

Tartu Ülikool
Loodus- ja täppisteaduste valdkond
Ökoloogia ja maateaduste instituut

Magistritöö keskkonnatehnoloogia erialal (30 EAP)

Kuivenduskraavi kauguse mõju CO₂ bilansile Umbusi ja Laukasoo raba näitel

Kätlin Aun

Juhendaja: Martin Maddison, Ph.D

Tartu 2024

Kuivenduskraavi kauguse mõju CO₂ bilansile Umbusi ja Laukasoo raba näitel

Looduslikus seisundis sood seovad CO₂ ja emiteerivad CH₄, mis on ühed olulisemad kasvuhoonegaasid, ning mõjutavad seeläbi globaalset kliimat. Nii kliima muutuse kui kuivendamise ja muu inimtegevuse tagajärjel soo ökoloogilised funktsioonid muutuvad ning soost kui CO₂ sidujast võib saada CO₂ allikas. Töö eesmärgiks oli uurida, kuidas kuivendus mõjutab CO₂ bilanssi, mis on üks raba loodusliku seisundi näitaja, teostades kahes rabas kuivenduskraavist erineval kaugusel asuvates mõõtepunktides CO₂ bilanssi panustavate voogude mõõtmised dünaamilise kambri meetodil. Seejärel teostati statistiline analüüs, et uurida kuivenduse mõju. CO₂ bilansi, hingamise, ja primaarproduktiooni puhul leiti korrelatsioon veetaseme, mullatemperatuuri ja taimkatte vahel.

Märksõnad: *CO₂ bilanss, primaarproduktioon, ökosüsteemi hingamine, soode kuivendamine, looduslikud rabad*

CERCS kood: P510 Füüsiline geograafia, geomorfoloogia, mullateadus, kartograafia, klimatoloogia

Impact of drainage on net ecosystem exchange of CO₂ in Umbusi and Laukasoo bogs

In their natural state, peatlands sequester CO₂ and emit CH₄, which are important greenhouse gases, thereby affecting global climate. As a result of drying caused by climate change, lowering of the water level, as well as due to drainage and other human activities that disturb the ecosystem, the ecological functions of peatlands change and peatlands as CO₂ sinks can become a source of CO₂. The aim of the work was to study how drainage affects CO₂ balance, which is an indicator of the natural state of the bog, by measuring CO₂ fluxes in different measuring points located at different distances from the drainage ditch in two Estonian bogs using the dynamic chamber method. Afterwards statistical analysis was carried out on the data to find drainage effect. Correlation between CO₂ net ecosystem exchange, respiration and gross primary production was found with water level, soil temperature and vegetation cover.

Keywords: *CO₂ balance, gross primary production, ecosystem respiration, net ecosystem exchange, drained peatlands, natural peatlands*

CERCS code: P510 Physical geography, geomorphology, pedology, cartography, climatology

Sisukord

Lühendid ja mõisted	5
Sissejuhatus	6
1. Süsinikdioksiidi (CO ₂) vood ja bilanss soodes.....	8
1.1. Soo mõiste.....	8
1.2. Soode levik ja kasutamine	8
1.3. Soode kuivendamine.....	10
1.4. CO ₂ vood ja bilanss soo ökosüsteemis	10
2. Materjal ja metoodika.....	12
2.1. Uurimisalade kirjeldus	12
2.2. Välitööde metoodika.....	13
2.3. Ilmaandmed	17
2.4. Taimestiku andmed.....	18
2.5. Andmeanalüüs	18
2.6. Statistiline analüüs	19
2.7. GPP ja ER aastase voo arvutamine.....	20
3. Tulemused ja arutelu	21
3.1. CO ₂ vood ja bilanss.....	21
3.2. CO ₂ voogude seosed keskkonnaparameetritega	26
3.2.1. Veetase.....	26
3.2.2. Mullatemperatuur	27
3.2.3. ER seos õhutemperatuuriga	28
3.2.4. GPP seos PAR-iga	29
3.3. Aastane CO ₂ bilanss.....	31
3.4. CO ₂ voogude seos taimestikuga	33
Kokkuvõte	34

Impact of drainage on net ecosystem exchange of CO ₂ in Umbusi and Laukasoo bogs	36
Kasutatud allikad	38
Tänuavaldused	42
Lisad	43
Lisa 1	43
Lisa 2	45
Lisa 3	46

Lühendid ja mõisted

C - süsinik

CO₂ – süsinikdioksiid ehk süsihappegaas

ER (*ecosystem respiration*) - ökosüsteemi hingamise käigus eralduv CO₂, sisaldab nii taime kui mulla hingamist (autotroofne ja heterotroofne hingamine).

GPP (*gross primary production*) – ökosüsteemi (bruto)primaarproduksioon, näitab taimede poolt seotud süsiniku kogust fotosünteesi käigus.

NEE (*net ecosystem CO₂ exchange*) – ökosüsteemi CO₂ bilanss. Ökosüsteemist hingamise käigus emiteeruva CO₂ koguse ja fotosünteesi käigus atmosfäärist ökosüsteemi seotava CO₂ koguse vahe. Negatiivsete väärtuste korral seob ökosüsteem rohkem CO₂ kui emiteerib, positiivsete väärtuste puhul on emiteerimine ülekaalus.

CH₄ – metaan

GWP (*global warming potential*) - globaalse soojenemise potentsiaal, näitab, mitu korda on soojusenergia absorbeerumisvõime poolest muu kasvuhoonegaasi üks molekul tugevam kui süsinikdioksiidi molekul.

PAR (*photosynthetically active radiation*) - fotosünteesiliselt aktiivne kiirgus, päikesekiirguse spektri osa, mida fotosünteesivad organismid kasutavad fotosünteesi läbiviimiseks.

Sissejuhatus

Turbaaladel on planeedi süsinikuringes oluline roll. Kuigi vaid umbes 3% ehk 4 miljonit km² maismaa pindalast on kaetud turbaaladega, on nendes talletunud kolmandik muldades sisalduvast süsinikust (Joosten and Clarke, 2002). Enim turbaalaid asub lähisarktilises ja boreaalses kliimavöötmes, kuid neid leidub ka parasvöötmes ja troopikas (Gorham, 1991).

Eesti maastikupildis on sood tavapärased ja aastakümneid on kirjanduses esitatud, et 22,3% Eesti maismaapindalast ehk 1 009 101 ha on eri tüüpi soodega kaetud (Orru, 1995). Antud arvestus aga ei ole tänapäeval enam korrektne, sest soo ja turbaala mõiste on täpsustunud ning kuigi kõiki möödunud sajandil soodena käsitletud alasid määratletakse küll turbaaladena, on neist osa vaid sood. Lisaks on viimased uuringud näidanud, et looduslikus seisundis sood on seni arvatust märgatavalt vähem. Võrreldes 1950. aastatega, mil algas süstemaatiline maaparandamine ja soode kuivendamine, on looduslikus seisundis soode pindala tänapäeval umbes 2,8 korda väiksem, kattes 5,5% ehk 250 000 ha Eesti pindalast (Paal ja Leibak, 2013).

Looduslikus seisundis turbaalad seovad süsihappegaasi (CO₂), emiteerivad metaani (CH₄) ja väheses koguses naerugaasi (dihämmastikoksiid, N₂O), mis on ühed olulisemad kasvuhoonegaasid, ning mõjutavad seeläbi globaalset kliimat (Minkkinen et al., 2002). Nii kliimamuutustest põhjustatud kuivamise, veetaseme alanemise tulemusena kui kuivendamise ja muu ökosüsteemi häiriva inimtegevuse tagajärjel soo ökoloogilised funktsioonid muutuvad ning soost kui CO₂ sidujast võib saada CO₂ allikas (Salm et al., 2009).

Arvatakse, et umbes 70% Eesti soodest on kuivendusest mõjutatud ning nende roll CO₂ talletajana on vahetunud CO₂ allika vastu (Salm et al., 2011). Maailma mastaabis on kuivendamisest mõjutatud umbes 20% soo- ja turbaaladest (Bansal et al., 2023; Biasi et al., 2008). Kui lisaks arvata alad, kus looduslike protsesside ja kliimamuutuse tulemusena on turba akumulatsioon katkenud, on kuivendamisest mõjutatud hinnanguliselt 40% kõigist turba- ja soodaladest (Joosten and Clarke, 2002).

Seni on läbi viidud mitmeid teadustöid (Waddington and Roulet, 2000; Bubier et al., 2003; Lafleur et al., 2003; Nykanen et al., 2003; Syed et al., 2006), mis uurivad ulatuslikult kuivendatud turbaalade süsinikubilanssi ja CO₂ voogude rolli selles, kuid vähe on uuritud, kuidas muutub kuivendatud aladega piirnevate looduslike rabade servaalade CO₂ bilanss (Salm et al., 2011). Antud teemat on uuritud projekti 2386 SFL nr 3-2_15/45-8/2011 „Soode

ökoloogilise funktsionaalsuse tagamiseks vajalike puhvertsoonide määratlemine pikaajalise häiringu leviku piiramiseks või leevendamiseks“ (Kull, 2016, 2013a) raames ja sellega seotult on avaldatud ka teisi uurimusi (Maddison et al., 2021; Pihlap, 2016; Veber, 2021).

Magistritöö eesmärgiks oli uurida, kas kuivenduskraavist erineval kaugusel asuvate mõõtmispunktide CO₂ bilanssi panustavate voogude (NEE – ökosüsteemi CO₂ bilanss, RE – ökosüsteemi poolt hingamise käigus eralduv CO₂, GPP – primaarproduktioon, fotosünteesi käigus ökosüsteemi poolt seotav CO₂ hulk) vahel leidub erinevusi ehk kas kuivendus mõjutab CO₂ bilanssi, mis on üks raba loodusliku seisundi näite.

Püstitatud uurimusküsimuse kontrollimiseks mõõdeti kahes freesturbaväljaga külgnevas rabas: Laukasoos ja Umbusis, dünaamilise kambri meetodil CO₂ emissiooni voogusid ja analüüsiti seeläbi CO₂ bilanssi. Lisaks uuriti CO₂ bilansi ajalist muutlikkust ning seost veetaseme, mullatemperatuuri ja taimestikuga.

Magistritöö andmed koguti Keskkonnainvesteeringute keskuse toetatud projekti „Soode ökoloogilise funktsionaalsuse tagamiseks vajalike puhvertsoonide määratlemine pikaajalise häiringu leviku piiramiseks või leevendamiseks“ raames rajatud mõõtmisaladelt.

1. Süsinikdioksiidi (CO₂) vood ja bilanss soodes

1.1. Soo mõiste

Sõltuvalt regioonist ja eesmärgist on märgalade klassifitseerimiseks kasutatud mitmeid mõisteid ja meetodeid. Katusterminina kasutatakse mõistet „märgalad“ (i.k *wetland*), mis Ramsari konventsiooni artikli 1.1 põhjal on märgalad: „lodud, sood, turbaalad või veekogud, mis on kas looduslikud või inimese poolt rajatud, püsivad või ajutised; märgalad on küllastunud veega, mis on kas seisev, voolav, mage, riim-või soolane vesi, hõlmates, seejuures ka merealad, kus vee sügavus ei ületa kuut meetrit.“ (Eesti Märgalade Ühing; cit Ramsar, 1971)

Eesti kontekstis on Masing (1988) defineerinud turbaala ja soo järgmiselt:

- Turbaala on selline osa maastikust, kus alalise veerohkuse ja hapnikuvaeguse tõttu mullas jääb osa orgaanilist ainet lagunemata ning ladestub turbana.
- Soo on turbaala, kus turbakihi paksus on üle 30 cm ning selle ladestumine ei ole katkenud.

Soo on üldiselt jagatud kolmeks tüübiks (Masing, 1988)

- Raba ehk kõrgsoo on soo tüüp, milles turbalasukk on nii paks, et raba pind kummub üle ümbritseva maastiku ja sellel kasvavad taimed saavad oma toitained üksnes sademeveest ja selle poolt adsorbeeritud tolmust (taimede ombrotroofne toitumine).
- Madalsoo on soo, kus turbakiht on piisavalt õhuke, et taimed saavad toitained põhjaveest.
- Siirdesoo on üleminekusoo madalsoo raba vahel.

1.2. Soode levik ja kasutamine

Tänapäevased turbaalad on tekkinud viimase 6 000 kuni 10 000 aasta jooksul turba ehk mittetäielikult lagunenu taime- ja organismide jäänuste akumulatsioonide tagajärjel. Orgaanika akumulatsioonide eelduseks on pinnase küllastumine väheliikva ja hapnikuvaese veega, mis loob anaeroobsed tingimused, kus on pärsitud orgaanilise aine lagunemist põhjustav oksüdatsioon ja mikroobide elutegevus. Turbatekke kiirus sõltub kohalikest tingimustest, kuid looduslikuks turbatekkeks on hinnatud 0,5 – 1 mm aastas (Parish et al., 2008)

Turbaalasad leidub troopikast lähisarktilise kliimavöötmeni. Enim turbaalasad asub põhjapoolkeral paras- , lähisarktilises ja boreaalses kliimavöötmes (3,5 miljonit km²) (Mitsch and Gosselink, 2015), kus kliimatingimused jaheda temperatuuri ning rohkete sademete näol soodustavad veega küllastunud pinnase tekkimist. Lisaks alalisele kõrgele veetasemele on turba tekkel olulisemad tegurid pinnamood, lähtekivim ja taimestik (Joosten and Clarke, 2002). Suured turbavarud jäävad Põhja-Ameerikasse, Euroopasse ja Siberisse. Suurimad troopilised turbavarud jäävad Indoneesiasse (Joosten and Clarke, 2002). Eestis hinnatakse, et turbaalasad on 0,01 miljonit km², mis moodustab 22,3% Eesti pindalast. Soid on Eestis 250 000 ha ja need katavad 5,5% Eesti pindalast (Paal ja Leibak, 2013).

Soid ja turbaalasad on kasutatud ajalooliselt eelkõige põllumajanduslikel, metsanduslikel ja turba varumise eesmärgil (Paal and Leibak, 2013; Valk, 1988). Turba varumine põletamiseks toimus turbarikastel aladel nagu Iirimaa ja Šotimaa juba ligi tuhat aastat tagasi. Varutud kogused olid väikesed ning turvast lõigati soodsamates kohtades, mis ei nõudnud eraldi kuivendamist. 11. - 12. sajandil hakati Hollandis, Iirimaa ja mujal Lääne-Euroopas liigniiskeid alasid laialdasemalt kuivendama, et uusi alasid saaks põllumajandusmaana kasutusele võtta (Jakobson, 2015).

Eestis hakati turvast küttematerjalina kasutama laiemalt 18. sajandi keskpaigas, kuid töö toimus käsitsi veel sajandi jooksul, mistõttu kaevamise aga kuivendamise mahud ei olnud suured. 20. sajandi esimeses pooles hakati soid kuivendama põllumaade saamiseks, tegevus intensiivistus oluliselt 1950ndatel aastatel, kui riik soosis viljakate turvasmuldade kuivendamist. On hinnatud, et 70% Eesti soodest on kuivendatud või kuivendamisest mõjutatud määral, mis takistab edasist turba akumulatsooni (Paal, 2005). Euroopa skaalal on hinnatud, et soode ja turbaalade pindala on vähenenud 52 %, globaalses skaalas 16 %. Mittetroopiliste turbaalade vähenemise põhjusteks on maakasutuse muutus soost põllumaaks (50 %), metsamaaks (30 %), turba kaevandusalaks (10 %) ja asulateks (5 %) (Joosten and Clarke, 2002).

Maailma mastaabis on kuivendamisest mõjutatud umbes 20% soo- ja turbaaladest (Bansal et al., 2023; Biasi et al., 2008). Kui siia hulka arvata ka turba-ja soosalasid, kus looduslike protsesside ja kliimamuutuse tulemusena on turba akumulatsioon katkenud, on selleks 40% (Joosten and Clarke, 2002).

1.3. Soode kuivendamine

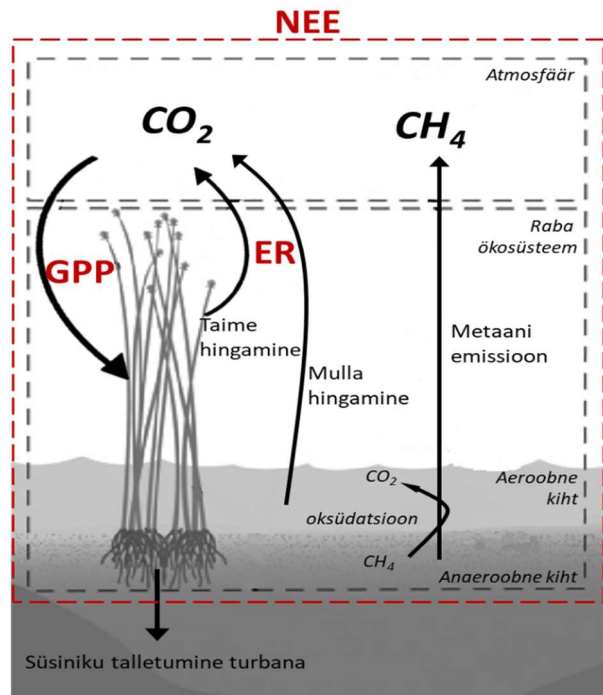
Soode kuivendamiseks ehitatakse tavaliselt kraavid ümber ala, kus soovitakse alandada looduslikku veetaset ja takistada vee juurdevool külgnevatele aladele. Veetaseme alanemine muudab hüdroloogilist režiimi, mis omakorda mõjutab mitmeid teisi soo ökosüsteemile omaseid keskkonnaparameetreid.

Veetaseme alanemisel muutub veega küllastunud anaeroobne turvasmuld aeroobseks, mistõttu intensiivistuvad mikroorganismide tegevus ja orgaanilise aine lagunemisprotsessid. See mõjutab gaasivoogusid ökosüsteemi ja atmosfääri vahel. Looduslikus seisundis turbaalad talletavad süsinikdioksiidi (CO_2), emiteerivad metaani (CH_4) ja väheses koguses diämmastikoksiidi (N_2O). Kuivendamise tulemusena suureneb CO_2 emissioon ja väheneb CH_4 emissioon.

Oluliste keskkonnaparameetrite nagu veetaseme, mulla aereerituse ja happelisuse muutus mõjutab ka taimestikku ning võib viia muutustele turbasambla (*Sphagnum*) esinemises või liigilises koosseisus. Turbasammal on rabale iseloomulik liik ning peamine taimeliik, millest turvas moodustub. Kui turbasammal asendub teiste sambla liikidega, siis ka turba akumulatsioon on takistatud. (Paal, 2005; Purre, 2021)

1.4. CO_2 vood ja bilanss soo ökosüsteemis

Soo ökosüsteemi süsiniku bilanss koosneb erinevatest voogudest, mille võib jagada kaheks suuremaks osaks: ökosüsteemi ja atmosfääri vaheline CO_2 voog ja ökosüsteemi ja atmosfääri vaheline CH_4 voog, lisaks toimub vees lahustunud süsiniku sisse- ja väljakanne. Ökosüsteemi ja atmosfääri vahelise CO_2 voo moodustavad fotosünteesi käigus CO_2 sidumine taimedesse ja nii taimede kui mullaelustiku hingamisel eralduv CO_2 . Mullahingamine jagatakse omakorda veel autotroofseks ja heterotroofseks hingamiseks. Metaan (CH_4), mille globaalse soojenemise potentsiaal on CO_2 võrreldes 28 korda suurem ($\text{GWP CH}_4 = 28 \text{ kg CO}_2 \text{ ekvivalenti}$) (IPCC, 2014), tekib anaeroobses pinnasekihis mikroorganismide elutegevuse tulemusena. Osa tekkinud metaanist vabaneb atmosfääri difusiooni, gaasimullide või taimede kaudu, osa oksüdeerub anaeroobses kui aeroobses kihis bakterite tegevuse tagajärjel (Mitsch and Gosselink, 2015). Skeem soo ökosüsteemi süsiniku bilansi peamiste komponentide kohta on toodud Joonis 1.



Joonis 1. Skeem raba ökosüsteemi ja atmosfääri vahelise süsinikubilansi (NEE) peamiste voogude kohta. GPP- primaarproduksioon, ER – ökosüsteemi hingamine (sisaldab nii taime kui mullahingamist). Joonis kohandatud (Mitsch et al., 2013; Zamora et al., 2022) järgi.

Ökosüsteemi CO_2 bilansi (*NEE*- *net ecosystem exchange*) kirjeldataksegi ökosüsteemi hingamise (ER – *ecosystem respiration*) ja taimede poolt seotud CO_2 koguse ehk primaarproduksiooni (GPP – *gross primary production*) vahena.

Erinevates uuringutes on kasutatud sama voo määratlemiseks kas positiivset või negatiivset skaalat sõltuvalt sellest, kas arvutused on tehtud atmosfääri või ökosüsteemi vaatest (Bansal et al., 2023). Kambrisüsteeme kasutades on lähtunud sellest, et nii ökosüsteemi hingamine (ER) kui primaarproduksioon (GPP) on positiivsed vood.

Positiivne CO_2 bilansi (NEE) väärtus näitab, et tegu on CO_2 allika ehk emiteeriva ökosüsteemiga ning see tähendab, et CO_2 emiteeritakse rohkem kui seotakse. Kui ökosüsteem seob rohkem CO_2 on tegemist CO_2 neelamisega ehk sidumisega ning siis on NEE väärtused negatiivsed.

2. Materjal ja metoodika

2.1. Uurimisalade kirjeldus

Süsinikdioksiidi voo mõõtmisi viidi läbi kahel uurimisalal:

- 1) Umbusi rabas (Pikknurme küla, Põltsamaa vald, Jõgeva maakond),
- 2) Laukasoo rabas (Sirgumetsa küla, Luunja vald, Tartu maakond).

Mõlemad uurimisalad paiknevad sügava, mineraalpinnaseni ulatuva kuivenduskraavi ääres, mis eraldab looduslikku raba freesturbaväljast. Kuivenduskraavist umbes 20 meetri kaugusel asub täiendavat drenivat mõju omav akrotelmi läbiv 0,5 meetri sügavune lisakraav.

Umbusi raba on tüübilt ombrotroofne älve- ja laukarohke lageraba, kus kasvab üksikuid mände. See on tekkinud Võrtsjärve nõo põhjaosas Põltsamaa ja tema lisajõgede lammide ja järvede soostumisel boreaalse kliimaperioodi soojades ja niisketes tingimustes (Orru, 1995). Umbes 8000 aasta jooksul on alal moodustunud kuni 8- meetri tusedune turbakiht. Paks turbakiht katab ka uurimisala, kuid kuivenduskraavi lähedal on see kuni 2 m kokku vajunud (Kull, 2013). Mineraalpinnasele (liiv, savi, aleuriit, moreen, soo keskosas ka paks järvelubjakiht) on soostumise alguses ladestunud esmalt rohutarnaturvas, järgnevalt vähelagunenud tarnaturvas, milles leidub ka pilliroogu. Madalsooturbal lasuvad lühikese perioodi kestel ladestunud sfagnumirohked siirdesooturbad ja pindmise rabaturba lasundi moodustab põhiliselt eri lagunemisastmega puhas sfagnumiturvas, milles esineb älve-, kanarbiku- ja männiturba läätseid (Kull, 2013; Orru, 1995).

Turbaala kirdeosas paikneb 65 ha suurune freesturbaväli. Väheses mahus toimus käsitöönduslik turbakaevandamine seal juba perioodil 1935- 1939, kuid peamine kuivendamine ja eesvoolude rajamine leidis alal aset 1964. aastal (Kull, 2013). 1966. aastal alustas turba kaevandamisega Jõgeva EPT (Ramst et al., 2006). Hetkel tegeleb kaevandamisega AS Tara-Torf, mille turbatoodang Umbusi rabas oli 2021. aastal 16 690 m³ ja 2022. aastal 21 590 m³ (Aktiaselts TARA-TORF, 2022).

Ülejäänud osa Umbusi rabast, kus asub ka uurimisala, on kaitsealuste objektide nimistus Umbusi raba sihtkaitsevööndina (KLO1101373). See asub Alam-Pedja looduskaitsealal (KLO1000455), mis asutati 1994. aastal rikkumata veerežiimiga tervikliku maastiku kaitseks, kus leidub suuri soid, erinevaid metsatüüpe, suuri jõgesid koos oma vanajõgedega ning luhaalaseid (EELIS, 2024a). Looduskaitseala liideti 1997. aastast rahvusvahelise tähtsusega

märgalade (Ramsari alade) hulka ja 2004. aastast Euroopa Liidu Natura kaitsealade võrgustikku (Paal and Leibak, 2013). Umbusi raba sihtkaitsevöönd hõlmab Alam- Pedja looduskaitseala 34 220 ha suurusest pindalast 622 ha ja selle konkreetsem kaitse-eesmärk on ökosüsteemide arengu tagamine loodusliku protsessina ning kaitstavate liikide elupaikade kaitse (Alam-Pedja looduskaitseala kaitse-eeskiri, 2007; EELIS, n.d.).

Laukasoo puhul on tegu järve soostumisel tekkinud puisrabaga, ida- ja põhjaosas katab raba siirdesoomets (Orru, 1995). Turbakihi paksus on kuni 6 meetrit, mis on freesvälja eraldava kuivenduskaavi mõjul tugevasti kokku vajunud: uurimisala transekti alguses üle kahe meetri võrra (Kull, 2013). Liivale ja savile on ladestunud esmalt rohu-lehtsamblad, seejärel rabafaasile omase turbakihi moodustavad sfagnumi ja tupp-villpea jäänused koos puidujäänustega. Pindmise turbakihi moodustab älveturba läätседega üldiselt puhas sfagnumiturvas (Kull, 2013; Orru, 1995).

Turbaala edelaosas asub 196 ha suurune freesturbaväli, kus asus 1970. a turvast kaevandama Tartu EPT, selle kuivendus pärineb aastast 1966 (Kull, 2013; Ramst et al., 2006). Varasemalt on maardlal toodetud tükkTURVAST ning väheses mahus 1950. aastatel freestURVAST (Ramst et al., 2006). Alates 2002. a kaevandab LaukasOOS freestURVAST OÜ Lauka Turvas, mis ühines 2012. a AS Tartu Jõujaamaga (Ramst et al., 2006). 2005. aastal omandas AS Gren Tartu tütarfirma AS Tartu Jõujaam 100%-lise osaluse OÜ-s Lauka Turvas. LaukasOOS on geoloogilistele uuringute põhjal hinnatud turba koguarud 518 475 m³ (Gren Tartu AS, 2022).

Vahetult ida poolt piirneb tootmisala Pähklisaare looduskaitsealaga (KLO1000649), mille põhieesmärk on kaitsta laugasjärvi ja rabakooslusi, millisest on älves-laugas kompleks Laukasoo keskosas hästi säilinud. (EELIS, b).

2.2. Välitööde metoodika

Mõõtmisi teostati Keskkonnainvesteeringute Keskuse rahastatud projekti 2386 SFL nr 3-2_15/45-8/2011 (Kull, 2016, 2013) läbiviimiseks rajatud uurimisaladel. Uurimisala moodustasid kuivenduskraaviga risti asetseva ja kuivenduskraavi kaldast raba keskosa suunalisel transektil paiknevad mõõtmispunktid (Joonis 2). Transekti alguspunkt asus kas kuivenduskraavi kaldal või mineraalmaa ja turvaspinna piiril, seejärel järgnevad mõõtepunktid regulaarselt kasvava sammuga kuni viimase punktini, mis asus võimalikult looduslähedastes

tingimustes. Mõõtepunktide kaugused olid spetsiifilisel uurimisalal valitud sõltuvalt häiringu mõju ulatusele (Kull, 2013). Projekti raames rajatud 7 mõõtmispunktist valiti mõlemal uurimisalal antud töö raames mõõtmiste teostamiseks välja 4 mõõtmispunkti, mis iseloomustaksid esinduslikult kuivendamisesest tingitud muutusi.

Igal mõõtmisalal oli pinnasele paigaldatud kolm kambriõngast kordusmõõtmiste tegemiseks ja veevaatluskaev veetaseme mõõtmiseks (Lisa 1: joonis 1). Tabel 1 annab ülevaate uurimisaladel asuvatest mõõtmisaladest ning neile vastavatest kaugustest (mõõdetuna raba servas asuvast kuivenduskraavist, mis eraldab rabamassiivi freesturbaväljast).

Tabel 1. Uurimisaladel asuvad mõõtmisalad koos vastavate kaugustega kuivenduskraavist (mõõdetud raba servas asuvast kuivenduskraavist, mis eraldab rabamassiivi freesturbaväljast) ning mõõtmispunktidele ja kambriõngastele määratud koodidega.

Uurimisala	Mõõtmiskoht	Kaugus kraavist (m)	Mõõtmisala lühend	Kambriõngad mõõtmisalal (3 kordust)
Laukasoo raba	Laukasoo 1	3	La1	La1a, La1b, La1c
Laukasoo raba	Laukasoo 4	38	La4	La4a, La4b, La4c
Laukasoo raba	Laukasoo 5	51	La5	La5a, La5b, La5c
Laukasoo raba	Laukasoo 7	125	La7	La7a, La7b, La7c
Umbusi raba	Umbusi 1	10	Um1	Um1a, Um1b, Um1c
Umbusi raba	Umbusi 4	50	Um4	Um4a, Um4b, Um4c
Umbusi raba	Umbusi 5	101	Um5	Um5a, Um5b, Um5c
Umbusi raba	Umbusi 6	201	Um6	Um6a, Um6b, Um6c

CO₂ bilansi mõõtmised viidi läbi perioodil 16. aprillist 4. detsembrini 2015. a. Mõõtmised toimumised iga kahe nädala tagant, kasutades dünaamilise suletud läbipaistva kambri meetodit (Lisa 1: joonised 2 ja 3). Antud meetodit on põhjalikult kirjeldanud Aro (2014), Drösler (2005), Järveoja (2015). oma uurimustöodes.



Joonis 2. Uurimisala skeem Umbusi raba näitel. Mõõtmisalade asukoht on transektil märgitud rohelise ristkülikuga, mille juurde on lisatud mõõtmisala number ja selle kaugus liikudes kuivenduskraavist (0) raba keskosa suunas. Igal mõõtmisalal paikneb kolm kambriõngast ja üks veevaatluskaev. Aluskaardina on kasutatud orto (**Maa-amet**).

Antud juhul (Joonis 3) koosnes kasutatud mõõtmisüsteem PAR- ja õhutemperatuuri sensoriga varustatud silindrikujulisest pleksiklaasist läbipaistvast kambri (maht 65 l, kõrgus 33 cm, läbipaistvus 95%), PP Systems infrapuna-gaasianalüsaatorist EGM-4, pumbast ja kaasaskantavast akust. Kamber ja analüsaator olid omavahel ühendatud kahe voolikuga, mis toimisid sisse- ja väljavooluna. Õhuringlussüsteemi oli lisatud pump, mis tagas analüüsitava õhu efektiivse ringluse. Otsese päikese kiirguse mõjul kambri sees õhutemperatuuri tõusu vältimiseks kõrgemaks välisõhu temperatuurist, kasutati kambri sees jahutuseks külmaelemente ja kambri sees ventilaatorit.



Joonis 3. Mõõtmisüsteem CO₂ voogude mõõtmiseks. Pildil on näha pleksiklaasist läbipaistev kamber lisadega ja infrapuna-gaasianalüsaator EGM-4.

Gaasianalüsaator EGM-4 on varustatud infrapunasensoriga, mille tööpõhimõte seisneb CO₂ molekuli võimel neelata footoneid infrapunakiirguse spektrivahemikus. Tänu sellele saab analüsaatoriga CO₂ kontsentratsioone täpselt ja kiirelt mõõta. Gaasianalüsaatori mõõtmistäpsus CO₂ puhul on <1% kalibreerimisvahemikust, milleks oli 0-1000 ppm ($\mu\text{mol}/\text{mol}$). Analüsaator mõõdab CO₂ kontsentratsiooni 1,2 sekundi tagant, näit salvestatakse nelja mõõtmise keskmistatud väärtusena iga 4,8 sekundi tagant (PP Systems, 2013).

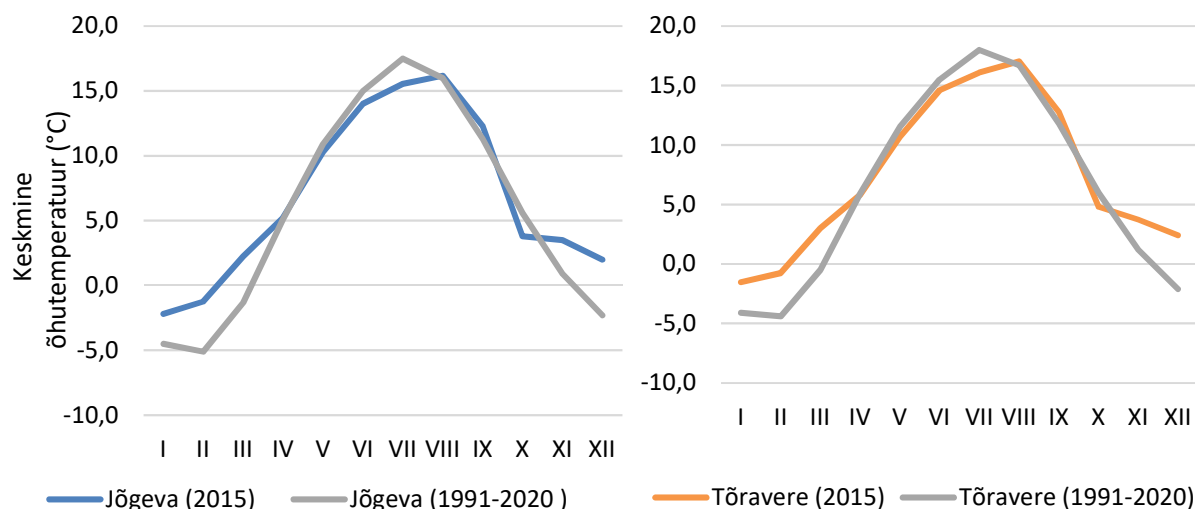
Gaasivoo mõõtmisperioodiks asetati läbipaistev kamber 15 cm sügavusele pinnasesse vajutatud plastrõnga platvormile, mis seejärel täideti veega, et saavutada kambris õhukindlus. Ökosüsteemi CO₂ bilansi (NEE) mõõtmiskord kestis 4 minutit ning igal mõõtmisalal mõõdeti läbipaistva kambriga kolmes korduses. Pärast NEE mõõtmisi kaeti läbipaistev kamber heleda valgustpeegeldava kattega ning teostati ökosüsteemi hingamise (ER) mõõtmised ka kolmes korduses ühe mõõtmisala kohta. Mõõtmisperioodi pikkuseks oli 3 minutit.

Igal mõõtmisalal asuvad 75 mm läbimõõduga perforeeritud polüpropüleenitorust veevaatluskaevud, mis olid paigaldatud 1,3 m sügavusele pinnasesse (Kull, 2013). Vaatluskaevude veetase maapinna suhtes mõõdeti käsitsi mõõdulindiga, mullatemperatuurid 10 cm, 20 cm, 30 cm ja 40 cm sügavusel salvestati temperatuurilogeriga (Comet Systems Ltd.).

2.3. Ilmaandmed

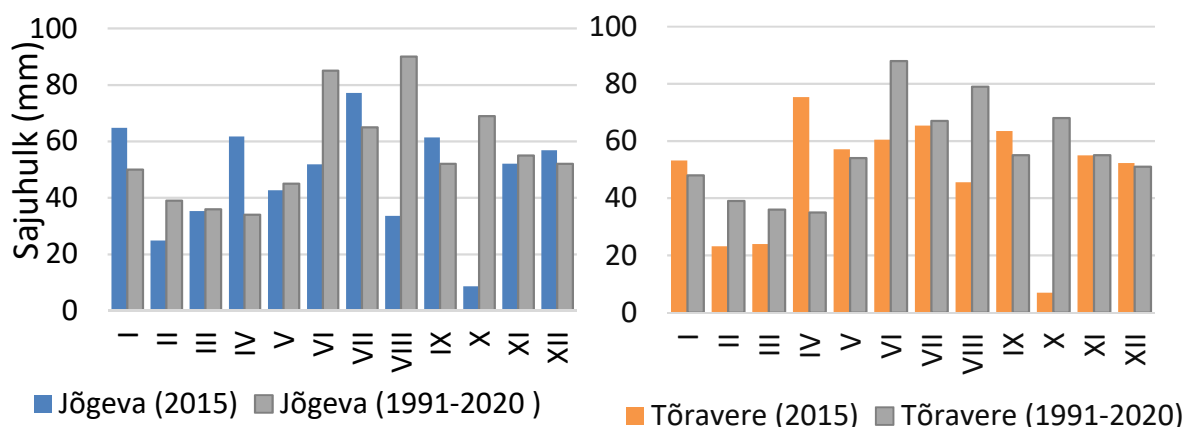
Laukasoo ilmastiku kirjeldamiseks kasutati Tartu- Tõravere meteoroloogiajaama ning Umbusi puhul Jõgeva meteoroloogiajaama andmeid ning kliimanormide (pikaajalised keskmised, 1991-2020) andmeid (Keskkonnaagentuur).

2015. aastal olid kuu keskmised õhutemperatuurid normist (30-aastase keskmine, 1991-2020) kõrgemad nii Jõgeva kui Tõravere andmete põhjal jaanuaris, veebruaris, märtsis, novembris ja detsembris, juulis oli kuu keskmine õhutemperatuur normist madalam (Joonis 4). Aasta keskmine õhutemperatuur oli Tõraveres 7,5°C, mis oli 1,2°C normist kõrgem (paljuaastane keskmine on 6,3°C). Jõgeval oli aasta keskmine õhutemperatuur 6,8°C, mis oli 1°C normist kõrgem (paljuaastane keskmine on 5,8 °C).



Joonis 4 Keskmine õhutemperatuur aastal 2015 ja paljuaastane keskmine (1991-2020) Tartu-Tõravere (Laukasoo kohta) ja Jõgeva (Umbusi kohta) meteoroloogiajaama andmete järgi.

Sademe poolest oli 2015. aasta märkimisväärselt sajuvaesem mõlema vaatlusala piirkonnas oktoobrikuus, kus sajuhulk oli ligi 10 korda normist väiksem, ning sajurikkam kevadel aprillis, kus sajuhulk oli kahekordne tavapärasest (Joonis 5). Aastane sajuhulk oli Tõraveres 581 mm, mis oli 85% normist (paljuaastane keskmine 673 mm). Jõgeval oli aastane sajuhulk 571 mm, mis oli 86% normist (paljuaastane keskmine 672 mm).



Joonis 5. Sajuhulk aastal 2015 ja paljuaastane keskmine (1991-2020) Tartu-Tõravere (Laukasoo kohta) ja Jõgeva (Umbusi kohta) meteoroloogiajaama andmete järgi.

2.4. Taimestiku andmed

Projektis 2386 SFL nr 3-2_15/45-8/2011 (Kull, 2013, 2013) oli üheks uurimisobjektiks kuivenduse mõju taimestikule, mistõttu viidi läbi detailne alustaimestiku uuring eraldi analüüsiruudul ja uuriti põõsa- ja puurinde järelkasvu. Lisaks hinnati mõõtmisalal iga kambriõnga sees taimestiku katvust (%) taimeliikide kaupa. Töös kasutatud taimede katvuse andmestik saadi projekti täitja Ain Kulli käest. Andmestikus oli iga kambriõnga kohta määratud taimede katvused (%) liikide järgi, mis olid omakorda grupeeritud rühmadeks: puud – põõsad, puhmad, rohhtaimed, samblad, ning samblikud. Sambla rühmas olid eristatud turbasamblad ja muud samblad.

2.5. Andmeanalüüs

Katseandmete töötlus ja kvaliteedikontroll viidi läbi programmiga Excel (Microsoft 365), kus gaasikontsentratsiooni lineaarse muutuse alusel arvutati välja gaasivoo intensiivsused iga kambriõnga jaoks (Hutchinson and Livingston, 1993; Järveoja et al., 2016). Selleks kasutati mõõteperioodist 2-minutilist akent, kus lineaarse regressiooni determinatsioonikordaja (R^2) omas kõrgeimat väärtust. Determinatsioonikordaja lävendiks oli 0,8. Juhul, kui gaasivoo muutus oli madalam kui $0,0625 \text{ ppm sek}^{-1}$, siis R^2 lävendi kriteeriumit ei rakendatud.

Seejärel teisendati CO₂ kontsentratsioon (ppm sek⁻¹) CO₂-C vooks (mg CO₂-C m⁻² h⁻¹) ideaalgaasi olekuvõrrandi (valem 1) alusel:

$$F = S \times \frac{p \times V \times M \times t}{R \times T \times A \times A} \quad (\text{Valem 1})$$

Valemis 1 on F - arvutatud CO₂-C voog, S - CO₂ kontsentratsiooni lineaarne tõus, p - keskmine õhurõhk, V – kambri ruumala, M – CO₂ molaarmass (44.01 g mol⁻¹), t – mõõtmise kestus, R – universaalne gaasikonstant (8,3143 J mol⁻¹ K⁻¹), t – kambrisine keskmine temperatuur mõõtmise jooksul, A – kambrialune pindala.

Ökosüsteemi (bruto)primaarproduksioon (GPP) leiti arvutuslikult lahutades ökosüsteemi hingamisel eraldunud CO₂ hulgast (ER) ökosüsteemi CO₂ bilansi (NEE) (valem 2):

$$GPP = ER - NEE \quad (\text{Valem 2})$$

2.6. Statistiline analüüs

Statistiline andmeanalüüs viidi läbi vabavaralise programmiga R-4.4.0. Eelnevalt väljaarvutatud kambriõhugastele vastavad gaasivood keskmistati iga mõõtmisala kohta (3 kordust igal mõõtmisalal), et vältida pseudoreplikatsiooni edasises statistilises analüüsis (Veber, 2021).

Muutujate normaaljaotuse kontrollimiseks kasutati Shapiro-Wilki, Kolmogorov-Smirnovi, Lillieforsi teste. CO₂-C voogude (NEE, ER ja GPP) jaotused ei vastanud kõikidel juhtudel normaaljaotusele, mistõttu rühmavaheliste erinevuste tuvastamiseks kasutati mitteparameetrilist Kruskal-Wallis ANOVA testi koos Mann-Whitney U testiga.

Keskkonnaparameetrite ja CO₂ voogude seoste uurimiseks viidi läbi korrelatsioonianalüüsid. Mõõtmisalade veetasemete mõõtetulemused ei vastanud normaaljaotusele ning nendevaheliste erinevuste analüüsimisel kasutati Kruskal-Wallis ANOVA testi koos Mann-Whitney U testiga. Seost veetaseme ja CO₂ voogude (NEE, ER, GPP) vahel analüüsiti Spearmani astakorrelatsiooniga.

Mullatemperatuurid eri sügavustel (10 cm, 20 cm, 30 cm, 40 cm) vastasid normaaljaotusele. Seost eri sügavusel mõõdetud mullatemperatuuride ja CO₂ voogude (NEE, ER, GPP) vahel analüüsiti Spearmani astakkorrelatsiooniga.

Taimerühmade katvused ei vastanud normaaljaotusele. Seost taimerühmade aastaste CO₂ voogude (NEE, ER, GPP) vahel analüüsiti Spearmani astakkorrelatsiooniga.

2.7. GPP ja ER aastase voo arvutamine

Valemite 3 ja 4 põhjal arvutati 2015. aasta jaoks iga tunni kohta välja GPP, kasutades PAR andmeid tunni kohta, ja ER, kasutades õhutemperatuuri andmeid tunni kohta. Tartu- Tõravere meteoroloogiajaama ilmaandmeid kasutati Laukasoo jaoks ning Umbusi puhul kasutati Jõgeva meteoroloogiajaama andmeid (Keskkonnaagentuur, n.d.).

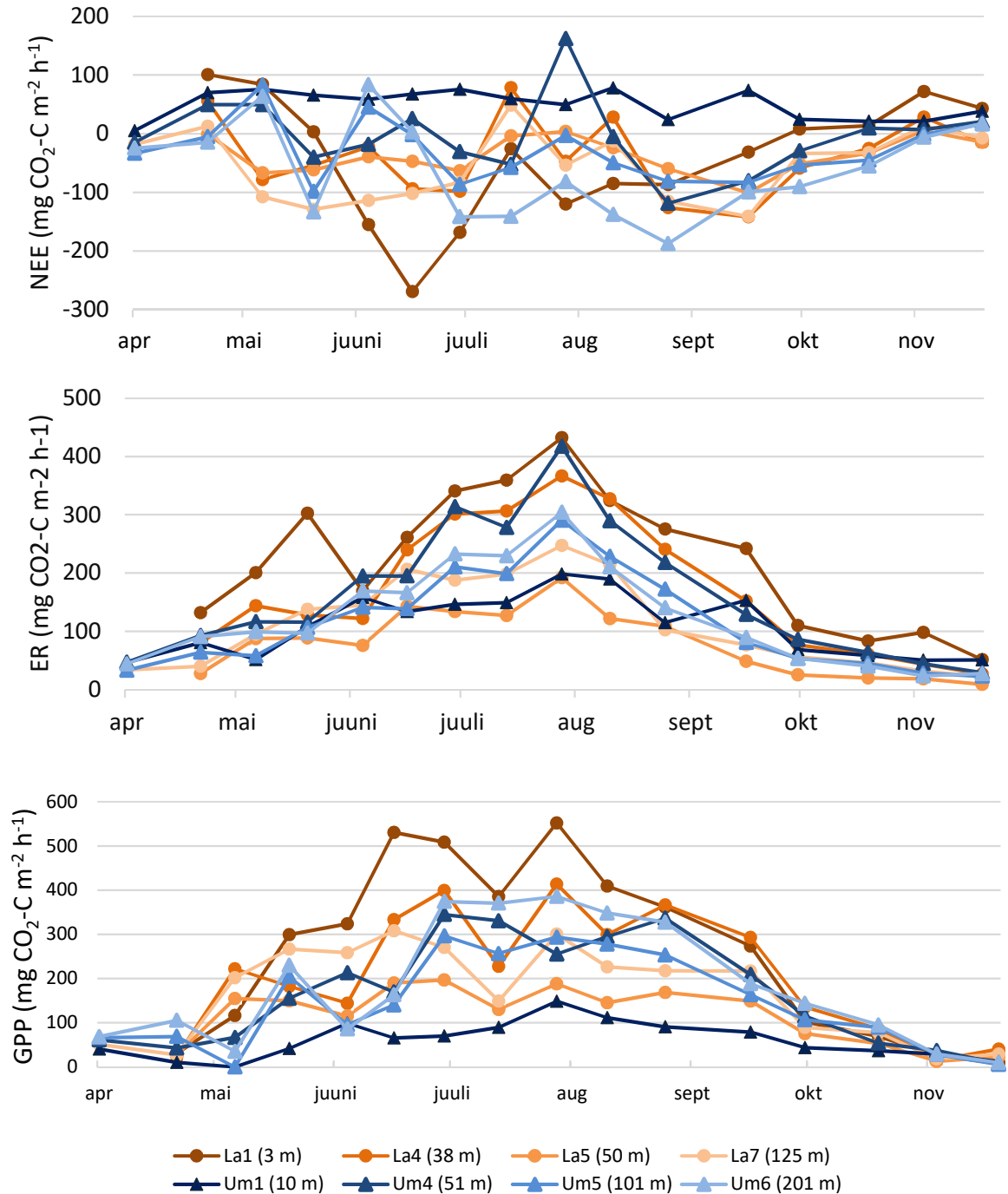
GPP ja ER aastase voo arvutamiseks kasutati parimat statistilist seost mõõdetud keskkonnaparameetritega, milleks oli GPP puhul PAR (fotosünteetiliselt aktiivne kiirgus) ja ER puhul õhutemperatuur. GPP ja ER arvutati 2015. a. iga tunni kohta iga kambriõngal ning seejärel summeeriti saadud tulemused aastaseks vooks ($\text{kg CO}_2\text{-C m}^{-2}\text{a}^{-1}$).

GPP jaoks kasutati Tartu-Tõravere meteoroloogiajaamas mõõdetud PAR-i (Keskkonnaagentuur, n.d.). Tartu-Tõravere meteoroloogiajaamas mõõdetud õhutemperatuuri kasutati Laukasoo ning Jõgeva meteoroloogiajaama andmeid Umbusi puhul.

3. Tulemused ja arutelu

3.1. CO₂ vood ja bilanss

Mõõtmistulemused varieerusid nii ökosüsteemi CO₂ bilansi (NEE), hingamisel eraldunud CO₂ (ER) kui eelmise kahe näitaja põhjal arvatud primaarproduksiooni (GPP) puhul nii ühe mõõtmisala kui kõigi mõõtmisalade lõikes suures ulatuses.



Joonis 6. Ökosüsteemi CO₂ bilansi (NEE), hingamise (ER) ja primaarproduksiooni (GPP) väärtused Laukasoo rabas ja Umbusi rabas mõõtmisperioodi (16.04 - 4.12 2015) jooksul.

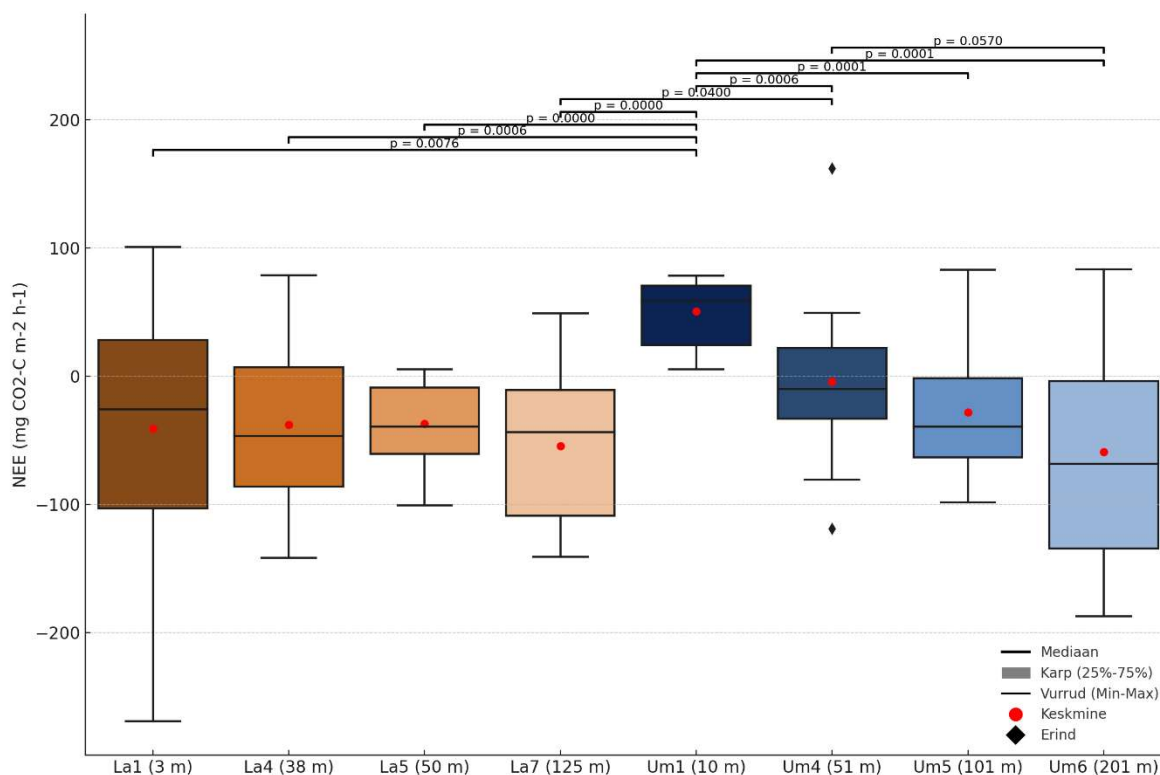
Mõõtmistulemuste suurest varieeruvusest hoolimata on parasvöötmele tüüpiline sesoonne käik selgelt eristatav nii ER kui GPP puhul (Joonis 6). Vegetatsiooniperioodi alguses ja lõpus olid nii hingamine kui taimeproduktioon madalamad, juunis toimus kiire tõus, kõige intensiivsemad tulemused mõõdeti suvekuudel juulis ja augustis ning septembris toimus intensiivsuse langus. NEE puhul olid täheldatavad vähese intensiivsusega väärtused samuti aprillis ning novembris ja detsembris. Suvel ja soojal sügisperioodil toimus mõõtepunktides kas CO₂ sidumine või emiteerimine. Sellist CO₂ voogude hooajalise käiku on kirjeldanud ka Bansal et al. (2023), Lindroth et al (2007). Kull (2016) on välja toonud, et tugeva kuivenduse mõjuga freesturbaväljaga piirneva raba puhul on iseloomulik, et CO₂ emissioon kasvab kevadel väga kiirest kraavile lähemal, kus alanenud veetaseme tõttu kuivem maapind sulab ja soojeneb kiiremini. Kiiret tõusu mais on märgata Laukasoo La1a kraavile lähimas punktis, kuid mitte Umbusis.

Statistilise analüüsi käigus ilmnisid olulised erinevused mõõtmisalade vahel NEE, GPP ja ER mediaanväärtuste puhul.

Joonis 7 kirjeldab ökosüsteemi CO₂ bilansi varieeruvust proovialadel. NEE oli tugevalt positiivne Umbusi uurimisalal kuivenduskraavile lähimal (10 m) mõõtmisalal Um1 (mediaanväärtus 59 mg CO₂-C m⁻²h⁻¹) ja see erines statistilise usaldusväärsusega (p<0,05) teistest Umbusis ja Laukasoo asuvate mõõtmisalade mediaanväärtustest, mis olid negatiivsed. See näitas, et mõõtmisalal Um1 emiteeriti CO₂, teistel mõõtmisaladel oli aga ülekaalus CO₂ ökosüsteemi sidumine, mis Umbusi uurimisalal kuivenduskraavist kaugenedes intensiivistus: 201 meetri kaugusel asuval mõõtmisalal Um6 toimus kõige intensiivsem CO₂ sidumine (-68 mg CO₂-C m⁻²h⁻¹), järgnesid kuivenduskraavist 101 m kaugusel paiknev mõõtmisala Um5 (-39 mg CO₂-C m⁻²h⁻¹) ja 51 m kaugusel paiknev mõõtmisala Um4 (-10 mg CO₂-C m⁻² h⁻¹). Statistiliselt usaldusväärne erinevus (p<0,05) esines ka mõõtmisalade Um4 ja Um6 vahel ning La7 ja Um4 vahel.

Laukasoo kuivenduskraavist erineval kaugusel paiknevate mõõtmisalade vahel ei leitud statistiliselt usaldusväärset erinevust (p<0,5). Mõõtmisaladel La4, La5 ja La7 toimus mediaanväärtuste järgi küll CO₂ sidumine, kuid ei täheldatud sellist trendi nagu Umbusi uurimisalal, kus kuivenduskraavist kaugenedes CO₂ sidumine ökosüsteemi intensiivistus. Mõõtmisalal La1 esines juhtumeid, kus CO₂ bilansi järgi toimus CO₂ emiteerimine, kui ka intensiivne CO₂ sidumine ökosüsteemi, millele viitavad väga madalad üksikväärtused. Kõige suurem NEE varieeruvus esines La1 väärtuste juures: negatiivsest väärtusest -269 mg m⁻² h⁻¹

kuni 100 mg CO₂-C m⁻² h⁻¹ positiivse väärtuseni. Teiste mõõtmisalade juures nii suurt varieeruvust ei täheldatud.

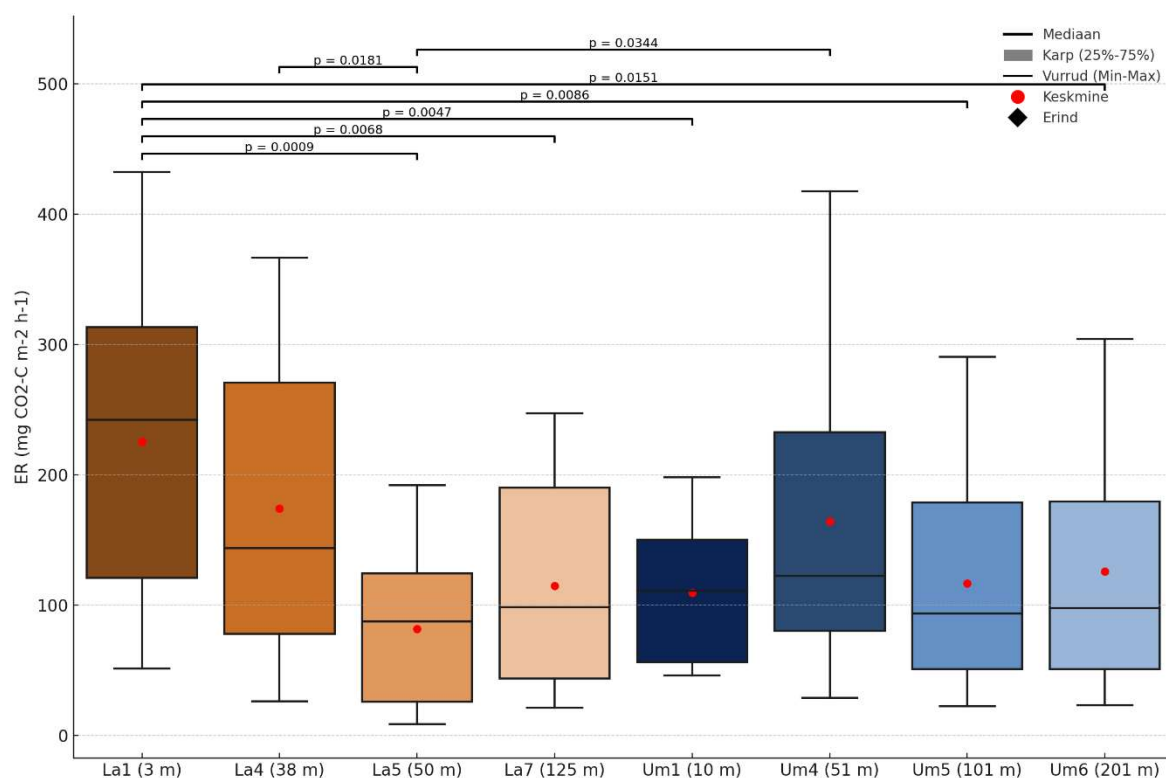


Joonis 7. Ökosüsteemi CO₂ bilanss (NEE) Laukasoo raba (La1, La4, La5, La7) ja Umbusi raba (Um1, Um4, Um5, Um6) uurimisaladel. Joonisel on toodud mõõtmisalade lühendid ja sulgudes vastava mõõtmisalala kaugus kuivenduskraavist. Karpdiagrammide kohale on märgitud, milliste mõõtmisalade mediaanväärtuste vahel leidis statistiliselt usaldusväärne erinevus.

Joonis 8 kirjeldab ökosüsteemi hingamise (ER) varieeruvust mõõtmisaladel. Ökosüsteemi hingamisel emiteeritus CO₂ (ER) mõõtmisalade lõikes, v.a La1, vahemikus 88 - 122 mg CO₂-C m⁻² h⁻¹. Mõõtmisalade seast eristus La1, mille ER puhul statistiliselt usaldusväärsed erinevused (p<0.05) leidsid mõõtmisaladega La5, La7, Um1, Um5 ja Um6. La1 omas kõrgeimat ER mediaanväärtust (242 mg CO₂-C m⁻² h⁻¹, ning kõrgeimad maksimumväärtusi (kuni 432 mg CO₂-C m⁻² h⁻¹). Kõrgemad maksimumväärtused esinesid ka mõõtmispunktides La4 (kuni 367 mg CO₂-C m⁻² h⁻¹) ja Um4 (kuni 418 mg CO₂-C m⁻² h⁻¹).

Uurides ER mõõtmistulemuste hajuvust eraldi Laukasoo uurimisalal, nähtus, et mõõtmisaladel, mis on kuivenduskraavile lähemal: kuivenduskraavist 3 meetri kaugusel asuv La1 (242 mg CO₂-C m⁻² h⁻¹) ja 38 meetri kaugusel asuv La4 (143 mg CO₂-C m⁻² h⁻¹), on ER intensiivsus suurem kui kuivenduskraavist kaugemal asuvatel mõõtmisaladel: 50 m kaugusel asuv La5 (88

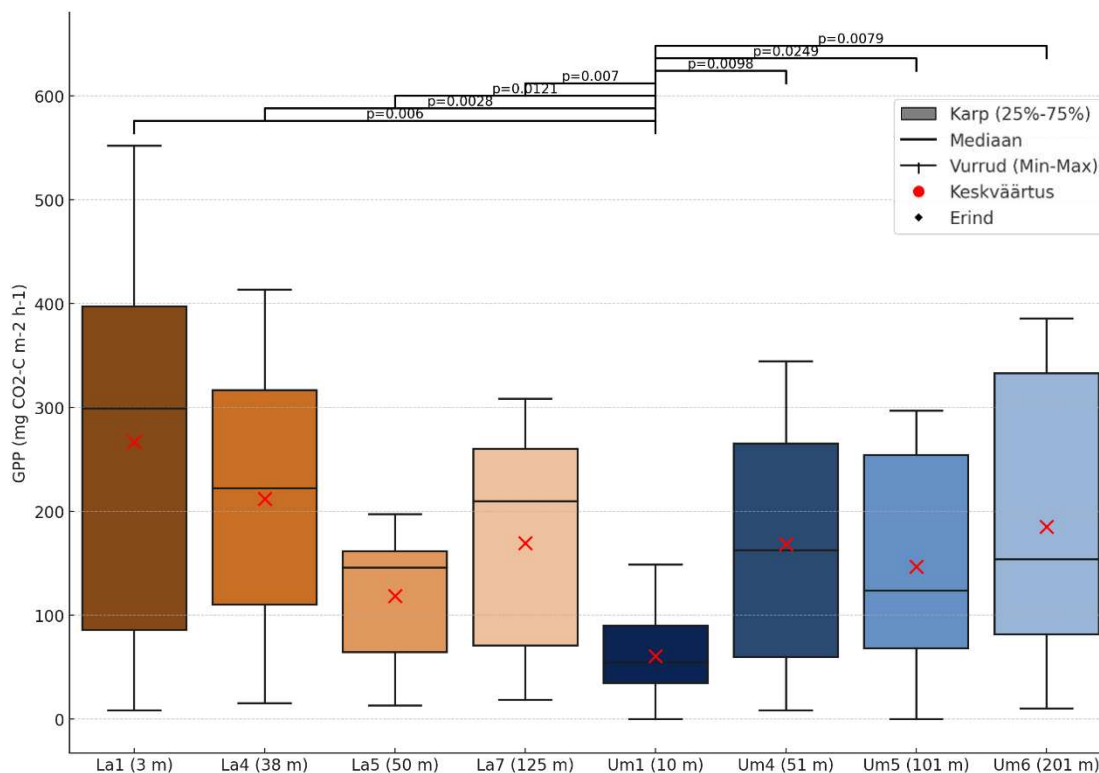
mg CO₂-C m⁻² h⁻¹) ja 125 meetri kaugusel La7 (98 mg CO₂-C m⁻² h⁻¹). Nende mõõtmisalade vahel (La1- La5, La1- La7, La4- La5) leiti ka statistiliselt usaldusväärsed erinevused (p<0.05). Umbusi raba mõõtmisalade ER mediaanväärtused olid samuti kahel kuivenduskraavile lähemal mõõtmisalal kõrgemad kui kaugemal looduslähedamates tingimustes asuval kahel uurimisalal. Ka mõõtmisalade sisene ER varieeruvus on suurem kuivenduskraavile lähemal asuval mõõtmisaladel kui kuivenduskraavist kaugemal asuvate mõõtmisalade sisene varieeruvus.



Joonis 8. Ökosüsteemi hingamine (ER) Laukasoo raba (La1, La4, La5, La7) ja Umbusi raba (Um1, Um4, Um5, Um6) uurimisaladel. Joonisel on toodud mõõtmisalade lühendid ja sulgudes vastava mõõtmisalala kaugus kuivenduskraavist. Karpdiagrammide kohale on märgitud, milliste mõõtmisalade mediaanväärtuste vahel leidis statistiliselt usaldusväärne erinevus.

Ökosüsteemi hingamise mediaanväärtused varieerusid vahemikus 242 mg CO₂-C m⁻² h⁻¹ kuivenduskraavile lähimas punktis kuni 87 mg CO₂-C m⁻² h⁻¹ looduslähedasemas punktis. Eesti looduslikes rabades on CO₂ emissioone kuivendusgradiendil uurinud (Veber, 2021), kes leidis, et emiteeritav CO₂ on tugevas negatiivses korrelatsioonis kuivenduskraavi kaugusega ning leidis hingamise mediaanväärtused vahemikus 78,4 mg CO₂-C m⁻² h⁻¹ kuivenduskraavi lähedal kuni 48,7 mg CO₂-C m⁻² h⁻¹ raba looduslikus punktis. Veberi (2021) leitud väärtused on märgatavalt väiksemad, kuid tuleb arvestada, et antud töö raames teostati mõõtmisi vaid ühe

aasta vegetatsiooniperioodil, kuid Veberi uurimus kattis mitmeaastast perioodi ja ka talve, mil ER on madalam.



Joonis 9. Ökosüsteemi primaarproduksioon (GPP) Laukasoo raba (La1, La4, La5, La7) ja Umbusi raba (Um1, Um4, Um5, Um6) uurimisel. Joonisel on toodud mõõtmisalade lühendid ja sulgudes vastava mõõtmisala kaugus kuivenduskraavist. Karpdiagrammide kohale on märgitud, milliste mõõtmisalade mediaanväärtuste vahel leidis statistiliselt usaldusväärne erinevus.

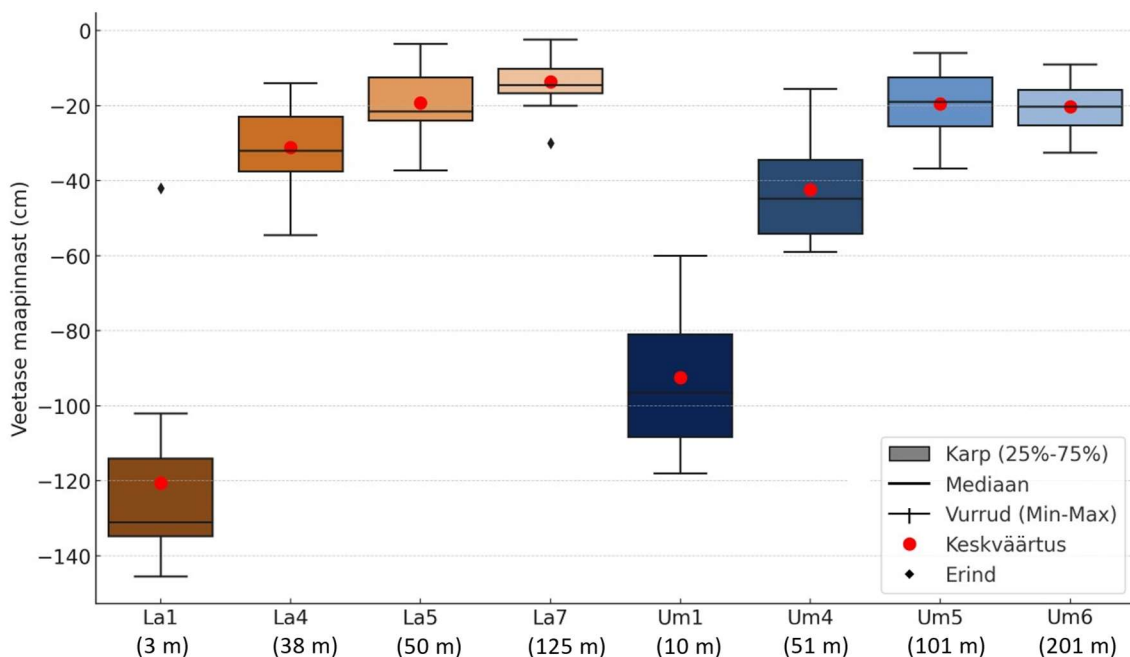
Joonis 9 kirjeldab primaarproduksiooni varieeruvust mõõtmisaladel. GPP väärtused varieerusid mõõtmisalade sees palju, kuid mitte mõõtmisalade vahel. Statistiliselt usaldusväärne erinevus ($p < 0.05$) tuvastati ainult Um1 ($55 \text{ mg CO}_2\text{-C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) vahel teiste mõõtmisaladega, mille mediaanid jäid vahemikku $123 \text{ mg CO}_2\text{-C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ (Um5) kuni $222 \text{ mg CO}_2\text{-C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ (La4) ja $300 \text{ mg CO}_2\text{-C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ (La1).

GPP varieerus mõõtmisalal La1 suures ulatuses. Sellele mõõtmisalale jäid ka primaarproduksiooni kõige intensiivsemad vood – üle 50% juhtudel jäid CO_2 taimedesse sidumise vood $300 - 552 \text{ mg CO}_2\text{-C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ vahele. Teistel mõõtmisaladel esinesid vaid üksikud nii kõrge intensiivsusega GPP väärtused.

3.2. CO₂ voogude seosed keskkonnaparaameetritega

3.2.1. Veetase

Veetaseme alanemine on kuivendamise otsene tagajärg ja selle mõju kuivenduskraavist kaugenedes väheneb. Kõikide mõõtmisalade, v.a La5 (50 m) - La7 (125 m) ja Um5 (101 m) - Um6 (201), puhul leiti usaldusväärne statistiline erinevus ($p < 0,05$) (Joonis 10). Kuna mõlemal uurimisalal kahe kaugema mõõtmisala veetasemete vahel olulist erinevust ei leitud ning uurimisalad olid üles seatud nii, et kuivenduskraavist kaugeim punkt asuks võimalikult looduslähedastes tingimustes, siis võib pidada veerežiimi mõõtmisaladel L5 ja Um5 samuti looduslikuks. Samas on punktides La5 ja Um5 veetasemete varieeruvus (La5: -6 kuni -37 cm ja Um5: -6 kuni -37 cm) suurem kui punktides La7 (-2,4 kuni -20 cm, erind -30 cm) ja Um6 (-9 kuni -32 cm), mis viitab La5 ja Um6 alade suuremale vastuvõtlikkusele muutustele. Selgelt eristusid kuivenduskraavile kõige lähemad mõõtmisalad La1 (mediaan -131 cm) ja Um1 (mediaan -96.5 cm), kus veetase oli sügavam ning mõõtmistulemuste hajuvus kõige suurem.



Joonis 10. Veetasemed (mõõdetuna maapinnast) Laukasoo raba (La1, La4, La5, La7) ja Umbusi raba (Um1, Um4, Um5, Um6) uurimisaladel. Joonisel on toodud mõõtmisalade lühendid ja sulgudes vastava mõõtmisala kaugus kuivenduskraavist.

Spearmani astmikkorrelatsiooni tulemusena leiti statistiliselt oluline keskmine kuni tugev negatiivne seos veetaseme ja ER vahel ($-0,78 < \rho > -0,5$) ning veetaseme ja GPP vahel ($-0,7 < \rho > -0,5$) enamikel mõõtmisaladel (Tabel 2). Negatiivne seos ökosüsteemi hingamise (ER) ja veetaseme vahel tähendab, et veetaseme alanemisel ökosüsteemi hingamine (ER) suurenes. Üldiselt oli seos seda tugevam, mida kaugemal mõõteala kuivenduskraavist asus. Kuivenduskraavile lähimatel mõõtmisaladel La1 ($\rho=0,5$) ja Um1 ($\rho=0,2$) statistiliselt usaldusväärset ($p<0,5$) seost veetaseme ja ER vahel ei tuvastatud.

Tabel 2. Spearmani astmikkorrelatsioonianalüüsi tulemused veetaseme ning NEE, ER ja GPP CO₂ voogude vahel Laukasoo ja Umbusi mõõtmisaladel. Tähistus (*) tähendab, et ρ -väärtused on statistiliselt olulised ($p<0,05$)

	La1 (3m)	La4 (38m)	La5 (50m)	La7 (125m)	Um1 (10m)	Um4 (50 m)	Um5 (101 m)	Um6 (201 m)
NEE	0,524*	0,018	-0,195	0,052	0,206	0,168	0,302	0,292
ER	-0,499	-0,595*	-0,59*	-0,781*	-0,206	-0,553*	-0,631*	-0,517*
GPP	-0,585*	-0,558*	-0,326	-0,62*	-0,326	-0,535*	-0,703*	-0,542*

Seos ökosüsteemi CO₂ primaarproduksiooni (GPP) ja veetasemete vahel oli negatiivne mis kirjeldab, et veetaseme alanemisel CO₂ sidumise voo intensiivsus taimedesse suurenes. Statistiliselt usaldusväärset ($p<0,5$) seost veetaseme ja GPP vahel ei tuvastatud mõõtmisaladel La5 ($\rho=0,3$) ja Um1 ($\rho=0,3$).

3.2.2. Mullatemperatuur

Spearmani astmikkorrelatsiooni tulemusena leiti statistiliselt oluline tugev seos eri sügavustel mõõdetud mullatemperatuuride ja ER vahel ($\rho > 0,77$) ning eri sügavustel mõõdetud mullatemperatuuride ja GPP vahel ($\rho > 0,7$) kõikidel mõõtmisaladel (Tabel 3).

Seos 10 cm, 20 cm, 30 cm, 40 cm sügavusel mõõdetud mullatemperatuuri ja ökosüsteemi hingamise (ER) vahel oli positiivne, mis näitab, et temperatuuri suurenemisel kõigil antud sügavustel on mõju ökosüsteemi hingamise suurenemisele. Mullatemperatuuri muutus 10 cm, 20 cm, 30 cm, 40 cm sügavusel mõjutas primaarproduksiooni (GPP) väärtust positiivselt:

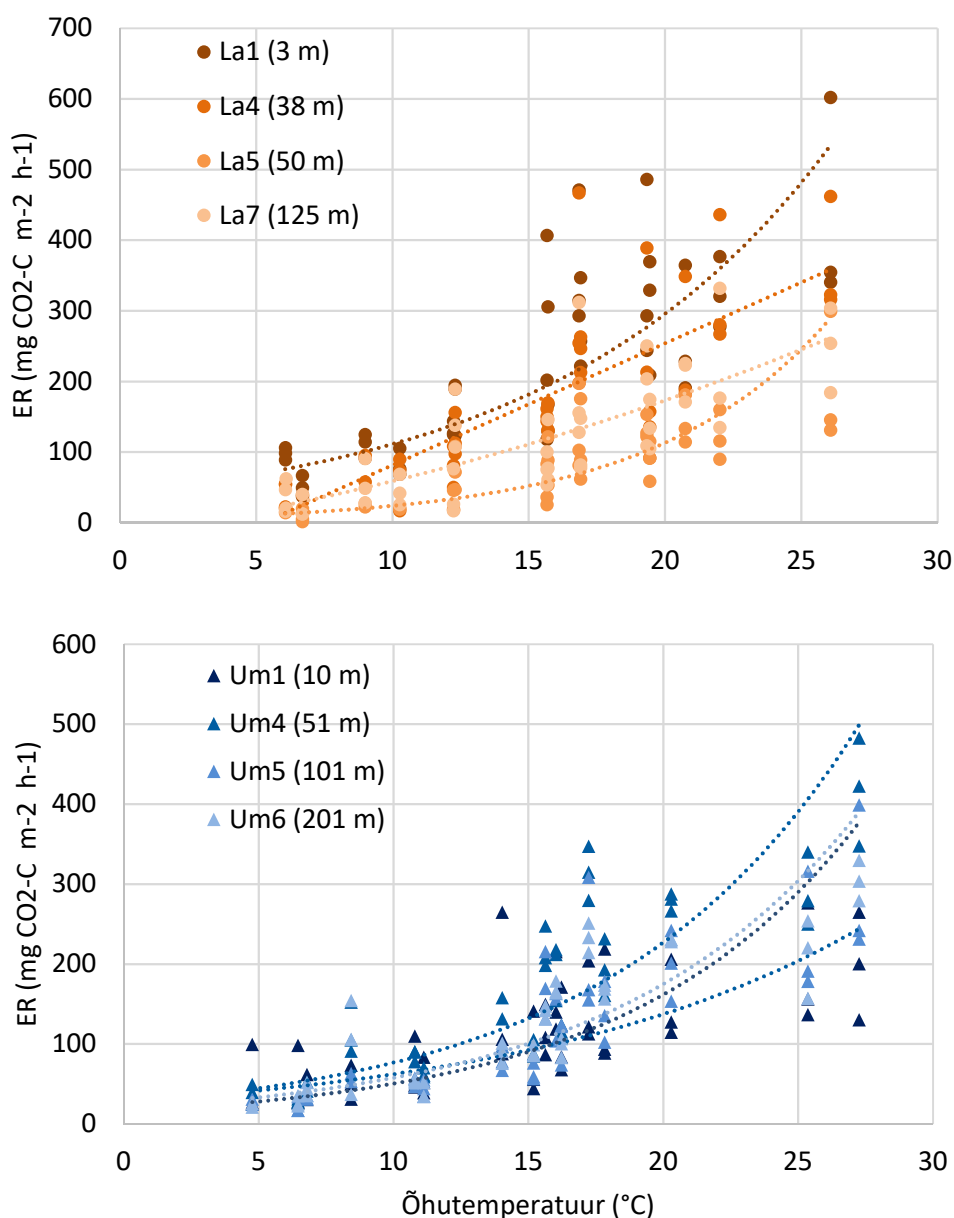
temperatuuri suurenedes primaarproduktsoon suurenes. Eri sügavuste juures leitud ρ -väärtusi võrreldes ei leitud, et mõnel sügavusel oleks mõju suurem.

Tabel 3. Spearmani astakorrelatsioonianalüüsi tulemused eri sügavusel mõõdetud mullatemperatuuri ja NEE, ER ja GPP CO₂ voogude vahel Laukasoo ja Umbusi mõõtmisaladel. Tähistus (*) tähendab, et ρ -väärtused on statistiliselt olulised ($p < 0,05$)

Mulla- temperatuur	La1 (3m)	La4 (38m)	La5 (50m)	La7 (125m)	Um1 (10m)	Um4 (50 m)	Um5 (101 m)	Um6 (201 m)
NEE								
10 cm	-0,74*	-0,12	0,02	-0,29	0,50	-0,11	-0,14	-0,22
20 cm	-0,74*	-0,11	-0,05	-0,23	0,53*	-0,15	-0,33	-0,40
30 cm	-0,77*	-0,10	-0,02	-0,28	0,53*	-0,16	-0,31	-0,49
40 cm	-0,78*	-0,18	-0,06	-0,32	0,46	-0,24	-0,38	-0,56
ER								
10 cm	0,92*	0,77*	0,87*	0,89*	0,89*	0,91*	0,92*	0,94*
20 cm	0,95*	0,90*	0,96*	0,95*	0,86*	0,96*	0,94*	0,92*
30 cm	0,93*	0,94*	0,95*	0,92*	0,85*	0,95*	0,95*	0,92*
40 cm	0,91*	0,96*	0,95*	0,89*	0,86*	0,95*	0,94*	0,90*
GPP								
10 cm	0,95*	0,69*	0,66*	0,81*	0,77*	0,81*	0,74*	0,70*
20 cm	0,95*	0,81*	0,76*	0,81*	0,76*	0,87*	0,85*	0,82*
30 cm	0,95*	0,82*	0,73*	0,79*	0,76*	0,85*	0,84*	0,86*
40 cm	0,93*	0,87*	0,76*	0,76*	0,81*	0,88*	0,87*	0,89*

3.2.3. ER seos õhutemperatuuriga

Ökosüsteemi hingamise (ER) intensiivsus sõltub mitmetest teguritest, millest üheks olulisemaks on õhu- või mullatemperatuur. Kambrirõngastel mõõdetud ER väärtuste ($\text{mg CO}_2\text{-C m}^{-2}\text{h}^{-1}$) ja õhutemperatuuri ($^{\circ}\text{C}$) vahel leiti statistiliselt usaldusväärne tugev positiivne seos ($0,81 < \rho < 0,97$; $p < 0,05$). Aastase voo arvutamiseks loodi antud seose põhjal iga kambrirõnga kohta eksponentfunktsioon, millega ennustati ER väärtusi õhutemperatuuri põhjal (Joonis 11). Kasutatud funktsioonid on toodud Lisa 3.

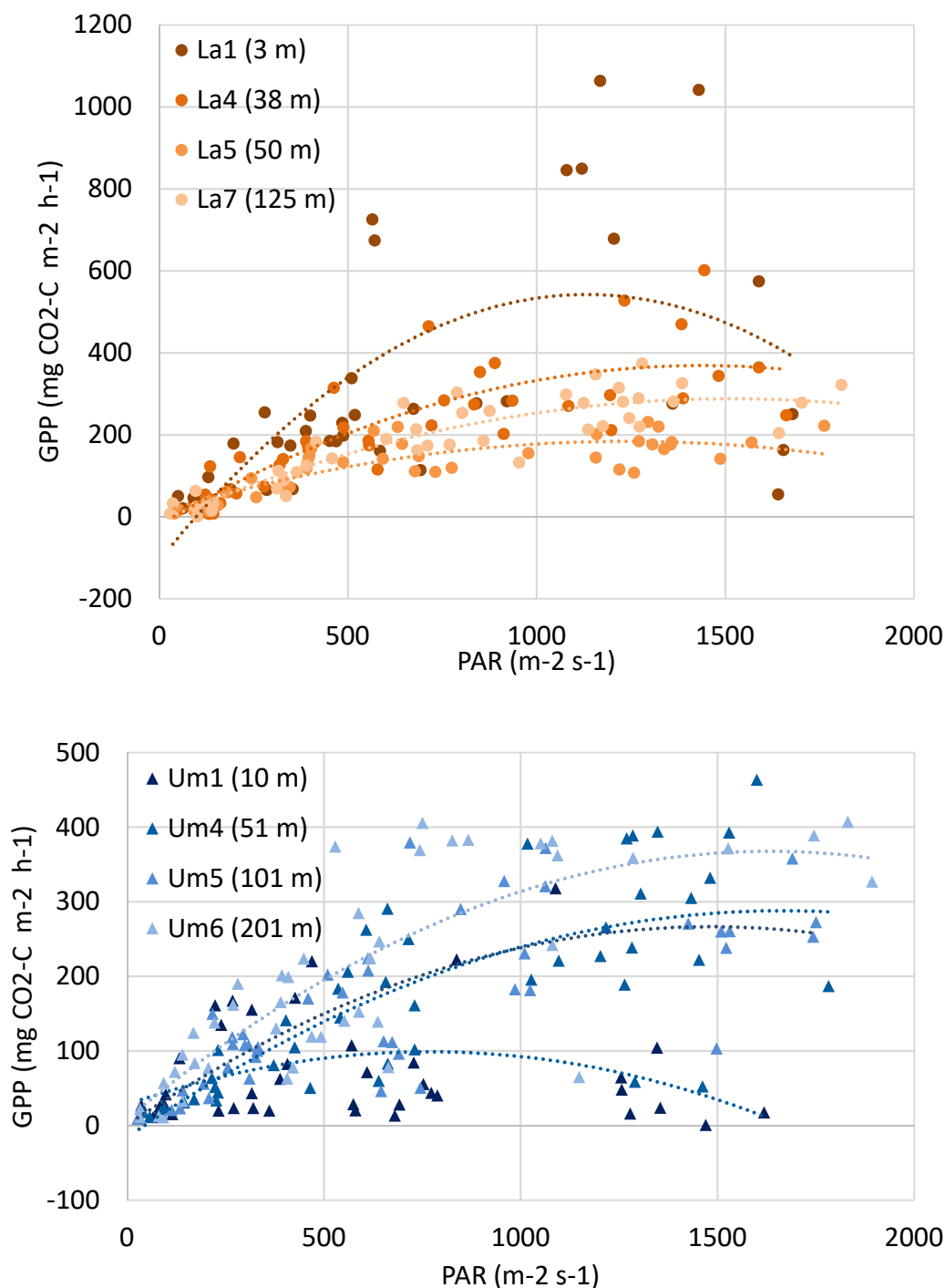


Joonis 11. Ökosüsteemi hingamise (ER) eksponentsiaalne seos õhutamperatuuriga.

3.2.4. GPP seos PAR-iga

Taimed ehk autotroofid sünteesivad fotosünteesi käigus atmosfääris olevast süsihappegaasist ja veest orgaanilisi ühendeid, mis on aluseks primaarproduksioonile ja selle käigus kasvab taime biomass. Fotosünteesi toimumiseks on vajalik päikesekiirgus. Kambriõngastel mõõdetud GPP väärtuste ($\text{kg CO}_2\text{-C m}^{-2}\text{h}^{-1}$) ja PARi ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) vahel leiti enamikel juhtudel statistiliselt usaldusväärne tugev seos ($\rho > 0,7$; $p < 0,05$), et suurema fotosünteesiliselt aktiivse kiirguse korral

on ka produktsioon suurem. Mõõtealadel Um1b ja Um1c leiti väga nõrk seos PAR ja GPP vahel ja see ei olnud statistiliselt oluline ($p > 0.05$), mõõtealadel La1b, La1c ja Um4a oli PAR ja GPP vaheline korrelatsioon keskmine ($0,57 < \rho < 0,6$; $p < 0.05$).



Joonis 12. Primaarproduktsiooni (GPP) parabolne seos fotosünteesiliselt aktiivse kiirgusega (PAR).

Aastase voo arutamiseks loodi antud seose põhjal iga kambriõnga kohta eksponentfunktsioon, millega ennustati ER väärtusi õhutemperatuuri põhjal. Kasutatud funktsioonid on toodud Lisa 3.

3.3. Aastane CO₂ bilanss

ER ja õhutemperatuuri ning GPP ja PAR vahelise seoses kaudu arvatud aastase CO₂ bilansi (kg CO₂-C m⁻²a⁻¹) komponendid on esitatud Tabel 4.

Tabel 4. Aastase CO₂ bilansi komponendid (kg CO₂-C m⁻²a⁻¹) koos standardhälbega (SD).

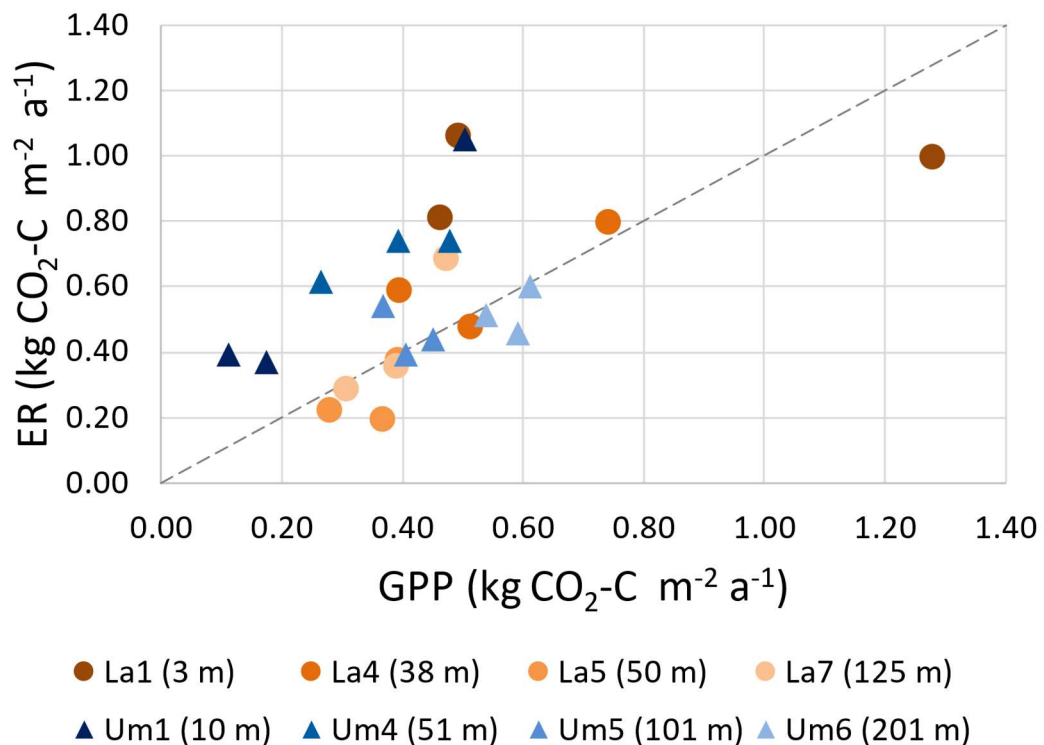
Mõõtmisala	GPP (kg CO ₂ -C m ⁻² a ⁻¹)	GPP SD	ER (kg CO ₂ -C m ⁻² a ⁻¹)	ER SD	NEE (kg CO ₂ -C m ⁻² a ⁻¹)	NEE SD
La1 (3 m)	0,74	0,27	0,96	0,07	0,22	0,25
La4 (38 m)	0,55	0,10	0,62	0,09	0,07	0,07
La5 (50 m)	0,34	0,03	0,27	0,06	-0,08	0,05
La7 (125 m)	0,39	0,05	0,45	0,12	0,06	0,08
Um1 (10 m)	0,26	0,12	0,60	0,22	0,34	0,11
Um4 (51 m)	0,38	0,06	0,70	0,04	0,32	0,03
Um5 (101 m)	0,41	0,02	0,46	0,04	0,05	0,06
Um6 (201 m)	0,58	0,02	0,52	0,04	-0,06	0,04

Kambriõngaste aastaseid NEE väärtusi mõõtmisaladele keskmistades ilmnes, et summaarselt toimus CO₂ sidumine ökosüsteemi vaid mõõtmisaladel La5 (NEE = -0,08 kg CO₂-C m⁻²a⁻¹ ± 0,05) ja Um6 (-0,06 kg CO₂-C m⁻²a⁻¹ ± 0,04), mõlemad alad asuvad uurimisalal kuivenduskraavist kaugemal rohkem looduslikes tingimustes. Bilansilt on kõige suuremad emiteerijad mõõtmisalad Um1 (NEE = 0,34 kg CO₂-C m⁻²a⁻¹ ± 0,11), Um4 (0,32 kg CO₂-C m⁻²a⁻¹ ± 0,03) ja La1 (0,22 kg CO₂-C m⁻²a⁻¹ ± 0,25), mis asuvad kuivenduskraavile lähemal. Mõõtmisalad La4, La7, Um5 on bilansi poolelt väheses koguses emiteerijad (0,05 kg CO₂-C m⁻²a⁻¹ <NEE> 0,07 kg CO₂-C m⁻²a⁻¹).

Kõige suurem kogus CO₂ emiteeriti hingamisel atmosfääri kraavilähedasel mõõtmisalal La1 (ER = 0,96 kg CO₂-C m⁻²a⁻¹ ± 0,07), samas toimus seal ka kõrge primaarproduksioon (GPP = 0,74 kg CO₂-C m⁻²a⁻¹ ± 0,27), mis omakorda oli suhteliselt suure standardhälbega. Sarnaselt mõõtmisalale La1 toimus mõõtmisalal La4 nii suure koguses hingamine (ER = 0,62 kg CO₂-C m⁻²a⁻¹ ± 0,27) kui primaarproduksioon (GPP = 0,55 kg CO₂-C m⁻²a⁻¹ ± 0,1).

Kahe uurimisala, Umbusi ja Laukasoo raba aastane NEE on sama häirituse tasemega mõõtmisalade lõikes võrreldav. Kuivenduskraavi lähedal on mõlemal uurimisalal NEE märgatavalt kõrgem, kui ülejäänud aladel, v.a Umbusis kauguselt teine mõõtmisala Um4, kus toimus samuti kõrge emissioon. NEE kogused on siiski erinevad, Umbusis on emiteerimise korral kogused 70 % võrra kõrgemad kui Laukasoo. Ökosüsteemi CO₂ sidumise korral on kogused Umbusis ja Laukasoo sarnased, vastavalt -0,06 ja -0,08 kg CO₂-C m⁻²a⁻¹. Mõlemas rabas oli GPP sarnane kahel viimasel mõõtmisalal La5 ja Um4 ning La7 ja Um6. GPP oli kahel esimesel mõõtmisalal uurimisaladel erinev. Uurimisaladel olid sama häirituse tasemega mõõtmisaladel erinevad ka ER väärtused.

Kambriirõngaste kohta arvatud aastase CO₂ bilansi põhjal on märgata, et CO₂ ökosüsteemi sidumine Laukasoo toimub üle mõõtmisalade mitmetel kambriirõngastel, samas Umbusi rabas toimub sidumine vaid kaugematel mõõtmisaladel asuvatel kambriirõngastel. Tulemused on illustreeritud Joonis 13, kus punktiirjoonest üleval paiknevates punktides ökosüsteemist emiteeriti CO₂, punktiirjoonest allpool olevates punktides toimus ökosüsteemi CO₂ sidumine.



Joonis 13. Ökosüsteemi hingamine (RE) ja primaarproduktsoon (GPP) Laukasoo ja Umbusi rabas.

3.4. CO₂ voogude seos taimestikuga

Taimestiku ja ökosüsteemi CO₂ voogude vahelise seose analüüsis kasutati kambriirõngaste sees määratud taimerühmade katvuste (%) ja kambriirõngaste kohta arvutatud aastaste CO₂ voogude (kg CO₂-C m⁻²a⁻¹) andmeid. Spearmani astmikkorrelatsiooni tulemused on toodud Tabel 5. NEE puhul leiti mõõdukas negatiivne seos turbasammalde katvuse ($\rho = -0,59$) vahel, mis tähendab, et turvasmulla suurema kaetuse korral turbasammaldega, on CO₂ sidumine ökosüsteemi suurem. Mõõdukas negatiivne seos leiti ka ER ja turbasammalde katvuse ($\rho = -0,67$) vahel, mis näitab, et maapinna turbasammaldega katvuse suurenedes ökosüsteemi hingamine väheneb. Keskmise negatiivse seose ER ja turbasammalde katvuse vahel on leidnud ka Veber (2021).

Muude sammaldega katvuse puhul leiti mõõdukas positiivne seos NEE ($\rho = 0,58$) ja ER puhul ($\rho = 0,58$), mis näitab, et muude sammalde suurema katvuse korral CO₂ sidumine ökosüsteemi väheneb ja ökosüsteemi hingamine suureneb.

Tabel 5. Spearmani astmikkorrelatsioonianalüüsi tulemused taimerühmade katvuste ning NEE, ER ja GPP CO₂ voogude (kg CO₂-C m⁻²a⁻¹) vahel Laukasoo ja Umbusi mõõtmisaladel. Tähistus (*) tähendab, et ρ -väärtused on statistiliselt olulised ($p < 0,05$)

Taimestiku katvus (%)	NEE (kg CO ₂ -C m ⁻² a ⁻¹)	ER (kg CO ₂ -C m ⁻² a ⁻¹)	GPP (kg CO ₂ -C m ⁻² a ⁻¹)
Puud ja põõsad	-0.22	-0.16	0.07
Puhmad	-0.20	0.39	0.75*
Rohttaimed	0.01	0.12	0.34
Turbasamblad (<i>Sphagnum</i>)	-0.59*	-0.67*	-0.18
Muud samblad	0.58*	0.42*	-0.07
Samblikud	0.34	0.03	-0.27

Puhmaste katvuse ja GPP puhul leiti tugev positiivne seos ($\rho = 0,75$), mis näitab, et puhmaste rohkuse korral suureneb primaarproduktioon. Antud seose puhul võib tuua näitena, et kambriirõngas La1c (Lisa 1: joonis 4), kus mõõdeti teiste kambriirõngastega võrreldes märgatavalt kõrgemad NEE (kuni -555 mg CO₂-C m⁻² h⁻¹) ja GPP (kuni 1063 mg CO₂-C m⁻² h⁻¹), oli puhmaste üldkatvus 100% (sinikas (*Vaccinium uliginosum*) 40%, harilik kanarbik (*Calluna vulgaris*) 60%) (Lisa 2). Sarnaselt eristus ka mõõtmisala La4c (NEE kuni -225 mg CO₂-C m⁻² h⁻¹, GPP kuni -601 mg CO₂-C m⁻² h⁻¹), kus puhmaste katvus oli 90%.

Kokkuvõte

Töö eesmärgiks oli uurida, kuidas mõjutab kuivendus loodusliku raba CO₂ bilanssi. Töö käigus mõõdeti 16. aprillist 4. detsembrini 2015. aastal kahes freesturbaväljaga külgnevas Eesti rabas: Laukasoo ja Umbusis, kuivenduskraavist erineval kaugusel asuvates mõõtmispunktides dünaamilise suletud kambri meetodil ökosüsteemi CO₂ bilanssi ja ökosüsteemi poolt hingamise käigus eralduva CO₂ kogust, mille põhjal arvutati lisaks välja primaarproduksioon (fotosünteesi käigus ökosüsteemi poolt seotav CO₂ hulk). Mõõtmistulemuste põhjal analüüsiti raba ökosüsteemi CO₂ bilanssi panustavaid voogusid kuivenduse mõju gradiendil, nende ajalist muutlikkust ning seost veetaseme, mullatemperatuuri ja taimestikuga.

Ökosüsteemi hingamine ja primaarproduksioon järgisid parasvöötme kliimale tüüpilist sesoonsset käiku, kus CO₂ vood olid intensiivseimad suveperioodil ning madalaima intensiivsusega talveperioodil. Juunis ja septembris toimus intensiivsuses vastavalt kiire tõus või langus. Umbusi rabas muutus mõõtmisalade lõikes CO₂ bilanss kuivenduskraavist kaugenedes CO₂ emiteerijast CO₂ sidujaks (muutus kuivenduskraavi lähima ja kaugeima mõõtmisalade mediaanväärtuste vahe oli -127,58 mg CO₂-C m⁻² h⁻¹). Laukasoo raba kõik mõõtmisalad olid CO₂ bilansi mediaanväärtuse järgi sidujad, kuid muutus mõõtmisalade mediaanväärtustes olid väiksemad (esimese ja viimase mõõtmisalade mediaanväärtuste vahe oli 17,88 mg CO₂-C m⁻² h⁻¹). Ökosüsteemi hingamine oli Laukasoo esimeses ja teises mõõtepunktis märgatavalt kõrgem ülejäänud mõõtealadel mõõdetud hingamisest, ülejäänud mõõtealadel hingamisel emiteeritud CO₂ koguste vahel ei leitud olulist erinevust. Primaarproduksiooni väärtused varieerusid mõõtmisalade sees palju, kuid mõõtmisalade vahel olulist erinevust ei leitud, v.a. Umbusi raba kuivenduskraavile lähim mõõtmisalade vahel.

Veetaseme ning ökosüsteemi hingamise vahel esines kõigis, välja arvatud kuivenduskraavile lähimais mõõtealades, keskmise tugevusega seos, mis näitas, et veetaseme alanemisel ökosüsteemi hingamine suurenes. Seos primaarproduksiooni ja veetaseme vahel oli samuti keskmise tugevusega ja näitas, et veetaseme alanemisel CO₂ sidumise voo intensiivsus taimedesse suurenes. 10 cm, 20 cm, 30 cm ja 40 cm sügavusel mõõdetud mullatemperatuuri ja nii ökosüsteemi hingamise kui primaarproduksiooni vahel leiti tugev seos, mis näitas, et mullatemperatuuri suurenedes suureneb nii hingamine kui primaarproduksioon. Taimede katvuse ja CO₂ korrelatsioonianalüüsi käigus leiti, et puhmaste katvuse ja primaarproduksiooni vahel on tugev positiivne seos. Turbasammalde (*Sphagnum*) suurema katvuse korral CO₂

sidumine ökosüsteemi suureneb ja ökosüsteemi hingamine väheneb, muude samblaliikide puhul leiti vastupidine seos.

Ökosüsteemi hingamise ja primaarproduktiooni aastaste hinnangute saamiseks leiti seos õhutemperatuuri ja ökosüsteemi hingamise vahel ning fotosünteetiliselt aktiivse kiirguse ja primaarproduktiooni vahel. Aastase CO₂ bilansi järgi olid Laukasoo ja Umbusi rabas kuivenduskraavile lähimad mõõtmisalad CO₂ allikad, kus emiteeriti vastavalt 0,22 ja 0,34 kg CO₂-C m⁻²a⁻¹. Umbusi rabas emiteeriti kuivenduskraavist kauguselt teises punktis sarnases koguses CO₂ (0,32 kg CO₂-C m⁻²a⁻¹). Ülejäänud mõõtmispunktides oli emiteeritava CO₂ kogus üle 3 korra väiksem (0,05 – 0,07 kg CO₂-C m⁻²a⁻¹) ning kahel mõõtealal toimus bilansi järgi CO₂ sidumine (- 0,06 kuni -0,08 kg CO₂-C m⁻²a⁻¹).

Et paremini mõista kuivenduse mõju looduslikes rabades, tuleks tuleviku uuringutesse kaasata suurem arv mõõtmisalasid ning täpsustavalt hinnata ka muutusi mõõtmisalade taimestiku katvuses või biomassis.

Impact of drainage on net ecosystem exchange of CO₂ in Umbusi and Laukasoo bogs

Kätlin Aun

Summary

In their natural state, peatlands sequester CO₂ and emit CH₄. These are important greenhouse gases, thus influencing the global climate. As a result of drying and lowered water level caused by climate change, as well as drainage and other human disturbance, the ecological functions of peatlands change and peatlands transform from CO₂ sinks to sources of CO₂.

The objective of the thesis was to study how drainage affects the net ecosystem exchange of CO₂ of a pristine bog. Net ecosystem exchange of CO₂ and ecosystem respiration were measured from April 16th to December 4th in 2015, in two Estonian bogs: Umbusi ja Laukasoo, using dynamic closed chamber method. Umbusi and Laukasoo are pristine bogs that are separated from adjacent peat extraction fields by deep drainage ditches. Measurements were carried out in 3 repetitions on 4 different sample plots along the gradient from most influenced near the drainage ditch to most natural farthest away from the drainage ditch. Based on these measurements, gross primary production (the amount of CO₂ absorbed by the ecosystem through photosynthesis) was also calculated. The measurement results were used to analyze the fluxes of CO₂ along the drainage gradient, their temporal variability, and their relationship with water t, soil temperature, and vegetation cover.

Ecosystem respiration and gross primary production followed a seasonal pattern typical of the temperate climate, with the most intense CO₂ fluxes occurring during the summer and the least intense during the winter. In June and September, there were rapid increases or decreases in intensity, respectively. In Umbusi bog, the CO₂ net ecosystem exchange shifted from being a CO₂ emitter to CO₂ sink as the distance from the drainage ditch increased (the difference in median value between the closest and farthest sample plots was -127.58 mg CO₂-C m⁻² h⁻¹). In Laukasoo bog, all sample plots were CO₂ sinks according to the median value of the CO₂ net ecosystem exchange, but the difference of median values between sample plots were smaller (the difference between the first and last sample plot was 17.88 mg CO₂-C m⁻² h⁻¹). Ecosystem respiration was significantly higher in the first and second plots in Laukasoo bog compared to other plots. There were no significant differences in respiration among the rest of the sample

plots. Primary production varied greatly within sample plots but no significant differences were found between plots, except for the sample plot closest to the drainage ditch in Umbusi bog.

A moderate correlation was found between water level and ecosystem respiration in all plots except those closest to the drainage ditch, indicating that lower water levels increase ecosystem respiration. The relationship between primary production and water level was also moderate, showing that CO₂ uptake by plants increased as the water level decreased. There was a strong correlation between soil temperature measured at depths of 10 cm, 20 cm, 30 cm, and 40 cm and both ecosystem respiration and primary production, indicating that both respiration and primary production increase with rising soil temperatures. Correlation analysis between vegetation cover and CO₂ revealed a strong positive correlation between shrub cover and primary production. A moderate negative correlation indicated that coverage by *Sphagnum* was associated with higher CO₂ uptake and lower respiration, whereas the opposite was found for other moss species.

To estimate annual ecosystem respiration and primary production, correlations were found between air temperature and ecosystem respiration, and between photosynthetically active radiation and primary production. According to the annual CO₂ balance, the sample plots closest to the drainage ditch in Laukasoo and Umbusi bogs were CO₂ sources, emitting 0.22 and 0.34 kg CO₂-C m⁻²a⁻¹, respectively. In the second measurement point from the drainage ditch in Umbusi bog, a similar amount of CO₂ was emitted (0.32 kg CO₂-C m⁻²a⁻¹). In other plots, the amount of emitted CO₂ was over three times lower (0.05-0.07 kg CO₂-C m⁻²a⁻¹), and in two areas, CO₂ was sequestered (-0.06 to -0.08 kg CO₂-C m⁻²a⁻¹).

To better understand the impact of drainage on natural bogs, future studies should include a larger number of measurement areas and more precise assessment of changes in vegetation cover or biomass within these plots.

Kasutatud allikad

- Aktsiaselts TARA-TORF, 2022. Majandusaasta aruanne.
- Alam-Pedja looduskaitseala kaitse-eeskiri, 2007. Eesti Vabariigi Valitsuse 18.05.2007 määrus nr 153 “Alam-Pedja looduskaitseala kaitse-eeskiri”, RT I 2007, 38, 273, RT I 2010, 13, 70.
- Aro, L., 2014. Kahe erineva meetodi kasutamine C-bilansi määramiseks Lavassaare jääkturbaala näitel. Magistritöö keskkonnatehnoloogia erialal, Tartu Ülikool. Tartu.
- Bansal, S., Creed, I.F., Tangen, B.A., Bridgham, S.D., Desai, A.R., Krauss, K.W., Neubauer, S.C., Noe, G.B., Rosenberry, D.O., Trettin, C., Wickland, K.P., Allen, S.T., Arias-Ortiz, A., Armitage, A.R., Baldocchi, D., Banerjee, K., Bastviken, D., Berg, P., Bogard, M.J., Chow, A.T., Conner, W.H., Craft, C., Creamer, C., DelSontro, T., Duberstein, J.A., Eagle, M., Fennessy, M.S., Finkelstein, S.A., Göckede, M., Grunwald, S., Halabisky, M., Herbert, E., Jahangir, M.M.R., Johnson, O.F., Jones, M.C., Kelleway, J.J., Knox, S., Kroeger, K.D., Kuehn, K.A., Lobb, D., Loder, A.L., Ma, S., Maher, D.T., McNicol, G., Meier, J., Middleton, B.A., Mills, C., Mistry, P., Mitra, A., Mobilian, C., Nahlik, A.M., Newman, S., O’Connell, J.L., Oikawa, P., van der Burg, M.P., Schutte, C.A., Song, C., Stagg, C.L., Turner, J., Vargas, R., Waldrop, M.P., Wallin, M.B., Wang, Z.A., Ward, E.J., Willard, D.A., Yarwood, S., Zhu, X., 2023. Practical Guide to Measuring Wetland Carbon Pools and Fluxes. *Wetlands* 43, 105. <https://doi.org/10.1007/s13157-023-01722-2>
- Biasi, C., Lind, S.E., Pekkarinen, N.M., Huttunen, J.T., Shurpali, N.J., Hyvönen, N.P., Repo, M.E., Martikainen, P.J., 2008. Direct experimental evidence for the contribution of lime to CO₂ release from managed peat soil. *Soil Biol. Biochem.* 40, 2660–2669. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.07.011>
- Drösler, M., 2005. Trace gas exchange and climatic relevance of bog ecosystem, Southern Germany. PhD Dissertation, Lehrstuhl für Vegetationsökologie, Department für Ökologie, Technische Universität München.
- EELIS, a. (Eesti Looduse Infosüsteem - Keskkonnaregister): Keskkonnaagentuur. <https://infoleht.keskkonnainfo.ee/> (viimati vaadatud 20.05.2024).
- EELIS, b. EELIS Infoleht: Pähklisaare maastikukaitseala. http://loodus.keskkonnainfo.ee/eelis/default.aspx?state=9;572247461;est;eelisand;;&c omp=objresult=ala&obj_id=1303 (viimati vaadatud 26.05.2024).

- EELIS, n.d. EELIS Infoleht: Alam-Pedja LKA, Umbusi raba skv.
http://loodus.keskkonnainfo.ee/eelis/default.aspx?state=6;-1158249072;est;eelisand;;&comp=objresult=ala&obj_id=374317568 (viimati vaadatud 26.05.2024).
- Eesti Märgalade Ühing, n.d. Põhimõisted - Eesti sood.
- Gorham, E., 1991. Northern Peatlands: Role in the Carbon Cycle and Probable Responses to Climatic Warming. *Ecol. Appl.* 1, 182–195. <https://doi.org/10.2307/1941811>
- Gren Tartu AS, 2022. Majandusaasta aruanne.
- Hutchinson, G. I., Livingston, G. p., 1993. Use of Chamber Systems to Measure Trace Gas Fluxes, in: *Agricultural Ecosystem Effects on Trace Gases and Global Climate Change*. John Wiley & Sons, Ltd, pp. 63–78. <https://doi.org/10.2134/asaspecpub55.c4>
- IPCC, 2014. *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Core Writing Team, Pachauri, R.K. and Meyer, L.A. IPCC, Geneva, Switzerland, 2014, 151 pp.
- Jakobson, L., 2015. Turbatootmise negatiivse hüdroloogilise mõju vähendamine. Magistritöö keskkonnatehnoloogia erialal, Tartu Ülikool. Tartu.
- 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 Dissertation, Department of Geography, Institute of Ecology and Earth Sciences, Faculty of Science and Technology, University of Tartu, Estonia.
- Järveoja, J., Peichl, M., Maddison, M., Teemusk, A., Mander, Ü., 2016. Full carbon and greenhouse gas balances of fertilized and nonfertilized reed canary grass cultivations on an abandoned peat extraction area in a dry year. *GCB Bioenergy* 8, 952–968. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12308>
- Joosten, H., Clarke, E., 2002. *Wise use of mires and peatlands. Background and principles including a framework for decision-making*. International Mire Conservation Group, International Peat Society, Saarijärvi, Finland.
- Keskkonnaagentuur,. Kliimanormid. <https://www.ilmateenistus.ee/kliima/kliimanormid/> (viimati vaadatud 29.04.2024).
- Keskkonnaagentuur, Ajaloolised ilmaandmed. <https://www.ilmateenistus.ee/kliima/ajaloolised-ilmaandmed/> (viimati vaadatud 29.04.2024).

- Kull, A., 2016. Soode ökoloogilise funktsionaalsuse tagamiseks vajalike puhvertsoonide määratlemine pikaajaliste häiringute leviku piiramiseks või leevendamiseks, II etapp Sihtfinantseerimislepingu 8286 SFL nr 3-2_15/835-14/2014 aruanne.
- Kull, A., 2013. Soode ökoloogilise funktsionaalsuse tagamiseks vajalike puhvertsoonide määratlemine pikaajalise häiringu leviku piiramiseks või leevendamiseks. Sihtfinantseerimislepingu 2386 SFL nr 3-2_15/45-8/2011 aruanne.
- Lindroth, A., Lund, M., Nilsson, M., Aurela, M., Christensen, T.R., Laurila, T., Rinne, J., Riutta, T., Sagerfors, J., Ström, L., Tuovinen, J.-P., Vesala, T., 2007. Environmental controls on the CO₂ exchange in north European mires. *Tellus B* 59. <https://doi.org/10.3402/tellusb.v59i5.17061>
- Maa-amet,. Geoportaal, URL <http://geoportaal.maaamet.ee/> (viimati vaadatud 11.05.2024).
- Maddison, M., Veber, G., Kull, A., 2021. Net ecosystem exchange of CO₂ and ecosystem respiration in two bogs in Estonia along disturbance gradient EGU21-12999. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-12999>
- Masing, V., 1988. Soode mõiste, levik ja väärtus. – Rmt-s: U. Valk (koost) Eesti sood. Tallinn, Valgus, lk. 7-21.
- Minkkinen, K., Korhonen, R., Savolainen, I., Laine, J., 2002. Carbon balance and radiative forcing of Finnish peatlands 1900–2100 – the impact of forestry drainage. *Glob. Change Biol.* 8, 785–799. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2002.00504.x>
- Mitsch, W., Gosselink, J., 2015. *Wetlands*, 5th edition.
- Mitsch, W.J., Bernal, B., Nahlik, A.M., Mander, Ü., Zhang, L., Anderson, C.J., Jørgensen, S.E., Brix, H., 2013. Wetlands, carbon, and climate change. *Landsc. Ecol.* 28, 583–597. <https://doi.org/10.1007/s10980-012-9758-8>
- Orru, M., 1995. Eesti turbasood. Eesti Geoloogiakeskus, Tallinn.
- Paal, J., 2005. Estonian Mires, in Moore - von Sib. bis Feuerl. / Mires - from Sib. to Tierra del Fuego, p. 117–146.
- Paal, J., Leibak, E., 2013. Eesti soode seisund ja kaitstus. AS Regio, Tartu.
- Parish, F., Sirin, A., Charman, D., Joosten, H., Minayeva, T., Silvius, M., Stringer, L., 2008. *Assessment on Peatlands, Biodiversity and Climate Change: Main Report*. Global Environment Centre, Kuala Lumpur and Wetlands International, Wageningen.
- Pihlap, E., 2016. Kuivenduse mõju vees lahustunud orgaanilise süsiniku ja huumusainete sisaldusele rabades ja siirdesoodes. Magistritöö keskkonnatehnoloogia erialal, Tartu Ülikool. Tartu.

- Purre, A.-H., 2021. Carbon dioxide dynamics and recovery of vegetation on restored peatlands. PhD Dissertation, School of Natural Sciences and Health, Tallinn University, Tallinn, Estonia. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.18786.45764>
- Ramsar, 1971. What are wetlands? Ramsar Convention on Wetlands. <https://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/library/info2007-01-e.pdf>.
- Ramst, R., Orru, M., Salo, V., Halliste, L., 2006. Eesti mahajäetud turbatootmisalade revisjon 2. etapp. Ida-Viru, Lääne-Viru, Jõgeva, Järva ja Tartu maakond. Tallinn. 173 lk.
- Salm, J.-O., Kimmel, K., Uri, V., Mander, Ü., 2009. Global warming potential of drained and undrained peatlands in estonia: A synthesis. *Wetlands* 29, 1081–1092. <https://doi.org/10.1672/08-206.1>
- Salm, J.-O., Maddison, M., Tammik, S., Soosaar, K., Truu, J., Mander, Ü., 2011. Emissions of CO₂, CH₄ and N₂O from undisturbed, drained and mined peatlands in Estonia. *Hydrobiologia* 692, 41–55. <https://doi.org/10.1007/s10750-011-0934-7>
- Valk, U., 1988. Soode mõiste, levik ja väärtus, in: Eesti Sood. Valgus, Tallinn, pp. 7–21.
- Veber, G., 2021. Greenhouse gas fluxes in natural and drained peatlands: spatial and temporal dynamics. PhD Dissertation, Department of Geography, Institute of Ecology and Earth Sciences, Faculty of Science and Technology, University of Tartu, Estonia.
- Zamora, S., Zitácuaro-Contreras, I., Betanzo-Torres, E.A., Herazo, L.C.S., Sandoval-Herazo, M., Vidal-Álvarez, M., Marín-Muñiz, J.L., 2022. Carbon Pool in Mexican Wetland Soils: Importance of the Environmental Service. *Life* 12, 1032. <https://doi.org/10.3390/life12071032>

Tänuavaldused

Autor avaldab suurt tänu oma juhendajale Tartu Ülikooli Loodusgeograafia ja maastikuökoloogia õppetooli keskkonnatehnoloogia kaasprofessorile Martin Maddisonile, kes oli nõuandmise ja toetusega suureks abiks välitööde läbiviimisel ning magistritöö koostamisel.

Lisaks soovib autor tänada Järvi Järveojat, kes juhendas välitööde läbiviimisel ja andmete analüüsi juures, ja Alar Teemuskit, kes abistas välitöödel.

Magistritöö andmed koguti Keskkonnainvesteeringute keskuse maapõue programmist finantseeritud sihtfinantseerimislepingu 2386 SFL nr 3-2_15/45-8/2011 „Soode ökoloogilise funktsionaalsuse tagamiseks vajalike puhvertsoonide määratlemine pikaajalise häiringu leviku piiramiseks või leevendamiseks“ raames rajatud mõõtmisaladelt. Autor tänab projekti vastutavat täitjat Ain Kulli ning projektis osalenud ja mitmesuguseid mõõtmisi ja analüüse teostanud isikuid tänu kellele oli uurimisalade kohta rohkelt taustandmeid kasutada.

Lisad

Lisa 1



Joonis 1. Mõõtmisala. Pildil toimub ökosüsteemi hingamise mõõtmine kaetud kambriga ühel kambrirõngal. Pildil on taamal näha lisaks kaks kambrirõngast kordusmõõtmiste tegemiseks ja veevaatluskaev veetaseme mõõtmiseks.



Joonis 2. Ökosüsteemi CO₂ bilansi (NEE) mõõtmine läbipaistva dünaamilise suletud kambriga



Joonis 3. Ökosüsteemi hingamise (ER) mõõtmine heleda valgustpeegeldava kattega kaetud dünaamilise suletud kambriga.



Joonis 4. Ökosüsteemi CO₂ bilansi (NEE) mõõtmine mõõtmisalal La1c, kus puhmaste üldkatvus oli 100% (sinikas (*Vaccinium uliginosum*) 40%, harilik kanarbik (*Calluna vulgaris*) 60%).

Lisa 2

Tabel 1. Aastase ökosüsteemi CO₂ bilansi (NEE) komponendid (kg CO₂-C m⁻²a⁻¹): GPP – primaarproduktioon, ER – ökosüsteemi hingamine, Laukasoo ja Umbusi rabas kambrirõngaste kaupa.

Kambrirõngas mõõtmisalal	GPP (kg CO₂-C m⁻² a⁻¹)	ER (kg CO₂-C m⁻² a⁻¹)	NEE (kg CO₂-C m⁻² a⁻¹)
Laukasoo raba			
La1a	0,46	0,81	0,35
La1b	0,49	1,06	0,57
La1c	1,28	1,00	-0,28
La4a	0,39	0,59	0,20
La4b	0,51	0,48	-0,03
La4c	0,74	0,80	0,06
La5a	0,39	0,38	-0,01
La5b	0,28	0,22	-0,05
La5c	0,37	0,19	-0,17
La7a	0,47	0,69	0,22
La7b	0,31	0,29	-0,02
La7c	0,39	0,36	-0,03
Umbusi raba			
Um1a	0,50	1,05	0,55
Um1b	0,17	0,37	0,19
Um1c	0,11	0,39	0,28
Um4a	0,26	0,61	0,35
Um4b	0,48	0,74	0,26
Um4c	0,39	0,74	0,34
Um5a	0,41	0,39	-0,02
Um5b	0,37	0,54	0,17
Um5c	0,45	0,44	-0,01
Um6a	0,54	0,51	-0,03
Um6b	0,59	0,45	-0,14
Um6c	0,61	0,60	-0,01

Lisa 3

Tabel 1. ER ja GPP aastase voo hindamisel kasutatud funktsioonid. ER on funktsioon õhutemperatuurist (t), GPP on funktsioon fotosünteetiliselt aktiivsest kiirgusest (PAR). R² näitab, kui suure osa nähtusest funktsioon ära selgitab.

	ER	R ²	GPP	R ²
La1a	$y = 40.766e^{0.0878t}$	0.7341	$y = -0.0008PAR^2 + 0.9158PAR - 25.295$	0.7256
La1b	$y = 58.281e^{0.0801t}$	0.5696	$y = -0.0003PAR^2 + 0.6012PAR - 24.385$	0.6107
La1c	$y = 31.248e^{0.1247t}$	0.7175	$y = -0.0008PAR^2 + 1.7822PAR - 155.48$	0.6822
La4a	$y = 21.793e^{0.1123t}$	0.6997	$y = -0.0003PAR^2 + 0.5511PAR - 32.052$	0.873
La4b	$y = 11.412e^{0.1437t}$	0.7007	$y = -0.0001PAR^2 + 0.4524PAR - 13.398$	0.8776
La4c	$y = 23.964e^{0.1275t}$	0.6138	$y = -0.0004PAR^2 + 0.8803PAR - 40.605$	0.8165
La5c	$y = 7.9234e^{0.1525t}$	0.741	$y = -0.0003PAR^2 + 0.5286PAR - 23.127$	0.9477
La5b	$y = 5.0707e^{0.1467t}$	0.6561	$y = -5E-05PAR^2 + 0.1973PAR + 8.68$	0.8987
La5c	$y = 3.4585e^{0.1632t}$	0.6337	$y = -0.0001PAR^2 + 0.2964PAR + 7.2555$	0.7056
La7c	$y = 29.016e^{0.1021t}$	0.672	$y = -0.0002PAR^2 + 0.4739PAR - 5.9857$	0.9338
La7b	$y = 7.8126e^{0.1353t}$	0.7304	$y = -1E-04PAR^2 + 0.316PAR - 15.443$	0.8642
La7c	$y = 7.9072e^{0.1489t}$	0.7234	$y = -8E-05PAR^2 + 0.3216PAR - 1.1533$	0.9488
Um1a	$y = 57.941e^{0.0645t}$	0.6685	$y = -8E-05PAR^2 + 0.2995PAR + 34.277$	0.5935
Um1b	$y = 16.526e^{0.097t}$	0.7918	$y = -3E-05PAR^2 + 0.0502PAR + 30.874$	0.0345
Um1c	$y = 21.276e^{0.081t}$	0.6805	$y = -3E-05PAR^2 + 0.0513PAR + 15.814$	0.155
Um4a	$y = 23.775e^{0.1088t}$	0.6852	$y = -0.0002PAR^2 + 0.3825PAR - 27.518$	0.4824
Um4b	$y = 28.907e^{0.1078t}$	0.7317	$y = -6E-05PAR^2 + 0.369PAR - 0.7368$	0.8621
Um4c	$y = 25.44e^{0.1088t}$	0.7676	$y = -0.0001PAR^2 + 0.4539PAR - 51.645$	0.7456
Um5c	$y = 15.717e^{0.1057t}$	0.8234	$y = -8E-05PAR^2 + 0.2793PAR + 18.243$	0.5965
Um5b	$y = 16.201e^{0.1274t}$	0.7888	$y = -0.0002PAR^2 + 0.4512PAR - 26.095$	0.6331
Um5c	$y = 15.377e^{0.1163t}$	0.6191	$y = -0.0001PAR^2 + 0.3401PAR + 12.459$	0.6296
Um6c	$y = 18.094e^{0.1159t}$	0.7266	$y = -0.0001PAR^2 + 0.4133PAR + 7.8275$	0.6185
Um6b	$y = 13.252e^{0.1297t}$	0.7755	$y = -0.0001PAR^2 + 0.4449PAR + 8.9576$	0.7814
Um6c	$y = 32.871e^{0.0801t}$	0.5461	$y = -0.0001PAR^2 + 0.4525PAR + 11.619$	0.5882

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Kätlin Aun,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose Kuivenduskraavi kauguse mõju CO2 bilansile Umbusi ja Laukasoo raba näitel, mille juhendaja on Martin Maddison, reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada, sealhulgas lisada digitaalarhiivi DSpace kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
2. Annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace kaudu Creative Commons'i litsentsiga CC BY NC ND 4.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
3. Olen teadlik, et punktides 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
4. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei riku ma teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse õigusaktidest tulenevaid õigusi.

Kätlin Aun

27.05.2024