	57.21378770	22.55396690
Diskots	IX	57.21357330	22.55369030

Tab. 25. Mērījumu datumi 2025. gadā

Mērījumu vieta	Datumi
Priednieki (āboliņš)	4.06; 26.06; 17.07; 5.08; 29.08; 18.09; 9.10; 29.10
Lagzdiņš (pupas)	4.06; 26.06; 17.07; 5.08; 29.08; 17.09; 9.10; 29.10
AREI SPC BIO lauks	10.06; 26.06; 17.07; 6.08; 27.08; 18.09; 10.10; 28.10

Meteoroloģiskie novērojumi veikti Dobeles institūta Pūres daļā esošajā meteoroloģisko novērojumu stacijā Pūres tuvumā esošajiem laukiem. AREI Stendes PC tuvumā esošajiem laukiem Latvijas vides ģeoloģijas un metroloģijas centra Stendes novērojumu stacijā. Pūres dati atspoguļoti Att. 25 un Tab. 26.

Meteoroloģiskie apstākļi Pūrē 2025

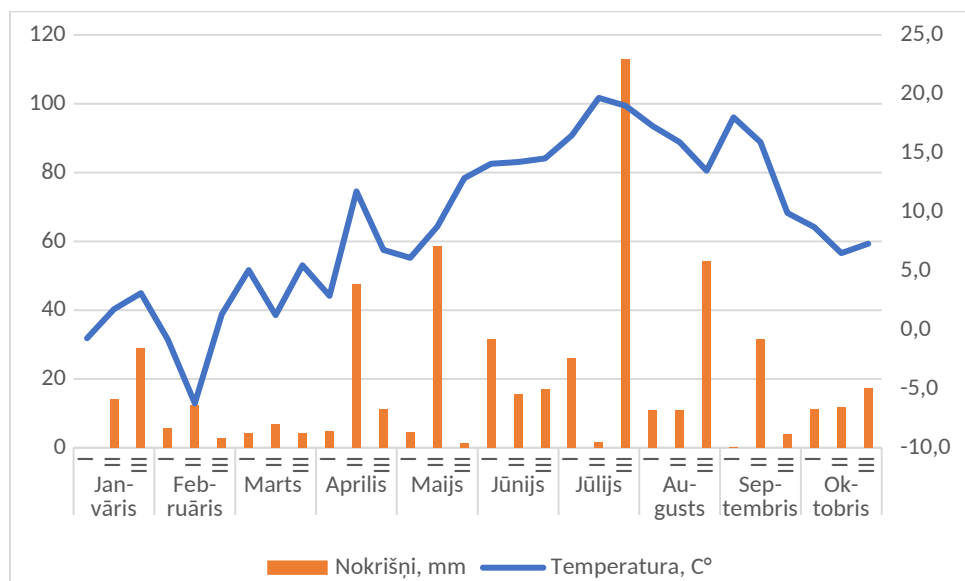


Att. 25. Vidējās gaisa temperatūras un nokrišņu summa Pūrē, 2025. gads.

Tab. 26. Meteoroloģiskie dati Dārzkopības institūta Pūres daļā, 2025. gads

Mēnesis	Temperatūra, C°			Nokrišņi, mm		
	I	II	III	I	II	III
Janvāris	-0,8	1,9	3,2	32,0	0,4	25,4
Februāris	-1,0	-6,1	0,8	3,0	3,8	1,2
Marts	4,7	1,6	5,0	3,4	5,6	0,8
Aprīlis	3,7	10,8	7,2	2,0	39,2	16,6
Maijs	6,7	8,4	12,9	2,0	74,0	3,8
Jūnijs	14,6	14,5	14,5	33,2	42,4	12,0
Jūlijs	16,7	19,2	19,7	17,6	2,6	87,4
Augusts	17,2	16,4	13,0	27,4	8,4	30,4
Septembris	17,6	16	9,7	1,2	38,2	4
Oktobris	8,2	6,5	7,4	17,4	10,4	29,8

Stendes pētījuma centra meteoroloģiskie dati atspoguļoti Att. 26 un Tab. 27.



Att. 26. Vidējās gaisa temperatūras un nokrišņu summa Stendes NS, 2025. gads.

Tab. 27. Meteoroloģiskie dati AREI Stendes PC, 2025. gads

Mēneši/dekādes	Temperatūra, C°			Nokrišņi, mm		
	I	II	III	I	II	III
Janvāris	-0,7	1,7	3,1	73,6	14,2	28,8
Februāris	-0,8	-6,2	1,3	5,8	12,5	2,9
Marts	5,1	1,2	5,5	4,1	6,8	4,3
Aprilis	2,9	11,7	6,8	4,9	47,4	11,3
Maijs	6,1	8,7	12,9	4,4	58,7	1,4
Jūnijs	14,1	14,2	14,5	31,5	15,5	16,9
Jūlijs	16,5	19,7	19,0	25,9	1,7	113
Augusts	17,3	15,9	13,5	11	10,9	54,2
Septembris	18,0	15,9	9,9	0,2	31,6	4
Oktobris	8,7	6,5	7,3	11,3	11,7	17,4

CO₂ mērījums veikts ar pārnēsājamo lauka instrument EGM-5, kam pievienota augsnes elpošanas kamera, kas reģistrē CO₂ plūsmas un atmosfēras spiedienu, sensors, kas mēra augsnes temperatūru un mitrumu. Lauka mērījumi veikti 1 reizi 3 nedēļās. Katrā mērījumu vietā trīs atkārtojumos.

Mērījuma laiks - 150 sek, kameras tilpums V=1171 mL, platība 78 cm².

2025. gada aprīlī tika iekārtots izmēģinājuma poligons AREI SPC bioloģiskajā laukā, kur kūdras biežums laukā pārsniedza 50 cm (Att. 27).



Att. 27. Kūdras augsne AREI SPC poligonā.

Lauka kopējā platība ir 0.6 ha. Lauka pamatapstrāde bija veikta 2024. gada rudenī, kad lauks bija uzarts. Lauks sadalīts trīs daļās:

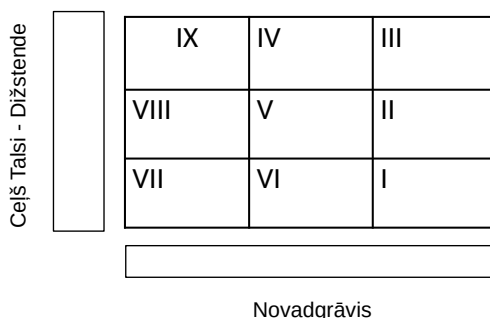
- pirmajā daļā 2025. gada 26.maijā tika iesēta pļavas auzene Patra (Att. 28), ar izsējas normu 14 kg ha⁻¹;
- otrajā un trešajā daļā 2025. gada 28. maijā iesēti griķi Aiva ar izsējas normu 65 kg ha⁻¹, zaļmēslojumam.



Att. 28. Pļavas auzenes sēja, 2025. gads.

Griķi zaļmēslojumam tika sasmalcināti 4. augustā un 7. augustā iestrādāti augsnē ar diskkiem. Turpinot poligona iekārtošanu rudenī tika veikta augsnes apstrāde 10. oktobrī II variantam uzarta, III variantam diskota (Att. 29).

Iekārtojot poligonu iezīmētas paraugu ņemšanas un mērījumu vietas. Tabulā norādītas vietu koordinātas, CO₂ mērījumi un augu paraugi tika ņemti iezīmētajās vietās.



Att. 29. Poligona iekārtojums.

Septembrī tika uzlikti digitālie augsnes mitruma un temperatūras sensori TOMST I, III, IV, VI, VII un IX mērījumu vietas. Temperatūras sensori izvietoti 3 trīs punktos: 1 – augsnes temperatūra 10 - 15 cm dziļumā, 2 – augsnes virskārta, 3 – gaisa temperatūra. Augsnes mitruma sensors izvietots pie 1 sensora. 9. septembrī daudzgadīgajā zālājā ievietoti 3 automātiskie ūdens mērītāji TD – Diver (Att. 30) I, II un III mērījuma vietās. Mērījumu caurules ievietotas 2 m dziļumā.



Att. 30. Ūdens mērītājs TD Diver.

Augsnes agroķīmiskās analīzes veiktas AREI SPC Graudu tehnoloģijas un agroķīmijas laboratorijā. Rezultāti doti Tab. 28. Izmantotās metodes:

- pH (LVS ISO 10390:2022) KCl vidē $c = 1 \text{ mol L}^{-1}$;

- organiskās vielas, % ((ZM 2022. gada 4. janvāra kārtība Nr. 1 (5. pielikuma 1. metode));
- kustīgais fosfors P₂O₅, mg kg⁻¹ (Ēgnera-Rīma metode);
- kustīgais Kālijs K₂O, mg kg⁻¹ (Ēgnera-Rīma metode);
- kopējais ogleklis, g kg⁻¹ (LVA ISO 10694:2006L);
- kopējais slāpeklis, mg g⁻¹ (LVA ISO 16878:1998);
- C/N attiecība (aprēķins).

Tab. 28. Augšņu raksturojums Stendes PC poligonā

Parauga ņemšanas vieta	pH	Organiskās vielas, %	Kustīgais fosfors P ₂ O ₅ , mg kg ⁻¹	Kustīgais Kālijs K ₂ O, mg kg ⁻¹	Kopējais ogleklis, g kg ⁻¹	Kopējais slāpeklis, mg g ⁻¹	C/N attiecība (aprēķins)
Zālājs	6,73	53,03	8,89	121,0	226,59	23,15	9,8
Artais	6,86	43,09	11,06	138,0	187,64	19,29	9,7
Diskotais	6,88	42,64	2,84	173,5	199,93	20,15	9,9

Visās vietās tika ņemti augu un sakņu paraugi, kuriem ir noteikta zaļmasas un sausnas ražas. Dati apkopoti Tab. 29 un 30.

Tab. 29. Zaļmasas un sausnas ražas, t ha⁻¹ palienes augsnes, 2025. gads

Parauga ņemšanas vieta	Suga	Vieta	Datums	Zaļmasas raža, t ha ⁻¹	Sausna, %	Sausnas raža, t ha ⁻¹
Lagzdiņi	Lauku pupas_virszeme	I	29.07.2025	10,29	18,96	1,95
		II	29.07.2025	16,01	9,46	1,51
		III	29.07.2025	18,35	13,17	2,42
	Lauku pupas_saknes	I	29.07.2025	8,11	15,55	1,26
		II	29.07.2025	8,71	14,90	1,30
		III	29.07.2025	7,97	15,72	1,25
Priednieki	Sarkanais āboliņš ar stiebrzālēm_virszeme	I	26.06.2025	62,50	15,28	9,55
		II	26.06.2025	66,96	15,74	10,54
		III	26.06.2025	60,17	16,11	9,69
		I	29.09.2025	21,19	21,90	4,64
		II	29.09.2025	18,14	35,17	6,38
		III	29.09.2025	35,39	27,64	9,78
	Sarkanais āboliņš ar stiebrzālēm_virszeme_kopā	I	*	83,96	*	14,19
		II	*	85,10	*	16,92
		III	*	95,56	*	19,47
	Sarkanais āboliņš ar stiebrzālēm_saknes	I	29.09.2025	69,89	31,06	21,71
		II	29.09.2025	71,12	34,19	24,32
		III	29.09.2025	53,84	27,74	14,94

Tab. 30. Zaļmasas un sausnas ražas, t ha⁻¹ kūdras augsnēs SPC BIO, 2025. gads

Variants	Suga	Vieta	Datums	Zaļmasas raža, t ha ⁻¹	Sausna, %	Sausnas raža, t ha ⁻¹
Zālājs	Pļavas auzene Patra_virszeme	I	22.07.2025	19,07	20,68	3,94
		II	22.07.2025	26,74	14,96	4,00
		III	22.07.2025	36,54	19,11	6,98
		I	27.08.2025	20,10	25,91	5,21
		II	27.08.2025	18,24	25,16	4,49
		III	27.08.2025	18,05	25,32	4,57
		I	7.10.2025	7,70	25,52	1,96
		II	7.10.2025	9,08	25,65	2,33
		III	7.10.2025	10,73	25,59	2,75
	Pļavas auzene Patra_virszeme_kopā	I	*	46,87	*	11,12
		II	*	54,06	*	10,92
		III	*	65,31	*	14,30
	Pļavas auzene Patra_Saknes	I	7.10.2025	53,59	16,81	9,01
		II	7.10.2025	30,35	22,71	6,89
		III	7.10.2025	52,74	20,61	10,87
Arts	Griķi Aiva_virszeme	IV	22.07.2025	54,00	10,05	5,43
		V	22.07.2025	36,48	12,23	4,46
		VI	22.07.2025	29,11	13,01	3,79
	Griķi Aiva_saknes	IV	22.07.2025	43,56	20,47	8,92
		V	22.07.2025	44,51	22,25	9,90
		VI	22.07.2025	45,06	22,64	10,20
Diskots	Griķi Aiva_virszeme	VII	22.07.2025	31,13	11,67	3,63
		VIII	22.07.2025	37,12	11,04	4,10
		IX	22.07.2025	52,02	10,36	5,39
	Griķi Aiva_saknes	VII	22.07.2025	41,68	22,48	9,37
		VIII	22.07.2025	29,70	19,76	5,87
		IX	22.07.2025	32,50	20,14	6,55

Paraugu sausnas kvalitātes analīzēs tika noteikts kopējais C un N, kā arī C/N attiecība. Analīzes veiktas AREI SPC Graudu tehnoloģijas un agroķīmijas laboratorijā. Dati apkopoti Tab. 31 un 32.

Tab. 31. Sausnas kvalitātes rādītāji paraugiem palienes augsnēs, 2025. gads

Parauga ņemšanas vieta	Suga	Vieta	Datums	Kopējais Slāpeklis, % (Elementanalīze, modificēta Dimā (Sausās sadedzināšanas) metode)	Kopējais Ogleklis, % (Elementanalīze, modificēta Dimā (Sausās sadedzināšanas) metode)	C/N attiecība (aprēķins)
Lagzdiņi	Lauku pupas_virszeme	I	29.07.2025	3.21	38.03	12

Aramzemes un ilggadīgo zālāju apsaimniekošanas radīto siltumnīcefekta gāzu (SEG) emisiju un oglekļa dioksīda (CO₂) piesaistes uzskaites sistēmas pilnveidošana un atbilstošu metodisko risinājumu izstrādāšana

Parauga ņemšanas vieta	Suga	Vieta	Datums	Kopējais Slāpeklis, % (Elementanalīze, modificēta Dimā (Sausās sadedzināšanas) metode)	Kopējais Ogleklis, % (Elementanalīze, modificēta Dimā (Sausās sadedzināšanas) metode)	C/N attiecība (aprēķins)
	Lauku pupas_saknes	II	29.07.2025	2.41	37.07	15
		III	29.07.2025	3.16	41.1	13
		I	29.07.2025	1.53	24.72	17
		II	29.07.2025	1.61	38.34	24
		III	29.07.2025	1.91	39.51	21
Priednieki	Sarkanais āboliņš ar stiebrzālēm_virszeme	I	26.06.2025	2.2	40.14	18
		II	26.06.2025	2.38	42.08	18
		III	26.06.2025	2.3	41.26	18
		I	29.09.2025	3.06	41.13	13
		II	29.09.2025	1.95	43.09	22
		III	29.09.2025	2.73	44.38	16
	Sarkanais āboliņš ar stiebrzālēm_saknes	I	29.09.2025	1.21	21.93	18
		II	29.09.2025	0.65	14.96	23
		III	29.09.2025	1.95	35.68	18

Tab. 32. Sausnas kvalitātes rādītāji paraugiem kūdras augsnē, 2025. gads

Variants	Suga	Vieta	Datums	Kopējais Slāpeklis, % (Elementanalīze, modificēta Dimā (Sausās sadedzināšanas) metode)	Kopējais Ogleklis, % (Elementanalīze, modificēta Dimā (Sausās sadedzināšanas) metode)	C/N attiecība (aprēķins)
Zālājs	Pļavas auzene Patra_virszeme	I	22.07.2025	2,78	43,54	16
		II	22.07.2025	3,56	45,12	13
		III	22.07.2025	2,86	46,67	16
		I	27.08.2025	1,81	40,68	23
		II	27.08.2025	2,67	40,8	15
		III	27.08.2025	2,58	42,22	16
		I	7.10.2025	2,59	39,28	15
		II	7.10.2025	3,56	38,58	11
		III	7.10.2025	3,76	39,78	11
	Pļavas auzene Patra_Saknes	I	7.10.2025	2,22	39,3	18
		II	7.10.2025	2,04	41,88	21
		III	7.10.2025	2,01	44,73	22
Arts	Griķi Aiva_virszeme	IV	22.07.2025	2,98	35,35	12
		V	22.07.2025	2,21	36,6	17
		VI	22.07.2025	2,43	34,08	14
	Griķi Aiva_saknes	IV	22.07.2025	2,1	42,56	20

Variants	Suga	Vieta	Datums	Kopējais Slāpeklis, % (Elementanalīze, modificēta Dimā (Sausās sadedzināšanas) metode)	Kopējais Ogleklis, % (Elementanalīze, modificēta Dimā (Sausās sadedzināšanas) metode)	C/N attiecība (aprēķins)
Diskots		V	22.07.2025	1,79	36,5	20
		VI	22.07.2025	1,84	37,05	20
		VII	22.07.2025	2,82	38,03	14
	Griķi Aiva_virszeme	VIII	22.07.2025	3,28	36,17	11
		IX	22.07.2025	2,64	35,67	13
	Griķi Aiva_saknes	VII	22.07.2025	1,71	36,78	22
		VIII	22.07.2025	2,05	33,9	17
		IX	22.07.2025	1,78	36,52	20

Saimniecība Lagzdiņi lauku pupu biomasa noņemta 79-80 attīstības fāzē, kad pākstis ir zaļas un pupas piepilda pāksti. Paraugs ņemts ar visām pākstīm. Apakšējās lapas augiem vēl nav nobirušas (Tab. 33 un 34).

Tab. 33. Biomasas dati palieņu augšņu paraugiem

Parauga ņemšanas vieta	Suga	Vieta	Datums	Lauciņa izmērs, m ²	Iegūtā biomasa, g
Lagzdiņi	Lauku pupas_virszeme	I	29.07.2025	0,5	514,5
		II	29.07.2025	0,5	800,4
		III	29.07.2025	0,5	917,5
	Lauku pupas_saknes	I	29.07.2025	0,5	405,7
		II	29.07.2025	0,5	435,5
		III	29.07.2025	0,5	398,7
Priednieki	Sarkanais āboliņš ar stiebrzālēm_virszeme	I	26.06.2025	0,24	1500,0
		II	26.06.2025	0,24	1607,4
		III	26.06.2025	0,24	1444,2
		I	29.09.2025	0,125	2264,9
		II	29.09.2025	0,125	226,8
		III	29.09.2025	0,125	442,4
	Sarkanais āboliņš ar stiebrzālēm_saknes	I	29.09.2025	0,125	873,6
		II	29.09.2025	0,125	889,02
		III	29.09.2025	0,125	673,0

Tab. 34. Biomasas dati kūdras augsnēs paraugiem

Variants	Suga	Vieta	Datums	Lauciņa izmērs, m ²	Iegūtā biomasa, g
Zālājs	Pļavas auzene Patra_virszeme	I	22.07.2025	0,125	238,4
		II	22.07.2025	0,125	334,3
		III	22.07.2025	0,125	456,7

Variants	Suga	Vieta	Datums	Lauciņa izmērs, m ²	Iegūtā biomasa, g
		I	27.08.2025	0,125	251,3
		II	27.08.2025	0,125	228,0
		III	27.08.2025	0,125	225,6
		I	7.10.2025	0,125	96,2
		II	7.10.2025	0,125	113,5
		III	7.10.2025	0,125	134,1
	Pļavas auzene Patra_Saknes	I	7.10.2025	0,125	669,9
		II	7.10.2025	0,125	379,4
		III	7.10.2025	0,125	659,3
Arts	Griķi Aiva_virszeme	IV	22.07.2025	0,125	675,0
		V	22.07.2025	0,125	456,0
		VI	22.07.2025	0,125	363,9
	Griķi Aiva_saknes	IV	22.07.2025	0,125	544,5
		V	22.07.2025	0,125	556,4
		VI	22.07.2025	0,125	563,3
Diskots	Griķi Aiva_virszeme	VII	22.07.2025	0,125	389,1
		VIII	22.07.2025	0,125	464
		IX	22.07.2025	0,125	650,2
	Griķi Aiva_saknes	VII	22.07.2025	0,125	521,0
		VIII	22.07.2025	0,125	371,2
		IX	22.07.2025	0,125	406,3

Rezultāti

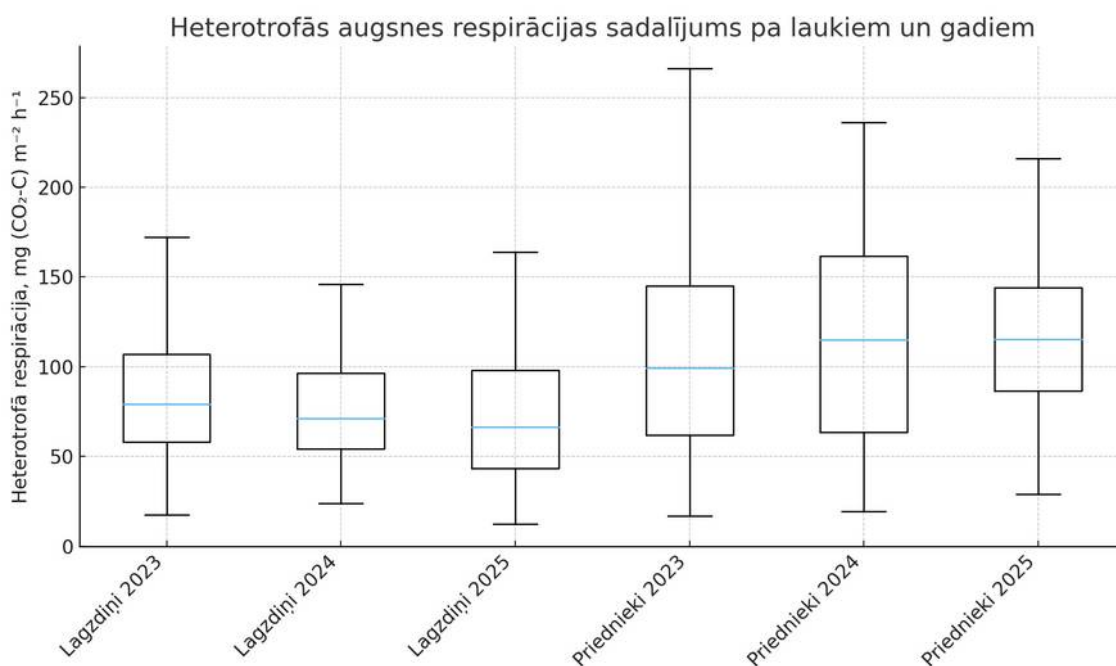
Ziņojumā analizēti heterotrofās augsnes elpošanas mērījumi divos laukos organiskās aluviālās augsnes (saimniecības “Lagzdiņi” un “Priednieki”) trīs veģetācijas sezonu (2023.-2025. gadi) laikā. Datu kopa satur 464 mērījumus, kas veikti ar statiskajām kamerām un EGM-5 iekārtu. Analīzē kā potenciālos skaidrojoši mainīgi izmantoti Tair (gaisa temperatūra zemes virsmas augstumā) un Msoil (relatīvais mitruma saturs augsnes virskārtā, 0-10 cm).

Pēc rindu ar trūkstošiem galvenajiem parametriem izslēgšanas saglabājās 464 mērījumi. Heterotrofās elpošanas intensitāte vienmēr bija pozitīva un ļoti mainīga, svārstoties no 12,4 līdz 532,6 mg (CO₂-C) m⁻² h⁻¹; vidējā vērtība bija 101,1 mg (CO₂-C) m⁻² h⁻¹, bet standartnovirze – 66,3 mg (CO₂-C) m⁻² h⁻¹. Pēc kārtas 25., 50. un 75. percentile bija 58,9; 85,8 un 125,8 mg (CO₂-C) m⁻² h⁻¹, kas liecina par pozitīvi asimetrisku sadalījumu ar izteiktiem lielu plūsmu “astēm”.

Apkopojot datus pa laukiem, iegūtas būtiskas atšķirības. Lagzdiņos vidējā heterotrofā elpošana bija 81,8 ± 51,8 mg (CO₂-C) m⁻² h⁻¹ (n = 232), savukārt Priedniekos – 120,4 ± 73,3 mg (CO₂-C) m⁻² h⁻¹ (n = 232). Divfaktoru dispersijas analīze ar gadu (“Year”)

un lauku ("Apstrādes metode") kā fiksētajiem faktoriem parādīja, ka laukam ir ļoti nozīmīga ietekme ($F = 42,9$; $p < 0,0001$), bet gada ietekme kopējā datu kopā nav statistiski nozīmīga ($F = 1,25$; $p = 0,287$). Tādējādi atšķirības starp laukiem ir izteiktākas nekā starp gadiem.

Vidējie plūsmas lielumi visai datu kopai pa gadiem bija: 2023. gadā – 106,9 mg (CO₂-C) m⁻² h⁻¹ (n = 180), 2024. gadā – 97,1 mg (CO₂-C) m⁻² h⁻¹ (n = 140) un 2025. gadā – 97,6 mg (CO₂-C) m⁻² h⁻¹ (n = 144). Vienfaktora dispersijas analīze ar gadu kā faktoru būtiskas atšķirības neatklāja ($F = 1,15$; $p = 0,32$). Analizējot laukus atsevišķi, Lagzdiņos vidējā plūsma samazinājās no 93,1 mg (CO₂-C) m⁻² h⁻¹ 2023. gadā līdz 77,0 mg (CO₂-C) m⁻² h⁻¹ 2024. gadā un 72,3 mg (CO₂-C) m⁻² h⁻¹ 2025. gadā; šīs izmaiņas ir statistiski nozīmīgas ($F = 3,75$; $p = 0,025$). Priedniekos plūsmas saglabājās augstas un praktiski nemainīgas – 120,7; 117,3 un 122,9 mg (CO₂-C) m⁻² h⁻¹ attiecīgi 2023., 2024. un 2025. gadā ($F = 0,10$; $p = 0,90$). Heterotrofās elpošanas sadalījums pa laukiem un gadiem attēlots Att. 31, kur skaidri redzami augstāki mediānas un augšējā kvartiles līmeņi Priedniekos un mērens samazinājums Lagzdiņos.

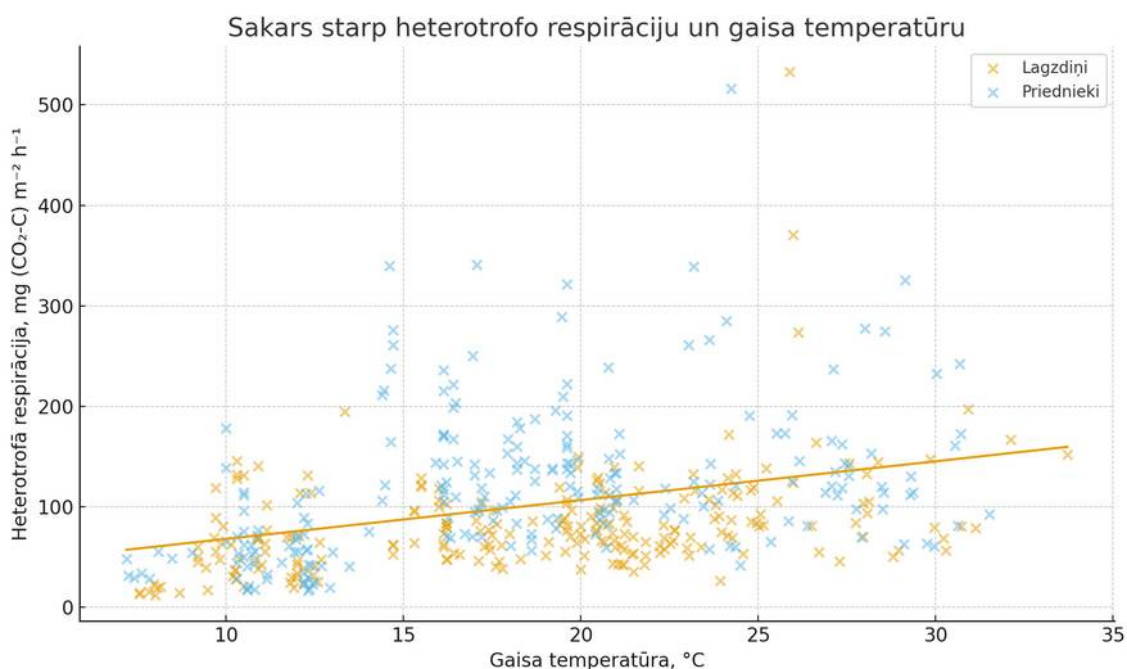


Att. 31. Heterotrofās elpošanas sadalījums pa laukiem un gadiem.

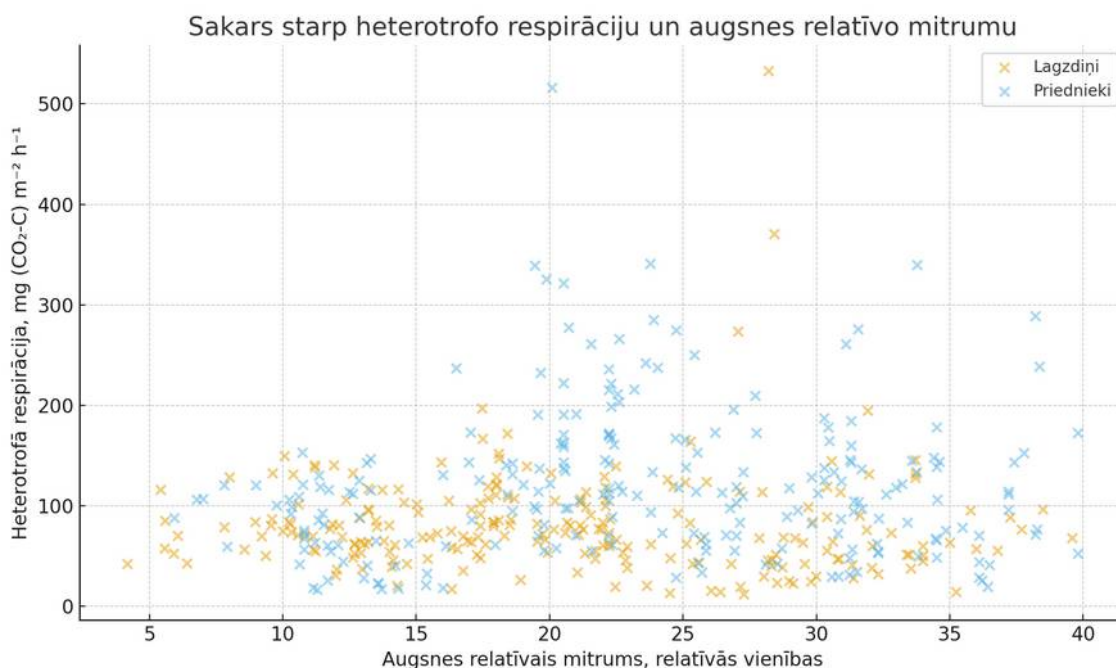
Eksperiments ļauj salīdzināt arī dažādu kultūru ietekmi. Priedniekos 2023. gadā audzēja ziemas kviešus ("Ziemas kvieši"), bet 2024. un 2025. gadā – āboliņu. Ierobežojot datus ar šo lauku un gadiem, iegūst vidējo heterotrofo elpošanu 120,7 mg (CO₂-C) m⁻² h⁻¹ ziemas kviešiem (n = 90) un 117,3 mg (CO₂-C) m⁻² h⁻¹ āboliņam (n = 70). Velča t-tests parādīja, ka šī atšķirība nav statistiski nozīmīga ($t = 0,29$; $p = 0,776$). Līdz ar to āboliņa iekļaušana otrajā veģetācijas sezonā Priedniekos šajā datu kopā neizraisa statistiski ticamu CO₂ emisijas samazinājumu, salīdzinot ar ziemas kviešiem, kas audzēti pirms tam. Dominējošais faktors ir lauka apstākļi (hidroloģija, kūdras dziļums, ilgtermiņa

apsaimniekošana), nevis konkrētā kultūra. Lai arī precīzāku datu iegūšanai, lai raksturotu zemes izmantošanas maiņas ietekmi nepieciešams lielāks novērojumu skaits.

Lai kvantitatīvi raksturotu klimatisko ietekmi uz elpošanu, izvērtēja sakarības starp heterotrofo elpošanu, gaisa temperatūru un augsnes relatīvo mitrumu. Visā datu kopā Pīrsona korelācijas koeficients starp plūsmu un Tair bija 0,35, kas norāda uz mērenu pozitīvu sakarību, savukārt korelācija starp plūsmu un Msoil bija tikai 0,09. Lagzdiņos $r(F, T_{air}) = 0,37$ un $r(F, M_{soil}) = -0,02$; Priedniekos $r(F, T_{air}) = 0,38$ un $r(F, M_{soil}) = 0,08$. Izklīdes diagrammas ar regresijas līniju Tair gadījumā un bez tās Msoil gadījumā parādītas attiecīgi Att. 2 un 3. Att. 2 redzama skaidra vidējās plūsmas pieauguma tendence, palielinoties gaisa temperatūrai, savukārt Att. 3 augsnes relatīvā mitruma ietekme novērotajā diapazonā ir daudz vājāka.



Att. 32. Sakarība starp heterotrofo elpošanu un gaisa temperatūru.



Att. 33. Sakarība starp heterotrofo elpošanu un relatīvo mitruma saturu augsnē.

Temperatūras ietekmei uz heterotrofo elpošanu vispirms piemēroja lineāru regresijas modeli:

$$F = a + b \cdot T_{air} \quad (6)$$

kur F ir heterotrofā elpošana ($\text{mg (CO}_2\text{-C) m}^{-2} \text{ h}^{-1}$), bet T_{air} – gaisa temperatūra ($^{\circ}\text{C}$). Novērtētie koeficienti visai datu kopai bija $a=29,54$ un $b=3,86$, un iegūtais determinācijas koeficients $R^2=0,124$. Tādējādi vienādojumu var uzrakstīt:

$$F = 29.54 + 3.86 \cdot T_{air} \quad (7)$$

Tas nozīmē, ka gaisa temperatūras palielināšanās par 10°C vidēji saistīta ar heterotrofās elpošanas pieaugumu apmēram par $38,6 \text{ mg (CO}_2\text{-C) m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. Tomēr relatīvi zemais R^2 norāda, ka tikai aptuveni 12% plūsmu variācijas izskaidro gaisa temperatūra, pārējo nosaka telpiskā heterogenitāte un neuzmērīti faktori (piemēram, pieejamā substrāta daudzums, mikroreljefs, gruntsūdens līmenis).

Ņemot vērā bioloģisko procesu bieži eksponenciālo temperatūras atkarību, aprēķiniem pielāgots arī eksponenciāls modelis:

$$\ln F = \alpha + \beta \cdot T_{air} \quad (8)$$

Novērtētie parametri bija $\alpha=3,53$ un $\beta=0,0483$; $R^2=0,214$. Pārrakstot iegūst:

$$F = 34.2 \cdot \exp(0.0483 \cdot T_{air}) \quad (9)$$

Atbilstošais temperatūras jutīgums izteikts kā Q_{10} vērtība:

$$Q_{10} = \exp(10 \cdot \beta) = \exp(0,483) \approx 1,62, \quad (10)$$

kas nozīmē, ka, palielinoties temperatūrai par 10 °C, heterotrofā elpošana pieaug aptuveni par 62%.

Lai izvērtētu temperatūras un augsnes mitruma kopējo ietekmi, izveidots daudzfaktoru lineārs modelis:

$$F = c + d \cdot T_{air} + e \cdot M_{soil} . \quad (11)$$

Novērtētie koeficienti bija $c = -35,47$, $d = 4,93$ un $e = 2,05$; determinācijas koeficients $R^2 = 0,180$. Tādējādi modelis ir:

$$F = -35.47 + 4.93 \cdot T_{air} + 2.05 \cdot M_{soil} \quad (12)$$

Salīdzinot ar vienfaktora modeli (6), iekļaujot augsnes mitrumu, izskaidrotā variācijas daļa pieaug no 12,4 % līdz 18,0 %, bet vidējā kvadrātiskā kļūda nedaudz samazinās. Tādējādi augsnes mitruma ietekme ir statistiski ticama, tomēr salīdzinoši vāja; dominējošais faktors ir gaisa temperatūra. Paplašināts kvadrātiskais modelis ar kvadrātiem un mijiedarbības locekli $T_{air} M_{soil}$ palielināja R^2 līdz ~0,22, taču būtiski palielināja kolinearitāti, tāpēc praktiskos aprēķinos pietiek ar vienādojumu (7).

Gadskārtējās heterotrofās CO₂-C plūsmas novērtēšanai kombinēti temperatūras regresijas vienādojumi ar raksturīgiem mēneša vidējiem gaisa temperatūras rādītājiem centrālajai Latvijai. Katram laukam pielāgoja lineāru modeli:

$$F = a_{Lag} + b_{Lag} \cdot T_{air} , \quad F = a_{Pri} + b_{Pri} \cdot T_{air} , \quad (13)$$

kas deva šādus vienādojumus:

$$F_{Lagzdiņi} = 22.30 + 3.19 \cdot T_{air} \quad (14)$$

$$F_{Priednieki} = 34.62 + 4.65 \cdot T_{air} \quad (15)$$

Katram mēnesim m ar vidējo temperatūru T_m prognozēja plūsmu F_m pēc vienādojumiem (14) un (15). Negatīvas prognozes, ja tādas rastos, tika aizstātas ar nulli, pieņemot, ka heterotrofā elpošana nevar būt negatīva. Gadskārtējo vidējo plūsmu $\bar{F}$ (mg (CO₂-C) m⁻² h⁻¹) aprēķināja kā 12 mēnešu vidējo vērtību, ņemot vērā stundas katrā mēnesī, un pārrēķināja gadskārtējā oglekļa zudumā no augsnes:

$$C_{gadā} = \bar{F} \cdot 10^{-9} \frac{tC}{mgC} \cdot 10^4 \frac{h^2}{ha} \cdot 8760 \frac{h}{gadā} . \quad (16)$$

No šīs attiecības izriet vienkāršots sakars:

$$C_{gadā} = 0.0876 \cdot \bar{F} \quad (17)$$

Izmantojot raksturīgas klimata normas vienādojumos (14, 15 un 16), iegūtie gadskārtējie heterotrofās CO₂-C zudumi ir aptuveni 4 t C ha⁻¹ gadā⁻¹ Lagzdiņos un 6 t C ha⁻¹ gadā⁻¹ Priedniekos. Šie rādītāji ir pirmā tuvinājuma novērtējumi, bet skaidri parāda, ka abi lauki funkcionē kā lieli augsnes CO₂ emisiju avoti.

Lai novērtētu oglekļa apriti, šie zudumi salīdzināti ar oglekļa ienesi ar augu atliekām. Literatūrā minēts, ka graudaugu, rapša un graudzāļu – pākšaugu kultūru sakņu, rugāju

un citu augu atliekas lauka apstākļos bieži nodrošina aptuveni 2 t C ha⁻¹ gadā⁻¹, bet zālāju un āboliņa zelmenis – 3-5 t C ha⁻¹ gadā⁻¹. Pieņemot 2,0 t C ha⁻¹ gadā⁻¹ kā tipisku vērtību graudaugiem, rapsim un pupām un 3,5 t C ha⁻¹ gadā⁻¹ āboliņa zelmenim, iegūst, ka Lagzdiņu augsne neto oglekļa balance ir ap -2 t C ha⁻¹ gadā⁻¹, bet Priedniekos – -3 līdz -4 t C ha⁻¹ gadā⁻¹ pat ar āboliņa iekļaušanu augu maiņā. Tas saskan ar secinājumu, ka meliorētās organiskās aluviālās augsnes intensīvi apsaimniekota aramzeme ir būtisks CO₂ emisiju avots.

Siltumnīcefekta gāzu inventarizācijas vajadzībām izstrādātas arī ieteicamās N₂O emisiju faktoru vērtības. IPCC 2013 Wetlands Supplement nosaka noklusēto pirmā līmeņa tiešās emisijas faktoru drenētām organiskām augsnēm aramzemē mērenajā un boreālajā joslā:

$$EF_{dir, crop} = 13 \text{ kg N}_2\text{O} - \text{N ha}^{-1} \text{ gadā}^{-1}, \quad (18)$$

bet zālājiem uz drenētām organiskām augsnēm:

$$EF_{dir, crop} = 9,5 \text{ kg N}_2\text{O} - \text{N ha}^{-1} \text{ gadā}^{-1}, \quad (19)$$

Tiešās N₂O emisijas no augsnes uz vienu hektāru var aprēķināt kā

$$E_{N_2O-N, dir} = EF_{dir}, \quad (20)$$

un pārrēķināt N₂O masā ar attiecību

$$E_{N_2O, dir} = E_{N_2O-N, dir} \cdot \frac{44}{28} \quad (21)$$

bet CO₂ ekvivalentos:

$$E_{CO_2-eq, dir} = E_{N_2O, dir} \cdot \frac{GWP_{N_2O}}{1000} \quad (22)$$

$$\text{kur} \\ GWP_{N_2O} = 265 \text{ (AR5 vērtība)}.$$

Izmantojot organisko augšņu emisiju faktoru, aramzemes ar aluviālajām augsnēm tādējādi iegūst aptuveni 20,4 kg N₂O ha⁻¹ gadā⁻¹ jeb 5,4 t CO₂-ekv. ha⁻¹ gadā⁻¹ tiešās N₂O emisijas, bet zālājos ar aluviālo augsni – 14,9 kg N₂O ha⁻¹ gadā⁻¹ jeb 4,0 t CO₂-ekv. ha⁻¹ gadā⁻¹.

Netiešās N₂O emisijas no slāpekļa izskalošanās un noteces aprēķina saskaņā ar IPCC 2006 gada vadlīnijām (Eggleston, Buendia, Miwa, Ngara, & Kiyoto, 2006). Noklusētajām pirmā līmeņa vērtībām netiešās N₂O–N emisijas no izskalošā slāpekļa ir

$$E_{N_2O-N, leach} = N_{input} \cdot \text{FracLEACH}(H) \cdot EF_5, \quad (23)$$

kur N_{input} ir kopējais slāpekļa ienese (kg N ha⁻¹ gadā⁻¹), FracLEACH(H) – daļa, kas izskalojas un nonāk ūdeņos (noklusējuma vērtība 0,3), bet EF₅ – emisijas faktors N₂O–N no izskalošā N (noklusējuma vērtība 0,0075 kg N₂O–N uz kg izskalošā N).

Piemēram, ja kopējais slāpekļa ievads organiskā alūvijā aramzemē ir 100 kg N ha⁻¹ gad⁻¹, tad

$$E_{N_{2O}-N, leach} = 100 \cdot 0.3 \cdot 0.0075 = 0.225 \text{ kg } N_2O - N \text{ ha}^{-1} \text{ gad}^{-1} \quad (24)$$

kas atbilst aptuveni 0,35 kg N₂O ha⁻¹ gadā⁻¹ jeb 0,10 t CO₂-ekv. ha⁻¹ gadā⁻¹. Līdz ar to netiešās N₂O emisijas no izskalošanās parasti ir par kārtu mazākas nekā tiešās emisijas no meliorētām organiskām augsnēm.

Kopumā veiktie mērījumi parāda, ka organiskās aluviālās augsnēs abos laukos ir būtiski CO₂ un N₂O avoti. Nozīmīgākās atšķirības vērojamas starp laukiem, nevis starp gadiem, un kultūras maiņa no ziemas kviešiem uz āboliņu novērošanas periodā būtiski nemazina heterotrofo elpošanu. Temperatūra ir galvenais izskaidrojošais faktors, kamēr augsnes mitruma tiešā ietekme šajā datu kopā ir salīdzinoši vāja. Kombinācijā ar literatūrā aprakstītajiem oglekļa pieplūdes rādītājiem no augu atliekām tas nozīmē ievērojamus neto augsnes organiskā oglekļa zudumus. ZIZIMM un lauksaimniecības sektora SEG inventarizācijā organiskās aluviālās augsnēs būtu jāidentificē kā augsta riska teritorijas, izmantojot IPCC “Wetlands Supplement” tiešās N₂O emisiju faktoru vērtības un IPCC 2006. gada metodiku netiešajām emisijām.

Pētījuma rezultāti apliecina, ka aluviālās augsnes jāietver SEG inventarizācijas ziņojuma kā emisiju avots, pielietojot pētījumā izstrādātos emisiju faktorus zālājiem un aramzemēm, kā arī turpinot pilnveidot emisiju prognozēšanas metodes.

Izmēģinājumu objektu ierīkošana un empīrisku datu ieguve zemes izmantošanas un augsnes apstrādes metodes ietekmes uz CO₂, CH₄ un N₂O emisijām no organiskām augsnēm raksturošanai

Ievads

Organiskās augsnes, īpaši meliorētās kūdras augsnes, ir viens no nozīmīgākajiem antropogēno SEG emisiju avotiem lauksaimniecībā un ZIZIMM sektorā globālā mērogā. Tiek lēsts, ka emisijas no meliorētām organiskām augsnēm lauksaimniecības zemēs sasniedz gandrīz 1 Gt CO₂ ekv. gadā, no kā aptuveni 0,78 Gt ir tieši CO₂ emisijas, kas veido vairāk nekā ceturto daļu no neto CO₂ emisijām AFOLU sektorā (Conchedda & Tubiello, 2020; Tubiello & Conchedda, 2020). Šīs emisijas koncentrējas mērenās un boreālās klimata joslas reģionos, kur koncentrējusies lielākā daļa organisko augšņu un ir labvēlīgi apstākļi to intensīvai izmantošanu lauksaimniecībā, tostarp boreālajā, hemiboreālajā un mērenā klimata joslā (Hiraishi u.c., 2013; Kasimir-Klemedtsson u.c., 1997). Emisiju apjoms ir īpaši liels aramzemēs un zālajos ar organiskām augsnēm ar dziļi meliorētām augsnēm. Mehāniskā apstrāde paātrina kūdras mineralizāciju un oglekļa zudumu no augsnes.

IPCC 2006. gada vadlīnijas un to 2013. gada papildinājums par mitrziem (Eggleston, Buendia, Miwa, Ngara, & Tanade, 2006; Hiraishi u.c., 2013) piedāvā pirmā līmeņa noklusētos jeb Tier 1 emisiju faktoros meliorētām organiskām augsnēm dažādās zemes izmantošanas kategorijās, tostarp aramzemēs un zālajos mērenajā un boreālajā zonā. Šie noklusējuma emisiju faktori ir relatīvi lieli, atbilstoši vairākiem desmitiem tonnu CO₂ ha⁻¹ gadā, tomēr tie ir balstīti uz ierobežotu novērojumu kopu, kas apvieno dažādas klimata, augsnes un apsaimniekošanas kombinācijas, tāpēc raksturojas ar ļoti lielu nenoteiktību (Kasimir-Klemedtsson u.c., 1997; Tiemeyer u.c., 2020). Vairāki pētījumi rāda, ka Tier 1 pieeja bieži pārvērtē emisijas tajās valstīs, kur organisko augšņu apsaimniekošana ir mazāk intensīva vai kur panākta daļēja emisiju samazināšana, izmantojot uzlabotas apsaimniekošanas prakses, kā arī mērenās klimata joslas ziemeļu daļā (Paul & Alewell, 2018; Purviņa u.c., 2024). Tādēļ valstīm ar lielu organisko augšņu īpatsvaru ir kritiski svarīgi attīstīt valsts līmeņa (Tier 2/3) emisiju faktoros vai modeļus, kas balstīti uz ilgtermiņa novērojumiem reprezentatīvās saimniecībās (Hiraishi u.c., 2013; Tiemeyer u.c., 2020).

Latvijā organisko augšņu emisijas ir viens no dominējošajiem SEG avotiem. Nesen veikti divi saistīti pētījumi, kuros kombinēti digitālie augsnes kartējumi, Meža statistiskās inventarizācijas (MSI) un citi datu avoti, parādīja, ka organiskajās augsnēs atrodas ievērojama daļa aramzemju un zālāju, bet daļa agrāk kartēto organisko augšņu jau ir zaudējušas organisko horizontu pastiprinātas mineralizācijas dēļ, vienlaikus organisko augšņu platība lauksaimniecībā izmantojamās zemēs vēl arvien ir vismaz 156 tūkst. ha (Ivanovs u.c., 2024; Petaja u.c., 2018). Jaunāki novērtējumi liecina, ka meliorētās organiskās augsnes Latvijā 2020.-2022. gadā radīja aptuveni 5,4-7,0 milj. t CO₂ ekv. gadā, kas ir aptuveni divas trešdaļas no valsts kopējām emisijām ārpus ZIZIMM sektora (LSFRI Silava, 2023). Nacionālajos scenāriju aprēķinos tiek izmantoti gan IPCC, gan no reģionāliem pētījumiem atvasināti emisiju faktori, un, piemēram, projekciju ziņojumā par ZIZIMM emisijām Latvijā pieņemts, ka tipisks CO₂ emisiju faktors aramzemēm organiskajās augsnēs ir ap 22,4 t CO₂ ha⁻¹ gadā, bet zemes izmantošanas maiņa no aramzemes uz zālāju var samazināt emisijas par aptuveni 6,6 t CO₂ ha⁻¹ gadā (LSFRI Silava, 2015). Saskaņā ar jaunākajiem pētījumiem potenciālais emisiju samazinājums, transformējot aramzemi ar organisko augsni par zālāju, ir būtiski mazāks – 3,3-3,7 t CO₂ ekv. ha⁻¹ gadā, pie kam, ņemot vērā nenoteiktību, emisiju samazinājums nav statistiski pierādāms (Bārdule u.c., 2025).

Hemiboreālajā zonā, kur atrodas arī Latvija, pēdējos gados uzkrājies būtisks novērojumu apjoms par heterotrofās elpošanas intensitāti meliorētās organiskās augsnēs. Vairāki pētījumi piedāvā reģionāli piemērojamos emisiju faktoros aramzemēm un zālājiem uz organiskajām augsnēm: Latvijā un Baltijas reģionā iegūtie provizorisks heterotrofās elpošanas emisiju faktori ir aptuveni 7,5 t C ha⁻¹ gadā (≈27,5 t CO₂ ha⁻¹ gadā) aramzemēm un 6,2 t C ha⁻¹ gadā (≈22,7 t CO₂ ha⁻¹ gadā) zālājiem, ar plašām 95% ticamības intervālu robežām (LSFRI Silava, 2021). Detalizēts hemiboreālo organisko augšņu pētījums par ikgadējiem neto CO₂ emisijām apstiprina šo tendenci: starp vairākām saimniecībām ar meliorētām organiskajām augsnēm aramzemēs vidējais neto CO₂ emisijas bija ap 4,8 ± 0,8 t C ha⁻¹ gadā, bet zālājos – ap 3,8 ± 0,7 t C ha⁻¹ gadā (aptuveni 17,6 un 13,9 t CO₂ ha⁻¹ gadā), kas norāda uz aptuveni piektdaļas emisiju samazinājumu, pārejot uz zālāju, lai gan pārlicinoša statistiskā nozīmība nav konstatēta visām vietām (Bārdule u.c., 2025).

Latvijā iegūtie rezultāti zālājos ar organiskajām augsnēm saskan ar plašāku Eiropas pieredzi, ka lokāli mērītās CO₂ emisijas bieži ir zemākas par IPCC Tier 1 noklusējuma emisiju faktoriem, īpaši, ja ūdens līmenis ir relatīvi augsts un mēslojuma ienese nepārsniedz vidējos rādītājus (Jauhiainen u.c., 2023; Paul & Alewell, 2018; Purviņa u.c., 2024). Divus gadus ilgs pētījums meliorētās fenu augsnēs zālājos Latvijā parādīja, ka faktiskās augsnes-atmosfēras CO₂, CH₄ un N₂O plūsmas kopumā ir mazākas par IPCC noklusējuma faktoriem, un ka būtiska nozīme emisiju variācijā ir organiskām vierlām bagātās augsnes kārtas biezumam un gruntsūdens līmenim (Purviņa u.c., 2024). Līdzīgas tendences konstatētas arī citur Eiropā, piemēram, Šveicē un Vācijā, kur rūpīgi monitorētas meliorētās ganības uz organiskajām augsnēm uzrāda heterotrofās elpošanas

emisijas 3,6-4,1 t C ha⁻¹ gadā, kas ir zem IPCC noklusējuma vērtībām, bet saskan ar reģionāliem Tier 2 novērtējumiem (Paul & Alewell, 2018; Tiemeyer u.c., 2020).

Zemes izmantošanas maiņu no aramzemes uz zālāju organiskajās augsnēs uzskata par vienu no perspektīvākajiem klimata politikas instrumentiem emisiju samazināšanai mērenajā un boreālajā klimata zonā. Sistemātiskais pārskats par aramzemju pārveidošanu par zālājiem ar oglekli bagātās augsnēm liecina, ka vidēji CO₂ emisiju faktors samazinās, taču rezultāti ir ļoti variabli, atkarībā no meliorācijas dziļuma, laika kopš pārveidošanas, zālāja veida un apsaimniekošanas (Holzknecht u.c., 2025). Daļā pētījumu konstatēts relatīvi straujš emisiju faktoru samazinājums (par 20-40%) pirmajās desmitgadēs pēc zālāja izveides, citos – tikai niecīgas vai statistiski nenozīmīgas izmaiņas, īpaši dziļi meliorētās un iepriekš intensīvi apsaimniekotās organiskajās augsnēs (Bārdule u.c., 2025; Holzknecht u.c., 2025; Kasimir-Klemedtsson u.c., 1997). Latvijā veikti nacionāla līmeņa modelējumi, izmantojot ZIZIMM projekciju scenārijus, liecina, ka, pārvēršot organisko augšņu aramzemes zālājos, var teorētiski samazināt CO₂ emisijas apmēram par 6-7 t CO₂ ha⁻¹ gadā, taču aprēķinos izmantotajiem emisiju faktoriem ir augsta nenoteiktība (LSFRI Silava, 2015, 2023).

SEG bilanci organiskajās augsnēs nosaka ne tikai heterotrofās elpošanas intensitāte, bet arī oglekļa ienese no virszemes un sakņu biomasas. Pētījumi par augsnes organiskā oglekļa izmaiņām pēc aramzemju atstāšanas un pārveidošanas par ganībām vai zālājiem rāda, ka ilgtermiņā (vairāku desmitgažu laikā) var notikt būtiska SOC krātuves palielināšanās, īpaši ganībās, kur dominē daudzgadīgas sugas ar lielu sakņu biomasu (Johansson u.c., 2024; Petersson u.c., 2025). Tomēr šie ieguvumi bieži kompensējas ar emisijām no augsnes meliorētās organiskajās augsnēs, jo turpinās organisko vielu mineralizācija un CO₂ emisijas, kas var daļēji vai pat pilnībā kompensēt oglekļa uzkrāšanos virszemes un sakņu biomasā (Kasimir-Klemedtsson u.c., 1997; Tiemeyer u.c., 2020). Latvijā veiktie pētījumi norāda, ka zālāju oglekļa balance meliorētās organiskajās augsnēs ir labvēlīgāka nekā aramzemēm, bet neto emisijas joprojām saglabājas pozitīvas un būtiskas, ja meliorācijas intensitāte netiek mainīta (Bārdule u.c., 2024; Purviņa u.c., 2024).

Tradicionālās augsnes apstrādes metodes aramzemēs organiskajās augsnēs – jo īpaši pilna dziļuma aršana ar augsnes apvēršanu – rada īslaicīgus, bet izteiktus heterotrofās elpošanas pīķus, kas saistīti ar aerācijas un substrāta pieejamības strauju palielināšanos, savukārt mazāk agresīvas augsnes apstrādes metodes, piemēram, diskošana, saglabā augsnes horizontu struktūru un daļēji ierobežo šos pīķus (Abdalla u.c., 2016; Reicosky u.c., 1997; Soane u.c., 2012). Metaanalīze, kas aptver dažādus augsnes un klimata apstākļus, liecina, ka vidēji aramzemēs ar intensīvu augsnes apstrādi CO₂ emisijas no augsnes ir par aptuveni 21% lielākas, bet augsnes virskārtas SOC saturs par 10% mazāks nekā bezaršanas vai samazinātas augsnes apstrādes sistēmās (Abdalla u.c., 2016). Tomēr liela daļa šo pētījumu veikti minerālaugsnēs; boreālajās un hemiboreālajās organiskajās augsnēs bezaršanas tehnoloģija vai samazinātas augsnes apstrādes ietekme uz gada emisiju bilanci bieži ir neliela salīdzinājumā ar ūdens līmeņa

un organiskās kārtas biežuma efektu (Dencső u.c., 2021; Honkanen u.c., 2024; Krauss u.c., 2017). Tas nozīmē, ka pāreja no tradicionālās aršanas uz diskošanu var būt nozīmīga īstermiņa emisiju pīķu ierobežojumā, tomēr nepieciešami detalizēti mērījumi, lai kvantitatīvi novērtētu gada bilances izmaiņas meliorētās kūdras augsnēs.

Jaunākie Latvijas un Baltijas reģiona pētījumi (Bārdule u.c., 2024; LSFRI Silava, 2021; Purviņa u.c., 2024) uzsver arī būtisku emisiju nenoteiktību. Piemēram, hemiboreālajās organiskajās augsnēs iegūtie neto CO₂ fluxi aramzemēs un zālajos atšķiras tikai par 1,0 t C ha⁻¹ gadā, kamēr standarta kļūdas un 95% ticamības intervāli bieži ir ±0,7-1,0 t C ha⁻¹ gadā (Bārdule u.c., 2025; LSFRI Silava, 2021). Tāpat Purviņa u.c. (2024) parāda, ka CO₂ emisiju variācija starp zālāju parauglaukumiem ar atšķirīgu kūdras slāņa biežumu un ūdens līmeni pārsniedz starpgadu variāciju vienā un tajā pašā laukā, un ka emisiju faktoru nenoteiktība var būt vairākas tonnas CO₂ ha⁻¹ gadā. Sistemātiskais pārskats par aramzemju pārveidošanu par zālājiem liecina, ka daudzos gadījumos mērītā emisiju samazinājuma amplitūda ir līdzīga vai pat mazāka par mērījumu un modelēšanas nenoteiktību, kas sarežģī būtiskas ietekmes statistisko konstatēšanu (Holzknecht u.c., 2025).

Šādos apstākļos īpaši aktuāls kļūst jautājums par to, kā specifiskas apsaimniekošanas prakses – zemes izmantošanas maiņa no aramzemes uz zālāju un tradicionālās aršanas aizstāšana ar diskošanu – ietekmē heterotrofās elpošanas intensitāti organiskajās augsnēs īstermiņā un potenciāli ilgtermiņā. Pieejamie dati liecina, ka agrīnajos gados pēc zemes izmantošanas maiņas vai augsnēs apstrādes sistēmas maiņas emisiju dinamika var būt sarežģīta: iespējami gan īslaicīgi emisiju pīķi (piemēram, pirmajā gadā pēc aršanas), gan pakāpeniska emisiju samazināšanās, stabilizējoties zālāja sakņu sistēmai un organiskā slāņa strukturālajam līdzsvaram (Johansson u.c., 2024; Kasimir-Klemetsson u.c., 1997; Reicosky, 1997). Taču pierādījumu bāze, kas tieši attiecas uz meliorētām kūdras augsnēm hemiboreālajā zonā, joprojām ir fragmentāra, un nacionāla līmeņa emisiju faktoru vai modeļu izstrādei nepieciešami jauni augstas izšķirtspējas lauka eksperimenti (LSFRI Silava, 2023; Tiemeyer u.c., 2020).

Ņemot vērā, ka organiskās augsnēs aramzemēs un zālajos ir lielākais emisiju avots Latvijas klimata bilancē un šo emisiju mazināšana ir nozīmīgākais uzdevums nacionālajā klimata politikā ZIZIMM sektorā, ir būtiski kvantitatīvi novērtēt, vai un cik lielā mērā zemes izmantošanas maiņa un mazāk agresīvas augsnēs apstrādes metodes – piemēram, diskošana – var samazināt heterotrofās elpošanas emisijas, vienlaikus saglabājot lauksaimniecisko produktivitāti (Lazdiņš, 2024; LSFRI Silava, 2023). Vienlaikus ir būtiski saprast, kāda ir īstermiņa (pirmo gadu) un ilgtermiņa (vairāku desmitgažu) ietekme, kā arī šo ietekmju variācija dažādos vides apstākļos (ūdens līmenis, kūdras slāņa biežums, barības vielu nodrošinājums). Šāda informācija ir nepieciešama gan reāli izmantojamu nacionālo emisiju faktoru un regresijas modeļu izstrādei, gan arī politikas plānošanai, piemēram, izvērtējot, cik lielā platībā un kādā secībā būtu lietderīgi pāriet no aramzemes uz zālāju vai aizstāt aršanu ar diskošanu.

Šī pētījuma mērķis ir ierīkot izmēģinājumu objektus un kvantitatīvi raksturot augsnes heterotrofās elpošanas intensitāti meliorētās organiskajās augsnēs atkarībā no zemes izmantošanas veida (aramzeme, zālājs) un augsnes apstrādes metodes (aršana, diskošana) hemiboreālajā klimatā Latvijā, lai novērtētu šo apsaimniekošanas pasākumu potenciālu SEG emisiju samazināšanai un izmantotu iegūtos rezultātus nacionālo emisiju faktoru un prognožu modeļu pilnveidei. Lai sasniegtu šo mērķi, pētījumā paredzēts: pirmkārt, veikt pilotizmēģinājumus tipiskās saimniecību platībās uz organiskajām augsnēm, kurās kombinētas dažādas augsnes apstrādes un zemes izmantošanas sistēmas; otrkārt, ar slēgto kameru metodi augstā laika izšķirtspējā noteikt augsnes CO₂ plūsmas un iegūt temperatūras un mitruma atkarības regresijas; treškārt, analizēt īstermiņa (pirmo gadu) un potenciālo ilgtermiņa emisiju dinamiku pēc zemes izmantošanas vai augsnes apstrādes sistēmas maiņas; ceturtkārt, novērtēt emisiju samazinājuma amplitūdu un nenoteiktību starp dažādām apsaimniekošanas opcijām un salīdzināt rezultātus ar IPCC un nacionālajiem emisiju faktoriem. Šie rezultāti nodrošinās zinātniski pamatotu informāciju nacionālās klimata politikas īstenošanai, fokusējoties uz lielāko emisiju avota – drenēto organisko augšņu – emisiju samazināšanu.

Metodika

Rezultāti

Analīzē iekļauti 187 novērojumi (rindas bez trūkstošām plūsmas vērtībām), kas veikti 2025. gadā laika posmā no 10. jūnija līdz 28. oktobrim. Dati raksturo heterotrofo CO₂ emisiju no kūdras augsnes, atkarībā no apsaimniekošanas veida:

- Arts – augsnes apstrāde, izmantojot tradicionālu aršanu;
- Diskots – augsnes apstrāde ar disku kultivatoru;
- Zālājs – pēc augsnes uzaršanas iesēts zālāja sēklu maisījums.

Pētījumā analizētie mainīgie: gaisa temperatūra (Tair), augsnes relatīvais mitrums (Msoil) un augsnes heterotrofā elpošana (mg (CO₂-C) m⁻² h⁻¹).

Aprakstošās statistikas rādītāji kūdras sagatavošanas metožu griezumā apkopoti Tab. 35.

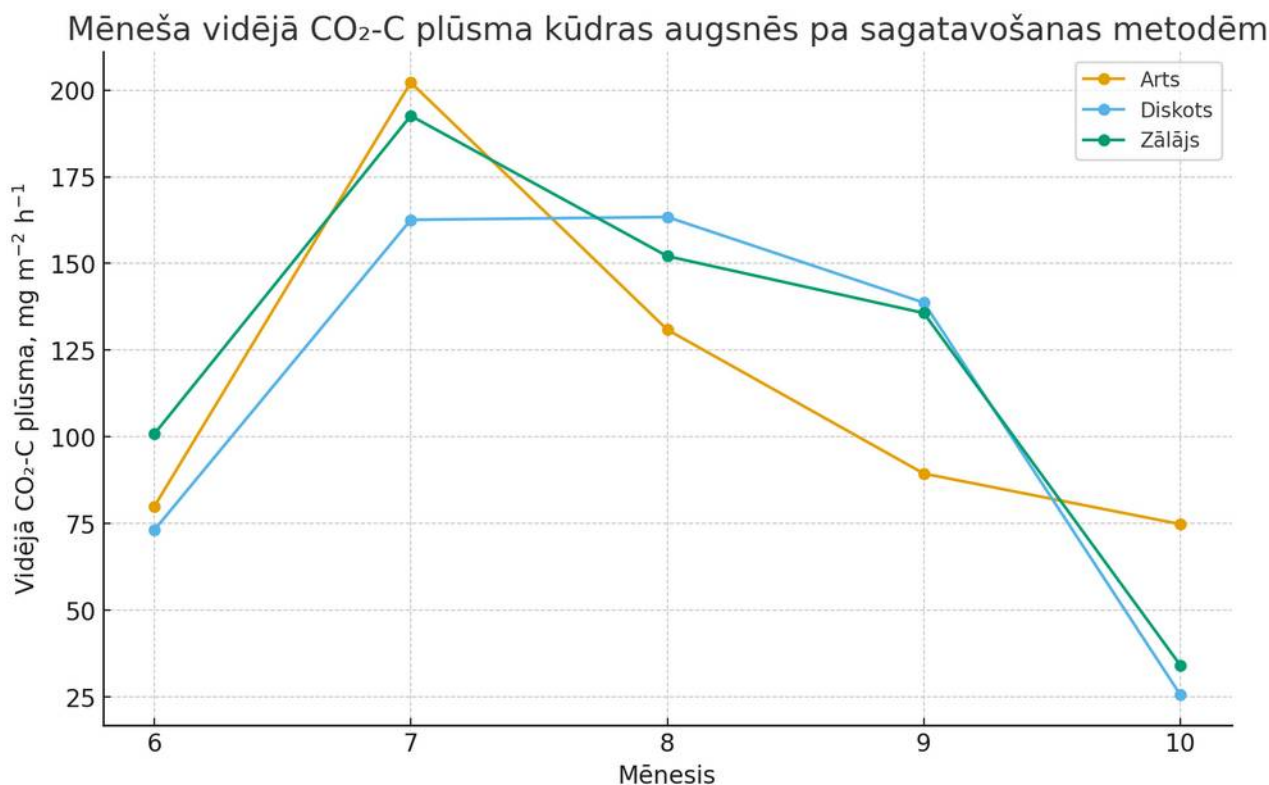
Tab. 35. Aprakstošās statistikas rādītāji

Metode	n	Tair vid., °C	Tair SD, °C	Msoil vid., %	Msoil SD, %	Plūsma vid., mg m ⁻² h ⁻¹	Plūsma SD, mg m ⁻² h ⁻¹	Plūsma min., mg m ⁻² h ⁻¹	Plūsma maks., mg m ⁻² h ⁻¹
Arts	62	17,34	5,94	39,65	7,48	104,95	64,18	9,65	264,02
Diskots	62	17,58	5,98	43,27	6,50	94,94	65,77	12,56	244,36

Metode	n	Tair vid., °C	Tair SD, °C	Msoil vid., %	Msoil SD, %	Plūsma vid., mg m ⁻² h ⁻¹	Plūsma SD, mg m ⁻² h ⁻¹	Plūsma min., mg m ⁻² h ⁻¹	Plūsma maks., mg m ⁻² h ⁻¹
Zālājs	63	17,43	6,60	45,78	6,70	107,18	68,11	21,65	297,51

Kopējā datu kopa (visas metodes kopā): Tair vidēji 17,45 °C (SD 6,15 °C), Msoil 42,9 % (SD 7,3 %), CO₂-C plūsma vidēji 102,4 mg m⁻² h⁻¹ (SD 65,9 mg m⁻² h⁻¹, min. 9,6; maks. 297,5 mg m⁻² h⁻¹).

Plūsmas sadalījums pa kūdras sagatavošanas metodēm parādīts 1. attēlā.



Att. 34. Mēneša vidējā heterotrofā CO₂-C plūsma mg m⁻² h⁻¹ augsnes sagatavošanas metožu griezumā (Arts, Diskots, Zālājs; jūnijs – oktobris, 2025. gadā).

CO₂ plūsmu raksturošanai atkarība no gaisa temperatūras pielāgots lineārs modelis:

$$F = a_T + b_T \cdot T_{air}, \text{ kur} \quad (25)$$

F – CO₂-C plūsma mg m⁻² h⁻¹;

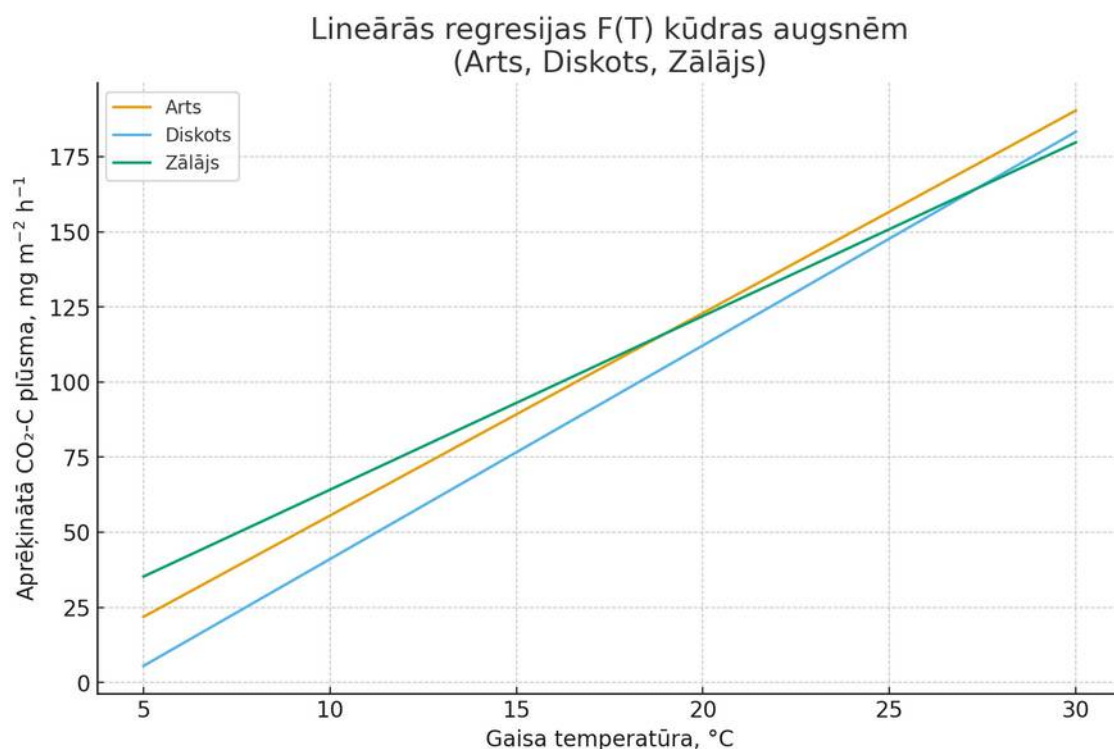
T_{air} – gaisa temperatūra °C;

a_T un b_T – regresijas koeficienti (Tab. 36)

Tab. 36. Lineārās regresijas parametri (CO₂ plūsma pret gaisa temperatūru un augsnes mitrumu)

Metode	Slīpums (b _T) Tair, mg m ⁻² h ⁻¹ °C ⁻¹	Brīvais loceklis (a _T) Tair, mg m ⁻² h ⁻¹	R ² (Tair)	Slīpums (b _M) Msoil, mg m ⁻² h ⁻¹ % ⁻¹	Brīvais loceklis (a _M) Msoil, mg m ⁻² h ⁻¹	R ² (Msoil)
Arts	6,74	-11,83	0,39	-2,69	211,64	0,10
Diskots	7,11	-30,01	0,42	-4,54	291,57	0,20
Zālājs	5,78	6,37	0,31	-4,34	305,70	0,18

Tātad visām trim kūdras metodēm konstatēta līdzīga temperatūras pieauguma ietekme uz CO₂ emisiju pieaugumu (5,8-7,1 mg m⁻² h⁻¹ uz 1 °C). Vidēji spēcīga determinācija (R² = 0,31-0,42), kas nozīmē, ka temperatūra izskaidro ievērojamu daļu heterotrofās elpošanas variācijas, bet pastāv arī citi nozīmīgi faktori. Att. 35 parādīta plūsmas atkarība no gaisa temperatūras ar pielāgotajām regresijas taisnēm.



Att. 35. Lineārās regresijas starp heterotrofo CO₂-C plūsmu un gaisa temperatūru kūdras augsnēs dažādām sagatavošanas metodēm.

CO₂ plūsmas atkarība no augsnes mitruma aprakstīta ar tādu pašu lineāro modeli:

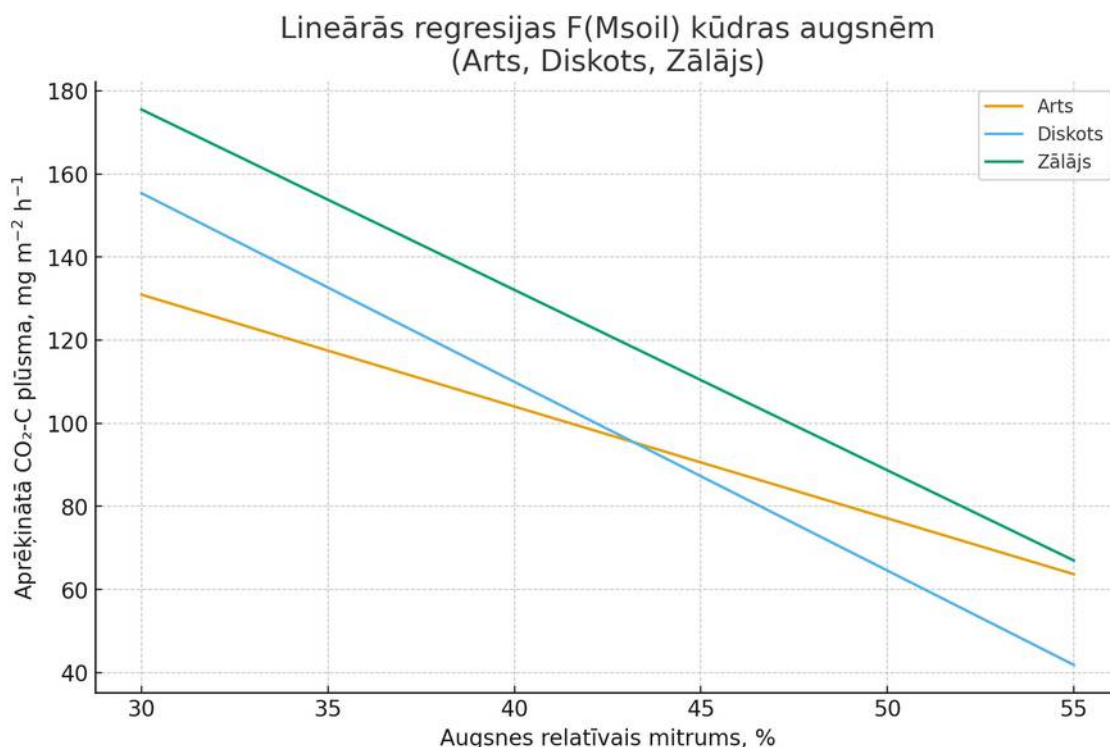
$$F = a_M + b_M \cdot M_{soil}, \text{ kur} \quad (26)$$

F – CO₂-C plūsma mg m⁻² h⁻¹;

M_{soil} – relatīvais mitruma saturs augsnē;

a_M un b_M – regresijas koeficienti (Tab. 36)

Visām trim metodēm plūsmas slīpums pret mitrumu ir negatīvs (–2,7 līdz –4,5 mg m⁻² h⁻¹ uz 1 % mitruma). Determinācijas koeficienti (R² = 0,10–0,20) norāda uz vāju līdz mērenu lineāru saistību, kā arī iespējamu nelineāru mitruma efektu (optimizēts mitruma diapazons heterotrofajai elpošanai, bet pārmērīgs mitrums samazina aerāciju). Att. 36 ilustrēta plūsmas atkarība no M_{soil} ar lineārajām regresijām.



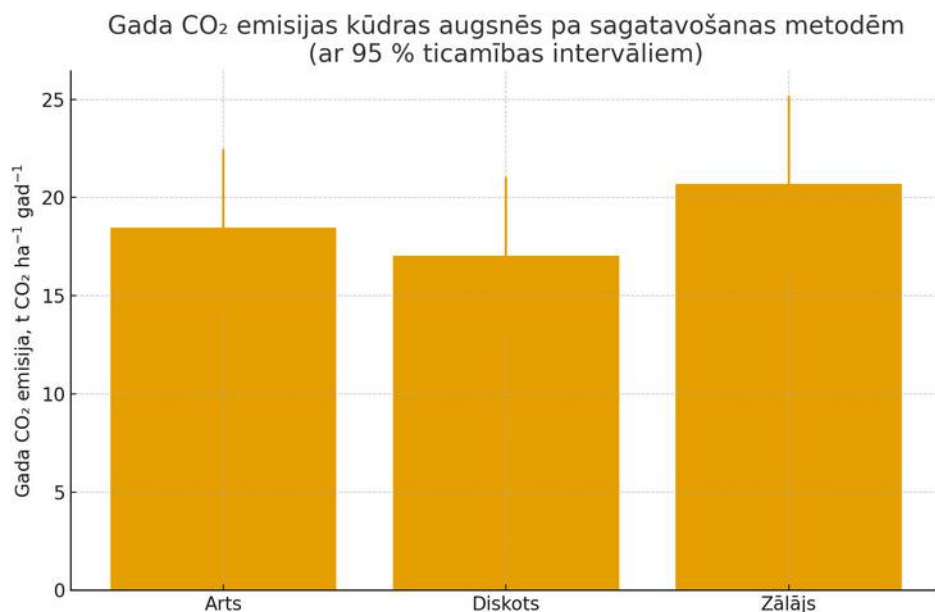
Att. 36. Lineārās regresijas starp heterotrofo CO₂-C plūsmu un augsnes relatīvo mitrumu kūdras augsnēs dažādām sagatavošanas metodēm.

Mēneša vidējie augsnes heterotrofās elpošanas rādītāji (mg (CO₂-C) m⁻² h⁻¹):

- Arts – jūnijs 79,9; jūlijs 202,2; augusts 130,9; septembris 89,4; oktobris 74,8;
- Diskots – jūnijs 73,1; jūlijs 162,6; augusts 163,4; septembris 138,7; oktobris 25,6;
- Zālājs – jūnijs 100,8; jūlijs 192,6; augusts 152,1; septembris 135,7; oktobris 34,1.

Visām metodēm maksimums ir jūlijā – augustā, ar izteiktu kritumu oktobrī. Varianti Zālājs un Diskots parāda lielāku emisiju līmeni vasaras beigās salīdzinājumā ar Arts.

Lai aprēķinātu indikatīvu augsnes heterotrofās elpošanas līmeni gada griezumā mēnešiem bez novērojumiem (janvāris – maijs, novembris – decembris) augsnes emisijas ekstrapolētas, izmantojot lineāro temperatūras – emisiju modeli (25. formula) konkrētajai metodei un klimatoloģiskos mēneša vidējos Tair (Brocēnu apstākļiem; janvāris –2 °C, februāris –2 °C, marts 1 °C, aprīlis 6 °C, maijs 12 °C, jūnijs 16 °C, jūlijs 18 °C, augusts 17 °C, septembris 13 °C, oktobris 7 °C, novembris 3 °C, decembris –1 °C). Negatīvas plūsmas netika pieļautas – ja lineārais modelis dod $F < 0$, F pieņemts 0. Tas ļauj iegūt telpiski integrētu, klimatoloģiski saskaņotu gada profilu ar reālistiskām zemām plūsmām ziemas periodā. Indikatīvais gada emisiju līmenis (novērojumi + ekstrapolācija) attēlots Att. 37.



Att. 37. Gada heterotrofās CO₂ emisijas kūdras augsnēs pa sagatavošanas metodēm (Arts, Diskots, Zālājs) t CO₂ ha⁻¹ gadā⁻¹ ar 95 % ticamības intervālu.

Gada vidējās CO₂ emisijas no augsnes katrai metodei aprēķināta kā dienu skaita svērtā vidējā visos 12 mēnešos (izmantojot mēneša vidējās plūsmas un attiecīgo dienu skaitu).

Tika lietots tāds pats pārrēķina koeficients kā iepriekš noteiktais temperatūras ietekmes faktors:

$$1 \text{ mg}(\text{CO}_2 - \text{C}) \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1} \approx 0,3212 \text{ t CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ gadā}^{-1} \quad (27)$$

Vidējie rādītāji doti Tab. 37. Artajā platībā un 2025. gadā izveidotajā zālājā CO₂ emisijas ir lielākas, taču Att. 37 parāda, ka atšķirība starp variantiem pagaidām nav būtiskas.

Tab. 37. Gada CO₂ emisijas augsnes sagatavošanas veidu griezumā

Metode	Gada vidējā plūsma, mg m ⁻² h ⁻¹	Gada plūsma, t CO ₂ ha ⁻¹ gad ⁻¹	Atšķirība no vidējās t CO ₂ ha ⁻¹ gadā ⁻¹
Arts	57,46	18,46	-0,27
Diskots	53,01	17,03	-1,70
Zālājs	64,46	20,70	+1,98

Vidējais CO₂ emisiju līmenis ir ~18,7 t CO₂ ha⁻¹ gadā⁻¹. Zālājā šis rādītājs nedaudz pārsniegts, diskotajā – tas ir nedaudz mazāks, artajā platībā – tuvs vidējam.

Nenoteiktību gada plūsmai katrai metodei novērtēju, izmantojot temperatūras–plūsmas modeļu atlikumu standartnovirzi (SD). Vispirms aprēķināts atlikumu SD (mg m⁻² h⁻¹) katrai metodei. Tad noteikta vidējā emisiju standartklūda $SE_F = \frac{SD}{\sqrt{n}}$; kas pārrēķināta uz gada plūsmas SE t CO₂ ha⁻¹ gadā⁻¹, reizinot ar 0,3212 (Tab. 38).

Tab. 38. Atlikumu SD un gada plūsmas standartklūda

Metode	Atlikumu SD, mg m ⁻² h ⁻¹	SE gada emisijām, t CO ₂ ha ⁻¹ gadā ⁻¹
Arts	50,20	2,05
Diskots	50,19	2,05
Zālājs	56,42	2,28

No tā izriet 95 % ticamības intervāli gada plūsmām (Tab. 39):

$$CI_{95\%} = \hat{F}_{gadā} \pm 1,96 \cdot SE_{gadā} \quad (28)$$

Tab. 39. Gada plūsmas ar 95 % ticamības intervāliem

Metode	Gada plūsma, t CO ₂ ha ⁻¹ gadā ⁻¹	SE, t CO ₂ ha ⁻¹ gadā ⁻¹	95 % CI zemākā robeža	95 % CI augstākā robeža
Arts	18,46	2,05	14,44	22,47
Diskots	17,03	2,05	13,01	21,04
Zālājs	20,70	2,28	16,23	25,18

Nenoteiktības intervāli pārklājas, kas norāda uz to, ka pagaidām nepastāv statistiski pārliecinoša atšķirība starp metodēm, lai arī redzama tendence, ka diskotajā platībā emisijas varētu būt mazākas.

Lai novērtētu, vai pastāv statistiski nozīmīgas atšķirības starp kūdras sagatavošanas metodēm, veikta vienfaktora dispersijas analīze (ANOVA) modelim:

$$F_{ij} = \mu + \alpha_{metode(i)} + \varepsilon_{ij} \quad (29)$$

Saskaņā ar iegūtajiem rezultātiem $F = 0,61$ un p -vērtība = 0,55. Atšķirība nav būtiska, lai gan zālājā parādās nelielas gada emisijas. Šī atšķirība, ņemot vērā nenoteiktību, nav statistiski pārliecinoša.

Precīzākai emisiju novērtēšanai var izmantot lineārus jauktos modeļus ar nejaušiem parauglaukuma (plot) un lauka efektiem, bet pašreizējā analīze parāda, ka augšnes sagatavošanas veida ietekme uz heterotrofo CO₂ emisiju nav tik kontrastaina, lai iegūtu būtiski precīzāku emisiju prognozi.

Pētījumā noteiktie gada heterotrofās elpošanas rādītāji no meliorētām organiskajām augsnēm aramzemēs un zālajos kopumā atbilst līdz šim Latvijā un Baltijas valstīs publicētajam emisiju diapazonam: Bārdule u.c. (2025) konstatēja, ka vidējās neto CO₂ emisijas ir $4,8 \pm 0,8$ t CO₂-C ha⁻¹ gadā⁻¹ aramzemēs un $3,8 \pm 0,7$ t CO₂-C ha⁻¹ gadā⁻¹ zālajos, balstoties uz Reco un no tā atvasinātu Rhet, savukārt Purviņa u.c. (2024) Latvijā veiktā pētījumā zālajos ar organiskām augsnēm ieguva vidējo heterotrofās elpošanas rādītāju $6,01 \pm 0,20$ t C ha⁻¹ gadā⁻¹ un neto CO₂ emisijas $3,48 \pm 0,33$ t CO₂-C ha⁻¹ gadā⁻¹, bet agrākā pētījumā par dziļām kūdras zālāju augsnēm Latvijā neto emisiju faktors sasniedza $4,4$ t CO₂-C ha⁻¹ gadā⁻¹ (Purviņa u.c., 2024). Arī LIFE OrgBalt projekta ziņojumos sniegtie Latvijas emisiju faktori meliorētām organiskām augsnēm aramzemēs un zālajos (aptuveni $3-6$ t CO₂-C ha⁻¹ gadā⁻¹ neto emisiju diapazonā atkarībā no zemes izmantošanas veida un ūdensrežīma) norāda uz līdzīgu lieluma

kārtu. Līdz ar to šajā pētījumā iegūtie heterotrofās elpošanas gada rādītāji atrodas tajā pašā lieluma kārtā, kā citos Latvijas apstākļos veikto pētījumu rezultāti gan zālajos, gan aramzēmēs.

Secinājumi

Sākotnējie rezultāti liecina, ka augsnes heterotrofās elpošanas CO₂ emisiju līmenis izmēģinājumu platībā starp variantiem šobrīd statistiski būtiski neatšķiras, tomēr šī neesamība visticamāk atspoguļo nevis vienādu ilgtermiņa emisiju režīmu, bet gan kopīgu apsaimniekošanas vēsturi. Zālajos un artajā sējplatībā gadījumos augsne ir tikusi uzarta – vienā gadījumā kultūraugu sēšanai, otrā gadījumā zālāja ierīkošanai, tādēļ novērotais emisiju līmenis drīzāk raksturo pārejas stāvokli pēc aršanas, nevis stabilizējušos emisiju režīmu nobriedušā zālājā, kas ilgstoši nav intensīvi mehāniski traucēts.

Lai izdarītu pamatotus secinājumus par dažādu augsnes sagatavošanas metožu ietekmi uz CO₂ emisijām no kūdras augsnēm lauksaimniecībā izmantojamās zemēs, nepieciešami ilgāki un sezonāli pilnīgāki novērojumi. Tikai vairāku gadu dinamikas analīze ļaus novērtēt: (i) vai diskošana ilgtermiņā patiešām spēj samazināt CO₂ emisijas, salīdzinot ar aršanu, un (ii) kādā laika posmā pēc zālāja ierīkošanas emisiju līmenis pakāpeniski samazinās un vai tas pietuvojas stabilam, zālājiem raksturīgam emisiju līmenim. Šobrīd iegūtie dati būtu jāinterpretē kā agrīna, pārejas posma momentuzņēmums, kurā joprojām dominē uzaršanas radītā organiskās vielas mineralizācijas “pēcefekta” komponente.

Īpaši kritiski vērtējama prakse piemērot zālājiem raksturīgu emisiju faktoru tūlīt pēc zemes izmantošanas veida maiņas, kad zālājs izveidots iepriekš intensīvi kultivētā kūdras augsnē. Šādā situācijā emisiju faktors, kas pieņem zemu un stabilu zālāja emisiju līmeni, būtiski pārvērtē zemes izmantošanas veida maiņas pozitīvo klimata efektu, jo ignorē pārejas perioda palielinātās CO₂ emisijas. Nacionāla mēroga emisiju faktoru vai procesorientētu modeļu izstrādei nepieciešams paplašināt pētījumu objektu skaitu (vairāk lauku, dažādi apsaimniekošanas scenāriji, vecuma struktūra pēc zemes izmantošanas maiņas), tādējādi nodrošinot reprezentatīvu datu bāzi, kas atspoguļo telpisko un laika variabilitāti un ļauj izstrādāt robustus emisiju faktorus Latvijas apstākļiem.

Izmantotā literatūra

1. A. Ramezan, C., A. Warner, T., & E. Maxwell, A. (2019). Evaluation of Sampling and Cross-Validation Tuning Strategies for Regional-Scale Machine Learning Classification. *Remote Sensing*, 11(2), 185. <https://doi.org/10.3390/rs11020185>
2. Abagandura, G. O., Sekaran, U., Singh, S., Singh, J., Ibrahim, M. A., Subramanian, S., Owens, V. N., & Kumar, S. (2020). Intercropping kura clover with prairie cordgrass mitigates soil greenhouse gas fluxes. *Scientific Reports*, 10(1), 7334. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-64182-2>
3. Abdalla, K., Chivenge, P., Ciais, P., & Chaplot, V. (2016). No-tillage lessens soil CO₂ emissions the most under arid and sandy soil conditions: Results from a meta-analysis. *Biogeosciences*, 13(12), 3619–3633. <https://doi.org/10.5194/bg-13-3619-2016>
4. Adhikari, K., Hartemink, A. E., Minasny, B., Kheir, R. B., Greve, M. B., & Greve, M. H. (2014). Digital Mapping of Soil Organic Carbon Contents and Stocks in Denmark. *PLOS ONE*, 9(8), e105519. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0105519>
5. Aitkenhead, M. J. (2017). Mapping peat in Scotland with remote sensing and site characteristics. *European Journal of Soil Science*, 68(1), 28–38. <https://doi.org/10.1111/ejss.12393>
6. 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. (2024). Annual net CO₂ fluxes from drained organic soils used for agriculture in the hemiboreal region of Europe. *Biogeochemistry: Land*. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2024-2523>
7. 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>
8. Baril, X., Durand, A.-A., Srei, N., Lamothe, S., Provost, C., Martineau, C., Dunfield, K., & Constant, P. (2022). The biological sink of atmospheric H₂ is more sensitive to spatial variation of microbial diversity than N₂O and CO₂ emissions in a winter cover crop field trial. *Science of The Total Environment*, 821, 153420. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153420>
9. Basheer, S., Wang, X., Farooque, A. A., Nawaz, R. A., Pang, T., & Neokye, E. O. (2024). A Review of Greenhouse Gas Emissions from Agricultural Soil. *Sustainability*, 16(11), 4789. <https://doi.org/10.3390/su16114789>
10. Behnke, G. D., & Villamil, M. B. (2019). Cover crop rotations affect greenhouse gas emissions and crop production in Illinois, USA. *Field Crops Research*, 241, 107580. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.107580>
11. Boettinger, J. L. (2005). Alluvium and alluvial soils. No *Encyclopedia of Soils in the Environment* (lpp. 45–49). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B0-12-348530-4/00008-4>
12. Böhner, J., & Selige, T. (2006). *Spatial prediction of soil attributes using terrain analysis and climate regionalisation* (Sēj. 115).
13. Boschiero, M., De Laurentiis, V., Caldeira, C., & Sala, S. (2023). Comparison of organic and conventional cropping systems: A systematic review of life cycle assessment studies. *Environmental Impact Assessment Review*, 102, 107187. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2023.107187>
14. Brady, N. C., & Weil, R. R. (2014). *Elements of the Nature and Properties of Soils* (3. ed., Pearson New Internat. Edition). Pearson.
15. Butlers, A., & Ivanovs, J. (2018). Improved activity data for accounting greenhouse gas emissions due

- to management of wetlands. *Rural Development*, 1, 27–33. <https://doi.org/10.22616/rrd.24.2018.004>
16. Butterbach-Bahl, K., Baggs, E. M., Dannenmann, M., Kiese, R., & Zechmeister-Boltenstern, S. (2013). Nitrous oxide emissions from soils: How well do we understand the processes and their controls? *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 368(1621), 20130122. <https://doi.org/10.1098/rstb.2013.0122>
17. Chataut, G., Bhatta, B., Joshi, D., Subedi, K., & Kafle, K. (2023). Greenhouse gases emission from agricultural soil: A review. *Journal of Agriculture and Food Research*, 11, 100533. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100533>
18. Chawla, N. V., Bowyer, K. W., Hall, L. O., & Kegelmeyer, W. P. (2002). SMOTE: Synthetic Minority Over-sampling Technique. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 16, 321–357. <https://doi.org/10.1613/jair.953>
19. Chen, P. Y., & Popovich, P. M. (2002). *Correlation: Parametric and Nonparametric Measures* (First Edition). SAGE Publications, Inc.
20. Chen, T., & Guestrin, C. (2016). XGBoost: A Scalable Tree Boosting System. *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, 785–794. <https://doi.org/10.1145/2939672.2939785>
21. Coffman, D. L., Maydeu-Olivares, A., & Arnau, J. (2008). Asymptotic Distribution Free Interval Estimation. *Methodology*, 4(1), 4–9. <https://doi.org/10.1027/1614-2241.4.1.4>
22. Conchedda, G., & Tubiello, F. N. (2020). Drainage of organic soils and GHG emissions: Validation with country data. *Earth System Science Data*, 12(4), 3113–3137. <https://doi.org/10.5194/essd-12-3113-2020>
23. Conrad, R. (2020). Methane Production in Soil Environments—Anaerobic Biogeochemistry and Microbial Life between Flooding and Desiccation. *Microorganisms*, 8(6), 881. <https://doi.org/10.3390/microorganisms8060881>
24. Cooper, J. M., Butler, G., & Leifert, C. (2011). Life cycle analysis of greenhouse gas emissions from organic and conventional food production systems, with and without bio-energy options. *NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences*, 58(3), 185–192. <https://doi.org/10.1016/j.njas.2011.05.002>
25. Córdón, I., García, S., Fernández, A., & Herrera, F. (2018). Imbalance: Oversampling algorithms for imbalanced classification in R. *Knowledge-Based Systems*, 161, 329–341. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2018.07.035>
26. Council Directive 92/43/EEC of 21 May 1992 on the Conservation of Natural Habitats and of Wild Fauna and Flora, CONSIL, 206 OJ L (1992). <http://data.europa.eu/eli/dir/1992/43/oj/eng>
27. Čuhel, J., Šimek, M., Laughlin, R. J., Bru, D., Chèneby, D., Watson, C. J., & Philippot, L. (2010). Insights into the Effect of Soil pH on N₂O and N₂ Emissions and Denitrifier Community Size and Activity. *Applied and Environmental Microbiology*, 76(6), 1870–1878. <https://doi.org/10.1128/AEM.02484-09>
28. Daryanto, S., Fu, B., Wang, L., Jacinthe, P.-A., & Zhao, W. (2018). Quantitative synthesis on the ecosystem services of cover crops. *Earth-Science Reviews*, 185, 357–373. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.06.013>
29. De Notaris, C., Mortensen, E. Ø., Sørensen, P., Olesen, J. E., & Rasmussen, J. (2021). Cover crop mixtures including legumes can self-regulate to optimize N₂ fixation while reducing nitrate leaching. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 309, 107287. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.107287>
30. Dencső, M., Horel, Á., Bogunovic, I., & Tóth, E. (2021). Effects of Environmental Drivers and Agricultural Management on Soil CO₂ and N₂O Emissions. *Agronomy*, 11(1), 54. <https://doi.org/10.3390/agronomy11010054>
31. Donath, T. W., Schmiede, R., & Otte, A. (2015). Alluvial grasslands along the northern upper Rhine – nature conservation value vs. Agricultural value under non-intensive management. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 200, 102–109. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.11.004>

32. Eggleston, S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., & Kiyoto, T. (Red.). (2006). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Agriculture, Forestry and Other Land Use. No 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (Sēj. 4, lpp. 678). Institute for Global Environmental Strategies (IGES).
33. Eggleston, S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., & Tanade, K. (Red.). (2006). 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories Volume 2 Energy. The Institute for Global Environmental Strategies.
34. European Commission. (2023, aprīlī 19). Regulation (EU) 2023/839 of the European Parliament and of the Council of 19 April 2023 amending Regulation (EU) 2018/841 as regards the scope, simplifying the reporting and compliance rules, and setting out the targets of the Member States for 2030, and Regulation (EU) 2018/1999 as regards improvement in monitoring, reporting, tracking of progress and review (Text with EEA relevance). <http://data.europa.eu/eli/reg/2023/839/oj/eng>
35. Ferdush, J., Paul, V., Varco, J., Jones, K., & Sasidharan, S. M. (2023). Consequences of elevated CO₂ on soil acidification, cation depletion, and inorganic carbon: A column-based experimental investigation. *Soil and Tillage Research*, 234, 105839. <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105839>
36. Fleck, D., He, Y., Ilexander, C., Jacobson, G., & Cunningham, K. L. (2013). Simultaneous soil flux measurements of five gases—N₂O, CH₄, CO₂, NH₃, and H₂O -- with the Picarro G2508 (Application note No. AN034; lpp. 11). Picarro. https://www.picarro.com/support/library/documents/simultaneous_soil_flux_measurements_of_five_gases_n2o_ch4_co2_nh3_and_0
37. Food and Agriculture Organization. (2014). World reference base for soil resources 2014 international soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. FAO.
38. Foteinis, S., & Chatzisyseon, E. (2016). Life cycle assessment of organic versus conventional agriculture. A case study of lettuce cultivation in Greece. *Journal of Cleaner Production*, 112, 2462–2471. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.075>
39. Franzén, L. (2006). Increased decomposition of subsurface peat in Swedish raised bogs: Are temperate peatlands still net sinks of carbon? *Mires and Peat*. <https://www.semanticscholar.org/paper/Increased-decomposition-of-subsurface-peat-in-bogs%3A-Franz%C3%A9n/bcd2b5ea91dd53d64cfe8bc77a87f02e7820b390>
40. Freeman, B. W. J., Evans, C. D., Musarika, S., Morrison, R., Newman, T. R., Page, S. E., Wiggs, G. F. S., Bell, N. G. A., Styles, D., Wen, Y., Chadwick, D. R., & Jones, D. L. (2022). Responsible agriculture must adapt to the wetland character of mid-latitude peatlands. *Global Change Biology*, 28(12), 3795–3811. <https://doi.org/10.1111/gcb.16152>
41. Gatis, N., Luscombe, D. J., Carless, D., Parry, L. E., Fyfe, R. M., Harrod, T. R., Brazier, R. E., & Anderson, K. (2019). Mapping upland peat depth using airborne radiometric and lidar survey data. *Geoderma*, 335, 78–87. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.07.041>
42. Gougoulas, C., Clark, J. M., & Shaw, L. J. (2014). The role of soil microbes in the global carbon cycle: Tracking the below-ground microbial processing of plant-derived carbon for manipulating carbon dynamics in agricultural systems. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 94(12), 2362–2371. <https://doi.org/10.1002/jsfa.6577>
43. Grantina, L., Kenigvalde, K., Eze, D., Petriņa, Z., Skrabule, I., Rostoks, N., & Nikolajeva, V. (2011). Impact of six-year-long organic cropping on soil microorganisms and crop disease suppressiveness. *Zemdirbyste-agriculture*. <https://www.semanticscholar.org/paper/Impact-of-six-year-long-organic-cropping-on-soil-Grantina-Kenigvalde/b067e1772af153cb1d5a5d3bd4f03d595b77c3ef>
44. Guardia, G., Tellez-Rio, A., García-Marco, S., Martin-Lammerding, D., Tenorio, J. L., Ibáñez, M. Á., & Vallejo, A. (2016). Effect of tillage and crop (cereal versus legume) on greenhouse gas emissions and Global Warming Potential in a non-irrigated Mediterranean field. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 221, 187–197. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.01.047>

45. Guo, Y., Saiz, E., Radu, A., Sonkusale, S., & Ullah, S. (2023). Prolonged flooding followed by drying increase greenhouse gas emissions differently from soils under grassland and arable land uses. *Geoderma Regional*, 34, e00697. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2023.e00697>
46. Hartwig, N. L., & Hoffman, L. D. (1975). *Suppression of perennial legume and grass cover crops for no-tillage corn*.
47. Hillel, D. (2003). *Introduction to Environmental Soil Physics*. <https://shop.elsevier.com/books/introduction-to-environmental-soil-physics/hillel/978-0-12-348655-4>
48. Hiraishi, T., Krug, T., Tanabe, K., Srivastava, N., Fukuda, M., Troxler, T., & Jamsranjav, B. (2013). *2013 Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands* (lpp. 354). IPCC. http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/wetlands/pdf/Wetlands_Supplement_Entire_Report.pdf
49. Holzknicht, A., Land, M., Dessureault-Rompré, J., Elsgaard, L., Lång, K., & Berglund, Ö. (2025). Effects of converting cropland to grassland on greenhouse gas emissions from peat and organic-rich soils in temperate and boreal climates: A systematic review. *Environmental Evidence*, 14(1), 1. <https://doi.org/10.1186/s13750-024-00354-1>
50. Honkanen, H., Kekkonen, H., Heikkinen, J., Kaseva, J., & Lång, K. (2024). Minor effects of no-till treatment on GHG emissions of boreal cultivated peat soil. *Biogeochemistry*, 167(4), 499–522. <https://doi.org/10.1007/s10533-023-01097-w>
51. Yao, F., Wu, Y., Liu, X., Cao, Y., Lv, Y., Wei, W., Xu, W., Liu, Z., Liang, J., & Wang, Y. (2023). Research Progress and Development Trends of Greenhouse Gas Emissions from Cereal–Legume Intercropping Systems. *Agronomy*, 13(4), 1085. <https://doi.org/10.3390/agronomy13041085>
52. 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>
53. Ivanovs, J., & Lupikis, A. (2018). Identification of wet areas in forest using remote sensing data [PDF]. *Agronomy Research*, 16(5), 399.4Kb. Scopus. <https://doi.org/10.1515/AR.18.192>
54. Jansson, J. K., & Hofmockel, K. S. (2020). Soil microbiomes and climate change. *Nature Reviews Microbiology*, 18(1), 35–46. <https://doi.org/10.1038/s41579-019-0265-7>
55. Jauhiainen, J., Heikkinen, J., Clarke, N., He, H., Dalsgaard, L., Minkinen, K., Ojanen, P., Vesterdal, L., Alm, J., Butlers, A., Callesen, I., Jordan, S., Lohila, A., Mander, Ü., Óskarsson, H., Sigurdsson, B. D., Søgaard, G., Soosaar, K., Kasimir, Å., ... Laiho, R. (2023). Reviews and syntheses: Greenhouse gas emissions from drained organic forest soils – synthesizing data for site-specific emission factors for boreal and cool temperate regions. *Biogeosciences*, 20(23), 4819–4839. <https://doi.org/10.5194/bg-20-4819-2023>
56. Johansson, A., Livsey, J., Guasconi, D., Hugelius, G., Lindborg, R., & Manzoni, S. (2024). Long-term soil organic carbon changes after cropland conversion to grazed grassland in Southern Sweden. *Soil Use and Management*, 40(1), e13004. <https://doi.org/10.1111/sum.13004>
57. Kabała, C. (2022). Origin, transformation and classification of alluvial soils (mady) in Poland – soils of the year 2022. *Soil Science Annual*, 73(3), 1–13. <https://doi.org/10.37501/soilsa/156043>
58. Kaye, J. P., & Quemada, M. (2017). Using cover crops to mitigate and adapt to climate change. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 37(1), 4. <https://doi.org/10.1007/s13593-016-0410-x>
59. Kasimir-Klemetsson, C., Klemetsson, L., Berglund, K., Martikainen, P., Silvola, J., & Oenema, O. (1997). Greenhouse gas emissions from farmed organic soils: A review. *Soil Use and Management*, 13(4 SUPPL.), 245–250. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.1997.tb00595.x>
60. Krauss, M., Ruser, R., Müller, T., Hansen, S., Mäder, P., & Gattinger, A. (2017). Impact of reduced tillage on greenhouse gas emissions and soil carbon stocks in an organic grass-clover ley—Winter wheat cropping sequence. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 239, 324–333. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.01.029>

61. Kuhn, M. (2008). Building Predictive Models in R Using the **caret** Package. *Journal of Statistical Software*, 28(5). <https://doi.org/10.18637/jss.v028.i05>
62. Kuzyakov, Y. (2006). Sources of CO₂ efflux from soil and review of partitioning methods. *Soil Biology and Biochemistry*, 38(3), 425–448. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2005.08.020>
63. Łabaz, B., & Kabala, C. (2016). Human-induced development of mollic and umbric horizons in drained and farmed swampy alluvial soils. *CATENA*, 139, 117–126. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.12.013>
64. Lazdiņš, A. (2024). *Projektā ieviestie klimata pārmaiņu mazināšanas pasākumi*. Seminārs mežsaimniekiem un konsultantiem par organisko augšņu ilgtspējīgu apsaimniekošanu, Launkalne. LIFE OrgBalt: «Klimata pārmaiņu samazināšanas pasākumu demonstrēšana auglīgu meliorētu organisko augšņu apsaimniekošanā Baltijas valstīs un Somijā». <https://rgdoi.net/10.13140/RG.2.2.15562.38088>
65. Lazdiņš, A., Bārdule, A., Butlers, A., Lupiķis, A., Okmanis, M., Bebre, I., Sarkanābols, T., & Petaja, G. (2016). *Aramzemes un ilggadīgo zālāju apsaimniekošanas radīto siltumnīcefekta gāzu (SEG) emisiju un oglekļa dioksīda (CO₂) piesaistes uzskaites sistēmas pilnveidošana un atbilstošu metodisko risinājumu izstrādāšana (2016. Gada starpziņojums)* (No. 101115/S109; lpp. 33). https://drive.google.com/open?id=0Bxv4jQ_04jXZRExSMWhPMWhDNDg
66. Le Mer, J., & Roger, P. (2001). Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: A review. *European Journal of Soil Biology*, 37(1), 25–50. [https://doi.org/10.1016/S1164-5563\(01\)01067-6](https://doi.org/10.1016/S1164-5563(01)01067-6)
67. Lebender, U., Senbayram, M., Lammel, J., & Kuhlmann, H. (2014). Impact of mineral N fertilizer application rates on N₂O emissions from arable soils under winter wheat. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 100(1), 111–120. <https://doi.org/10.1007/s10705-014-9630-0>
68. Li, Y., Chen, J., Drury, C. F., Liebig, M., Johnson, J. M. F., Wang, Z., Feng, H., & Abalos, D. (2023). The role of conservation agriculture practices in mitigating N₂O emissions: A meta-analysis. *Agronomy for Sustainable Development*, 43(5), 63. <https://doi.org/10.1007/s13593-023-00911-x>
69. Lin, Q., Wang, S., Li, Y., Riaz, L., Yu, F., Yang, Q., Han, S., & Ma, J. (2022). Effects and mechanisms of land-types conversion on greenhouse gas emissions in the Yellow River floodplain wetland. *Science of The Total Environment*, 813, 152406. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152406>
70. Lindsay, R. (2010). *Peatbogs and carbon: A critical synthesis to inform policy development in oceanic peat bog conservation and restoration in the context of climate change*. [Technical report]. University of East London, Environmental Research Group. http://www.rspb.org.uk/Images/Peatbogs_and_carbon_tcm9-255200.pdf
71. LSFRI Silava. (2015). *Projections of greenhouse gas (GHG) emissions and CO₂ removals in land use, land use change and forestry (LULUCF) sector in Latvia until 2035* (No. 2015/02 (07.07.2015); lpp. 46). LSFRI Silava. https://ppdb.mk.gov.lv/wp-content/uploads/2023/08/VARAM_Projections_of_greenhouse_gas_GHG_emissions_SEG_ATSKAITE_LULUCF_KPD.pdf?utm_source=chatgpt.com
72. LSFRI Silava. (2021). *Interim Draft Report on Improved Ghg Emission Factors for Nutrient- Rich Managed Organic Soils in Baltic States* (Nos. 2021-C1/3; Filling Knowledge Gaps on Ghg Emissions from Organic Soils (C1), lpp. 67). LSFRI Silava. https://www.orgbalt.eu/wp-content/uploads/2024/11/2021_C1_4-Interim-draft-report-on-improved-GHG-EF_.pdf
73. LSFRI Silava. (2023). *Evaluation of factors affecting greenhouse gas (GHG) emissions reduction potential in cropland and grassland with organic soils (press release 1.1.1.1/21/A/031)*. https://www.silava.lv/images/Petijumi/2022-ERAF-031/2023-07-31-ERAF-031-Press-release-Summary.pdf?utm_source=chatgpt.com

74. LVĢMC. (2025). *Meteoroloģisko novērojumu tīkls. Stendes stacija* [Dataset]. <https://videscentrs.lvgm.lv/noverojumu-arhivs/meteo/30111/active/4570/2024-04-01/2024-10-31>
75. Machado Dos Santos Pinto, R., Weigelhofer, G., Diaz-Pines, E., Guerreiro Brito, A., Zechmeister-Boltenstern, S., & Hein, T. (2020). River-floodplain restoration and hydrological effects on GHG emissions: Biogeochemical dynamics in the parafluvial zone. *Science of The Total Environment*, 715, 136980. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136980>
76. Mander, Ü., Espenberg, M., Melling, L., & Kull, A. (2023). Peatland restoration pathways to mitigate greenhouse gas emissions and retain peat carbon. *Biogeochemistry*, 167(4), 523–543. <https://doi.org/10.1007/s10533-023-01103-1>
77. Meirons, Z. (2002). Kvartāra nogulumi. No *Latvijas ģeoloģiskā karte, M 1:200000*. Valsts ģeoloģijas dienests.
78. 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>
79. Ministry of Climate and Energy. (2023). *Latvia's National Inventory Report. Greenhouse Gas Emissions in Latvia from 1990 to 2021 in Common Reporting Format (CRF)* (lpp. 489). Ministry of Environmental Protection and Regional Development of the Republic of Latvia. <https://unfccc.int/documents/627724>
80. Mitsch, W. J., & Gosselink, J. G. (2015). *Wetlands* (Fifth edition). John Wiley and Sons, Inc.
81. MoCE. (2025). *Latvia's National Inventory Document under the UNFCCC and Paris Agreement. Greenhouse Gas Emissions in Latvia from 1990 to 2023* (lpp. 504). Ministry of Climate and Energy of the Republic of Latvia. https://unfccc.int/sites/default/files/resource/LV_NID_15042025.pdf
82. Muhammad, I., Sainju, U. M., Zhao, F., Khan, A., Ghimire, R., Fu, X., & Wang, J. (2019). Regulation of soil CO₂ and N₂O emissions by cover crops: A meta-analysis. *Soil and Tillage Research*, 192, 103–112. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.04.020>
83. Mulder, V. L., Lacoste, M., Richer-de-Forges, A. C., Martin, M. P., & Arrouays, D. (2016). National versus global modelling the 3D distribution of soil organic carbon in mainland France. *Geoderma*, 263, 16–34. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.08.035>
84. Murphy, P. N. C., Ogilvie, J., Castonguay, M., Zhang, C., Meng, F.-R., & Arp, P. A. (2008). Improving forest operations planning through high-resolution flow-channel and wet-areas mapping. *The Forestry Chronicle*, 84(4), 568–574. <https://doi.org/10.5591/ggcvmg>
85. Naiman, R. J., & Décamps, H. (1997). The Ecology of Interfaces: Riparian Zones. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 28(1), 621–658. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.28.1.621>
86. Nguyen, L. T. T., & Kravchenko, A. N. (2021). Effects of cover crops on soil CO₂ and N₂O emissions across topographically diverse agricultural landscapes in corn-soybean-wheat organic transition. *European Journal of Agronomy*, 122, 126189. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126189>
87. Oertel, C., Matschullat, J., Zurba, K., Zimmermann, F., & Erasmī, S. (2016). Greenhouse gas emissions from soils—A review. *Geochemistry*, 76(3), 327–352. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2016.04.002>
88. Padarian, J., Minasny, B., McBratney, A., & Smith, P. (2022). Soil carbon sequestration potential in global croplands. *PeerJ*, 10, e13740. <https://doi.org/10.7717/peerj.13740>
89. Paul, S., & Alewell, C. (2018). *An assessment of CO₂ emission factors of drained organic soils in Switzerland* (Report for FOEN). University of Basel.
90. Petaja, G., Okmanis, M., Polmanis, K., Stola, J., Spalva, G., & Jansons, J. (2018). Evaluation of greenhouse gas emissions and area of organic soils in cropland and grassland in Latvia – integrated National forest inventory data and soil maps approach. *Agronomy Research*, 16(4), 1809–1823. <https://doi.org/10.15159/ar.18.183>
91. Petersson, T., Antoniella, G., Perugini, L., Chiriaco, M. V., & Chiti, T. (2025). Carbon farming

- practices for European cropland: A review on the effect on soil organic carbon. *Soil and Tillage Research*, 247, 106353. <https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106353>
92. Piirimäe, K., Salm, J.-O., Ivanovs, J., Stivrins, N., Greimas, E., Jarašius, L., Zableckis, N., & Haberl, A. (2020). *Paludiculture in the Baltics—GIS study* (lpp. 48). Project Assessment report Estonian Fund for Nature & Succow Foundation partner in the Greifswald Mire Centre. https://media.voog.com/0000/0037/1265/files/GIS_EE_LV_LT_04.2020.pdf
93. Poff, N. L., & Zimmerman, J. K. H. (2010). Ecological responses to altered flow regimes: A literature review to inform the science and management of environmental flows. *Freshwater Biology*, 55(1), 194–205. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2009.02272.x>
94. Purviņa, D., Zvaigzne, Z. A., Skrandā, I., Meļņiks, R. N., Petaja, G., Līcīte, I., Butlers, A., & Bārdule, A. (2024). Impact of Soil Organic Layer Thickness on Soil-to-Atmosphere GHG Fluxes in Grassland in Latvia. *Agriculture*, 14(3), Article 3. <https://doi.org/10.3390/agriculture14030387>
95. Regulation (EU) 2024/1991 of the European Parliament and of the Council of 24 June 2024 on Nature Restoration and Amending Regulation (EU) 2022/869 (Text with EEA Relevance) (2024). <http://data.europa.eu/eli/reg/2024/1991/oj/eng>
96. Reicosky, D. C. (1997). Tillage-induced CO₂ emission from soil. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 49(1), 273–285. <https://doi.org/10.1023/A:1009766510274>
97. Reicosky, D. C., Dugas, W. A., & Torbert, H. A. (1997). Tillage-induced soil carbon dioxide loss from different cropping systems. *Soil and Tillage Research*, 41(1), 105–118. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(96\)01080-X](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(96)01080-X)
98. Rydin, H., & Jeglum, J. K. (2013). *The Biology of Peatlands*. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/acprof:osobl/9780199602995.001.0001>
99. Rudyanto, Minasny, B., Setiawan, B. I., Arif, C., Saptomo, S. K., & Chadirin, Y. (2016). Digital mapping for cost-effective and accurate prediction of the depth and carbon stocks in Indonesian peatlands. *Geoderma*, 272, 20–31. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.02.026>
100. Sadeghpour, A., Lefever, A., Ketterings, Q., & Czymmek, K. (2016). *Nitrous Oxide Emission from Crop Fields. Cornell University Cooperative Extension. Agronomy Fact Sheet Series* (No. Fact Sheet 91; Agronomy Fact Sheet Series). <http://nmsp.cals.cornell.edu/publications/factsheets/factsheet90.pdf>
101. Sanz-Cobena, A., García-Marco, S., Quemada, M., Gabriel, J. L., Almendros, P., & Vallejo, A. (2014). Do cover crops enhance N₂O, CO₂ or CH₄ emissions from soil in Mediterranean arable systems? *Science of The Total Environment*, 466–467, 164–174. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.07.023>
102. Senbayram, M., Wenthe, C., Lingner, A., Isselstein, J., Steinmann, H., Kaya, C., & Köbke, S. (2015). Legume-based mixed intercropping systems may lower agricultural born N₂O emissions. *Energy, Sustainability and Society*, 6(1), 2. <https://doi.org/10.1186/s13705-015-0067-3>
103. Syväsalö, E., Regina, K., Turtola, E., Lemola, R., & Esala, M. (2006). Fluxes of nitrous oxide and methane, and nitrogen leaching from organically and conventionally cultivated sandy soil in western Finland. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 113(1–4), 342–348. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2005.10.013>
104. Soane, B. D., Ball, B. C., Arvidsson, J., Basch, G., Moreno, F., & Roger-Estrade, J. (2012). No-till in northern, western and south-western Europe: A review of problems and opportunities for crop production and the environment. *Soil and Tillage Research*, 118, 66–87. <https://doi.org/10.1016/j.still.2011.10.015>
105. Squalli, J., & Adamkiewicz, G. (2018). Organic farming and greenhouse gas emissions: A longitudinal U.S. state-level study. *Journal of Cleaner Production*, 192, 30–42. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.160>
106. Šeffer, J., Janák, M., & Šefferová, V. (2008). *MANAGEMENT of Natura 2000 habitats Alluvial*

- meadows of river valleys of the *Cnidion dubii* 6440. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.19172.60802>
107. Tabari, H. (2020). Climate change impact on flood and extreme precipitation increases with water availability. *Scientific Reports*, 10(1), 13768. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-70816-2>
108. Thorp, J. (1968). Alluvium. No *Geomorphology* (lpp. 10–11). Kluwer Academic Publishers. https://doi.org/10.1007/3-540-31060-6_7
109. 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>
110. Tubiello, F., & Concheda, G. (2020). *FAOSTAT GHG Emissions from Organic Soils* (Versija April 2020) [Dataset]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.3942370>
111. Vasander, H., & Kettunen, A. (2006). Carbon in Boreal Peatlands. No R. K. Wieder & D. H. Vitt (Red.), *Boreal Peatland Ecosystems* (Sēj. 188, lpp. 165–194). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-31913-9_9
112. Walter, K., Don, A., Fuß, R., Kern, J., Drewer, J., & Flessa, H. (2015). Direct nitrous oxide emissions from oilseed rape cropping – a meta-analysis. *GCB Bioenergy*, 7(6), 1260–1271. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12223>
113. Wang, Y., Zhang, Z., & Chen, X. (2023). Land Use Transitions and the Associated Impacts on Carbon Storage in the Poyang Lake Basin, China. *Remote Sensing*, 15(11), Article 11. <https://doi.org/10.3390/rs15112703>
114. Zerbe, S. (2023). *Restoration of Ecosystems – Bridging Nature and Humans: A Transdisciplinary Approach* (1st ed. 2023 edition). Springer Spektrum.
115. Zhao, Y., Liu, Y., Cao, S., Hao, Q., Liu, C., & Li, Y. (2024). Anaerobic oxidation of methane driven by different electron acceptors: A review. *Science of The Total Environment*, 946, 174287. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174287>