



Tartu Ülikool

Ökoloogia ja Maateaduste Instituut

Eesti niiduökosüsteemide roll kliimamuutuste leevendamisel

Aruanne



2024, Tartu

Sihtfinantseerimislepingu RE.4.06.22-0026 „Eesti niiduökosüsteemide roll kliimamuutuste leevendamisel” täitjaks oli Tartu Ülikool. Projekti rahastas SA Keskkonnainvesteeringute Keskus läbi Keskkonnaprogrammi.

Kestvus: 01.06.2022–08.04.2024

Projekti täitjad

Aveliina Helm, TÜ taastamisökoloogia professor, vastutav täitja, aveliina.helm@ut.ee

Elvi Liiv, TÜ doktorant, andmete kogumine ja analüüs

Triin Reitalu, TÜ taastamisökoloogia teadur, andmete kogumine ja analüüs

Elisabeth Prangel, TÜ doktorant, soontaimed, kirjanduse ülevaated

Sigrid Ots, TÜ peaspetsialist, koordineerimine

Ain Kull, TÜ loodusgeograafia kaasprofessor, gaasivoogude mõõtmised ja analüüs

Martin Maddison, TÜ keskkonnatehnoloogia kaasprofessor, gaasivoogude mõõtmised ja analüüs

Ivika Ostonen, TÜ juureökoloogia professor, maa-aluse biomassi mõõtmised ja analüüs

Töö läbiviimist toetas lisaks Keskkonnainvesteeringute Keskusele (sihtfinantseerimisleping RE.4.06.22-0026) ka Eesti Teadusagentuur läbi personaalse uurimistoetuse rühmagrandi "Elurikkuse maastikuskaalas taastamine ja ajalised viibed ökosüsteemi funktsioneerimises" (PRG874) ning Haridus- ja Teadusministeerium läbi Kestliku maakasutuse tippkeskuse (TK232).



Eesti
Teadusagentuur



KLIIMAMINISTEERIUM



HARIDUS- JA
TEADUSMINISTEERIUM

Töö viitamine:

Helm, A., Liiv, E., Prangel, E., Kull, A., Maddison, M., Ostonen, I., Reitalu, T. (2024). *Eesti niiduökosüsteemide roll kliimamuutuste leevendamisel*. Keskkonnainvesteeringute Keskus. Tartu Ülikool.

Täname kõiki kes olid abiks nõu ja jõuga: Oscar Zárate-Martínez, Iris Reinula, Yui Fujinuma, Kristjan Rooni, Ene Kook, Kaari Uibomägi, Maia Pruuli, Hugo Prints, Anni Maria Pearson, Christofer Lodeson, Brita Lii Sei, Brigitta Sari, Troy Marchant-Whitehurst, Viktoria Mikša, Jaak Pärtel, Eva Orro, Liza Musienko, Raffael Somelar, Hanna Kirsipuu, Ursula Pajumäe, Mae Uri, Mart Meriste, Liis Kasari-Toussaint, Martti Vasar, Marko Kohv, Karin Kaljundi.

Töö koos lisade ja taustainfoga on kättesaadav ka TÜ maastike elurikkuse töörühma kodulehel <http://landscape.ut.ee>.

Esikaane joonis: Foto kullerkuppudega Kristiina Jürisoo (Tartu Ülikool), joonis Eesti temperatuurimuutustega perioodil 1850–2022 Ed Hawkins (National Centre for Atmospheric Science, University of Reading., National Centre for Atmospheric Science, UoR.

<https://showyourstripes.info/s/europe/estonia/all/>)

SISUKORD

Sisukord	3
Kokkuvõte.....	4
Sissejuhatus	4
Eesmärk	4
Metoodika.....	4
Tulemused.....	5
Sissejuhatus	6
Rohumaad.....	6
Rohumaade ja niitude roll kliimamuutuste leevendamisel	7
Süsinikuvaru hoidmine	7
Süsiniku sidumine	8
Eesti rohumaad	9
Pärandniidud	11
Pikaajalised kultuurrohumaad (püsirohumaad).....	12
Eesti niidud ja rohumaad kasvuhoonegaaside bilansis	13
Eesti kasvuhoonegaaside inventuur	13
Metoodika.....	16
Uurimisalade valik	16
Andmete kogumine välitöödel	19
Laboratoorsed analüüsid.....	26
Andmeanalüüs	27
Andmete säilitamine ja avalikustamine	29
Tulemused ja arutelu.....	30
Niiduökosüsteemide süsinikuvaru.....	30
Mullaelustik ja süsinikuvaru.....	35
Gaasivoogude mõõtmised	38
Mõõdetud gaasivood niitudelt	38
Gaasivoogude seos keskkonnaparaameetritega.....	39
Kirjandusviited.....	44
Lisad.....	48
Lisa 1	48
Lisa 2.....	49

KOKKUVÖTE

SISSEJUHATUS

- Erinevat tüüpi rohumaad, aga eriti just põlised pärandniidud, on väga olulised elurikkuse hoidjad, maastikulise mitmekesisuse tagajad ning erinevate looduse hüvede pakkujad.
- Kui rohumaade tähtsus elupaikade pakkumise seisukohast on laialdaselt uuritud ja tunnustust leidnud, siis niitude ja rohumaade rollile süsinikuvaru hoidmisel ja süsiniku sidumisel on vähe tähelepanu pööratud.
- Hiljutised tööd on esile tõstnud niiduökosüsteemide olulist rolli süsiniku stabiilsel maa-alusel ladestamisel ning tuvastanud mitmeid seni veel vähetuntud seoseid maa-aluse ja maapealse liigilise mitmekesisuse ning süsinikusidumise ja -varu hoidmise vahel.
- Eesti looduslikud rohumaad – niidud – on maakasutuse kasvuhooonegaaside inventuuris süsinikku siduvad ökosüsteemid, kuid täpsemad kohapealsed teadmised Eesti niitude süsinikuvarust, seda mõjutavatest teguritest ning kasvuhooonegaaside voogudest on puudu.
- Populaarse kliimameetmena on taas esile tõusnud metsastamine. Hästi on teada metsastamise kahjulikud mõjud niidukooslustega seotud elurikkusele ja looduse hüvedele, aga ei ole teada, kuidas mõjub metsastamine niiduökosüsteemide maa-alustele protsessidele, süsinikuvarule ja -sidumisele.

EESMÄRK

- Hinnata Eesti pärandniitude ja kultuurrohumaade mulla orgaanilise süsiniku (Corg) sisaldust ja mulla orgaanilise süsiniku varu 0–20 cm sügavusel (t/ha).
- Hinnata rohumaade maa-alusesse ja maapealsesse biomassi seotud süsinikuvaru.
- Hinnata mulla mikroelustiku (bakterid ja seened) mitmekesisust mulla ülemises 0–15 cm tükeldusega kihis.
- Valitud niidualadel mõõta kasvuhooonegaaside voogu ning hinnata CO₂ ja CH₄ voogude aastast bilanssi.
- Tuvastada võimalikke seoseid mulla elurikkuse ning süsinikuvaru vahel.

METOODIKA

- Rajati üle-eestiline uurimisalade võrgustik EcoGrid, mis hõlmas rohumaid ja niiduökosüsteeme üle Eesti, püüdes võimalikult esinduslikult katta kõik pärandniitude elupaigatüübid ja seisundiklassid.
- Lisaks pärandniitudele lisati võrgustikku võrdluseks ka põllumajanduslikus kasutuses olevad pikaajalised kultuurrohumaad (püsirohumaad), muud avatud niidusarnased alad (teeservad, liinialused, kunagised hüljatud kultuurrohumaad) ning erinevad metsatüübid.
- Andmeid koguti 2021.–2023. aasta vältel 412 uurimisalalt, neist 240 asusid erinevates pärandniidu elupaigatüüpides, 25 kultuurrohumaadel, 19 muudes avatud kooslustes, 122 metsades.
- Igal alal koguti mulla süsinikusisalduse jt mulla geokeemilise koosseisu proovid, lasuvustiheduse proovid ning DNA proovid bakterite ja mullaseente liigirikkuse ja koosseisu määramiseks. Ligikaudu pooltel aladel koguti maa-aluse ja maapealse biomassi proovid
- Igal alal kirjeldati ka erinevad keskkonnaparametrid (mullaga seotud näitajad, taimestiku ja maastiku struktuur jm) ja muud ökosüsteemi potentsiaalselt mõjutavad tegurid (kuivendamise mõju, majandamine jm).
- Kolmel niidul – Raadi pärisaruniidul, Tõrve lamminiidul ja Kärevere lamminiidul – hinnati kasvuhooonegaaside CO₂ ja CH₄ vooge ja ökosüsteemi CO₂ netovahetust kambrimeetodil.

- Andmete põhjal kirjeldati rohumaadel jt vaatlusaladel maa alla (muld ja juured ja risoomid 0–20 cm tõesedusega kihis), maapealsesse elusasse biomassi ning kulukihti seotud süsinikuvaru ning analüüsi seoseid süsinikuvaru ning erinevate keskkonnaparameetrite ja elurikkuse näitajate vahel.

TULEMUSED

- Eesti pärandniitudel ja kultuurrohumaadel on valdav osa süsinikust salvestatud mulda ja juurtesse ning märgatavalt väiksem osa maapealsesse biomassi.
- Pärandniitude mulla süsinikuvaru on suurem väiksema sademete hulgaga aladel ning kõrgema NDVI taimkatteindeksiga aladel.
- Ranniku- ja lammialadel on pärandniitude süsinikuvaru oluliselt suurem karjatavatel aladel, võrreldes hooldamata aladega, pärandniidu hooldus (nii karjatamine kui ka niitmine) oli seotud suurema süsinikuvaruga ka teistel pärandniidutüüpidel.
- Kasvuhoonegaaside mõõdetavad vood olid vaatlusperioodi jooksul väga kõikuvad. Kuna mõõtmised algasid suve keskel, jäi mõõteperioodiks vaid suve teine pool ja sügis, mil biomassi produktsioon oli vähenemas, mullahingamine aga püsis sooja ilma tõttu suur.
- Vaatlusperioodi jooksul olid vaadeldavad alad mõõdukad CO₂ allikad ja CH₄ sidujad, kuid täpsemateks järeldusteks on mõõtmisi vajalik jätkata nii, et kaetud oleks ka kiirema kasvu periood kevadel ja suve alguses.

SISSEJUHATUS

ROHUMAAD

Erinevat tüüpi rohumaad katavad globaalselt ligikaudu 52,5 miljonit km² ehk ca 40% kogu maismaa pinnast (White *et al.* 2000). Termin "rohumaad" hõlmab laias tähenduses kõiki ökosüsteeme, kus taimestik domineerivad rohttaimed Euraasia steppidest Põhja-Ameerika preeriast, Lõuna-Ameerika pampade ning Aafrika savannide ja rohtlateni. Rohumaade hulka kuuluvad ka erinevad tundraalad, puhmikutega kõrbelised ökosüsteemid, Euroopa poollooduslikud kooslused (pärandniidud) ning ka kultuurrohumaad ja -karjamaad. Lisaks on rohumaad ka puude ja põõsastega osaliselt kaetud, kuid tiheda rohukamaraga ökosüsteemid, sh parasvöötme puisniidud jt sarnased ökosüsteemid. Rohumaad on üle maailma väga olulised elupaigad paljudele liikidele, nad panustavad toidutootmisse ja kindlustavad inimkonda arvukate ökosüsteemiteenuste ehk looduse hüvedega (Zhao *et al.* 2020, Lindborg *et al.* 2023).

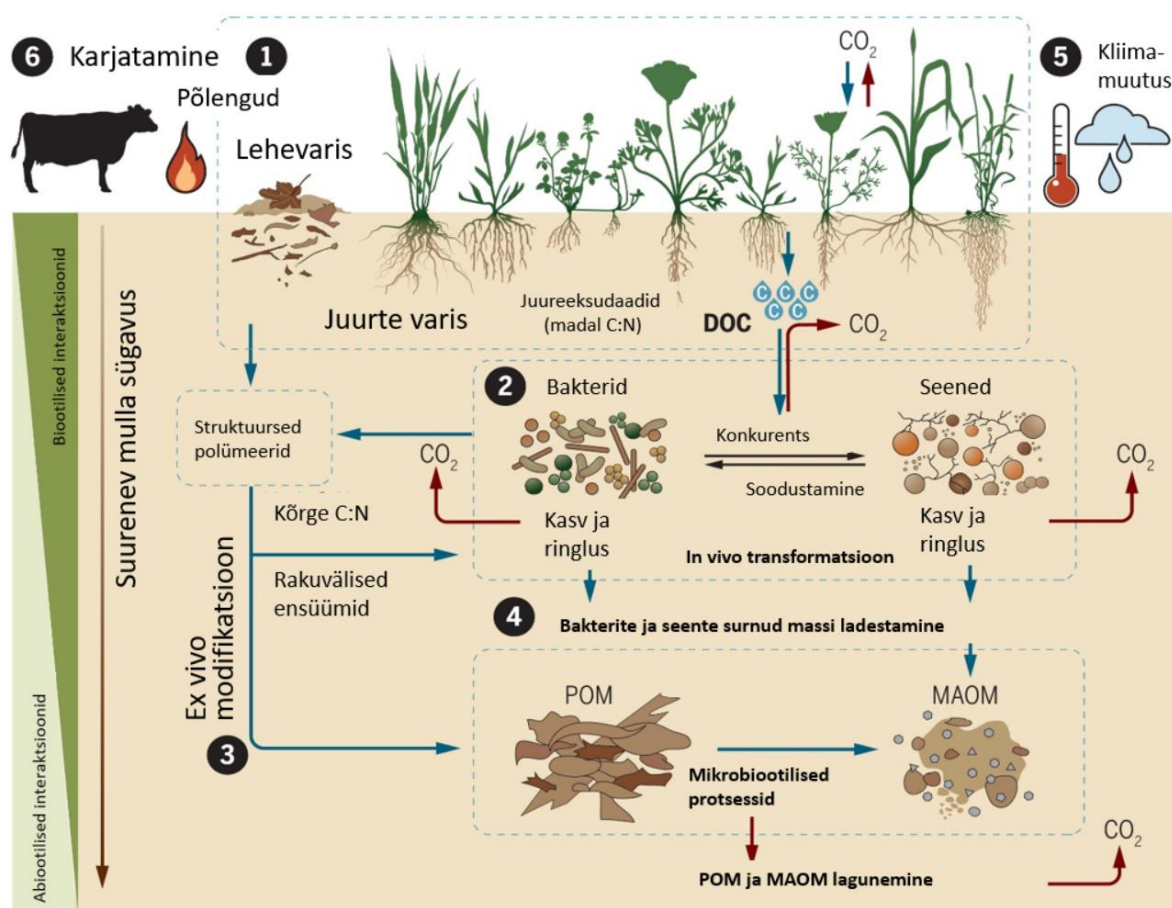
Rohumaadel on oluline roll globaalses süsinikuringes, nad on nii süsinikuvaru hoidjad kui ka süsiniku sidujad (Wang & Fang 2009, Dondini *et al.* 2023). Samas on seni rohumaade tähtsust kliimamuutuste kontekstis alahinnatud, kuna rohumaade süsinikust on suurem osa seotud maa alla ja seotud maa-aluste protsessidega, mida on olnud keerulisem kvantifitseerida kui puittaimedesse ja teistesse kergemini nähtavatesse ja mõõdetavatesse maapealsetesse struktuuridesse seotud süsinikku. Lisaks valitseb endiselt väärarusaam, et rohumaad ei ole loodusliku elurikkuse ja aineriingete kontekstis "väärtuslikud ökosüsteemid", hoolimata laialdastest teadmistest rohumaade suurest ökoloogilisest tähtsusest. Kui parasvöötme niidukoosluste looduslik mitmekesisus on hästi teada ja uuritud, siis lõunapoolseid rohumaid – savanne, steppe – peetakse sageli endiselt ekslikult mitmekesisuse poolest vaesteks ja kaitseväärtuseta kunagisteks degradeerunud metsadeks, kuigi tegu on iseseisva evolutsioonilise kujunemislooga, väga mitmekesiste ja unikaalse elustikuga ökosüsteemidega (Veldman, 2016). Seda võiks pidada teataval määral pimetähniks – n-ö niidupimeduseks – ehk niitudest teadlikkuse vähesuseks (*grassland awareness disparity* sensu Tölgyesi *et al.* 2022, vt ka Pausas & Bond 2019, Moyano *et al.* 2024), mille all kahjuks kannatavad ka paljud loodusteadlased, eriti just Lääne-Euroopas, kust ajaloolised niiduökosüsteemid ja nende uurimise võimalused on peaaegu hävinud. Näiteks Web of Science'i portaalis on metsade taastamise kohta avaldatud ligi kolm korda rohkem teadustöid kui rohumaade kohta. See kõik raskendab üldsuse ja poliitikakujundajate poolset tunnustust rohumaade ja niidukooslustega seotud kliimalahenduste osas (Tölgyesi *et al.* 2022).

Seetõttu pole üllatav, et ka kliimameetmetes pole rohumaid ja niite veel piisavalt tähtsustatud ja niitude säilimist ja hooldust kliimaeesmärkide seadmisel olulisena ei käsitleta. Vastupidi, niitude hävimisse panustavat avatud alade metsastamist käsitletakse kliimamuutusi leevendava meetmena, kuigi metsastamise pikajärgsed kliimamõjud on veel vähe teada. Kuigi maapealne biomass ja sinna seotud süsinik metsastamisel suureneb, kaasnevad põliste looduslike ja poollooduslike rohumaade metsastamisega soovimatud ning potentsiaalselt kahjulikud tagajärjed: kahaneb maapinna albeedo, väheneb elurikkus ja väheneb erinevate oluliste looduse hüvede pakkumine, muutub veerežiim, suureneb invasiivsete liikide leviku tõenäosus ning ohtu võib sattuda ka süsinikuvaru turvaline ja stabiilne talletamine maa all (Tölgyesi *et al.* 2022, Prangel *et al.* 2023, Veldman *et al.* 2019, Moyano *et al.* 2024). Niitude metsastamist - põlistele avatud ökosüsteemidele puude istutamist - ei tohi segi ajada taasmetsastamisega ehk hävinud ajalooliste metsade asemele taas metsade rajamisega, millel on hästi teada olevad positiivsed mõjud nii elurikkusele kui ka süsinikusidumisele.

ROHUMAADE JA NIITUDE ROLL KLIIMAMUUTUSTE LEEVENDAMISEL

SÜSINIKUVARU HOIDMINE

Rohumaade mulla orgaanilise süsiniku (Corg) varu sõltub süsiniku sisendite ja kadude tasakaalust. Peamine süsiniku sisend rohumaadel pärineb primaarproduktioonist ning jõuab mulda juureksudaatide ja juure- ning maapealse biomassi varise kaudu. Täiendav süsiniku sisend tuleb rohumaadele kariloomade sõnnikust. Süsiniku kadu toimub läbi hingamis-, lagunemis-, erosiooni-, leostumis- ja põlemisprotsesside ning läbi biomassi eemaldamise (Chang *et al.* 2015). Rohumaade ökosüsteemides liigub umbes 60% netoprimaarproduktioonist maa alla (Jackson *et al.* 2017), võrdluseks metsades ligikaudu 20%, põllumaadel ligikaudu 10%. Suur investeering maa-alustesse struktuuridesse aitab viia süsinikku rohkelt maa alla nii läbi keemiliste protsesside (alifaatsed ühendid, juureksudaadid) kui ka läbi otsese ladestumise (taimeosakeste liikumine mulda) (Bai & Cotrufo 2022) (**Joonis 1**). Rohumaadesse on seotud ligikaudu 20% (Puche *et al.* 2019) kuni 34% (Bai & Cotrufo 2022) globaalsest maismaa orgaanilise süsiniku varust, millest enamus, umbes 90%, on seotud maa-alusesse biomassi juurtesse ja mulda orgaanilise süsinikuna. Globaalselt on mullas salvestatud 3,5 korda rohkem süsinikku kui kõikides maapealsetes taimedes ning 2,3 korda rohkem kui atmosfääri CO₂ seotud süsinikku (Yang *et al.* 2019).



Joonis 1. Peamised orgaanilise aine ringlust ja süsinikuvaru kujunemist mõjutavad tegurid rohumaadel. (1) Taimestiku liigirikkus, mis mõjutab biomassi ruumilist paigutust, produktiivsust, juureksudaatide ja varise koosseisu; (2) mikroobipõhised rajad mineraalselt seotud orgaanilise aine (*mineral-associated organic matter*, MAOM) kujunemiseks ja ladestumiseks; (3) lahustamatu ehk hõljuva orgaanilise aine (*particulate organic matter*, POM) kujunemine ja ringe läbi surnud orgaanilise aine ladestamise; (4) rakuväliste ensüümide abil mikroobsesse nekromassi kogunenud süsinik; (5) kliimamuutuse mõjud (temperatuur, niiskus) orgaanilise aine sidumisse; (6) karjatamise ja põlengute mõju orgaanilise aine ladestamisele läbi sõnniku ja taimejäänuste, mulla kompakteerumise ja segamise (bioturbatsiooni). DOC – lahustunud orgaaniline aine. Joonis: Bai & Cotrufo 2022.

Juurte biomass ja koosseis mängib rohumaas ökosüsteemides olulist rolli mulla süsiniku sidumise protsessis. Kuna suurem osa rohumaade süsinikust on maa all ja sageli (eriti karjatatavatel aladel) seotud püsivamates mineraalidega seotud fraktsioonides, on rohumaade süsinik häiringute suhtes vähem tundlik kui süsinik suurema maapealse süsinikuvaruga ökosüsteemides. Kui välja arvata märkimisväärseid häiringuid mullakamaras, siis ülejäänud häiringutele – põlengutele, pöudadele, üleujutustele jm – on rohumaade mulda ja juurtesse salvestunud süsinikuvaru stabiilne ja vastupidav.

ÜRO Toidu- ja Põllumajandusorganisatsioon (FAO) hiljutise analüüsi põhjal (Dondini *et al.* 2023) lisandus 2010. aastal rohumaade muldadesse globaalselt 63,5 megatonni (Mt) süsinikku (C). Keskel läbi oli 2010. aastal rohumaade mulla (0–30 sentimeetri tusedusega kihis) orgaanilise süsiniku (*soil organic carbon*, Corg) varu looduslikel rohumaadel ca 53 tonni C/ha ja kultuuristatud rohumaadel 50 tonni C/ha. Suurimad süsinikuvarud olid parasvöötme rohumaadel, kus orgaanilise aine lagunemine on aeglane ja rohumaade tootlikkus kõrge, seal küündisid süsinikukogused 0–30 cm sügavusel isegi 160 tonnini hektari kohta (igihaljad põõsastikud boreaalses regioonis). Madalaimad Corg varud olid kuivade ja poolkuivade piirkondade rohumaade muldades (ca 25 t C/ha), mida iseloomustab vähene biomassi tootlikkus ja aeglane orgaanilise aine lagunemine, mis vähendab süsiniku sisendit mulda (Petri *et al.* 2010, Lorenz & Lal, 2018). FAO mudeli alusel olid globaalselt rohumaade 0–30 cm sügavusel oleva süsinikuvaru varieeruvust määravateks olulisimateks teguriteks piirkonna kliimaatilised tingimused, taimsest (ja loomsest) biomassist pärit süsiniku koguste sisend mulda ning mulla savisisaldus (Dondini *et al.* 2023).

Kõlli *et al.* (2007) on hinnanud, et Eesti rohumaade muldades on kokku seotud $39,9 \pm 8,0$ miljonit tonni orgaanilist süsinikku, sellest 72% bioloogiliselt aktiivsemas huumuskihis ning ülejäänud sügavamates mullakihtides (Kõlli *et al.* 2007). Põllumajandusuringute Keskuses läbi viidud uuringute alusel on Eesti põllumajanduslikud rohumaad süsiniku sidujad, soomuldadel keskmiselt 0,3 t/ha aastas, märgadel muldadel 0,03 t/ha aastas ja parasniisketel muldadel 0,24 t/ha aastas (Penu, 2014). Sama andmestiku põhjal hinnati mulla orgaanilise süsiniku varuks mullakihis 0–20 cm, sõltuvalt mõõtmisaastast ja põllumajanduse toetuskeemist parasniisketes muldades 69,1–71,6 t/ha, märgades muldades 118,5–118,9 t/ha ning soomuldades 431,2–433,4 t/ha.

SÜSINIKU SIDUMINE

CO₂ ja teiste kasvuhoonegaaside netobilanss (*Net Ecosystem Exchange*, NEE) on ökosüsteemi ja atmosfääri vaheliste süsinikuvoogude suhe ehk siis ökosüsteemist emiteeruva kasvuhoonegaasi ja seotava CO₂ suhe. Vastavat bilanssi arvutatakse alati atmosfääri suhtes, mistõttu negatiivse väärtuse korral on tegemist siduva süsteemiga ehk ökosüsteem on võimeline siduma rohkem süsinikku kui ta seda emiteerib; positiivse väärtuse korral on tulemus vastupidine. Süsinikuvood on erinevates elupaigatüüpides erinevad sõltuvalt ökosüsteemi omadustest, seisundist, mulla omadustest, veerežiimist ning majandamisest.

Rohumaade mullad võivad toimida nii süsiniku sidujate kui ka heitjatena. Tavapärast on heas seisundis ja madala intensiivsusega rohumaad süsinikku siduvad süsteemid, kuid maakasutuse muutuste tõttu on paljudel rohumaadel toimunud orgaanilise aine kahanemine intensiivse majandamise (ülekarjatamise, kündmise, häiringu) tulemusel. Intensiivse karjatamise ning mulla harimise tulemusel mulla süsinikusisaldus väheneb. Eriti kannatavad intensiivsema majandamise tõttu turvasmullad, mis kuivendades ja intensiivselt kasutades muutuvad olulisteks süsinikuallikateks ehk emiteerijateks. Turvasmuldade kuivendamisel ja harimisel intensiivistub mulla mineraliseerumine ja laguprotsessid ning mulla hingamise tulemusel eraldub nii CO₂ kui ka teised kasvuhoonegaasid (Kasimir-Klemedtsson *et al.* 1997). Mullas oleva süsiniku kadu saab vältida ning mullad taas süsinikusidujaks muuta tegevustega, mis soodustavad juurte ja taimede kasvu (nt mõõduka karjatamise, üleskündmise vältimise jm) ning aitavad süsinikul liikuda maa pealt maa alla, kus on võimalik seda siduda pikaajalistesse varudesse. Süsinikuvaru suurendavad tegevused võivad tuua ka märkimisväärset sotsiaalset, majanduslikku ja keskkonnaalast kasu, tagades majandatavate süsteemide stabiilsuse ning viljakuse.

Üldiselt on leitud, et heas seisundis looduslikud ja poollooduslikud ökosüsteemid (sh pärandniidud) on negatiivse bilansiga ehk süsiniku salvestajad ning positiivse bilansiga on pigem degradeerunud ning tugeva häiringu all kannatavad süsteemid nagu kuivendatud turvasmuldadel asuvad alad, intensiivselt haritavad põllumaad või lageraiealad. Ka niidukooslused võivad olla süsinikku emiteerivateks süsteemideks juhul, kui alad on intensiivselt karjatatud, perioodiliselt üles küntud ning eriti juhul, kui nad paiknevad kuivendatud turvasmuldadel (Maljanen *et al.* 2004). Lisaks mõjutavad ka kliima ning ilmastik erinevate ökosüsteemide võimekust süsinikku siduda. Näiteks pika põuaperioodiga aastatel on muidu süsinikku siduvad ökosüsteemid osutunud heitjateks (Thompson *et al.* 2020). Arvestades tulevikuprognosisega kliimamuutuste valguses, tuleks kindlasti aina enam tähelepanu pöörata CO₂ bilansi muutustele ning kuidas vastavaid muutusi puhverdada. Erisused süsiniku bilansis esinevad ka talve ja suveperioodi mõõtmiste vahel. Talveperioodil taimestik aktiivselt ei fotosünteesi ning süsiniku sidumise potentsiaal langeb. Samas iseloomustab suvist aktiivset kasvuperioodi tavaliselt vastupidine trend. Seetõttu on järelduste tegemiseks kindlasti vaja pikaajalised kasvuhoonegaaside bilansi mõõtmised.

Kirjanduse põhjal on erinevad niiduökosüsteemid CO₂ jt kasvuhoonegaaside bilansi mõttes siduja poolel, kusjuures aastasine ja aastatevaheline fluktuatsioon on küllalt suur. Näiteks 37-aastase perioodi (1982–2018) andmed näitasid, et Tiibeti platoo Alpi rohumaad on suvel tugevad süsinikusidujad, kuid teistel aastaaegadel nõrgad süsinikuallikad. Talvel suurenes rohumaade NEE oluliselt (0,14 g C m⁻² a⁻¹), mis tähendab kasvuperioodiväliselt CO₂-e eraldumise suurenemist. Kevadel, suvel ja sügisel tugevnes rohumaade süsinikuneeldumisvõime, näidates NEE langustrendi -0,18, -0,61 ja -0,13 g C m⁻² aasta kohta.

EESTI ROHUMAAD

Eesti rohumaad saab jagada eri tüüpideks ning ka rohumaade pindala arvestatakse mitmel moel, tulenevalt vajadusest ja väljakujunenud meetodikatest ning kasutatud rohumaade definitsioonist. Toome välja neli arvestust (**Tabel 1**).

Tabel 1. Eestis niitude-rohumaade pindala hindavad andmestikud ja nende kasutatavad definitsioonid.

Andmeallikas	Definitsioon	Pindala
1) Eesti topograafiline andmekogu (ETAK)	Looduslike rohtaimede kasvuala. Ala, mis ei sobi intensiivseks põllukultuuride kasvatamiseks, sealhulgas ka kasutusest ebarahuldava kuivenduse või ebasobiva asukoha tõttu välja langenud endine haritav maa. Puisniidud, mille esimese rinde võrade kattuvus on väiksem kui 50%.	266 106 ha (seisuga aprill 2024)
2) Statistiline metsainventuur (SMI)	Loodusliku rohukamaraga niitmis- või karjatamiskõlblik maa; haritava maa tunnused minetanud söödid ja endised kultuurrohumaad, põõsastikud ja puisniidud.	rohumaad 242 000 ha (±8%) (2022. aasta inventuur) põõsastikud 60 000 ha (±12,4%)
3) ELME2	Eesti inventeeritud pärandniidud, ETAK-i rohumaad ja muud lagedad alad (sh peamiselt trassialused ja teeservad), vähem kui 30 cm turbakihiga soostunud avatud alad (ETAK-i märgalad, kust on eemaldatud sood).	286 958 ha (2023. aasta seis)
4) LULUCF arvestus	Loodusliku rohukamaraga niitmis- või karjatamiskõlblik maa (mitte kultuurheinamaa ega -karjamaa). Rohumaade hulka arvatakse ka väiksema pinnaga, haritava maa tunnused minetanud söödid ja endised kultuurrohumaad, samuti põõsastikud ning niidetavad puisniidud, mille põõsa- ja puurinde liitus jääb alla 50%. Siia hulka ei	275 990 ha (2022. a inventuur)

	arvata ulatuslikumaid sööte ega kultuurrohumaid isegi siis, kui need on enamiku kultuurkamara tunnustest minetanud, kuid neid on võimalik uuesti kasutusele võtta erimeetmeid rakendamata. Puiskarjamaa liitusega 30–50% liigitatakse olenevalt peamisest maakasutusest, kas rohumaaks või metsamaaks.	
5) Väärtuslikud püsirohumaad	Tekkiv arvestus (inventuurid al 2024) põllumajandusmaadel olevate pikaajaliste ja loodusliku ilmega püsirohumaade kohta.	selgumisel

1) Eesti topograafiline andmekogu (ETAK) eristab rohumaid nähtusklassis “Lagedad (303) – looduslikud lagedad või rohttaimede kasvualad”. Selle nähtusklassi raames eristatakse tüüpe

- 10, rohumaad – looduslike rohttaimede kasvuala;
- 20, liivane ala – looduslik lahtise liiva või kruusaga kaetud ala;
- 30, muu lageda ala – muud lagedad alad;
- 40, klibune ala – looduslik, väikeste kividega (läbimõõt 1–50 cm) kaetud ala.

Põllumajanduslikud püsirohumaad arvestab ETAK haritava maa alla (klass 303).

Rohumaadeks loetakse ETAK-is alad, mis ei sobi intensiivseks põllukultuuride kasvatamiseks, sealhulgas ka kasutusest ebarahuldava kuivenduse või ebasobiva asukoha tõttu välja langenud endine haritava maa. PUISNIIDUD loetakse rohumaaks, kui esimese rinde võrade kattuvus on väiksem kui 50%. Muu lagedana kaardistatakse alad, mida ei saa kaardistada ühegi teise kõlvikuna, sh tehnovõrgu trass puistus, ehitus- ja karjääriala, ilutaimedeta liiklussaared ja eraldusribad välja arvatud teekatemärgistusega tekitatud alad. ETAK-i järgi on rohumaade pindala 266 106 ha.

2) Statistilise metsainventuuri (SMI) käigus hinnatakse maa kõlvikulist jaotust, sh looduslike rohumaade pindala põllumajandusmaa kategoorias. Looduslikuks rohumaaks loetakse "loodusliku rohukamaraga niitmis- või karjatamiskõlbulik maa; haritava maa tunnused minetanud söödid ja endised kultuurrohumaad, põõsastikud ja puisniidud." 2022. aasta SMI tulemustel oli looduslike rohumaade pindala 242 000 ha ($\pm 8\%$) ning põõsastike pindala 60 000 ha ($\pm 12,4\%$) ehk vastavalt 5,3% ja 1,3% Eesti maismaapindalast.

3) Projekti ELME2 käigus kaardistati Eesti ökosüsteemide katvus, kasutades erinevaid andmeallikaid, sh täiendades ETAK-i andmestikku erinevate andmebaaside andmetega ning kaugseireandmetega (Helm *et al.* 2023). Töö raames kaardistati Eesti erinevate niiduökosüsteemide ja põõsastike pindalaks 286 958 ha (ehk 7% Eesti maismaapindalast) (Tabel 1).

4) Eesti maakasutussektori (LULUCF) süsinikuvaru arvestuses kasutatakse rohumaade hindamiseks statistilise metsainventuuri SMI andmeid ning võetakse arvesse ka maakasutuse ajaloolist muutust. LULUCF-i rohumaad kuuluvad endas SMI-s määratud loodusliku rohumaad (RM) kategooriasse kuuluvad puudeta või kuni 50% katvusega puudega alad, hõredad põõsastikud (P) ja ka osad sood (S) (Tabel 2). LULUCF arvestuses on Eestis rohumaade pindalaks 2022. aastal 275 990 ha (vt ka peatükk Eesti kasvahoonegaaside inventuur).

5) Väärtuslikud püsirohumaad, vt järgmine peatükk.

Tabel 2. Statistilise metsainventuuri (SMI, veergudes) ja LULUCF (tulpades) arvestuse maakategoriate vastavus 2022. aastal (tuh ha). Allikas: Keskkonnaagentuur.

SMI ja LULUCFi maakategoriate vastavus

	Metsamaa	Põllumaa	Rohumaa	Märgalad	Asulad	Muu maa
Metsamaa (M)	2 111.25					
Metsata metsamaa (MM)	213.77					
Haritav põllumaa (v.a PK, PR) (PM)		670.73				
Püskikultuurid (PK)		3.75				
Pikaajaline kultuurrohumaad (PR)		307.52				
Põõsastik (P)	19.43		40.56			
Looduslik rohumaad (RM)	34.52		207.92			
Soo (S)	63.40		25.24	139.36		
Siseveed (SV)				263.77		
Turbakarjäärid (KT)				25.81		
Karjäärid (v.a KT) (K)					9.13	
Asulad (v.a T, TR) (A)					196.70	
Teed ja raudteed (T)					66.43	
Liinid, trassid (TR)					78.08	
Kasutuskõlbmatu mineraalmaa (KK)	4.38		2.28			38.22
Muu maa (Y)						11.76
Kokku	2 446.75	982.00	275.99	428.94	350.34	49.97

PÄRANDNIIDUD

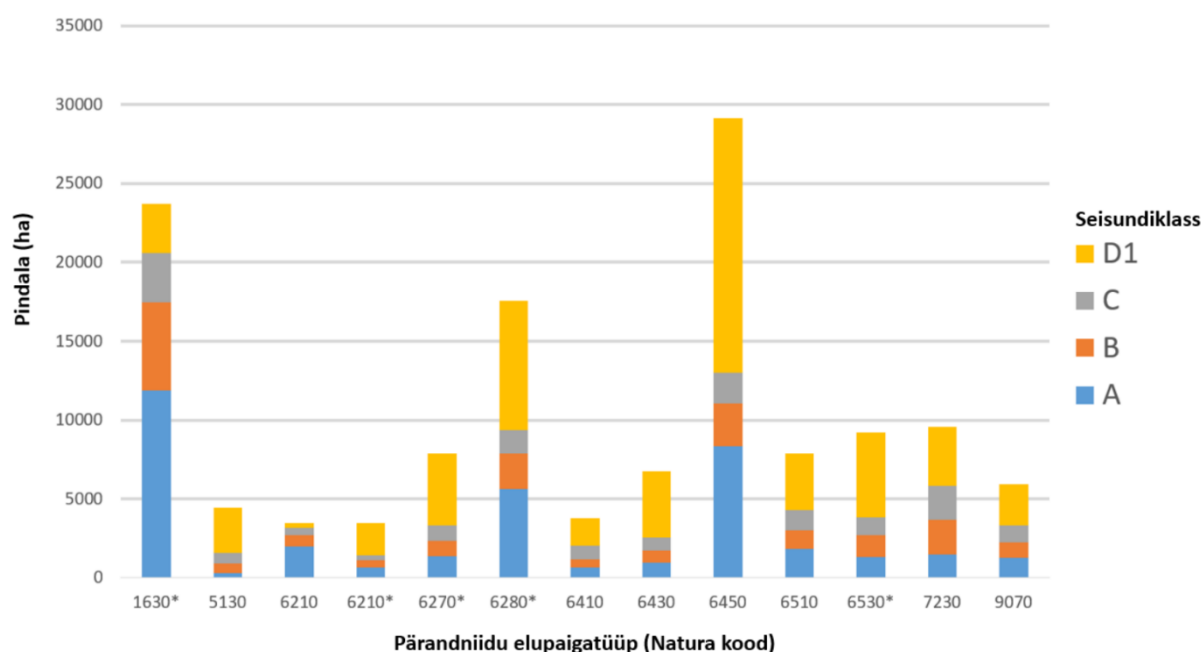
Pärändniidud (ka poollooduslikud kooslused, PLK-d) on loodusliku taimestikuga rohumaad, mida on traditsiooniliselt kasutatud karja- või heinamaadena, neid pole lähiajaloo küntud ja väetatud ning neile pole külvatud põllumajanduslike kultuurrohumaade liike. Eestis peamiselt levinud pärändniidud on loopealsed, aruniidud, lamminiidud, soostunud niidud, puisniidud, puiskarjamaad ja rannaniidud (**Tabel 3**). Ajaloolises maastikupildis olid sellised rohumaad väga laialt levinud, kuid praeguseks hetkeks on suurem osa poollooduslikest rohumaadest hävinud ning säilinud fragmendid vajavad hädasti kaitset või taastamist. Kui 20. sajandi algul katsid pärändniidud ligikaudu 40% Eesti maismaast, siis 2023. aasta seisuga leidub pärändniite ligemale 136 000 hektaril (Helm & Toussaint, 2020, Helm *et al.* 2023), millest hoolduses on ligikaudu 41 000 ha ja suurepärases-heas seisundis 60 800 ha (**Joonis 2**).

Pärändniidud on ühed liigirikkamad kooslused Eestis ning Laelatu puisniit kuulub maailma kõige liigirikkamate ökosüsteemide nimekirja (Wilson *et al.* 2012). Ökosüsteemi multifunktsionaalsus ehk võimekus pakkuda erinevaid ökosüsteemiteenuseid (ehk looduse hüvesid) korraga on tugevalt seotud liikide arvukusega rohumaadel, viidates, et liigirikkus täidab olulist rolli rohumaade ökosüsteemide toimimises (Prangel *et al.* 2023). Niidukooslustel on oluline roll elupaiga pakkumisel mitmetele olulisi funktsioone tagavatele taksonitele: tolmeldajatele, põllukahjurite looduslikele vaenlastele, mullaelustikule, lindudele jt. Eesti pärändniitude uuringud näitavad, aga et niitude hülgamine ja metsastamine vähendavad oluliselt liigirikkust erinevates taksonites ning põhjustavad mitmete ökosüsteemi hüvede kättesaadavuse langust (Helm *et al.* 2021; Prangel *et al.* 2023).

Tabel 3. Hoolduses ja taastamisel olevate pärändniitude pindala 2020. aasta seisuga (Pärändniitude tegevuskava, 2021) ning ELME2 hinnatud elupaiga kogupindala.

Pärändniit	Hoolduses ja taastamisel (ha)	Kogupindala (ha) (ELME2)
Rannaniit (1630*)	12 423	24 088
Kadastik (5130)	608	4495
Lubjarikas aruniit (6210, 6210*)	2576	7042

Lubjavaene aruniit (6270*)	1535	8011
Loopealne (6280*)	5376	18 636
Sinihelmikakooslus (6410)	750	4228
Niiskuslembeline kõrgrohustu (6430)	1215	6860
Luhaniit (6450)	9220	29 311
Aas-rebasesaba ja ürtpunanupuga niit (6510)	2673	8002
Puisniit (6530*)	1203	9359
Soostunud niit (7230)	2122	9687
Puiskarjamaa (9070)	1290	6086
KOKKU	40 991 ha	135 808 ha



Joonis 2. Pärändniitude seisundiklassid (A – suurepärase, B – hea, C – keskmine, D1 – vilets) ELME2 seisundikaardi alusel (Helm *et al.* 2023).

PIKAAJALISED KULTUURROHUMAAD (PÜSIROHUMAAD)

Püsirohumaad on rohumaad, kus heintaimede segu on kasvanud vähemalt viis aastat järjest ilma vahepealse maakasutuse muutmise ja üleskündmiseta. Püsirohumaad on lubatud uuendada heinaseemnete seguga ning kündmisele piirangut ei ole seatud – künda võib kasvõi igal aastal, püsirohumaaks klassifitseerumiseks on oluline vähemalt 5 järjestikustel aastal rohttaimede järjestikune kasvatamine. Eesti LULUCF arvestuses on pikaajalised kultuurrohumaad põllumaad arvestuses.

VÄÄRTUSLIKUD PÜSIROHUMAAD

Nii elurikkuse (kindlasti) kui ka süsinikuvaru säilimise seisukohast (tõenäoliselt) võib kündmine olla väga olulise negatiivse mõjuga, mistõttu on oluline püsirohumaade hulgast eristada ka need, mida on küntud ammu või on seda tehtud väga harva. Selleks on eristatud väärtuslikud püsirohumaad (VPR). Need on püsirohumaad, mida iseloomustab mitmekesine ja liigirikas looduslik taimekooslus. Tegu võib olla kunagise põllu või millalgi kultuurtaimedega külvatud rohumaaga, mida pole hiljuti (vähemalt viimase

10 aasta jooksul) uuendatud ega küntud. Looduslikust arengust kantuna on sellistele aladele ajapikku taas kujunenud looduslik ja liigirikas taimestik.

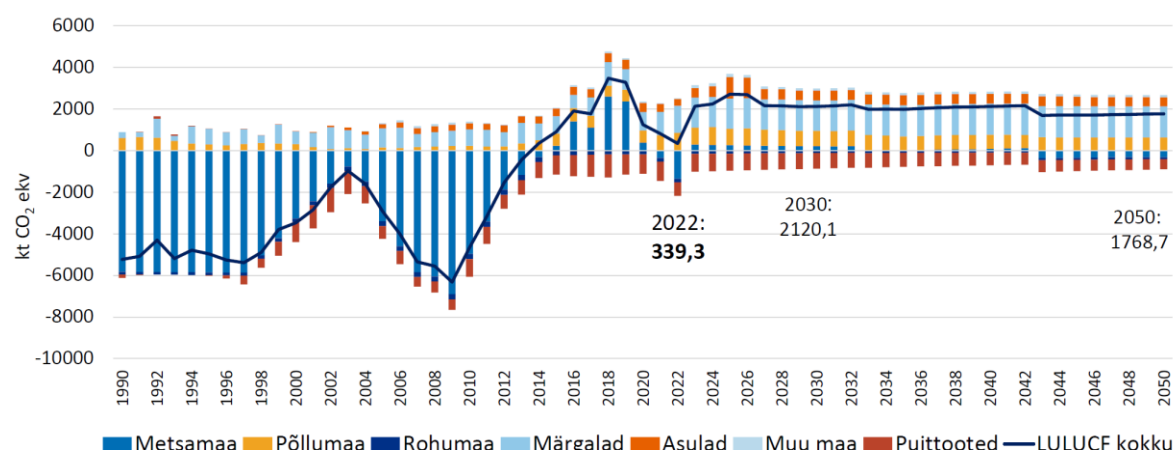
Püsirohumaad – nii tavalised kultuurrohumaad kui ka väärtuslikud püsirohumaad – on väga olulised põllumajandusmaastike osad, pakkudes elu-, toitumis- ja pesitsuspaiku mitmekesisele elustikule ning toetades erinevate ökosüsteemi hüvede pakkumist jätkusuutliku toidutootmise tagamiseks. Ka turvasmuldadel peaks eelistama küntavate põldude, aga ka küntavate püsirohumaade, asemel püsiva taimestikuga rohumaade rajamist. Püsitaimestikuga ja mitte küntavad alad aitavad põllumajandusmaastikes säilitada muldade elurikkust, süsinikuvarusid, toitaineid mullas ning vältida erosiooni (Helm *et al.* 2020).

EESTI NIIDUD JA ROHUMAAD KASVUHOONEGAASIDE BILANSIS

EESTI KASVUHOONEGAASIDE INVENTUUR

National Inventory Report (NIR) ehk kasvuhoonegaaside inventuur, mille aruanne inimtekkeliste kasvuhoone gaaside heite ja sidumise kohta tuleb esitada igal aastal Euroopa Komisjonile ja ÜRO kliimamuutuste raamkonventsiooni sekretariaadile. Inventuuris eristatakse rohumaid maakasutussektoris (LULUCF) ning rohumaade kategooria alla loetakse loodusliku rohukamaraga niitmis- või karjatamiskõlblik maa, söödid ja endised kultuurrohumaad, põõsastikud ning niidetavad puisniidud, mille põõsa- ja puurinde liitus jääb alla 50%. Kultuurrohumaad loetakse põllumaade kategooriasse.

Rohumaa kategooria hõlmab CO₂ heitkoguseid ja sidumist elusast biomassist, surnud puidust, mineraal- ja orgaanilisest mullast ning kaasab ka biomassi põletamisel tekkivad mitte-CO₂ heitmed. Rohumaad on kogu maakasutuse (LULUCF) sektoris metsamaa ja puittoodetega koos olnud ainsaks kasvuhoonegaaside sidumisse panustajaks (Joonis 3).



Joonis 3. Kasvuhoonegaaside heide (+) ja sidumine (-) maakasutussektoris aastatel 1990–2022 ning prognoositud heide perioodil 2022–2050 (kt CO₂ekv) (Kliimaministeerium 2024).

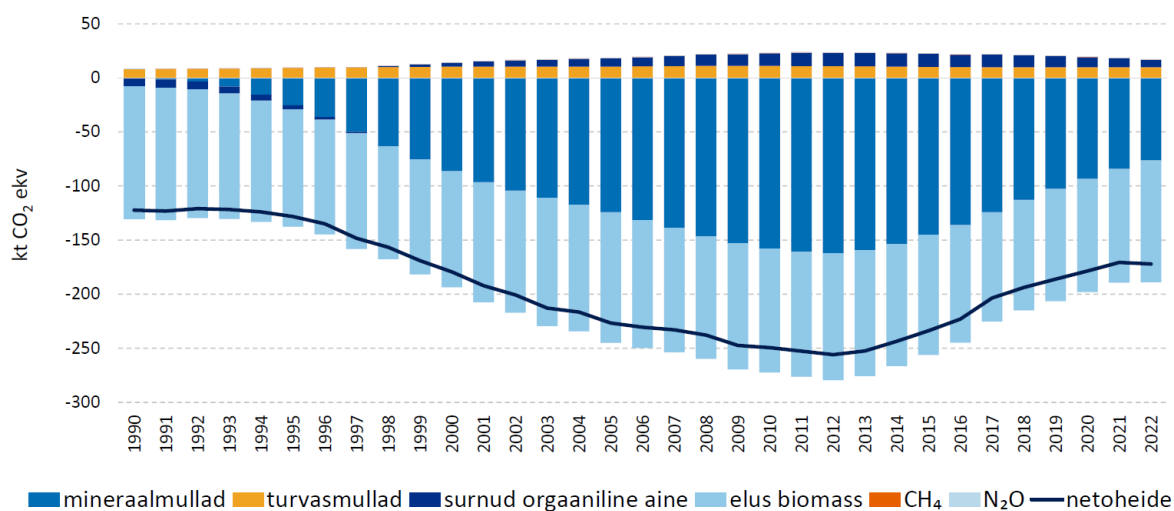
Eesti kasvuhoonegaaside inventuuris sidusid 2022. aastal 275 990 hektarit rohumaid 171,97 kt CO₂ ekv. (Joonis 4). Rohumaa kategooria on olnud CO₂ siduja alates 1990. aastast, peamiselt tänu süsiniku sidumisele elusasse biomassi neil rohumadel, mis on jäänud rohumadeks (*grassland remaining grassland*), mida 2022. aastal oli arvestuse järgi 275 870 hektarit), ning mineraalmuldadega aladel, mis olid pärast maakasutuse muutumist muutunud rohumadeks.

Rohumaade sidumise dünaamikat LULUCF-i arvestuses mõjutab rohumaade pindala muutus. Kui 1990. aastatel muutusid osad põllumaad rohumaadeks ja rohumaad kasvas, siis viimasel aastakümnel rohumaade pindala kahaneb, peamiselt on rohumaad muutunud metsamaaks ja põllumaaks (**Joonis 5**). Võrreldes 2021. aastaga oli 2022. aastaks rohumaade pindalades toimunud järgmised muutused:

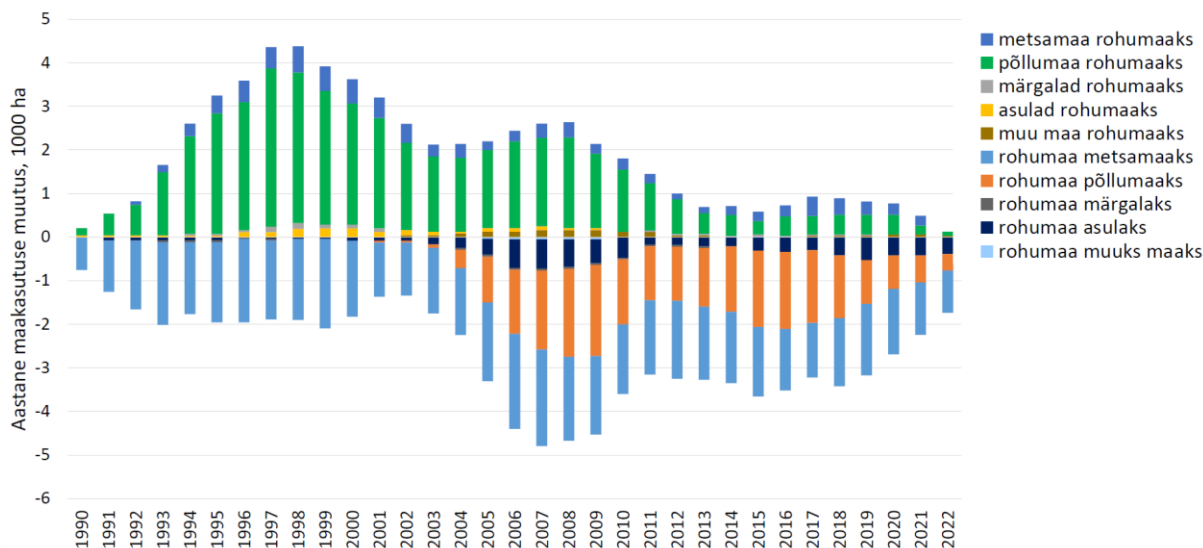
- ➔ 275 870 ha rohumaad jäi rohumaaks;
- ⬇️ 970 ha rohumaad liikus metsamaa alla;
- ⬇️ 380 ha rohumaad muutus põllumaaks;
- ⬇️ 390 ha rohumaad muutus asulateks;
- ⬆️ 90 ha põllumaad muutus rohumaadeks;
- ⬆️ 30 ha muud maad muutus rohumaadeks.

Võrreldes 2021. aastaga on kadunud 1740 hektarit rohumaid ning juurde tuli 140 hektarit.

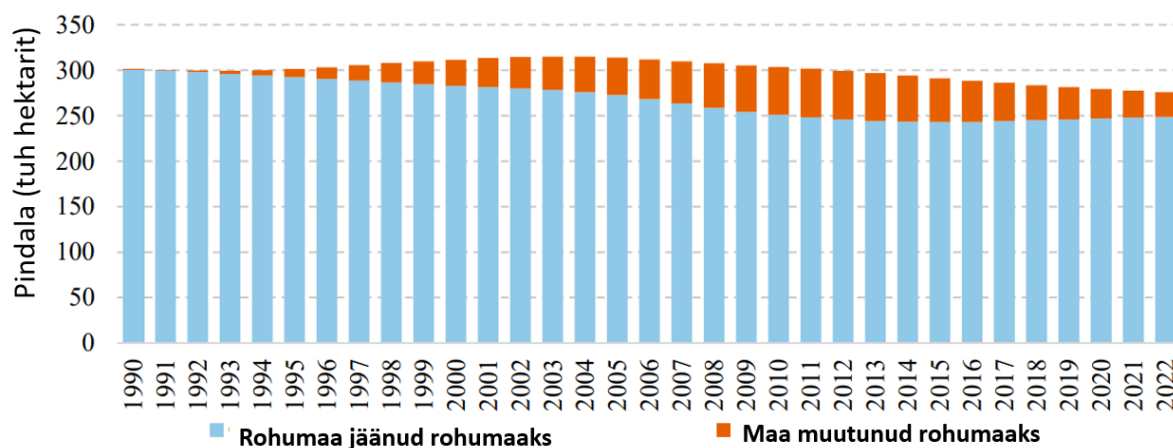
Rohumaa kategooria ruumiline osakaal oli kasvuhoonegaaside inventuuri alusel 2022. aastal 6,1% kogu Eesti pindalast. Sama arvestuse järgi on rohumaade pindala on viimase 35 aastaga vähenenud 8,5%, ligikaudu 301 040 hektarilt 1990. aastal 275 990 hektarini 2022. aastal (**Joonis 6**).



Joonis 4. Rohumaa maakategooria kasvuhoonegaaside bilanss: heitkogused (+) ja sidumine (-) aastatel 1990–2022, kt CO₂ekv (Kliimaministeerium 2024).



Joonis 5. Rohumaa pindala muutus Eesti maakasutussektori (LULUCF) maakasutuse arvestuses (tuh ha) (Kliimaministeerium 2024).



Joonis 6. Rohumaade pindala (tuh ha) muutus aastatel 1990–2022. (Kliimaministeerium 2024).

Rohumaade kasvuhoonegaaside arvestuses ei eristata erinevaid pärandniidu elupaigatüüpe, häiritumatest ja lühemaerialistest rohumaadest. Kultuurrohumaid käsitletakse eraldi põllumajandusmaade all ning kuivendatud turvasmuldade N₂O heide raporteeritakse põllumajandussektoris.

Kasvuhoonegaaside inventuuris rakendatavad andmed rohumaade pindala ja süsinikuvaru mõjutavate tegurite kohta pärinevad 1) statistilisest metsainventuurist (maakategoriate ja maakasutuse muutuste pindalad; mineraal- ja turvasmuldadel alade pindalad, kuivendatud turvasmuldade pindalad; puitse biomassi ja surnud puidu keskmised süsinikuvaru muutuste hinnangud); 2) Keskkonnaagentuurist (põlengualade pindala, põlengutes hävinud biomassi ja surnud orgaanilise aine kogus); 3) Päästeametist (põlengualade asukohad). Arvestuses kasutatakse IPCC 2006. aasta meetodilist juhendit (IPCC 2006a). Hinnatakse süsinikuvaru aastast muutust ja põlengutest tekkivat CH₄ ja N₂O emissiooni. Süsinikuvaru muutust elusas biomassis ja surnud puidus hinnatakse SMI alusel varises (peale metsamaa muutumist rohumaaks) Rootsi kasvuhoonegaaside inventuuri väärtuste alusel (NIR 2023) ning mineraalmuldades (rohumaaks muutunud aladel) Kölli *et al.* 2009 ja Kölli *et al.* 2010 analüüside põhjal. Kuivendatud turvasmuldade jaoks rakendatakse IPCC vaikeväärtusi (IPCC 2006b).

METOODIKA

Projekti raames hinnati erinevate niiduökosüsteemide (pärändniitude) ja rohumaade (sh kultuurrohumaade) mulda seotud orgaanilise süsiniku sisaldust, süsinikuvaru 0–20 cm sügavusel, maa-alusesse ja maapealsesse biomassi seotud süsinikku ja mulla elurikkust mulla pindmises (0–15 cm) kihis. Igal alal hinnati ka erinevaid keskkonnaparameetreid (mullaparameetrid, taimestiku ja maastiku struktuur jm) ning koos mulla elurikkuse (bakterid, seened) näitajatega uuriti nende seoseid niiduökosüsteemide süsinikuvaru ja seisundiga. Valitud aladel hinnati ka kasvuhoonegaaside CO₂ ja CH₄ vooge ja ökosüsteemi CO₂ netovahetust kambrimeetodil.

UURIMISALADE VALIK

Projekti eesmärkide täitmiseks moodustati koostöös Eesti Teadusagentuuri uurimistoetusega PRG874 "Elurikkuse maastikuskaalas taastamine ja ajalised viibed ökosüsteemi funktsioneerimises" (RESTFUNC) üle-eestiline seirepunktide (edaspidi ka "uurimisalad") võrgustik **EcoGrid**. EcoGrid seirepunktid katsid niiduökosüsteeme üle Eesti, püüdes võimalikult esinduslikult katta kõik pärändniitude elupaigatüübid ja seisundiklassid (projekti ELME2 ökosüsteemide seisundiklasside jaotuse alusel; Helm *et al.* 2023) ning tagada ka erinevate Eesti regioonide esindatus. Lisaks niiduökosüsteemidele lisati seirepunktide võrgustikku võrdluseks ka põllumajanduslikus kasutuses olevad kultuurrohumaad, muud avatud niidusarnased alad (teeservad, liinialused, hüljatud kunagised kultuurrohumaad) ning erinevad metsatüübid (**Tabel 4**).

Uurimisalade esmane valik oli kameraalne, tuginedes ELME baas- ja seisundikaardile (Helm *et al.* 2023), Eesti topograafilise andmekogu andmekihtidele (Maa-amet 2023), Maa-ameti värsketele ja ajaloolistele ortofotodele, Maa-ameti üle-eestilise laserskaneerimise (LiDAR) abil moodustatud taimkatte kõrgusmudelile, ajaloolisele taimkattekaardile (Laasimer 1965) ning niuduinventuuridel (Pärändkoosluste Kaitse Ühing, Keskkonnaamet) koostatud alakirjeldustele. Lisaks seisundile, elupaigatüübile ning regionaalsele katvusele oli uurimisalade valikul oluliseks kriteeriumiks ka ala ligipääsetavus. Suurem osa kaardil valitud eelvalikualadest püüti paigutada rohkem kui 200 meetrit, kuid lähemal kui 500 meetrit lähimast teest, tagamaks mõistlik ajakulu aladele pääsemisel. Ka Eesti väiksemad saared jäeti valimist välja.

Igal kaardianalüüsi abil määratud eelvalikualal käis välitöömeeskond, kes kohapeal otsustas, kas tegu on uurimusse sobiva alaga ning kas kaardipealsed määrangud elupaigatüübi ja seisundi osas vastavad tõele. Kui ala oli hävinud (nt üles küntud) või oli seisund oluliselt erinev kui eeldatud (nt heas seisus mets oli maha raiutud), otsiti läheduses taas kaardiandmeid kasutades uus ala.

Välitööd kestsid 2021., 2022. ja 2023. aastal juuni algusest septembri lõpuni, välitöömeeskondi oli kokku 11, kuid suurema osa andmetest kogusid 3 kaheliikmelist meeskonda. Enne andmete kogumisele asumist koolitati kõik meeskonnad (**Joonis 7**).

Andmeid koguti 2021–2023. aasta vältel 412 uurimisalalt, neist 240 asusid erinevates pärändniidu elupaigatüüpides, 25 kultuurrohumaadel, 19 muudes avatud kooslustes, 122 metsades ning 5 soodes (**Joonis 8, Tabel 4**). Hilisemates analüüsides soodest pärit andmeid ei kasutatud.

Igal uuritaval rohumaal hinnati Natura elupaik (või selle puudumine) kas varasemate inventuuri andmete põhjal (EELIS) või välitööde käigus. Kokku hõlmas uuring 12 Natura elupaigatüüpi ning märgi ja kuivasid kultuurrohumaad. Statistiliseks analüüsiks elupaigad grupeeriti vastavalt keskkonnaningimuste sarnasusele. Pärändniitudest moodustus 8 gruppi, millele lisati täiendavalt kuivad ja märjad kultuurrohumaad. Gruppid on esitatud **tabelis 1**.

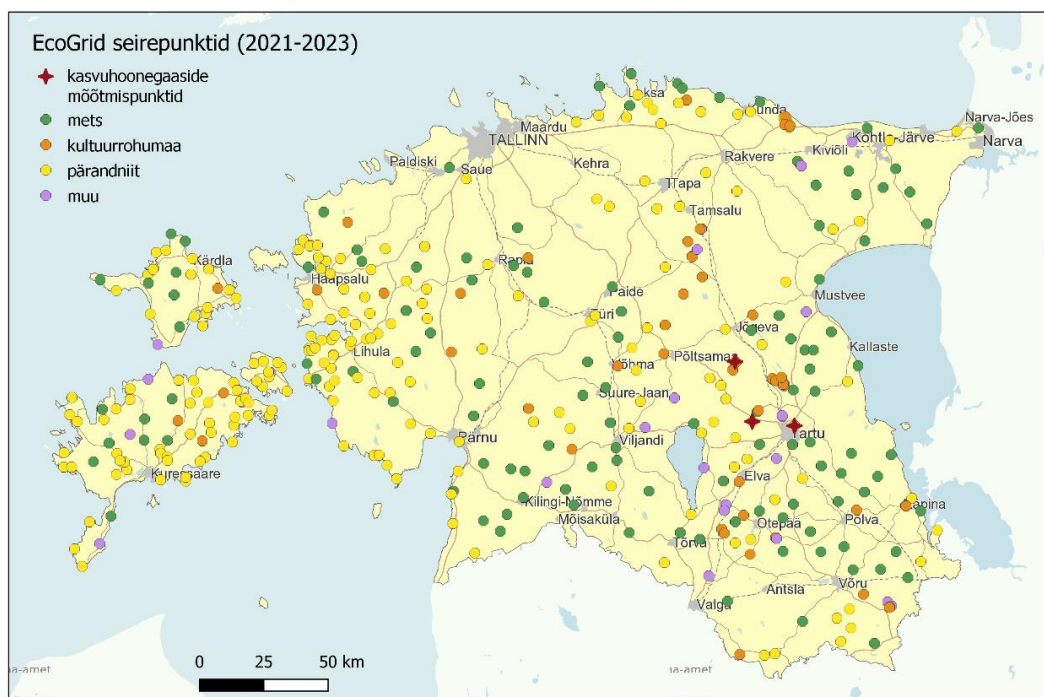


Joonis 7. Välitöörühmade koolituspäev 2022. aastal ning tööks vajalikud materjalid. Fotod Aveliina Helm, Maia Pruuli.

Tabel 4. Uurimisalad elupaigatüüpide ja seisundiklasside kaupa.

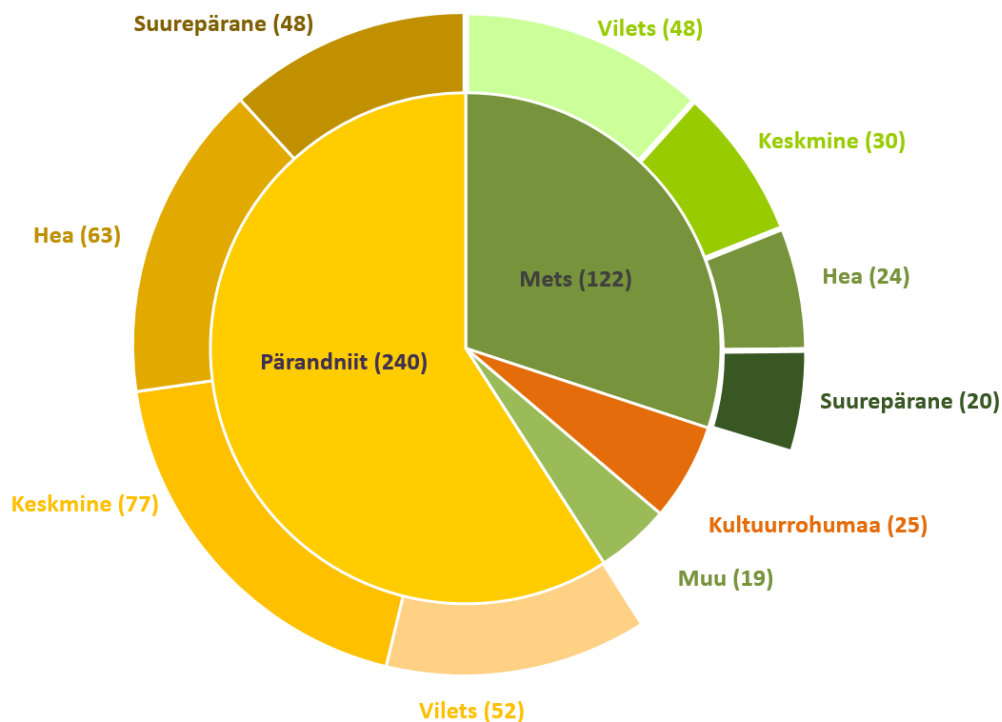
	Suurepärane	Hea	Keskmine	Vilets	KOKKU
Pärandniidud ja Natura elupaigakood	48	63	77	52	240
<i>Lamminiidud, servaniidud (6450, 6430)</i>	10	8	11	9	38
<i>Loopealsed, kadastikud (6280*, 5130)</i>	7	15	15	12	49
<i>Lubjarikkad aruniidud (6210(*))</i>	9	8	8	3	28
<i>Lubjavaesed aruniidud (6270, 6510)</i>	3	7	9	4	23
<i>Puiskarjamaad (9070)</i>	4	2	3	3	12
<i>Puisniidud (6530*)</i>	8	10	15	14	47
<i>Rannaniidud (1630*)</i>	6	8	8	3	25
<i>Soostunud niidud (6410, 7230)</i>	1	5	8	4	18
Kultuurrohumaad					25
<i>Kuivad kultuurrohumaad</i>					10
<i>Märjad kultuurrohumaad</i>					15
Muud					19
<i>Muud avatud kooslused</i>					19
Metsad	20	24	30	48	122
<i>Kõdusoometsad</i>	3	3	5	6	17
<i>Laanemetsad</i>	3	1	1	7	12
<i>Loometsad</i>	2		1	4	7
<i>Muud metsad</i>	1			4	5
<i>Nõmmemetsad</i>	1		2	1	4

Palumetsad	4	6	9	6	25
Rohusoometsad	1		2	3	6
Salumetsad	2	4	3	7	16
Samblasoometsad	1	4	3		8
Soovikumetsad	2	6	4	10	22
Sood		2	3		5
Sood		2	3		5
KOKKU					412



Joonis 8. EcoGrid võrgustiku uurimisalad (seirepunktid). Erinevat värvi punktidega on tähistatud uurimisala tüüp. Punasega on tähistatud kasvuhoonegaaside mõõtmispunktid.

Koosluse ökoloogilist seisundit hinnati metsadel ja pärandniitudel, erinevaid seisundiklasse (“suurepärane”, “hea”, “keskmine”, “vilets”) püüti kajastada võrdset, kuid tulenevalt kohapealsetest ümbermäärangutest tuli sisse mõningane varieeruvus. Metsade puhul oli enim viletsas ja keskmises seisus alasid, niitude puhul heas ja keskmises seisus alasid (**Joonis 9**).



Joonis 9. Uurimisalade jaotus erinevate elupaikade vahel ning metsade ja pärandniitude seisundiklasside jaotus. Sulgudes on toodud uurimisalade arv vastavas elupaigas ning seisundiklassis.

ANDMETE KOGUMINE VÄLITÖÖDEL

KESKKONNATINGIMUSTE KIRJELDAMINE

Igas seirepunktis määrati 30-meetrise raadiusega ala, kust koguti mullaproovid geokeemilisteks analüüsideks, mulla lasuvustiheduse proovid, maa-aluse ja maapealse biomassi proovid, mullaproovid DNA-analüüsideks ning täideti välitöövorm (**Lisa 3**) taimestiku ja ökosüsteemi üldiste näitajate kirjeldamiseks. Igal uurimisalal hinnati elupaiga üldist seisundit ja taimkatte struktuuri, tuvastati soontaimede, sammalde ja samblike katvus, alal esinevate puude ja põõsaste liigid ning arvukamad rohttaimede liigid. Alal hinnati kuivendamise mõju, kraavide olemasolu, varise, lamapuidu ja püstisurnud puidu kogust, vanade puude esinemist, rohttaimestiku kõrgust, õitsevate liikide esinemist, õite rohkust, inimtekkeliste häiringute esinemist ning ala hooldust (karjatamine, niitmine, hooldamata). Alates 2022. aastast koguti infot ka rohttaimestiku, puude, põõsaste, püstisurnud puude ja lamapuidu biomassi kohta. Puude ja põõsaste biomassi hindamiseks piiritleti ala keskpunkti ümber 10-meetrise küljepikkusega ruut, kus määrati kõigi ruutu jäävate puude ja põõsaste liik, kõrgus, puude rinnasdiameeter ja põõsaste läbimõõt, surnud puidu ja lamapuidu tüüp (okas- või lehtpuu), pikkus, läbimõõt ja kõdunemise aste. Lisaks määrati kändude esinemise, kändude diameetri ja kõduastmed ning mõõdeti mulla huumushorisondi tusedus mullapuuri abil viiest juhuslikult valitud kohast.

MULLAPROOVIDE KOGUMINE, LASUVUSTIHEDUSE MÄÄRAMINE, DNA-PROOVIDEKS MATERJALI KOGUMINE

Mulla geokeemiliste parameetrite (org C sisaldus, pH, P, K) hindamiseks kogusime igal uurimisalal mullaproove 2021. aastal viiest ning 2022. ja 2023. aastal kolmest juhuslikult valitud punktist seirepunkti ümber oleval 30-meetrisel alal. Ühelt uurimisalalt võetud mullaproovid segati kokku üheks ca 300 grammiseks seguprooviks, mis läks hiljem mulla geokeemia ja süsinikusisalduse hindamiseks laborisse.

Mulla lasuvustiheduse proovid võeti 2021. aastal võeti viiest juhuslikust punktist 0–10 cm sügavuselt ning 2022. ja 2023. aastal kolmest punktist 0-10 cm ja 10-20 cm sügavuselt, kasutades selleks spetsiaalset 100 cm³ mahtuvusega silindrit. Lasuvustiheduse proovide kogumise meetodika tugines Eurostat maakasutuse raamistiku [LUCAS](#) seiresüsteemi protokollil (Fernández-Ugalde *et al.* 2017).

Mullaelustiku DNA proovid koguti DarkDivNeti protokollil (Pärtel *et al.* 2019) järgides. Sama meetodikat on kasutatud ka teistes Tartu Ülikooli töörühmade läbiviidud projektides (põllumuldade analüüsides, Tartu mikroobide analüüsides, loopealsete taastamise tulemlikkuse analüüsides). DNA analüüsiks vajalik mullakogus koguti juhuslikult valitud kümnest punktist prooviala 30-meetrise raadiusega allalt, kasutades ühekordseid kummikindaid, plastknuga mullapinna kraapimiseks ning plastiklusikat proovi võtmiseks. Igast punktist võeti viis teelusikatäit mulda, ühelt proovialalt pärinev muld pandi kokku ja segati minigrip-koti sees raputamise ja mudimise teel läbi. Pärast segamist jagati muld kolme proovikotti, kaks DNA analüüsiks (proov ja varuproov) ning üks hilisemaks võimalikuks rasvhapete analüüsiks. Välitööpäeva lõpus, kui oli võimalik, kuivatati proove 24 tundi õhu käes, seejärel lisati proovile silikageeli ning edasine kuivatamine toimus õhukindlalt silikageeliga seda vastavalt vajadusele vahetades. Kui eelnev õhu käes kuivatamine polnud võimalik, lisati silikageel koheselt proovile.

MAAPEALSE JA MAA-ALUSE BIOMASSI KOGUMINE

Aastatel 2022 ja 2023 läbi viidud välitöödel koguti kõigilt 172 uurimisaladelt rohttaimestiku, sammalde ja varise biomassi proovid. Biomassi proovid koguti uurimisala 30 meetri raadiuses kolmest 20 x 20 cm ruudust. Ruudud valiti nii, et nad esindaks võimalikult hästi ala tüüpilist rohttaimestiku koosseisu. Igast ruudust lõigati kääridega kogu sama aasta jooksul kasvanud taimede biomass võimalikult maapinna lähedalt ning ruudul olev varis-kulu ja samblad, mis kõik paigutati eraldi paberkottidesse ja tähistati vastavalt uurimisalale ja ruudule. Pärast maapealse biomassi eemaldamist ja mullapinna puhastamist võeti igast ruudust maa-aluse biomassi hindamiseks aheneva südamikuga (lõikeotsa $d = 3,4$ cm) mullapuuriga ligikaudu 20 cm sügavuseni mullamonoliidid (**Joonis 4**). Mullamonoliidid pakendati kilekottidesse ja hoiustati kuni juurte väljapesemiseni külmikus 4 °C juures. Juurte biomass eraldati mullast väljapesemise teel professor Ivika Ostoeni laboris. Suuremad juured eemaldati pesemisel käega pesuveest. Väiksemate juurte eraldamiseks kasutati pintsette ja kogu pesuvesi vaadati järkjärgult läbi. Eraldatud juured kuivatati ning kaaluti laborikaaluga täpsusega 0,01 g.

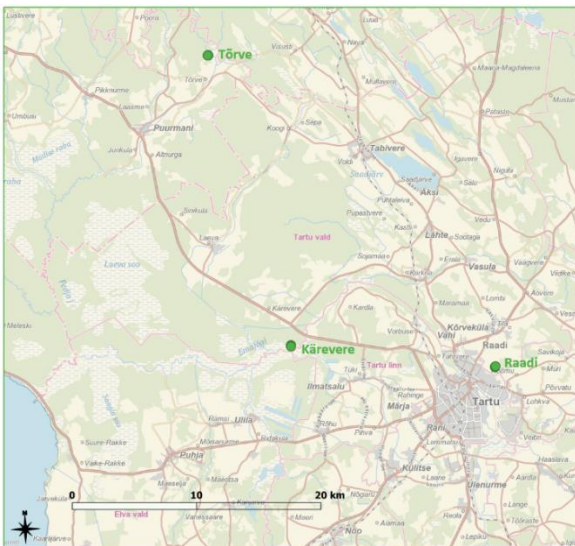
Maapealne biomass proov kuivatati esmalt toatemperatuuril, seejärel (kuid võimalusel juba kogumise ajal) sorteeriti proovid eraldi gruppideks: 1) kõrrelised ja lõikheinalised, 2) rohunid, 3) liblikõielised rohunid, 4) varis-kulu ja 5) samblad. Enne kaalumist kuivatati kõik kogutud biomassiproovid täiendavalt 60 °C juures 24 tundi. Proovid kaaluti laborikaaluga täpsusega 0,01 g. Kõik sorteeritud ja kaalutud proovid on hoiul Tartu Ülikooli Oecologicumi laos.



Joonis 10. Mulla huumushorisoni tuseduse hindamiseks kasutatud mullapuur (vasakul) ning maa-aluse biomassi proovide võtmiseks kasutatav mullapuur ja mullamonoliit.

CO₂ JA CH₄ VOOGUDE MÕÖTMINE

Kasvuhoonegaaside mõõtmisi ja andmete analüüsi viisid läbi Tartu Ülikooli keskkonnatehnoloogia kaasprofessor Martin Maddison ning TÜ loodusgeograafia kaasprofessor Ain Kull. Mõõtmised viidi läbi kolmel uurimisalal: Kärevere, Tõrve ja Raadi niidul (**Joonis 11**). Iga uurimisalale paigutati viis mõõtmispunkti, iga punkti vahele jäi ligikaudu 25 meetrit. Tõrve ja Kärevere niidul – mõlemad jõeäärsed lamminiidud olid mõõtmispunktid paigutatud piki ala niiskusgradienti. Kokku toimusid gaasimõõtmised 15 punktis, igasse punkti paigutati 17. juulil 2023 50 cm läbimõduga plastikust rõngas, mis jääb alale püsivalt ning millele asetatakse portatiivne gaasimõõtmisseade. Rõngas lõikas ca 20 cm sügavuselt läbi juured ning aitab vältida mullahingamise mõõtmisel mõõtmisala ümbritseva ala mõju.



Joonis 11. Kärevere, Tõrve ja Raadi kasvuhoonegaaside mõõtmise püsivaatlusalad.

Kärevere uurimisala (26.48354; 58.414518) on tüüpiline suur niiskus- ja produktsoonigradiendiga suurtõrreliste ja tarnade domineerimisega märg lamminiit (Natura 2000 elupaigatüüp 6450 – põhjamaised lamminiidud; Paal 1997 kasvukohatüüp 2.2.1.2.) Emajõe lammil (**Joonis 12**). Mõõtmispunktid paigutati piki niiskusgradienti Emajõe jõepoolsest niiskest lammialast kuni parasniiske

lammialani. Lamm on kevadeti ja aeg-ajalt ka sügiseti täielikult üleujutatav kõigi möötmispunktide ulatuses. Ala hooldatakse niitmise teel, 2023. aastal niideti ala ca nädal enne rõngaste panekut, kuid rõngastele planeeritud alad jäeti niitmata. Möötmispunktid niideti eraldi 2023. aasta septembris. 2024. aasta veebruari lõpus oli lamm täielikult üleujutatud.



Joonis 12. Karevere märg lamminiit, valged punktid tähistavad CO₂ ja CH₄ voogude mõõtmise püsivaid mõõtmispunkte. Parempoolne foto 17. juuli 2023 (Aveliina Helm). Ortofoto 2022 kevad, Maa-amet.

Tõrve uurimisala (26.384015; 58.626526) on väike liigirikas niiske aruniidu ja niiske lamminiidu segatüüp (Natura 2000 elupaigatüüp 6270 ja 6450; Paal 1997 niiske pärisaruniidu kasvukohatüüp 2.1.4.2 ja niiske lamminiidu kasvukohatüüp 2.2.1.1.) Pedja jõe ääres. Tegu on kaldapõndakuga, kus punktid 1–3 on kuivemas kohas, 4 ja 5 aga pidevalt niiskemas kohas (**Joonis 13**). Ala kirjeldamiseks sobib kõige paremini lammiaasa nimetus, niidul on kitsas kaldalamm ja kõrgem, liivasem keskklamm, mis omakorda jõest kaugemale liikudes muutub taas liigniiskeks terrassiäärseks luhaks. 2024. aasta veebruari lõpus on ala täielikult üle ujutatud.



Joonis 13. Tõrve niiske lamminiit, valged punktid tähistavad CO₂ ja CH₄ voogude mõõtmise püsivaid mõõtmispunkte. Parempoolne foto 17. juuli 2023 (Aveliina Helm). Ortofoto 2022 kevad, Maa-amet.

Raadi uurimisala (26.7625464; 58.3937982) on liigirikas parasniiske aruniit (Natura 2000 elupaigatüüp 6270* – liigirikkad aruniidud lubjavaesel mullal; Paal 1997 kasvukohatüüp 2.1.4.2., niiske pärisaruniidu kasvukohatüüp) Tartu külje all Raadi looduskaitsealal (**Joonis 14**). Tegu on rohukasvult küllalt lopsaka, kuid liigirikka alaga parasniiskel kuni märjal mineraalmullal, kohati gleimullal.



Joonis 14. Raadi pärisaruniit, valged punktid tähistavad CO₂ ja CH₄ voogude mõõtmise püsivaid mõõtmispunkte. Parempoolne foto 17. juuli 2023 (Aveliina Helm). Ortofoto 2023 kevad, Maa-amet.

Ökosüsteemi CO₂ bilansi (NEE, *Net Ecosystem Exchange*), hingamise (R_{eco} , *Ecosystem Respiration*), süsiniku fikseerimise (GPP, *Gross Primary Productivity*) ning CH₄ voo otseseks mõõtmiseks kasutati suletud dünaamilist kambrimeetodit (**Joonis 15**). Pleksiklaasist läbipaistva kambriga (65 L) oli ühendatud LI-7810 CH₄/CO₂/H₂O gaasianalüsaator (OF-CEAS e *Optical Feedback – Cavity Enhanced Absorption Spectroscopy*, LI-COR Inc.). Ökosüsteemi hingamise mõõtmiseks kaeti kamber valgust mitteläbilaskva valge kangaga.

Gaasimõõtmised toimusid portatiivse kambriga 17. juulist kuni 26. novembrini 2023 kaks korda kuus, kokku toimus kümme mõõtmiskorda. Mõõtmised jätkuvad 2024. aastal.

Samaaegselt gaasimõõtmistega mõõdeti igal gaasimõõtmise sessioonil kõigis mõõtmispunktides portatiivsete käsiseadmetega järgmised näitajad:

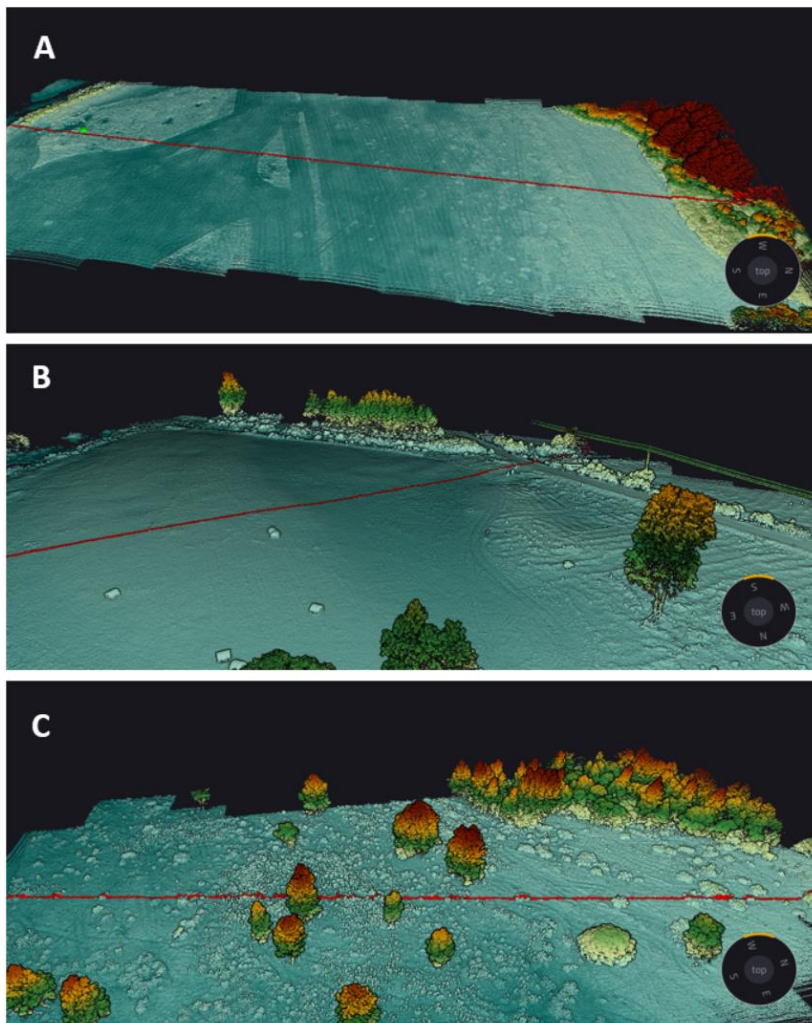
- mullatemperatuur viielt sügavuselt (0–5, 10, 20, 30, 40 cm) seadmega *Comet S0141 + PT1000, Comet System Ltd.*;
- volumeetriline mullaniiskus 0–5 cm sügavuselt seadmega *Decagon ProCheck + GS3, Decagon Device Inc.*;
- fotosünteesiline aktiivne kiirgus (PAR) seadmega *Apogee μ Cache + SQ-500 SS Full-spectrum Quantum/Sq-610 ePAR, Apogee Instrument.*

Aastase gaasivoo hindamiseks kasutati Tõrve hüdroloogiajaamast ja Tõravere meteoroloogiajaamast mõõdetud õhutemperatuuri andmeid (Keskkonnaagentuur) ning PAR-i (sensor Li-Cor 190SL, LI-COR Inc.) andmeid Laiuse taastatud raba uurimisalalt (andmed Ain Kull).



Joonis 15. CO₂ ja CH₄ voogude mõõtmised 2023. aastal. Fotod Martin Maddison.

Igal gaasimõõtmise alal sai koostöös Tartu Ülikooli rakendusgeoloogia teaduri Marko Kohviga koostatud drooniga LiDAR-mõõtmise teel detailne maapinna mudel, mis võimaldab hiljem hinnata kogu ala biomassi (puid, põõsaid, rohttaimestikku) (Joonis 16).



Joonis 16. Kärevere (A), Tõrve (B) ja Raadi (C) niidu LiDAR mõõdistus. Punane joon tähistab kasvuhoonegaaside mõõtmispunktide transekti. Joonised Marko Kohv.

GAASIVOOGUDE AASTASE BILANSI HINDAMINE

Süsiniku bilansi tulemus sõltub ökosüsteemi hingamise ja taimedesse süsiniku sidumise vahest (Elsgaard *et al.* 2012; Järveoja, 2015):

$$NEE = R_{eco} - GPP \quad (1)$$

Süsiniku sidumise mudelil on hüperboolne seos fotosünteetiliselt aktiivse kiirgusega ning efektiivse temperatuuri indeksi Gaussi kõvera (normaaljaotuse) jaotusega (Tuittila *et al.*, 2000; Riutta *et al.*, 2007; Maddison *et al.*, 2021):

$$GPP = \frac{GP_{max} \times PAR \times \alpha}{GP_{max} + PAR \times \alpha} \times e^{-0.5 \times \left(\frac{ETI - ETI_{opt}}{ETI_{tol}} \right)^2} \quad (2)$$

kus GPP - süsiniku sidumise mudel; GP_{max} - maksimaalne süsiniku fikseerimine suurima päikesekiirguse intensiivsuse korral (CO_2 -C $mg\ m^{-2}\ h^{-1}$); PAR - fotosünteetiliselt aktiivne kiirgus ($\mu mol\ m^{-2}\ s^{-1}$); α - valguse kasutamise efektiivsuse konstant; ETI_{opt} - optimaalne efektiivne temperatuuri indeks, kus GPP väärtus tuleb suurim ($^{\circ}C$); ETI_{tol} – efektiivne temperatuuri indeksi kõikumise ulatus, mil GPP on maksimaalne ($^{\circ}C$).

Ökosüsteemi hingamine on eksponentsiaalne funktsiooniga seotud mullatemperatuuriga ning efektiivse temperatuuri indeksi Gaussi kõvera (normaaljaotuse) jaotusega (Tuittila *et al.* 2000; Riutta *et al.* 2007; Maddison *et al.* 2021):

$$R_{eco} = R_{ref} e^{E_0 \left(\frac{1}{T_{ref} - T_0} - \frac{1}{T_{10cm} - T_0} \right)} \times e^{-0.5 \times \left(\frac{ETI - ETI_{opt}}{ETI_{tol}} \right)^2} \quad (3),$$

kus ER - süsiniku sidumise mudel koos keskkonnaparameetritega; R_{ref} - süsiniku hingamine võrdlus temperatuuri juures (CO_2 -C $mg\ m^{-2}\ h^{-1}$); E_0 - aktivatsioonenergia (K); T_{ref} - võrdlus temperatuur, $10\ ^{\circ}C$; T_0 - bioloogiliste protsesside aktiveerumise temperatuur, $-46,021\ ^{\circ}C$; $T_{10\ cm}$ - mullatemperatuur 10 cm sügavusel ($^{\circ}C$); ETI_{opt} - optimaalne efektiivne temperatuuri indeks, kus GPP väärtus tuleb suurim ($^{\circ}C$); ETI_{tol} – efektiivne temperatuuri indeksi kõikumise ulatus, mil GPP on maksimaalne ($^{\circ}C$).

GAASIVOOGUDE ANDMETÖÖTLUS JA -ANALÜÜS

Andmeanalüüsiks kasutati programme STATISTICA ja Microsoft Office Excel. MS Exceli Solveri paketti kasutati süsiniku sidumise ja ökosüsteemi hingamise funktsioonide väikseima veaaruutude summa järgi konstantide leidmiseks. Kõikidel juhtudel oli olulisusnivoo $\alpha = 0.05$.

Mudeli efektiivsust (MEF, *modelling efficiency*) hinnati ökosüsteemi hingamise ja süsiniku sidumisega taimedesse mõõdetud ja mudeldatud väärtuste suhetega ehk jääkidega, testides nende vahelist korrelatsiooni (R^2) (Elsgaard *et al.* 2012, Järvepõld, 2020), mida iseloomustab valem 4:

$$MEF = 1 - \left(\frac{\sum(y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum(y_i - \bar{y}_i)^2} \right) \quad (4),$$

kus y_i on mõõdetud väärtust; \hat{y}_i mudeldatud väärtus ja \bar{y}_i mõõdetud väärtuste keskmine.

Efektiivsete temperatuuride indeks (ETI) arvutamiseks kasutati Tõrve hüdroloogia jaamas ja Tõravere meteoroloogiajaamas mõõdetud õhutemperatuuri. ETI iseloomustab taimedele kättesaadavat soojushulka. Näitaja arvutatakse ööpäeva keskmise õhutemperatuuri üle $+5\ ^{\circ}C$ jääva osa summeerimisel vegetatsiooni algusest kevadel kuni vegetatsiooni lõpuni sügisel.

LABORATOORSED ANALÜÜSID

MULLAANALÜÜSIDE LÄBIVIIMINE

Mullaparametrite määramiseks laboris kasutati õhkuiva ja sõelutud mulda. Mullaproovidest määrati elementanalüsaatoril üldsüsinik (*total carbon*, TC%), üldine anorgaaniline süsinik (*total inorganic carbon*, TIC%), üldorgaaniline süsinik (*total organic carbon*, TOC%), lahustunud lämmastik (*dissolved nitrogen*, DN, mgN/kg), lahustunud orgaaniline süsinik (*dissolved organic carbon*, DOC, mg C/kg), mulla happelisus (pH) ning fosfor (P, mg/kg) ja kaalium (K, mg/kg). TC, TIC ja TOC sisaldus on määratud elementanalüüsi teel vastavalt standardmetoodikale ISO 10694, analüüsiks kasutati aparatuuri *Vario TOC, Solids Module; 950° C, Elementar GmbH, Germany*.

DN ja DOC analüüs tehti õhkuivale mullale H₂O lahuses 1:10 vahekorras (m/V). Analüüsimiseks filtreeriti proov läbi 0,45µm poorsusega filtri. Analüüs tehti elementanalüsaatoriga *Vario TOC, TNb detector; 850° C, Elementar GmbH, Germany*. Määramispiir (*limit of quantification*, LOQ) ehk analüüdi sisaldus proovis, mida metoodika võimaldab 95%-lise tõenäosusega määrata: TC = 1%, TIC = 1%, DOC = 1%, DN = 20 mg/kg, DOC = 20 mg/kg.

Mulla geokeemia lühianalüüs (pH, P, K) viidi läbi Põllumajandusuringute Keskuse akrediteeritud laboris. Mulla kaaliumi (K) ja fosfori (P) sisaldus määrati Mehlich III protokoll järgi ning pH määrati KCl lahuses (ISO 10390).

Lasuvustiheduse proovide kaalumiseks kuivatati õhkuivad proovid täiendavalt 105 °C juures 2-tunniste tsüklitega kuni proovi kaalu stabiliseerumiseni. Keskmiselt võttis proovi kaalu stabiliseerumine 8–10 tundi. 2021. aastal proovid sõeluti 1 mm sõelaga ning 2022. ja 2023. aastal kasutati 2mm sõela. Sõelumise käigus eemaldati kõik jämedamad juured ja kivid. Kõikide juurte ja kivide ruumala mõõdeti uputamise meetodil. Kuivatatud ja sõelutud proovid kaaluti. Netomassi (M; (ilma kivide ja juurteta ahjukuiva proovi kaal, g) ja netoruumala (V) (proovi ruumalast lahutatud kivide ja juurte ruumala, cm³) kasutati lasuvustiheduse (D) arvutamiseks kasutades valemit $D = M/V$.

MULLA DNA ERALDAMISE JA ANALÜÜSIMISE METOODIKA

Mullaproovidest määrati taksonispetsiifiliste praimeritega bakterite ja seente liigirohkus. Analüüsiks vajaliku DNA eraldamiseks eraldati kogutud ja segatud mullaproovist 5 g (kuivkaal) mulda ning DNA eraldati *PowerMax Soil DNA Isolation Kit*-i (MO BIO Laboratories, Inc., Carlsbad, CA, USA) kasutades. Eraldatud DNA sekveneerimisel kasutati mullaseente tuvastamiseks kolme praimeri kombinatsiooni fITS7, fITS7o ja ITS4 (Vahter *et al.* 2022). Bakterite tuvastamiseks kasutati päripidiseks lugemiseks 16S ja ja äraspidiseks lugemiseks 926R praimeereid (Parada *et al.* 2016) (**Tabel 5**). Sekveneerimisel tehti PCR amplifikatsioon, DNA proovi kvaliteedi kontroll ja amplikonide raamatukogu ettevalmistus (*amplicon library preparation*). Sekveneerimine viidi läbi Illumina MiSeq platvormil ettevõttes Novogene (UK) Company Limited.

Tabel 5. DNA analüüsides elustikurühmade tuvastamiseks kasutatud praimerid.

Elustikurühm	Päripidine praimer	Praimeri järjestus (päripidine, 5'-3')	Äraspidine praimer	Praimeri järjestus (äraspidine, 5'-3')
seened	Kombinatsioon fITS7 ja fITS7o	Kombinatsioon GTGARTCATCGAATCTTTG ja GTGAATCATCRAATYTTTG	ITS4	CCTCCGCTTATTGATATGC
bakterid	16S	GTGYCAGCMGCCGCGGTAA	926R	CCGYCAATTYMTTTRAGTT

Unikaalsed DNA järjestused klasterdati taksonoomilisteks üksusteks (OTU-deks) järjestuste 99% sarnasuse alusel. Vähem kui 10 järjestusega OTU-d eemaldati andmestikust. Esindusjärjestused blastiti vastu SILVA andmebaasi (Quast *et al.* 2012). Järgnes filtreeritud andmete taksonoomilise info võimalikult täpne määratlemine.

Hindasime bakterite elutegevuse ja ökosüsteemse rolli seost mullaparameetrite ja keskkonnanäitajatega funktsionaalsete rühmade kaupa. FAPROTAX andmebaasi (Louca *et al.* 2016) abil eristasime potentsiaalselt olulised funktsionaalsed rühmad, eraldades kemotroofid, kemoheterotroofid, lämmastikuringes osalejad, süsinikuringes osalejad ja parasiitsed bakterid. Rühmitus järgis artikli Vasar *et al.* (2022) meetodikat, kus analüüsiti mulla mikroorganismide funktsionaalsete rühmade globaalset ja elupaigalist jaotust. Kõigist OTU-dest ligikaudu kolmveerandil siiski info funktsioonide kohta puudus.

Projekti käigus kogutud proovide välitööde ja laboratoorsete tööde meetodika (sh DNA analüüsid) järgivad standardseid meetodeid, mida kasutatakse nii Eestis kui ka mujal mulla seisundi ja elurikkuse näitajate hindamiseks. See teeb kogutud andmed võrreldavaks ka varasemate ja käimasolevate projektide tulemustega (nt projekt "Tartu - heade mikroobide linn", Kestliku maakasutuse tippkeskus, Maaeluministeeriumi projekt "Loodusliku elurikkuse säilitamine põllumajandusmaadel" jpt). Kasutatav proovivõtu meetodika ja mulla orgaanilise aine sisalduse analüüs teeb kogutud andmed võrreldavaks ka Eesti põllumuldade seirel kogutud andmetega. Gaasimõõtmiste meetodika võimaldab kogutud kasvuhoonegaaside bilansi andmeid võrrelda teiste kambrimeetodil läbiviidud analüüsidega, mida Eestis on seni läbi viidud peamiselt märgaladel ning metsades.

ANDMEANALÜÜS

Andmete puhastamine, teisendamine, kombineerimine ja statistiline analüüs viidi läbi programmi R abil (versioon 4.1.1, 2021-08-10; R Core Team, 2021).

Mulla süsinikuvaru arvutati kasutades orgaanilise süsiniku (TOC) hinnangut (%) ja lasuvustiheduse (D) väärtust (g cm^{-3}). Sügavusel 0–10 cm, on kõigilt aladelt hinnatud TOC ja lasuvustihedus, lisaks on 206 uurimisalal hinnatud lasuvustihedus sügavustel 10–20 cm. Süsinikuvaru arvutati tonnides hektari kohta (t ha^{-1}) nii ülemise 10 cm mullakihi jaoks kui ka ülemise 20 cm mullakihi jaoks. Ülemise 10 cm süsinikuvaru arvutati järgnevalt:

$$C_varu0-10cm = D0-10cm * 10 * TOC\%$$

Et laiendada süsinikuvaru hinnangut 20 cm sügavuseni, arvutati olemasolevate 10–20 cm lasuvustiheduse andmete (206 proovi) põhjal nelja gruppi jaotatud muldadele ("kuivad ja parasniisked mullad", "lammi- ja rannikumullad", "märjad mullad" ja "turvasmullad") lasuvustiheduse mediaanväärtused. Vastava mullagrupi mediaanväärtust kasutati 10-20 cm lasuvustiheduse andmetes puuduvate väärtuste asemel.

$$C_varu10-20cm = D10-20cm * 10 * TOC\%$$

Süsinikuvaru 0-20 cm sügavusel saadi 0-10 cm ja 10-20 cm varu hinnangu liitmisel:

$$C_varu0-20cm = C_varu10-20cm + C_varu0-10cm$$

Süsinikuvaru ja teiste mulla omaduste seoste illustreerimiseks kasutasime peakomponentanalüüsi (PCA).

Eesti pärandkoosluste süsinikuvaru mõjutavate tegurite selgitamiseks koostasime välitöödelt või andmebaasidest (kaardiandmed, satelliidiandmed) näitajad, mille võimalikku rolli on teaduskirjanduse põhjal näidatud.

- **Mulla veerežiim** – kolme tasemega faktortunnus (“kuivad ja parasniisked mullad”, “lammi- ja rannikumullad”, “märjad mullad”). Proovivõtukohta detailsed mullatüübid tuvastati Kmoch *et al.* (2021) mullakaardilt. Detailsed mullatüübid koondati kolme laia mullatüübi kategooriasse¹ sarnaselt Kõlli *et al.* 2009: automorfseid mullad (edaspidi “kuivad ja parasniisked mullad”), hüdro-morfseid mullad (edaspidi “märjad mullad”) ning “lammi- ja rannikumullad” (**Tabel 6**).
- **Kuivendus** – kahe tasemega faktortunnus (“kuivenduse mõjuga”, “kuivenduse mõjuta”). Hinnati Eesti põhikaardi vooluveekogude kihi põhjal. Kui 100 m raadiuses uuringuala ümber esines “kraavid” või “peakraav” loeti ala kuivenduse mõjuga alaks, ülejäänud alad loeti kuivenduse mõjuta aladeks.
- **Temperatuur** (aasta keskmine temperatuur, °C) – WorldClim andmebaasist (Fick & Hijmans 2017).
- **Sademed** (aasta sademete hulk, mm) – WorldClim andmebaasist (Fick & Hijmans 2017).
- **Sademete hooajalisus** – kuude sademete hulga standardhälbe ja keskmise suhe – WorldClim andmebaasist (Fick & Hijmans 2017).
- **Ajalooline maakasutus** – kahe tasemega faktortunnus (“ajalooline rohumaad”, “ei ole ajalooline rohumaad”) leiti, kasutades digitaliseeritud ENSV taimkattekaarti (Laasimer, 1965), mis peegeldab rohumaade ulatust 20. sajandi esimeses pooles. Kuna taimkattekaardi täpsus on suhteliselt madal, kasutati “ajaloolise rohumaad” hindamiseks rohumaad proportsiooni uurimisala ümbruses 300 meetri raadiuses. Kui 300 meetri raadiuses oli vähemalt 60% ajaloolist rohumaad, loeti uurimisala “ajalooliseks rohumaaks”.
- **Ajalooline rohumaade sidusus** – rohumaade protsent ENSV taimkattekaardi järgi 1000 meetri raadiuses.
- **Tänapäevane rohumaade sidusus** – poollooduslike rohumaade protsent 1000 m raadiuses ELME2 kaardi alusel.
- **Maastiku looduslikkus** – heas seisundis looduslike ja pool-looduslike koosluste protsent 1000 m raadiuses ELME2 kaardi alusel.
- **NDVI** – taimkatte indeks "*Normalized Difference Vegetation Index*" Maaameti kaardikihtide põhjal.
- **Puurinde katvus** – protsentides 30 meetri raadiuses proovivõtualal, hinnati välitöödel.
- **Põõsarinde katvus** – protsentides 30 meetri raadiuses proovivõtualal, hinnati välitöödel.
- **Samblarinde katvus** – protsentides 30 meetri m raadiuses proovivõtualal, hinnati välitöödel.
- **Rohurinde katvus** – protsentides 30 meetri raadiuses proovivõtualal, hinnati välitöödel.
- **Kõdukihi katvus** – protsentides 30 meetri raadiuses proovivõtualal, hinnati välitöödel.
- **Hooldus** – kolme tasemega faktortunnus (“karjatamine”, “niitmine”, “hooldus puudub”) hinnati välitöödel.
- **Rohumaad seisund hinnang** – kahe tasemega faktortunnus. Seisundi hinnang ELME2 kaardi põhjal jagati kahte seisundisse (“hea” seisundiklassid A ja B, “halb” seisundiklassid C ja D).

¹ Vt ka http://entsyklopeedia.ee/artikkel/eesti_mullastik

Tabel 6. Mullatüüpide jaotus suurematesse gruppidesse vastavalt veerežiimile analüüside läbiviimiseks.

Automorfsed (kuivad ja mullad)	parasniisked mullad	Hüdmorfsed mullad (märjad mullad ja turvasmullad)	Lammi- ja rannikumullad		
paepealsed rendsiinad	(Kh)	glei-rendsiinad	(Gk)	lammimullad	(A)
rähksed rendsiinad	(K)	leostunud (Go) leetjad (GI) gleimullad		sooldunud rannikumullad	(As)
leostunud ja leetjad mullad	(Ko, Kl)	küllastunud ja küllastumata gleimullad	(G(o)), ((G(I))		
kahkjad mullad	(LP)	leetunud gleimullad	(LkG)		
leetunud mullad	(Lk)	leede-gleimullad	(LG)		
leedemullad	(L)	turvastunud gleimullad	(GI)		
gleistunud rendsiinad	(Kg)	turvastunud leet- gleimullad	(LGI)		
gleistunud leostunud ja leetjad mullad	(Kog), (Klg)				
gleistunud kahkjad mullad	(LPg)	Turvasmullad*: madalsoomullad	(M)		
gleistunud leetunud mullad	(Lkg)	Turvasmullad*: siirdesoomullad	(S)		
gleistunud leedemullad	(Lg)	Turvasmullad*: rabamullad	(R)		

* *Turvasmullad eristati aeg-ajalt joonistel, kuid mitte mudelis liiga väikese vaatluste arvu tõttu. Mudelis arvestati neid märgade muldade hulgas.*

Et välja selgitada, millised ülaltoodud tunnused on rohumaa süsinikuvaruga statistiliselt oluliselt seotud kasutasime lineaarses mudelis uuritava tunnusest süsinikuvaru 0–10 cm hinnangut. Kuna süsinikuvaru ei olnud normaaljaotusega, kasutasime mudelis logaritmitud süsinikuvaru hinnangut. Testisime ka ruumilise autokorrelatsiooni esinemist ja proovivõtu aasta olulisust, aga kumbki ei olnud statistiliselt oluline. Kuna süsinikuvaru on erinevatel muldadel erinev, testisime lisaks tunnuste otsesele mõjule ka tegurite koosmõju mulla veerežiimi gruppidega. Statistiliselt oluliste kirjeldavate tunnuste välja selgitamiseks eemaldasime muutujaid mudelist ühekaupa vastavalt mudeli AIC väärtustele kasutades *step()* käsku ja tunnuste p-väärtusi. Lõplikus mudelis on ainult mulla süsinikuvaruga statistiliselt oluliselt seotud tunnused.

ANDMETE SÄILITAMINE JA AVALIKUSTAMINE

Kõik töö läbiviimisel kogutud andmed säilitatakse andmebaasis PlutoF. Kõiki andmeid jagatakse vajadusel asjakohaste asutustega: Kliimaministeeriumi, Keskkonnaameti ja Keskkonnaagentuuriga. Aruanne koos lisadega avaldatakse Keskkonnainvesteeringute Keskuse veebilehel ning maastike elurikkuse töörühma [kodulehel](#).

TULEMUSED JA ARUTELU

NIIDUÖKOSÜSTEEMIDE SÜSINIKUVARU

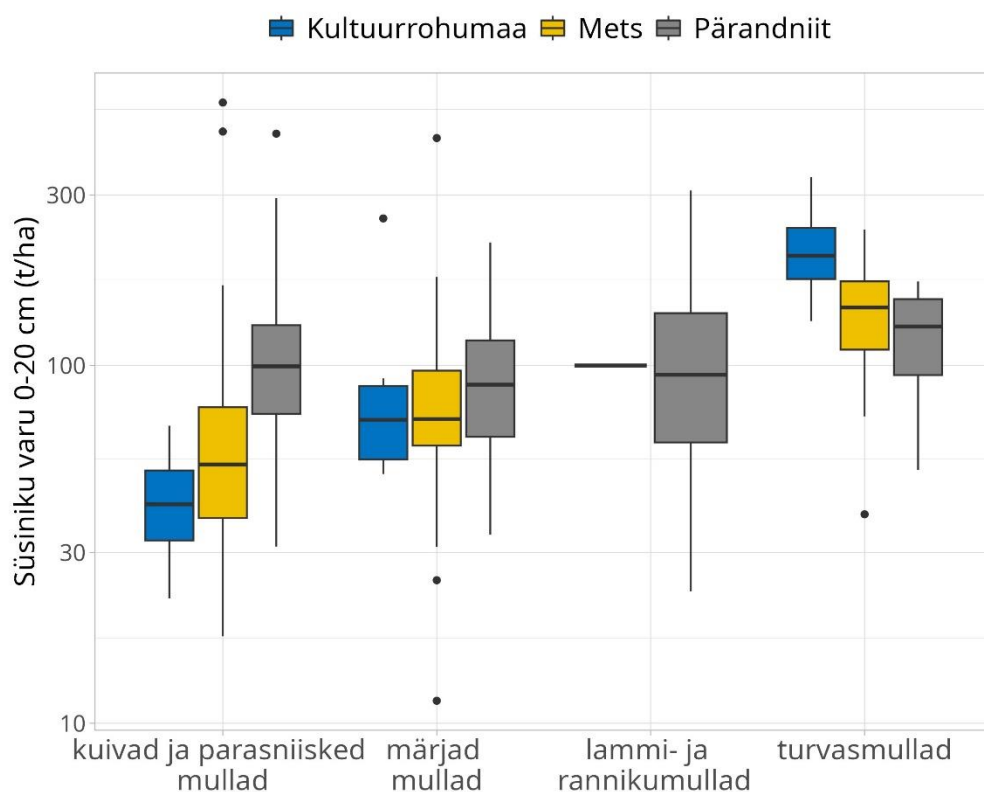
SÜSINIKUVARU MULLAS

Üle erinevate pärandniidu elupaigatüüpide oli 020 cm mullakihti talletatud 107 t süsinikku hektari kohta, kuid oluline on vastavaid väärtusi vaadata sarnaste mullatüüpide või ökosüsteemitüüpide kaupa, kuna varieeruvus on väga suur. Pärandniitudel varieerus mulla süsinikuvary 24 t ha⁻¹ kuni 440 t ha⁻¹. Kuivadel kultuurrohumaadel oli 0–20 cm tusedusega mullakihti talletatud 42 t C ha⁻¹, märgadesse (sh turvasmullal) kultuurrohumaadesse 159.5 t C ha⁻¹. Metsade keskmiseks väärtuseks oli 99,4 t C ha⁻¹, varieerudes 11 ja 544 t vahel (**Tabel 7**).

Veerežiimi alusel grupeeritud muldade kaupa vaadelduna oli süsinikuvary suurimad turvasmuldadega aladel (**Joonis 17**). Kuivadel ja parasniisketel muldadel (automorfsetel muldadel) on suurim süsinikuvary 0–20 cm kihis pärandniitudel (keskmine 108 ± 54 t C ha⁻¹), metsades oli varu keskmiselt 79 t C ha⁻¹ ja kultuurrohumaadel 42 t C ha⁻¹. Tegu on statistiliselt olulise vahega, mis viitab kuivade-parasniiskete muldade puhul olulisele erinevusele vaadeldud ökosüsteemide toimimises ja süsinikuringes. Selle erinevuse ökoloogilisi põhjuseid tuleb veel uurida. Eriti paistsid suure süsinikuvary poolest silma kuivadel muldadel asuvad puisniidud, loopealsed ja lubjarikkad aruniidud (vastavalt 107, 119 ja 107 t C ha⁻¹).

Märgadel muldadel ja lammi-rannikumuldadel olid pärandniidud kuivade muldadega sarnases süsinikuvary vahemikus, ka metsad ja kultuurrohumaad olid märgadel muldadel süsinikurohked, vastavalt metsades 85 t ja kultuurrohumaadel 99 t C ha⁻¹ (**Joonis 17**).

Täpsemate elupaigatüüpide kaupa on suurima süsinikuvaryga soometsad, märjad kultuurrohumaad ja soostunud niidud ning neile järgnevad puisniidud, loopealsed, lamminiidud ja lubjarikkad aruniidud. Väikseimad süsinikuvary väärtused olid nõmmemetsades, kuivadel kultuurrohumaadel aga ka laane-, loo- ja palumetsades ja lubjavaestel aruniitudel. Tähele tuleb panna, et valimid olid nõmme-, loo-, samblasoo ja rohusoometsades üsna väikesed (alla 10 vaatluse), mistõttu tuleb nende ökosüsteemide kohta antud väärtustesse suhtuda teatava ettevaatlikkusega. Varieeruvuse taga on ökosüsteemide vahelised erinevused nii mulla süsinikusisalduses kui ka lasuvustiheduses. Tihenenud muld iseloomustab kultuurrohumaad, samas kui pärandniitudel ja metsades olid lasuvustiheduse väärtused madalamad (vt ka **Joonis 18**).

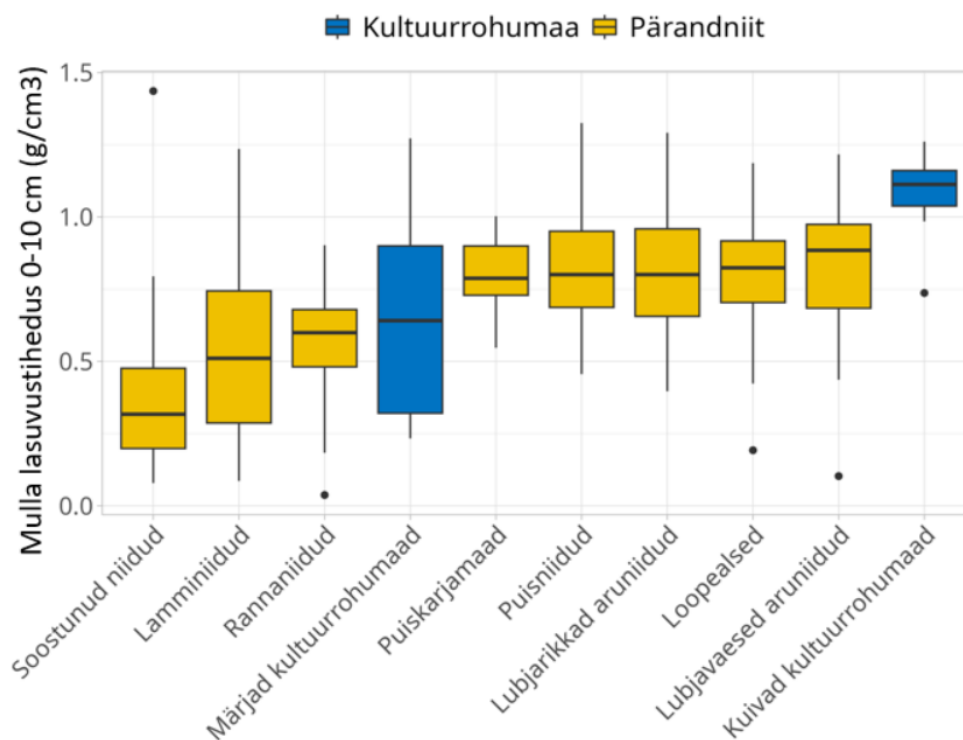


Joonis 17. Mulla orgaanilise süsiniku varu (t/ha) 0–20 cm kihis kultuurrohumaadel, metsades ja pärandniitudel sõltuvalt veerežiimi grupist. Y-telg on logaritmiline. Ristipidi joon tulba sees tähistab mediaanväärtust, tulp kvantiile ja vurrud miinimum-maksimumväärtusi. Punktid tähistavad erandlike väärtustega vaatlusi.

Tabel 7. Mulla süsinikuvaru 0–20 cm mullakihis (t C ha⁻¹), standardviga ja maksimum-miinimumväärtused vastavas elupaigatüübis. N tähistab vaatlusalade arvu.

	Süsinikuvaru 0-20 cm; t C ha ⁻¹	Standardviga	Max	Min	N
Pärändniidud	107.2	0.21	444.9	23.4	240
<i>Lamminiidud</i>	111.4	1.49	308.4	33.7	38
<i>Loopealsed</i>	119.4	1.28	444.9	42.4	49
<i>Lubjarikkad aruniidud</i>	107.1	1.59	217.2	36.2	28
<i>Lubjavaesed aruniidud</i>	74.5	1.57	171.4	31.2	23
<i>Puiskarjamaad</i>	95.2	3.74	197.7	36.2	12
<i>Puisniidud</i>	106.9	0.85	213.2	49.8	47
<i>Rannaniidud</i>	108.2	2.15	220.9	23.4	25
<i>Soostunud niidud</i>	114.8	2.49	207.7	29.6	18
Kultuurrohumaad					
<i>Kuivad kultuurrohumaad</i>	42.2	1.43	67.9	22.4	10
<i>Märjad kultuurrohumaad (turvasmuldadel)</i>	159.5	5.90	336.2	49.8	15
Metsad	99.4	0.64	543.6	11.6	122

<i>Kõdusoometsad</i>	145.9	2.71	220.2	58.2	17
<i>Laanemetsad</i>	52.8	1.91	99.3	25.6	12
<i>Loometsad</i>	78.0	6.90	167.7	31.1	7
<i>Muud metsad</i>	61.9	7.67	109.4	11.6	5
<i>Nõmmemetsad</i>	42.8	7.19	82.9	17.5	4
<i>Palumetsad</i>	86.6	4.27	543.6	21.2	25
<i>Rohusoometsad</i>	169.9	5.61	202.4	115.2	6
<i>Salumetsad</i>	107.6	6.09	451.0	49.9	16
<i>Samblasoometsad</i>	96.5	4.80	154.0	38.4	8
<i>Soovikumetsad</i>	105.0	3.59	432.4	46.3	22
Muud avatud	64.1	0.98	100.2	22.6	19

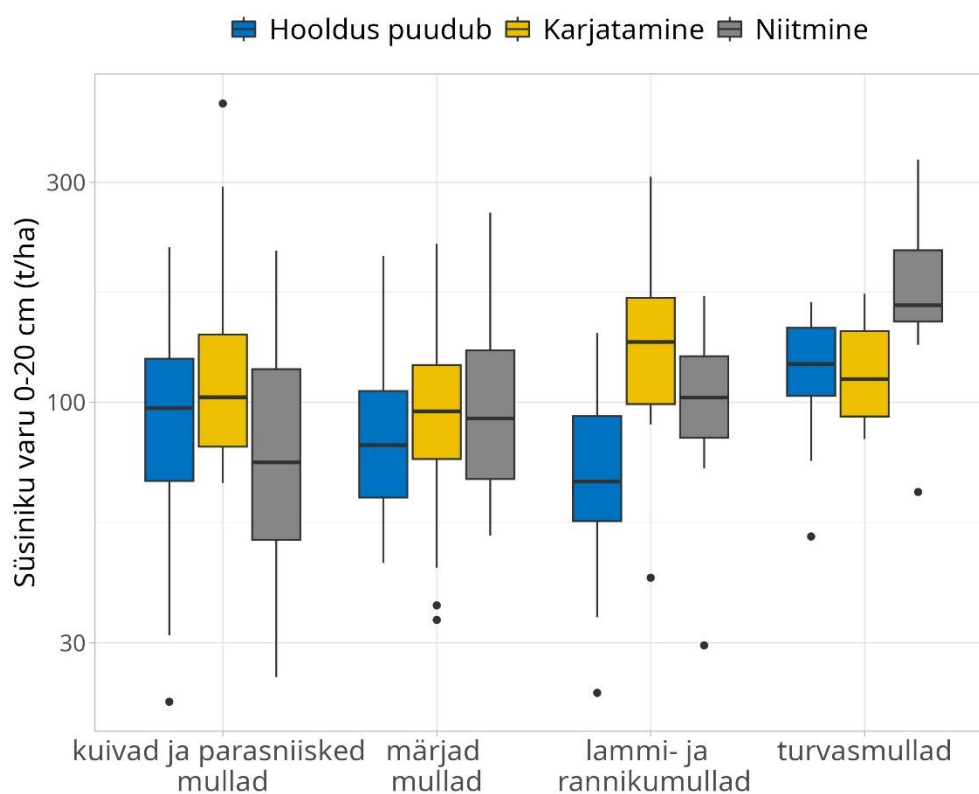


Joonis 18. Mulla lasuvustihedus (g/cm^3) 0–10 cm kihis erinevates niidutüüpides ja kultuurrohumaadel. Ristipidi joon tulba sees tähistab mediaanväärtust, tulp kvantiile ja vurrud miinimum-maksimumväärtusi. Punktid tähistavad erandlike väärtustega vaatlusi.

Pärändniitude süsinikuvaru mudelanalüüsi tulemused näitasid, et Eesti niidukoosluste mulla süsinikuvaruga on statistiliselt oluliselt seotud mulla veerežiim, hooldus, sademete hulk, põõsarinde katvus, puurinde katvus, samblarinde katvus ja NDVI taimkatte indeks. Teised testitud näitajad – kuivenduse mõju, temperatuur, sademete hooajalisus, ajalooline maakasutus, rohumaade sidusus, maastiku looduslikkus, ökosüsteemi seisund, rohurinde või kulukihi katvus – lõplikku mudelisse valitaks ei osutunud. Süsinikuvaru on positiivselt seotud samblarinde katvusega ja NDVI taimkatte indeksiga. Süsiniku varu on suurem rohumaadel, kus on laialdasem samblarinne. NDVI taimkatte indeks

peegeldab taimkatte katvust ja produktiivsust: positiivne seos süsinikuvaru ja NDVI vahel näitab seega, et kõrgema taimkatte produktiivsusega aladel on ka mulla süsinikuvaru suurem.

Süsinikuvaru ja sademete hulga seos on negatiivne: vähesema sademete hulgaga aladel on mulla süsinikuvaru väiksem. Põõsa- ja puurinde katvuse ja mulla süsinikuvaru seosed olid mulla tüübiti erinevad: ranniku- ja lammimuldadel oli seos positiivne (mulla süsinikuvaru oli suurem kõrgema puu- ja põõsarinde katvusega niidualadel), kuivadel- ja parasniisketel ning märgadel muldadel seos põõsa- ja puurinde katvusega puudus. Hoolduse – karjatamine, niitmine või hooldamata – seosed mulla süsinikuvaruga sõltusid mulla tüübist: ranniku- ja lammimuldadel oli süsinikuvaru karjatatavatel aladel oluliselt suurem kui hooldamata aladel, kuivadel muldadel samuti, teistel mullatüüpide gruppidel ei olnud seos hooldusega statistiliselt oluline, kuigi turvasmuldadel oli trend, et niidetud alasid iseloomustas suurem mulla süsinikuvaru (Joonis 19). Vastupidiselt meie algsele hüpoteesile ökosüsteemi seisund lõplikku pärandniitude mulla süsinikuvaru mudelis statistiliselt oluline ei olnud. Osaliselt kirjeldab pärandniitude seisundit ka hoolduse olemasolu, mis osutus oluliseks, kuid nähtavasti jääb seisund iseseisvana teiste testitud näitajate varju ning ei oma kuigi tugevat mõju.



Joonis 19. Hooldusrežiimi ja süsinikuvaru (0–20 cm tõeseduses mullakihis, t/ha) seosed eri muldadel paiknevatel niitudel. Y-telg on logaritmiline. Ristipidi joon tulba sees tähistab mediaanväärtust, tulp kvantile ja vurrud miinimum-maksimumväärtusi. Punktid tähistavad erandlike väärtustega vaatlusi.

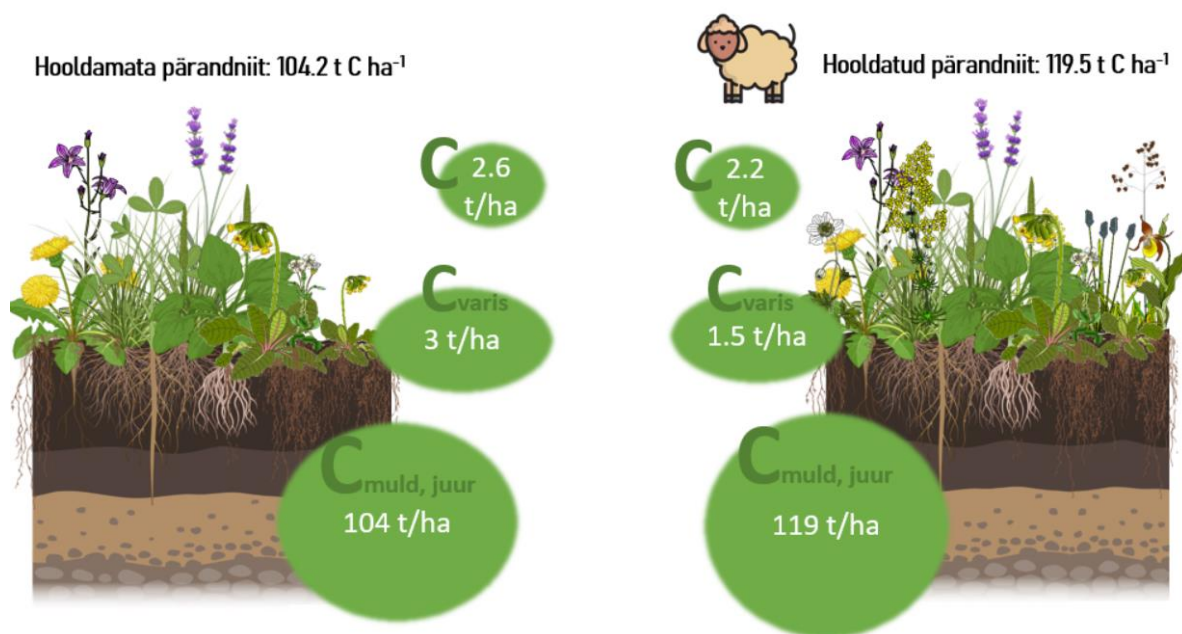
MAA-ALUSESSE JA MAAPEALSESSE TAIMESTIKKU SEOTUD SÜSINIKUVARU

Maa-alune biomass oli suurim pärandniitudel (8.57 t ha^{-1} ehk 850 g m^{-2}) ja madalaim kultuurrohumaadel (4.41 t ha^{-1}). Maapealse elusa biomassi väärtused olid kõrgeimad kultuurrohumaadel, varist oli enim hooldamata pärandniitudel ja metsades ning sammalt oodatult metsades. Kõrrelised ja rohundid mängivad ökosüsteemi maa-alustes ja maapealsetes protsessides erinevaid rolle, mis selgus ka süsinikuvaru ja maapealse biomassi seostest (Joonis 21).

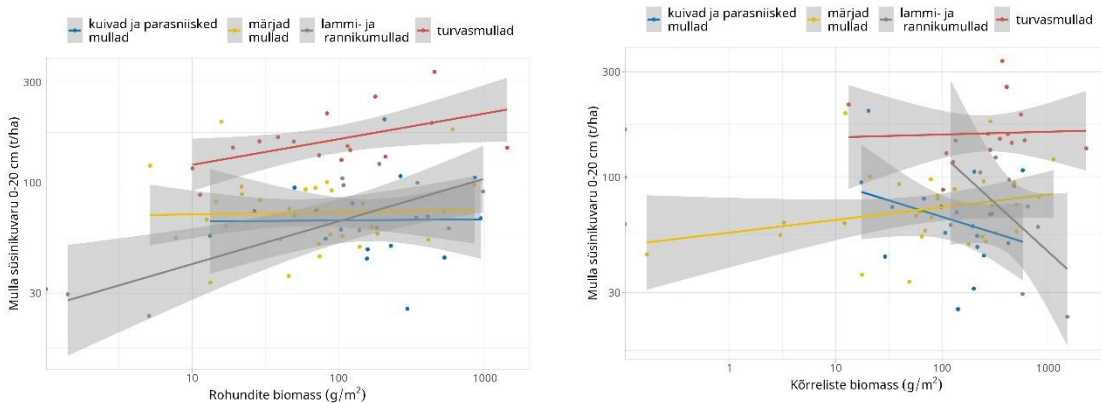
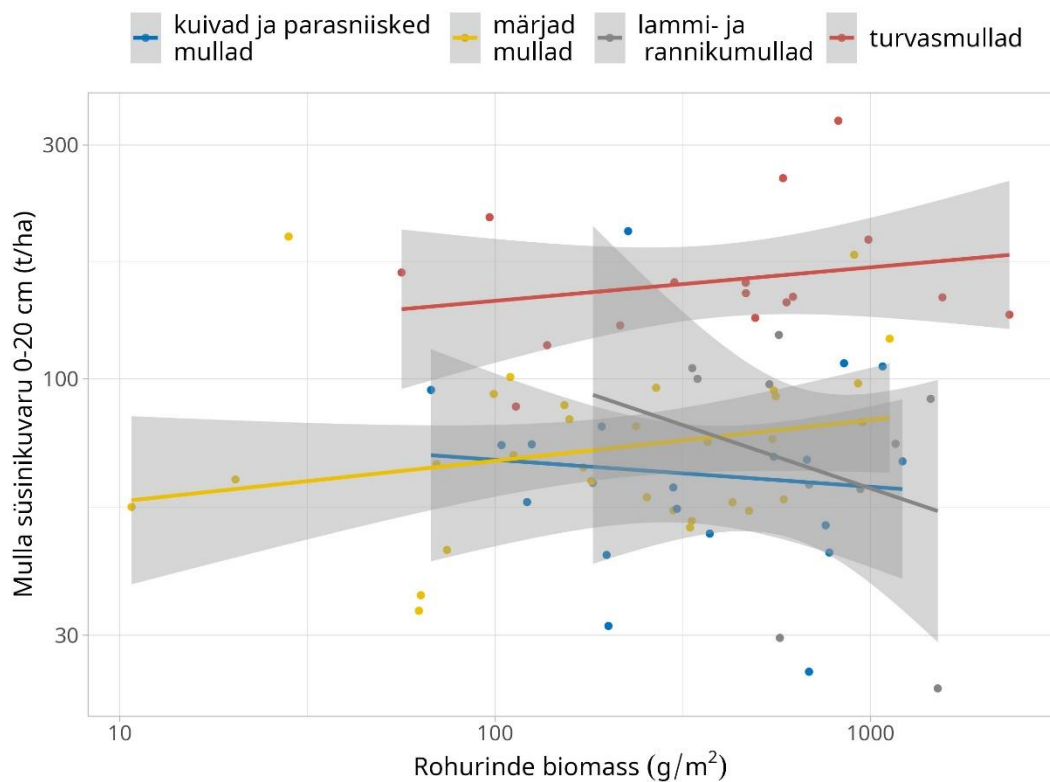
Hooldatavate pärandniitude maapealsesse biomassi ja varisesse seotud süsiniku hulk oli väiksem kui hooldamata niitudel, kuid kuna mulla süsinikuvaru oli hooldatud aladel oluliselt suurem, on neisse seotud keskmiselt 15 tonni jagu süsinikku hektari kohta rohkem kui hooldamata niitudel (Tabel 8, Joonis 20).

Tabel 8. Rohurinde, varise ja sambla biomass ning ja maa-alune biomass (juured-risoomid) tonnides hektari kohta pärandniitudel (hooldatud ja hooldamata), kultuurrohumaadel ja metsades. Muud avatud alad tabelis ei kajastu kogutud ja kaalutud maa-aluste proovide v ehesuse tõttu.

	Rohurinde biomass				Varis	Sammal	Maa-alune biomass
	K�rrelised	Rohundid	Liblik-�ielised	Rohurinne KOKKU			
	t/ha	t/ha	t/ha	t/ha	t/ha	t/ha	t/ha
P�randniit	2.86	1.88	0.07	4.81	4.61	1.04	8.57
<i>Hooldatud p�randniit</i>	2.82	1.46	0.12	4.40	2.91	0.62	7.96
<i>Hooldamata p�randniit</i>	2.90	2.21	0.02	5.13	5.94	1.37	8.91
Kultuurrohuma	2.64	2.15	0.24	5.03	2.71	0.85	4.41
Mets	0.95	2.13	0.12	3.20	5.74	3.01	5.70



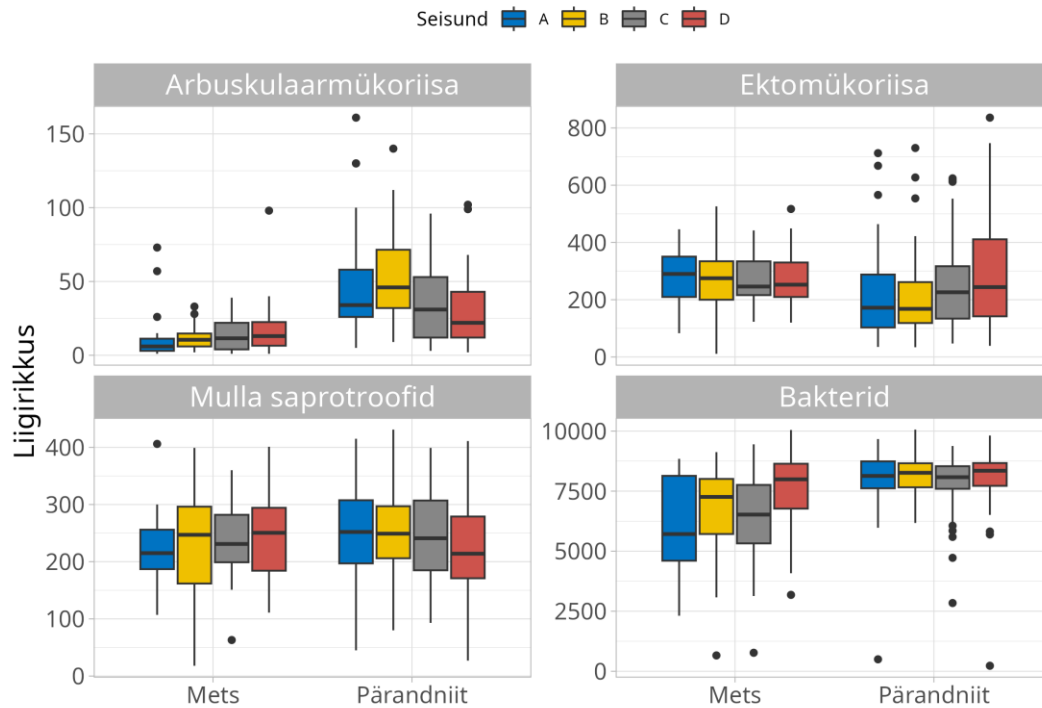
Joonis 20. Süsinik mullas, juurtes, varises ja maapealses biomassis hooldamata ja hooldatud pärandniitudel.



Joonis 21. Kogu rohurinde biomassi ja mulla süsinikuvaru seos (ülemine joonis) ning eraldi rohundite ja kõrreliste biomassi seos süsinikuvaruga sõltvalt mulla veerežiimist (alumised kaks joonist). Y-telg on joonistel logaritmiline.

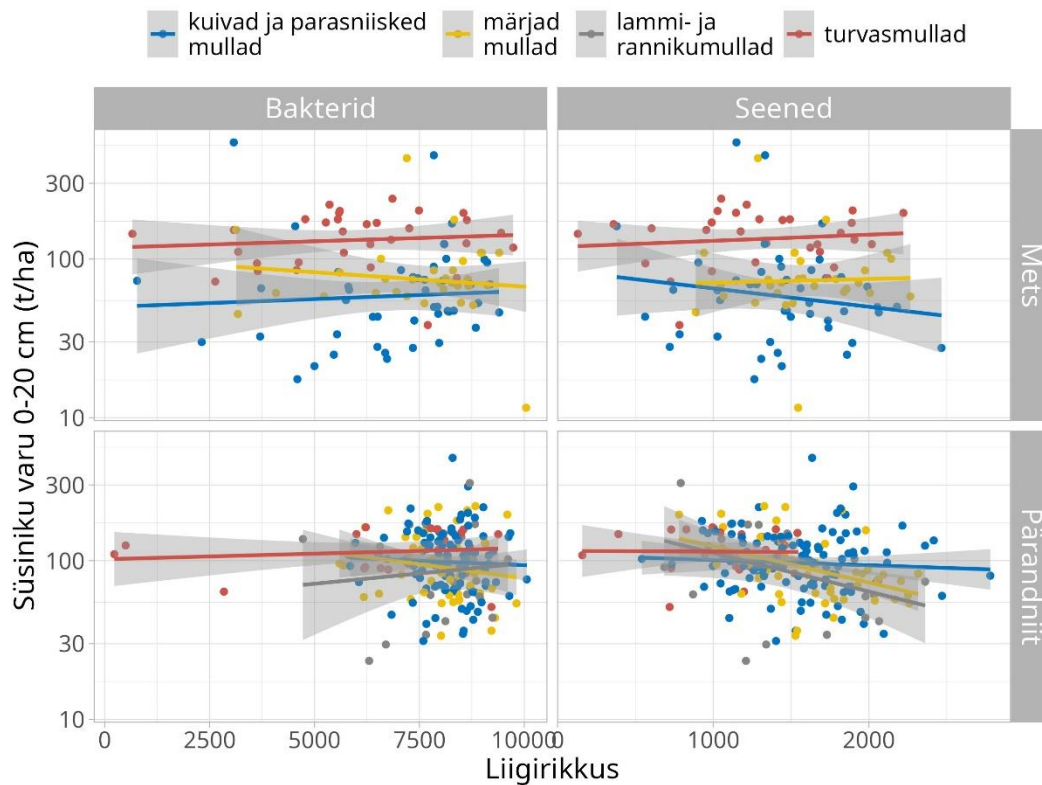
MULLAELUSTIK JA SÜSINIKUVARU

Mullaelustiku oluliste liigrühmade – seente ja bakterite – liigirikkust, koosseisu ja funktsioone kirjeldati DNA analüüside abil. Erinevate liigrühmade liigirikkused metsades ja pärandniitudel erinesid. Mullaseentest on rohttaimedega sümbioosis olev arbuskulaarmükoriisa juba varasemalt teadaolevalt kõrgeim pärandniitudel, samas kui ektomükoriissed seened (enamasti puudega seotud), on liigirohkemad metsades. Arbuskulaarmükoriisseid seeni oli enim paremas seisundis pärandniitudel, samas kui metsade puhul oli trend vastupidine – rohkem seeneliike oli kehvast seisundist metsades. See on selgitatav sellega, et D-klassi metsad on hiljuti lageraiutud, mis on loonud rohkem võimalusi rohttaimedega seotud seentele. Ektomükoriisete seente puhul erinevused seisundis silma ei paista, kuid pärandniitudel on kehvast seisundist alad pisut liigirohkemad, olles enamasti kinnikasvavad ja rohkemate puude-põõsastega alad (**Joonis 22**).

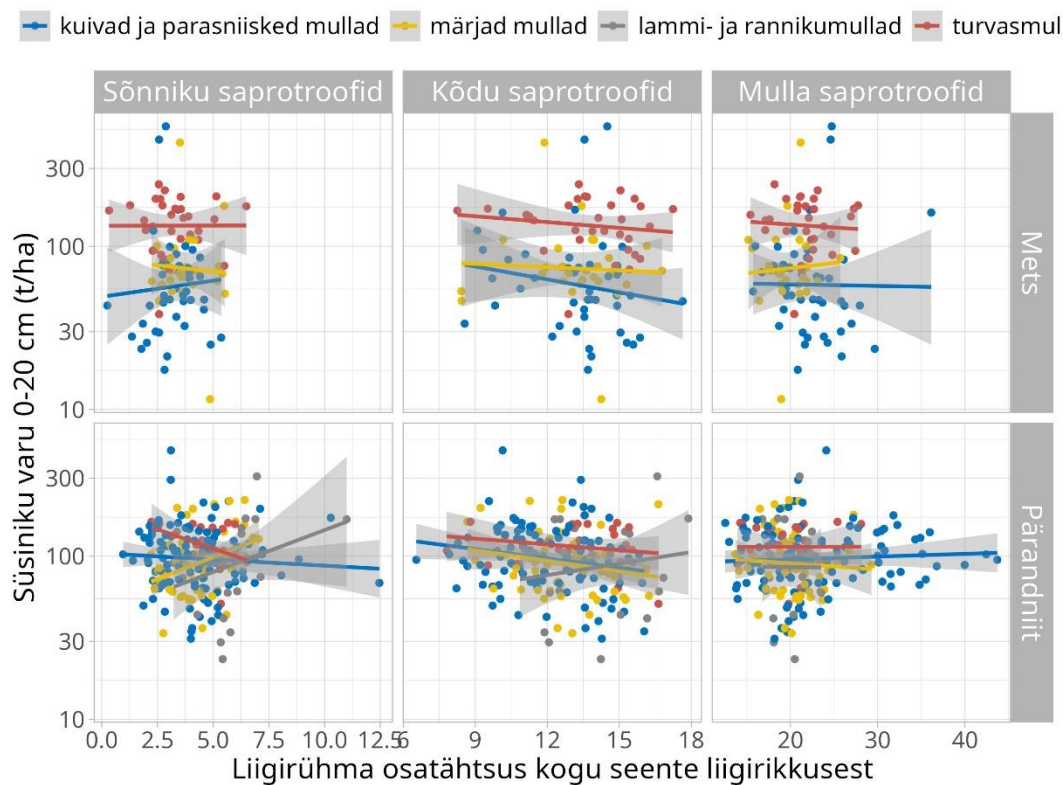


Joonis 22. Mullaseente ja bakterite liigirikused eri seisundis metsades ja pärändniitudel. Seentest on eristatud arbuskulaarmükoriissed ja ektomükoriissed seened ning saprotroofid.

Mullaelustiku rühmade ja süsinikuvaru seoste esialgne analüüs näitab, et bakterite ja seente kogu liigirikkus ei ole mulla süsinikuvaruga seotud (**Joonis 2****Joonis 22**). Kui vaadelda erinevaid mullaseente rühmi detailsemalt, siis on näiteks sõnniku saprotroofid positiivselt seotud pärändniitude süsinikuvaruga lammi- ja rannikumuldadel (**Joonis 24**). Varasemalt välja toodud seos karjatamise ning lammi- ja rannikumuldade süsinikuvaru vahel, võib seega olla seotud sõnniku saprotroofsete seente suurema aktiivsuse ja liigirikusega karjatatavatel aladel. Käesolevas aruandes toodud tulemused mulla süsinikuvaru ning mullaseente ja bakterite liigirikuse vahelistest seostest on esialgsed ja vajavad kindlasti detailsemat analüüsi.



Joonis 23. Süsinikuaru ning bakterite ja seente liigirikkuse seos erineva veerežiimiga muldadel metsades ja pärandniitudel. Y-telg on logaritmiline.

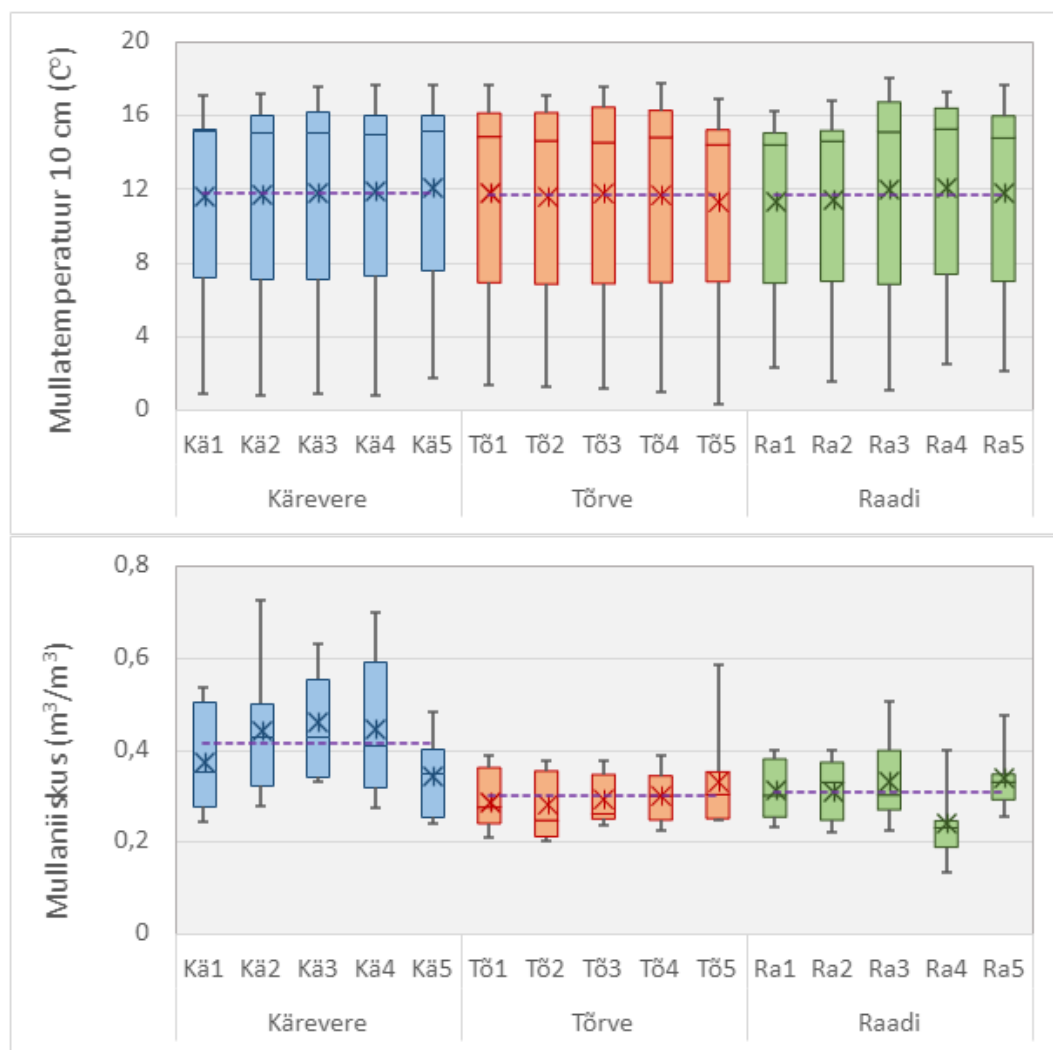


Joonis 24. Süsinikuaru ning erineva funktsionaalse rolliga seente liigirikkuse seos erineva veerežiimiga muldadel metsades ja pärandniitudel. Y-telg on logaritmiline.

GAASIVOOGUDE MÕÕTMISED

KESKKONNATINGIMUSED

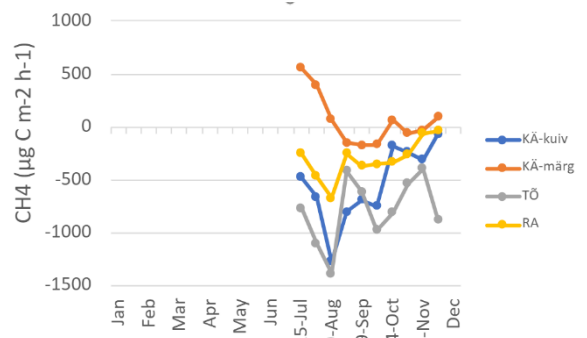
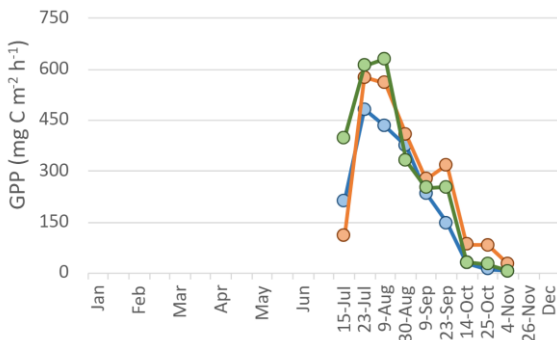
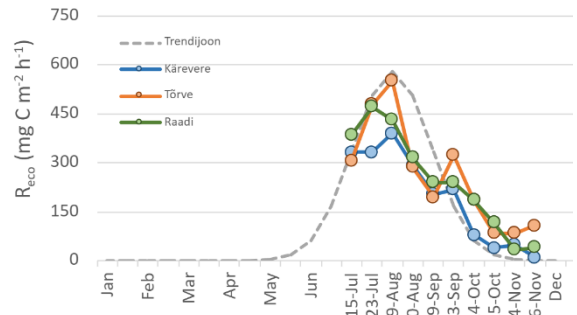
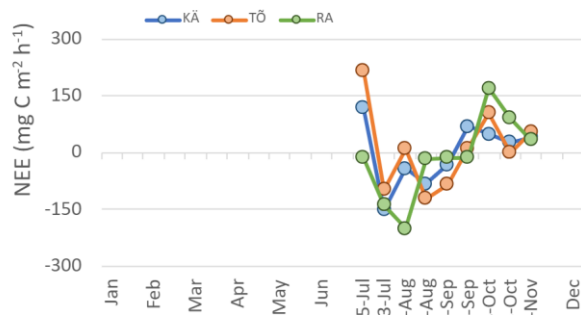
Igal alal mõõdeti igal vaatluskorral mullatemperatuur ning -niiskus, kuna need on nii hingamise kui ka produktsiooniga seotud. Temperatuuride keskmised väärtused olid kõigil aladel sarnased, mullaniiskus oli kõrgeim Kärevere vaatlusaladel ja madalam vastavalt Raadil ja Tõrvel (**Joonis 25**).



Joonis 25. Mullatemperatuur(T_10 cm, °C) ja mullaniiskus (VWC, m3/m3) Kärevere, Tõrve ja Raadi niitudel mõõtmisperiodi 15.07.–26.11.2023 keskmisena.

MÕÕDETUD GAASIVOOD NIITUDEL

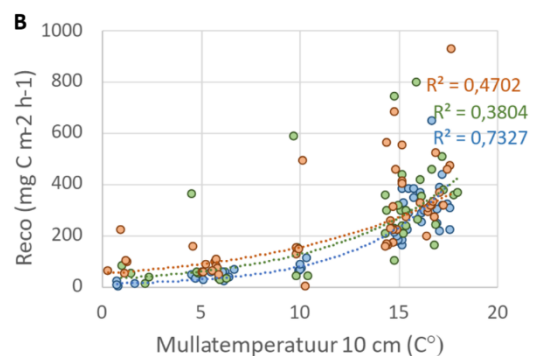
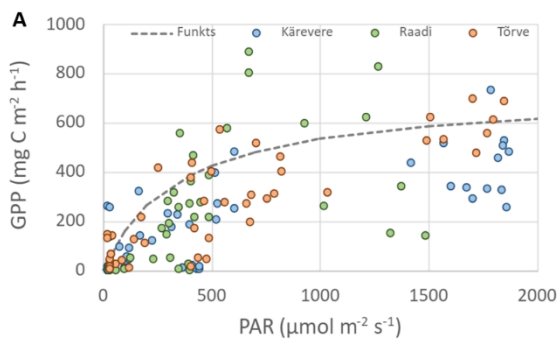
Tulemusi iseloomustab suur varieeruvus. Vahetult pärast paigaldamist on vaadeldav CO₂ ja CH₄ suurem heide ja väiksem süsiniku fikseerimine (GPP) tõenäoliselt koosluse häiringu ja rõnga paigaldamise tõttu. Seejärel muutuvad alad kasvuhoonegaaside sidujaks ja produktsioon tõuseb, kuid sügise lähenedes hakkavad näitajad taas muutuma – ala liigub heitja poole CO₂ osas (NEE), CH₄ voog suureneb ning produktsioon ja ka hingamine vähenevad (**Joonis 26**).

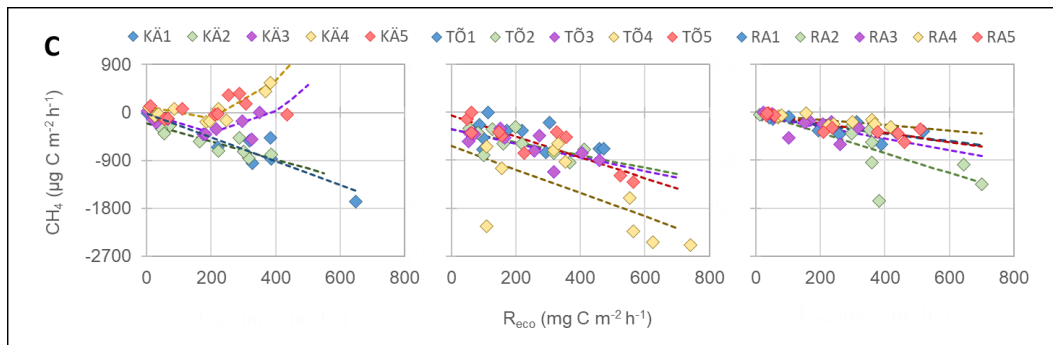


Joonis 26. Ökosüsteemi CO₂ bilansi (NEE, *Net Ecosystem Exchange*) (mg C m⁻² h⁻¹), hingamise (R_{eco}, *Ecosystem Respiration*) (mg C m⁻² h⁻¹), süsiniku fikseerimise (GPP, *Gross Primary Productivity*) GPP (mg C m⁻² h⁻¹) ning CH₄ voo (µg C m⁻² h⁻¹) näitajad Kärevere, Tõrve ja Raadi niitudel.

GAASIVOOGUDE SEOS KESKKONNAPARAMETRITEGA

Nii läbipaistva kambriga mõõdetud CO₂ sidumisel ehk taimeproduksioonil kui ka pimekambriga mõõdetud ökosüsteemi hingamisel oli sesoonne käik. CO₂ sidumine ja hingamine oli suurim juulis ja augustis. Septembris toimus enamus mõõtmiskohtades kiire rohukasvu vähenemine.





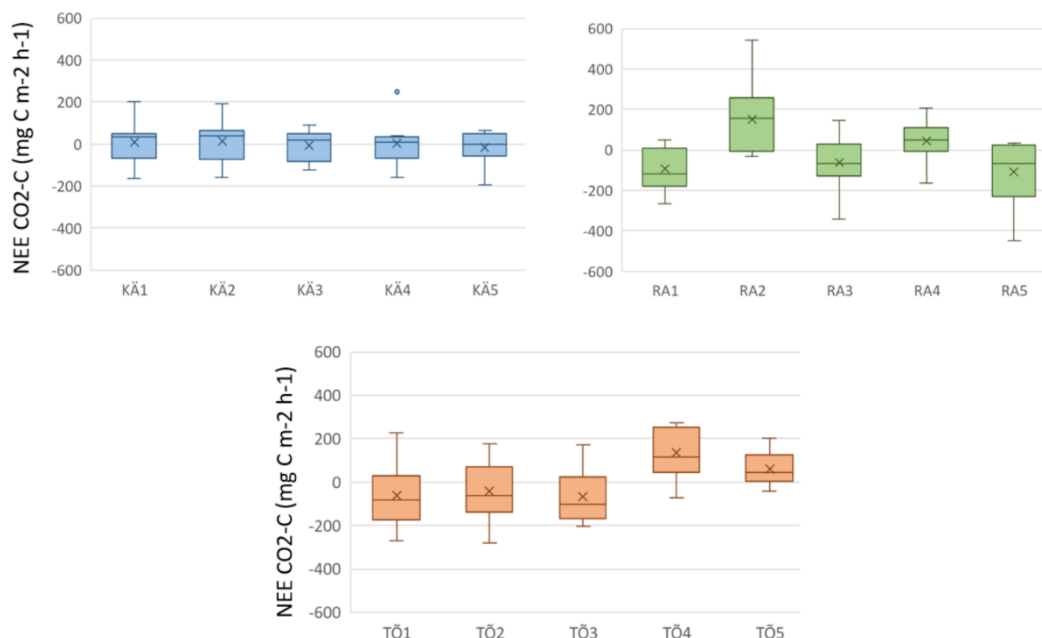
Joonis 27. Kärevere, Tõrve ja Raadi niitudel mõõdetud keskkonnaparameetrite ja gaasivoogude vahelised seosed: A- Produktioon (GPP, $\text{mg C m}^{-2} \text{h}^{-1}$) vs fotosünteetilise aktiivne kiirgus (PAR, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$); B- Ökosüsteemi hingamine (R_{eco} , $\text{mg C m}^{-2} \text{h}^{-1}$) vs mullatemperatuur (T-10cm, °C); C- Metaan (CH_4 , $\mu\text{g C m}^{-2} \text{h}^{-1}$) vs R_{eco} ($\text{mg C m}^{-2} \text{h}^{-1}$).

Gaasvoogudel oli statistiliselt usaldusväärne seos enamike keskkonnanäitajatega kõigil kolmel uurimisalal. Spearman astakorrelatsioonitulemused on toodud lisa 2.

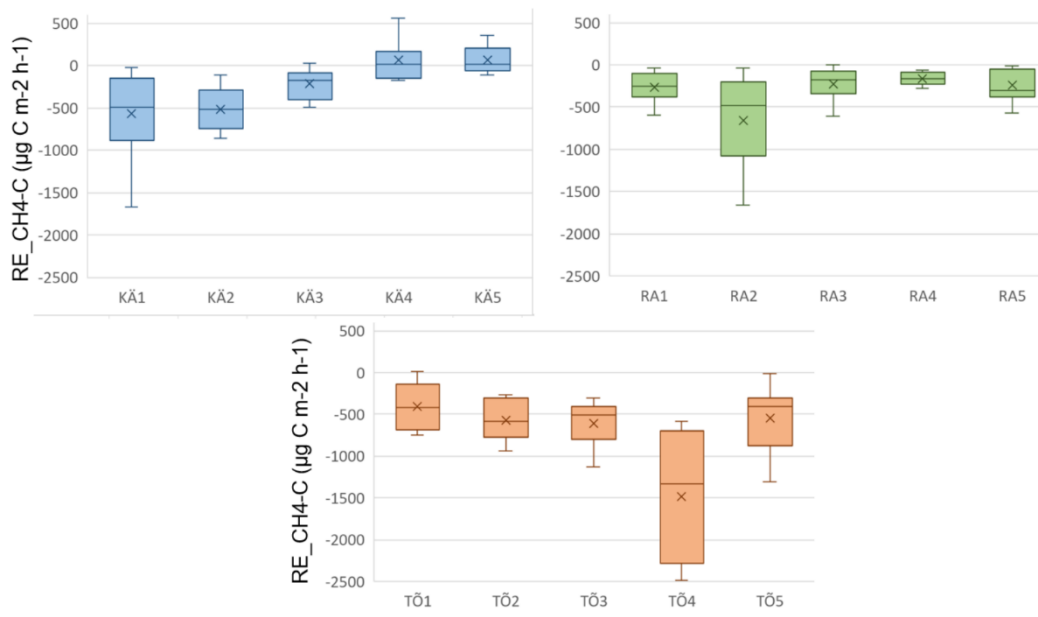
Ökosüsteemi hingamine (R_{eco}) koosneb nii taimede hingamisest kui ka mullahingamisest. Kui keskkonningimused on soodsad siis sügisel püsib mullahingamine kõrge, sest mulla mikroorganismidele on palju kergesti lagundatava orgaanikana rohu varisest. Ökosüsteemi hingamine jäi vaatlusperioodil kõrgeks, sest õhutemperatuur püsis soe (**Joonis 27**)

CO₂ JA CH₄ BILANSS UURIMISALADEL

CO₂ bilanss oli kõigil kolmel niidul mõõdetaval ajal keskmisena positiivne, kuid üksikute mõõtmispunktide vahel kõikus märkimisväärselt (**Joonis 28**). Mineraalmullal Tõrve ja Raadi niidul oli mõõtmisperioodil CH₄ ja sidumine. Kärevere turvasmullaga rohumaal jõest kaugemates mõõtmispunktides oli CH₄ ja sidumine ning jõepoolsetes CH₄ emissioon (**Joonis 29**).

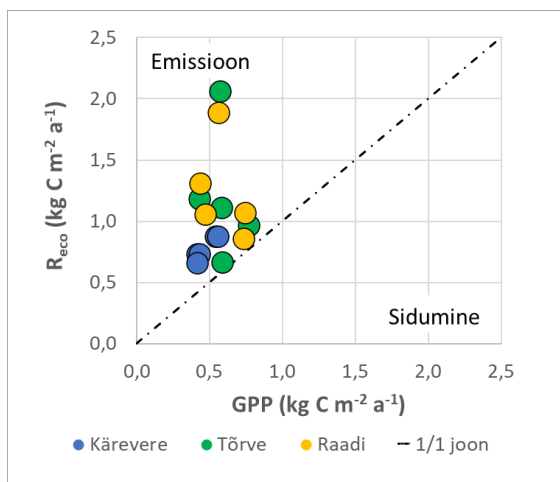


Joonis 28. Kärevere (KÄ), Raadi (RA) ja Tõrve (TÕ) vaatlusperioodi keskmine CO₂ bilanss (NEE, $\text{mg C m}^{-2} \text{h}^{-1}$) mõõtmispunktide kaupa.



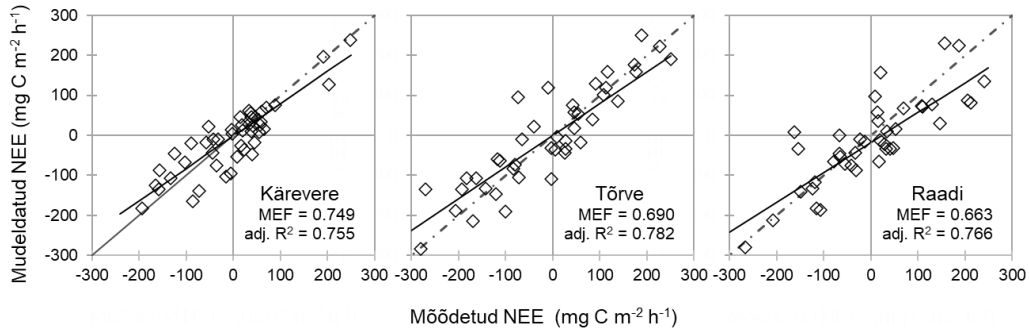
Joonis 29. Kävere (KÄ), Raadi (RA) ja Tõrve (TÕ) vaatlusperioodi keskmine CH₄ bilanss (RE CH₄-C, mg C m⁻² h⁻¹) mõõtmispunktide kaupa.

Ökosüsteemi summaarne hingamine (R_{eco}) ületas vaatlusperioodil süsiniku sidumist (produksiooni) (**Joonis 30**).

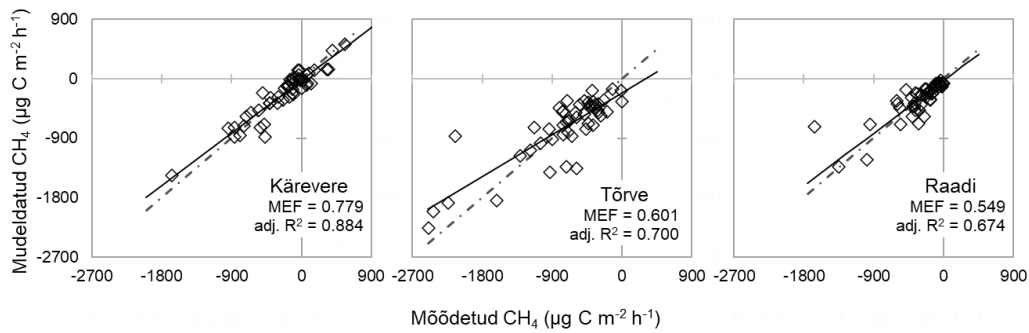


Joonis 30. Ökosüsteemi hingamine (R_{eco}) ja produktsioon (GPP) Kävere, Tõrve ja Raadi niitudel vaatlusperioodil (suve lõpp ja sügis).

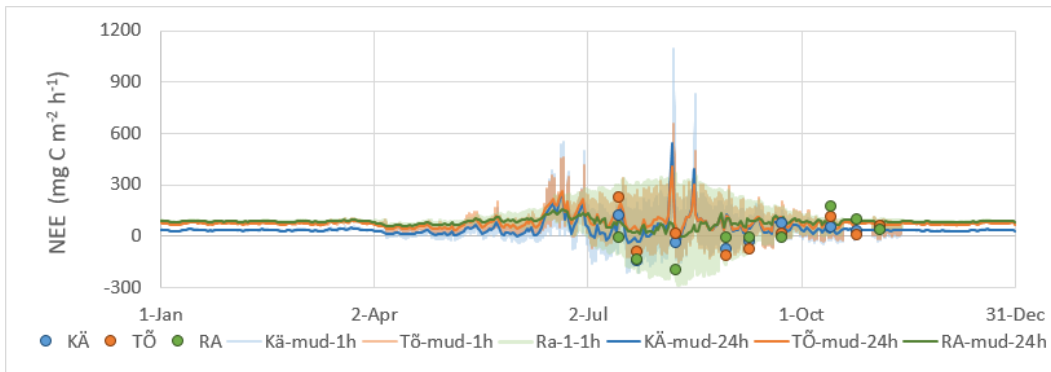
Modelleeritud ja mõõdetud CO₂ ja CH₄ voo võrdlus näitab mudeli võrdlemisi head kooskõla vaadeldud väärtustega, kuid täpsema mudeli koostamiseks on vajalik vähemalt aastaringne vaatlus (**Joonis 31**, **Joonis 32**). Aastase dünaamika modelleeritud vood ning mõõtmiste keskmised tulemused uurimisaladel on toodud **joonisel 33 ja 34**.



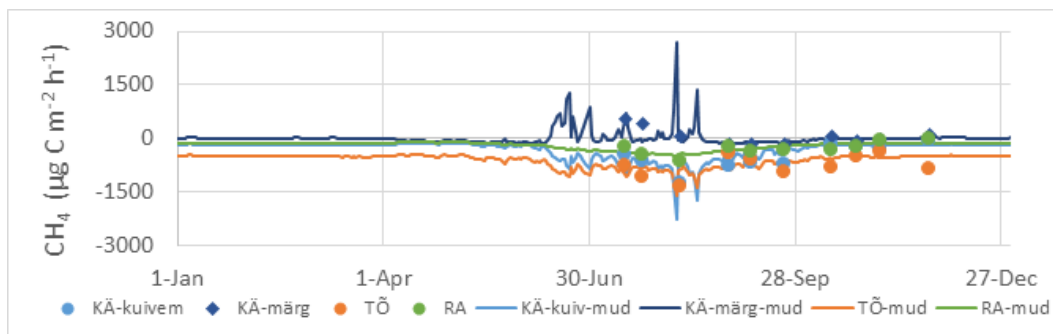
Joonis 31. Mõõdetud ja modelleeritud CO₂ bilanss (NEE, mg C m⁻² h⁻¹) Kärevere, Tõrve ja Raadi niitudel. Katkendlik joon tähistab 1:1 joont. Must pidev joon tähistab mudeli kõrvalekallet mõõdetud väärtustest.



Joonis 32. Mõõdetud ja modelleeritud CH₄ voog (μg C m⁻² h⁻¹) Kärevere, Tõrve ja Raadi niitudelt. Pidev joon tähistab 1:1 joont. Punktiiirjoon tähistab mudeli kõrvalekallet mõõdetud väärtustest.



Joonis 33. NEE tunni aja (mud-1h) ja ööpäeva (mud-24h) keskmise voo (mg C m⁻² h⁻¹) aastane dünaamika Kärevere, Tõrve ja Raadi niitudel 2023. aastal. Joon tähistab NEE modelleeritud voogusid, täpp tähistab mõõtmiskordade keskmisi tulemusi uurimisaladel. Biomass eemaldati niitmise teel 25. septembril.



Joonis 34. CH₄ ööpäeva keskmise voo ($\mu\text{g C m}^{-2} \text{h}^{-1}$) aastane dünaamika Kärevere, Tõrve ja Raadi niitudel 2023. aastal. KÄ-kuiv on Kärevere 1 ja 2 mõõtmispunktide keskmine, KÄ-märg 4. mõõtmispunkt, TÕ on Tõrve 2–5 mõõtmispunktide keskmine, RA on Raadi 1–5 mõõtmispunktide keskmine. Joon tähistab CH₄ modelleeritud voogusid, ring ja romb mõõtmiskordade keskmisi tulemusi uurimiseladel. Biomass eemaldati niitmise teel 25. septembril.

Tabel 9. CO₂ (GPP, R_{eco}, NEE, kg C m⁻² a⁻¹) ja CH₄ (g C m⁻² a⁻¹) aastane bilanss Kärevere, Tõrve ja Raadi niitudel 2023. aastal.

		GPP, g C m ⁻² a ⁻¹	R _{eco} , g C m ⁻² a ⁻¹	NEE, g C m ⁻² a ⁻¹	CH ₄ , g C m ⁻² a ⁻¹	NEE + CH ₄ , g C m ⁻² a ⁻¹
Kärevere	Kä-1	548,0	869,0	321,0	-2,1	318,9
	Kä-2	418,2	726,3	308,1	-3,0	305,1
	Kä-3	437,5	727,7	289,7	-2,0	287,7
	Kä-4	417,9	652,3	234,4	-0,5	233,9
	Kä-5	563,7	873,6	308,8	0,3*	
Tõrve	Tõ-1	592,6	660,2	67,5	-2,7*	
	Tõ-2	586,4	1109,1	522,7	-4,1	518,6
	Tõ-3	774,2	964,8	190,5	-4,1	186,4
	Tõ-4	575,1	2059,7	1484,5*	-10,1	
	Tõ-5	435,2	1176,2	741,1	-2,8	738,3
Raadi	Ra-1	748,9	1065,4	316,4	-1,6	314,8
	Ra-2	564,3	1885,4	1321,1*	-3,6	
	Ra-3	475,2	1054,8	579,6	-1,6	578,0
	Ra-4	441,0	1301,8	860,9	-1,0	859,9
	Ra-5	738,5	852,4	113,9	-1,0	112,9

*seos mõõdetud ja mudeldatud gaasivoogude tulemuste vahel ei olnud usaldusväärne ($p < 0,05$).

C-bilansi ja CH₄ voogude aastane hinnang on mõjutatud mõõtmisperioodist ning usaldusväärsete andmete saamiseks on vajalik mõõtmisi läbi viia vähemalt ühe aasta, eelistatult mitme aasta vältel. Antud töös alustati mõõtmisi vegetatsiooniperioodi keskel (juulis) ja raportis esitatud mõõtmised keetsid kuni aasta lõpuni. Seetõttu võib seniste mõõtmiste põhjal leitud CO₂ sidumine olla alahinnang, sest puudu on kevadine ja suve alguse kiire kasvu periood ning aasta teine pool on taimekasvu poolest oluliselt tagasihoidlikum. Vegetatsiooniperioodi keskel alustamine võib olla ka alade- ja kordustevaheliste suure varieeruvuse põhjuseks. Kambrimõõtmiste jaoks vajalike rõngaste paigaldamisel mulda tuli läbi lõigata pindmised rohujuured ning see võis häirida edasist taimekasvu ning suurendada CO₂ emissiooni. Ka ökosüsteemi hingamine võib olla üle hinnatud, sest mõõtmised olid valdavalt soojal perioodil. Viimased mõõtmiste ajal oli väljas küll miinuskraadid, aga

mullatemperatuur oli plussis. Samuti on võimalik, et CH₄ emissioon Kärevere jõepoolsetest mõõtmispunktidest on alahinnang, sest on puudu on mõõtmised kevadise suurvee järgne periood.

Terviklike andmete saamiseks jätkame mõõtmisi ka 2024. aastal ning täiendame seejärel raportit saadud tulemustega.

KIRJANDUSVIITED

Bai, Y., & Cotrufo, M. F. (2022). Grassland soil carbon sequestration: Current understanding, challenges, and solutions. *Science*, 377(6606), 603-608.

Chang, J., Ciais, P., Viovy, N., Vuichard, N., Sultan, B., & Soussana, J. F. (2015). The greenhouse gas balance of European grasslands. *Global change biology*, 21(10), 3748-3761.

Dondini, M., Martin, M., De Camillis, C., Uwizeye, A., Soussana, J.-F., Robinson, T. & Steinfeld, H. (2023). Global assessment of soil carbon in grasslands – From current stock estimates to sequestration potential. *FAO Animal Production and Health Paper No. 187*. Rome, FAO. <https://www.fao.org/3/cc3981en/cc3981en.pdf>

Elsgaard, L., Görres, C. M., Hoffmann, C. C., Blicher-Mathiesen, G., Schelde, K., & Petersen, S. O. (2012). Net ecosystem exchange of CO₂ and carbon balance for eight temperate organic soils under agricultural management. *Agriculture, ecosystems & environment*, 162, 52-67.

Fernández-Ugalde, O., Orgiazzi, A., Jones, A., Lugato, E. and Panagos, P. (2017). LUCAS 2018–Soil Component: Sampling Instructions for Surveyors.

Fick, S. E., & Hijmans, R. J. (2017). WorldClim 2: New 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 37(12), 4302–4315.

Helm, A., & Toussaint, A. (2020). Poollooduslike koosluste ökoloogilise toimimise hinnang. Tartu Ülikool, Ökoloogia ja Maateaduste Instituut.

Helm, A., Kull, A., Kiisel, M., Poltimäe, H., Rosenthal, R., Veromann, E., Reitalu, T., Knoch, A., Virro, H., Mõisja, K., Nurm, H.-I., Prangel, E., Vain, K., Sepp, K., Lõhmus, A., Linder, M., Otsus, M., & Uuemaa, E. (2023). Eesti maismaaökosüsteemide hüvede (ökosüsteemiteenuste) majandusliku väärtuse üleriigiline hindamine ja kaardistamine. Tehniline lõpparuanne. Riigihange "Maismaaökosüsteemiteenuste üleriigiline rahaline hindamine, sh meetodika väljatöötamine" (viitenumber 235366, Keskkonnaagentuur). Tartu Ülikool. Eesti Maaülikool.

Helm, A., Prangel, E., Ingerpuu, N., Ivask, M., Jüriado, I, Karise, R., Kasari, L., Keerberg, L., Kupper, T., Marja, R., Meriste, M., Oja, E., Soon, V., Tarlap, P., Tiitsaar, A., Reitalu, T. (2021). Loopealsete suuremahulise taastamise mõju elurikkusele, taastamisjärgne seisund ja taastamistegevuste analüüs. Keskkonnainvesteeringute Keskuse looduskaitseprogrammi projekti "Loopealsete suuremahulise taastamise mõju elurikkusele, taastamisjärgne seisund ja taastamistegevuste analüüs (01.01.2019-30.05.2021)" lõpparuanne. Tartu Ülikool, Ökoloogia ja Maateaduste Instituut.

Helm, A., Takkis, K., Riibak, K., Prangel, E., Devalez, J., Keerberg, L., Meriste, M., Trepp, R., Vahter, T., Vain, S., Aavik, T. (2020). Loodusliku elurikkuse säilitamine põllumajandusmaal. Projekti lõpparuanne. Koostatud Maaeluministeriumile programmi „Põllumajanduslikud rakendusuuringud ja arendustegevus aastatel 2015–2021“ lepingu nr 73 raames. Tartu Ülikool, Ökoloogia ja Maateaduste Instituut.

IPCC (2006a). Guidelines, Volume 4, Chapter 2: Generic Methodologies Applicable to Multiple Land-Use Categories.

IPCC (2006b). Guidelines, Volume 4, Chapter 6: Grassland.

IPCC. (2019). 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Report.

Jackson, R.B., Lajtha, K., Crow, S.E., Hugelius, G., Kramer, M.G. and Piñeiro, G. (2017). The ecology of soil carbon: pools, vulnerabilities, and biotic and abiotic controls. *Annual review of ecology, evolution, and systematics*, 48, pp.419-445.

Jones, M. B., & Donnelly, A. (2004). Carbon sequestration in temperate grassland ecosystems and the influence of management, climate and elevated CO₂. *New Phytologist*, 164(3), 423–439.

Järveoja, J. (2015). Fluxes of the greenhouse gases CO₂, CH₄ and N₂O from abandoned peat extraction areas: Impact of bioenergy crop cultivation and peatland restoration. PhD Thesis, University of Tartu.

Järvepõld R. (2020). Kasvuhoonegaaside vood ja neid mõjutavad keskkonnategurid päiderooga taimestatud Keressaare jääkturbaalal. Bakalaureustöö keskkonnatehnoloogias, Tartu Ülikool.

Kasimir-Klmedtsson, Å., Klmedtsson, L., Berglund, K., Martikainen, P., Silvola, J., & Oenema, O. (1997). Greenhouse gas emissions from farmed organic soils: a review. *Soil use and management*, 13, 245-250.

Keskonnaamet (2021). Pärändniitude tegevuskava. <https://loodusveeb.ee/sites/default/files/inline-files/P%C3%A4randniitude%20tegevuskava%20%28kinnitatud%202021%29.pdf>

Kliimaministeerium (2024). Greenhouse gas emissions in Estonia 1990-2022. National Inventory Document. Submission to the european commission. Common Reporting Formats (CRF) 1990–2022. Kättesaadav aadressil https://kliimaministeerium.ee/sites/default/files/documents/2024-03/NID_EST_1990-2022_15.03.pdf

Kmoch, A., Kanal, A., Astover, A., Kull, A., Virro, H., Helm, A., Pärtel, M., Ostonen, I., & Uemaa, E. (2021). EstSoil-EH: A high-resolution eco-hydrological modelling parameters dataset for Estonia. *Earth System Science Data*, 13(1), 83–97.

Kõlli, R., Ellermäe, O., Köster, T., Lemetti, I. Asi, E., Kauer, K. (2009). Stocks of organic carbon in Estonian soils. *Estonian Journal of Earth Sciences*, 58, 95–108

Kõlli, R., Köster, T., & Kauer, K. (2007). Organic matter of Estonian grassland soils. *Agronomy Research*, 5(2), 109-122.

Kõlli, R., Köster, T., Kauer, K., Lemetti, I. (2010). Pedoecological regularities of organic carbon retention in Estonian mineral soils. *International Journal of Geosciences*, 1, 139–148.

Laasimer, L. (1965). Eesti NSV taimkate (Vegetation of the Estonian S.S.R.). Valgus.

Lindborg, R., Hartel, T., Helm, A., Prangel, E., Reitalu, T. and Ripoll-Bosch, R. (2023). Ecosystem services provided by semi-natural and intensified grasslands: Synergies, trade-offs and linkages to plant traits and functional richness. *Applied Vegetation Science*, 26(2), p.e12729.

Lorenz, K., & Lal, R. (2018). Carbon sequestration in agricultural ecosystems.

Louca, S., Parfrey, L.W., Doebeli, M. (2016). Decoupling function and taxonomy in the global ocean microbiome. *Science* 353:1272-1277

Maddison, M., Veber, G., Kull, A. (2021). Net ecosystem exchange of CO₂ and ecosystem respiration in two bogs in Estonia along disturbance gradient. EGU2021, sessioon Peatland Under Pressure.

Maljanen, M., Komulainen, V. M., Hytönen, J., Martikainen, P. J., & Laine, J. (2004). Carbon dioxide, nitrous oxide and methane dynamics in boreal organic agricultural soils with different soil characteristics. *Soil Biology and Biochemistry*, 36(11), 1801-1808.

- Mander, Ü., Maddison, M., Valach, A. C., Soosaar, K., Kill, K., & Kasak, K. (2024). High methane emissions as trade-off for phosphorus removal in surface flow treatment wetlands. *Aquatic Botany*, 190, 103719.
- Moyano, J., Dimarco, R.D., Paritsis, J., Peterson, T., Peltzer, D.A., Crawford, K.M., McCary, M.A., Davis, K.T., Pauchard, A. and Nuñez, M.A. (2024). Unintended consequences of planting native and non-native trees in treeless ecosystems to mitigate climate change. *Journal of Ecology*.
- NIR (2023). National Inventory Report Sweden 2023: Annexes, pages 137–139.
- Paal J. (1997). Eesti taimkatte kasvukohatüüpide. Keskkonnaministeerium, Tallinn.
- Parada, A. E., Needham, D. M., & Fuhrman, J. A. (2016). Every base matters: assessing small subunit rRNA primers for marine microbiomes with mock communities, time series and global field samples. *Environmental microbiology*, 18(5), 1403-1414.
- Pausas J.G. & Bond W.J. (2019). Humboldt and the reinvention of nature. *Journal of Ecology* 107: 1031–1037
- Penu, P. (2014). Rohumaade muldade süsinikuvaru ja dünaamika hindamine. Aruanne. Saku: Põllumajandusuuringute Keskus.
- Petri, M., Batello, C., Villani, R. & Nachtergaele, F. (2010). Carbon status and carbon sequestration potential in the world's grasslands. *Integrated Crop Management*, 11: 11–31.
- Prangel, E., Kasari-Toussaint, L., Neuenkamp, L., Noreika, N., Karise, R., Marja, R., ... & Helm, A. (2023). Afforestation and abandonment of semi-natural grasslands lead to biodiversity loss and a decline in ecosystem services and functions. *Journal of Applied Ecology*, 60(5), 825-836.
- Puche, N., Senapati, N., Flechard, C. R., Klumpp, K., Kirschbaum, M. U., & Chabbi, A. (2019). Modeling carbon and water fluxes of managed grasslands: Comparing flux variability and net carbon budgets between grazed and mowed systems. *Agronomy*, 9(4), 183.
- Pärtel, M., Carmona, C. P., Zobel, M., Moora, M., Riibak, K., & Tamme, R. (2019). DarkDivNet—A global research collaboration to explore the dark diversity of plant communities. *Journal of Vegetation Science*, 30(5), 1039-1043.
- Quast, C., Pruesse, E., Yilmaz, P., Gerken, J., Schweer, T., Yarza, P., Peplies, J. and Glöckner, F.O., 2012. The SILVA ribosomal RNA gene database project: improved data processing and web-based tools. *Nucleic acids research*, 41(D1), pp.D590-D596.
- Riutta, T., Laine, J., & Tuittila, E. S. (2007). Sensitivity of CO₂ exchange of fen ecosystem components to water level variation. *Ecosystems*, 10, 718-733.
- Thompson, R.L., Broquet, G., Gerbig, C., Koch, T., Lang, M., Monteil, G., Munassar, S., Nickless, A., Scholze, M., Ramonet, M. and Karstens, U., 2020. Changes in net ecosystem exchange over Europe during the 2018 drought based on atmospheric observations. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 375(1810), p.20190512.
- Tölgyesi, C., Buisson, E., Helm, A., Temperton, V. M., & Török, P. (2022). Urgent need for updating the slogan of global climate actions from “tree planting” to “restore native vegetation”. *Restoration Ecology*, 30(3), e13594.
- Tuittila, E. S., Komulainen, V. M., Vasander, H., Nykänen, H., Martikainen, P. J., & Laine, J. (2000). Methane dynamics of a restored cut-away peatland. *Global change biology*, 6(5), 569-581.
- Vahter, T., Sepp, S. K., Astover, A., Helm, A., Kikas, T., Liu, S., ... & Hiiesalu, I. (2022). Landscapes, management practices and their interactions shape soil fungal diversity in arable fields—Evidence from a nationwide farmers' network. *Soil Biology and Biochemistry*, 168, 108652.

Vasar, M., Davison, J., Sepp, S. K., Mucina, L., Oja, J., Al-Quraishy, S., ... & Zobel, M. (2022). Global soil microbiomes: A new frontline of biome-ecology research. *Global Ecology and Biogeography*, 31(6), 1120-1132.

Veldman, J. W. (2016). Clarifying the confusion: old-growth savannahs and tropical ecosystem degradation. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 371(1703), 20150306.

Wang, W., & Fang, J. (2009). Soil respiration and human effects on global grasslands. *Global and Planetary Change*, 67(1-2), 20-28.

White R., Murray S., Rohweder M. (2000). Pilot analysis of global ecosystems: grassland ecosystems. World Resources Institute, Washington, DC.

Wilson, J. B., Peet, R. K., Dengler, J., & Pärtel, M. (2012). Plant species richness: the world records. *Journal of vegetation Science*, 23(4), 796-802.

Zhao, Y., Liu, Z., & Wu, J. (2020). Grassland ecosystem services: a systematic review of research advances and future directions. *Landscape Ecology*, 35, 793-814.

Yang, Y., Tilman, D., Furey, G., & Lehman, C. (2019). Soil carbon sequestration accelerated by restoration of grassland biodiversity. *Nature communications*, 10(1), 718.

Veldman, J. W., Aleman, J. C., Alvarado, S. T., Anderson, T. M., Archibald, S., Bond, W. J., Boutton, T. W., Buchmann, N., Buisson, E., Canadell, J. G., de Dechoum, M. S., Diaz-Toribio, M. H., Durigan, G., Ewel, J. J., Fernandes, G. W., Fidelis, A., Fleischman, F., Good, S. P., Griffith, D. M., ... Zaloumis, N. P. (2019). Comment on "The global tree restoration potential". *Science*, 366(6463), eaay7976.

LISAD

LISA 1

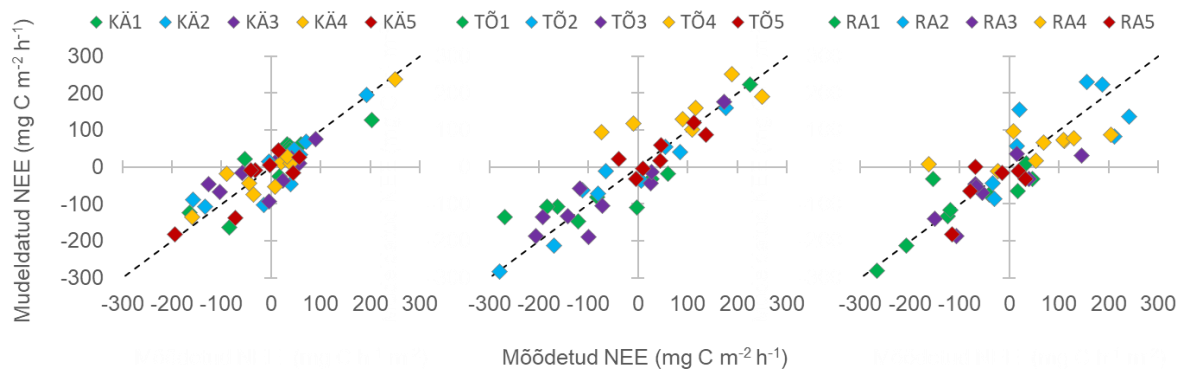
Kärevere, Tõrve ja Raadi niitudel mõõdetud keskkonnaparametrite ja gaasivoogude Spearman astakorrelatsiooni ρ –väärtused.

Jämedas punases kirjas toodud seos mõõdetud keskkonnanäitajate ja gaasivoogude vahel oli usaldusväärne ($p > 0,05$).

	NEE	Reco	GPP	CH4	PAR	VWC 0- 5cm	T°C 0- 5cm	T°C 10cm	T°C 20cm	T°C 30cm	T°C 40cm	T°C õhk
NEE	1,000											
Reco	-0,303	1,000										
GPP	-0,622	0,896	1,000									
CH4	0,023	0,285	-0,268	1,000								
PAR	-0,779	0,498	0,740	-0,109	1,000							
VWC 0-5cm	0,185	0,551	-0,503	0,185	0,370	1,000						
T°C 0-5cm	-0,409	0,866	0,830	-0,102	0,550	0,564	1,000					
T°C 10cm	-0,381	0,883	0,864	-0,205	0,580	0,522	0,945	1,000				
T°C 20cm	-0,291	0,893	0,835	-0,126	0,420	0,500	0,953	0,937	1,000			
T°C 30cm	-0,492	0,866	0,900	-0,187	0,708	0,538	0,934	0,961	0,929	1,000		
T°C 40cm	-0,491	0,855	0,894	-0,191	0,708	0,550	0,927	0,960	0,924	0,997	1,000	
Kärevere T°C õhk	-0,282	0,856	0,822	-0,364	0,454	0,606	0,893	0,915	0,870	0,868	0,867	1,000
NEE	1,000											
Reco	-0,255	1,000										
GPP	-0,687	0,839	1,000									
CH4	0,293	0,816	-0,744	1,000								
PAR	-0,456	0,585	0,683	-0,301	1,000							
VWC 0-5cm	0,213	0,465	-0,487	0,367	0,587	1,000						
T°C 0-5cm	-0,384	0,576	0,654	-0,383	0,659	0,477	1,000					
T°C 10cm	-0,438	0,687	0,781	-0,522	0,651	0,486	0,879	1,000				
T°C 20cm	-0,405	0,706	0,766	-0,541	0,708	0,541	0,901	0,953	1,000			
T°C 30cm	-0,475	0,703	0,816	-0,584	0,683	0,571	0,784	0,965	0,923	1,000		
T°C 40cm	-0,445	0,713	0,811	-0,580	0,686	0,590	0,788	0,964	0,922	0,996	1,000	
Raadi T°C õhk	-0,382	0,692	0,760	-0,537	0,627	0,462	0,932	0,917	0,892	0,854	0,854	1,000
NEE	1,000											
Reco	-0,001	1,000										
GPP	-0,560	0,795	1,000									
Tõrve CH4	-0,359	0,629	-0,298	1,000								

PAR	-0,642	0,501	0,813	-0,207	1,000															
VWC 0-	0,147	-	-0,472	0,433	-	0,304	1,000													
5cm		0,531																		
T°C 0-	-0,174	0,784	0,734	-0,450	0,516	-	0,679	1,000												
5cm																				
T°C 10cm	-0,175	0,796	0,743	-0,303	0,437	-	0,653	0,924	1,000											
T°C 20cm	-0,124	0,771	0,697	-0,292	0,390	-	0,640	0,904	0,963	1,000										
T°C 30cm	-0,271	0,773	0,792	-0,268	0,596	-	0,595	0,898	0,963	0,955	1,000									
T°C 40cm	-0,290	0,766	0,801	-0,277	0,609	-	0,596	0,893	0,958	0,948	0,996	1,000								
T°C öhk	-0,340	0,665	0,722	-0,134	0,476	-	0,507	0,652	0,794	0,734	0,798	0,802	1,000							

LISA 2



Joonis. Mõõdetud ja mudeldatud CO₂ bilanss (NEE, mg C m⁻² h⁻¹) Kärevere, Tõrve ja Raadi niitudel mõõtmispunktide kaupa. Katkendlik joon tähistab 1:1 joont.