

Tartu Ülikool  
Loodus- ja tehnoloogiateaduskond  
Ökoloogia ja Maateaduste Instituut  
Geograafia osakond

Magistritöö keskkonnatehnoloogia erialal

**Kahe erineva meetodi kasutamine C-bilansi määramiseks Lavassaare  
jääturbaala näitel**

Liisa Aro

Juhendajad: Martin Maddison PhD

Järvi Järveoja MSc

Kaitsmisele lubatud:

Juhendaja:

Osakonna juhataja:

Tartu 2014

# Sisukord

Sissejuhatus .....	4
1. Ökosüsteemi CO <sub>2</sub> vood .....	6
1.1 Turbaalade roll süsinikuringes .....	8
2. CO <sub>2</sub> voogude mõõtmismeetodid .....	10
2.1 Turbulentse õhuvoo meetod .....	10
2.2 Kontsentratsiooni gradiendi meetod .....	11
2.3 Kambrimeetod .....	12
2.4 Kambrimeetodi puudused ja neile olemasolevad lahendused .....	14
2.4.1 Vertikaalne CO <sub>2</sub> kontsentratsiooni gradient .....	15
2.4.2 Vertikaalne rõhugradient .....	16
2.4.3 Niiskus ja temperatuur .....	17
2.4.4 Kambrikaela sügavus ja rõngas .....	17
2.4.5 Olemasolevate kambriüsteemide võrdlus .....	18
3. Materjal ja metoodika .....	20
3.1 Uurimisala kirjeldus .....	20
3.2 Väli- ja laboratoorsete tööde metoodika .....	21
3.3 Statistiline analüüs .....	25
4. Tulemused ja arutelu .....	26
4.1 Staatilise ja dünaamilise kambriga mõõdetud CO <sub>2</sub> voogude võrdlus .....	26
4.2 Süsnikubilanss Lavassaare jääkturbaalal .....	29
4.2.1 Dünaamilise läbipaistva kambriga leitud C-bilanss .....	29
4.2.2 Kombineeritud staatilise pimekambri ja taimse biomassi meetodiga leitud C-bilanss .....	31
4.2.3 Kahe meetodiga leitud C-bilansi võrdlus .....	36

4.3 Mõõtmistulemuste seosed keskkonnaparameetritega.....	38
4.3.1 Dünaamilise läbipaistva kambri meetodiga leitud CO <sub>2</sub> voogude seosed .....	38
4.3.2 Staatilise pimekambri meetodiga leitud tulemuste seosed.....	40
Kokkuvõte .....	43
Summary .....	45
Tänuavaldused .....	48
Kasutatud kirjandus .....	49
Lisad.....	55
Lisa 1.....	56
Lisa 2.....	57
Lisa 3.....	59
Lisa 4.....	61
Lisa 5.....	64

## Sissejuhatus

Süsinikdioksiid ( $\text{CO}_2$ ) on kasvuhoonegaas, mis neelab infrapuna- ja lähisinfrapunavalgust, hoides sellega soojust troposfääris ning soojendades maapinda (Solomon *et al.*, 2007). Gorham (1991) on väitnud, et 30% globaalsest mullasüsinukust leidub põhjapoolsetel turbaaladel. Ta lisas, et süsinikuringluse uurimine lähisarktilistel ja boreaalsetel turbaaladel on oluline, selgitamaks välja nende tähtsust atmosfääri  $\text{CO}_2$  kontsentratsiooni kõikumises. Ka hiljutised uuringud on kinnitanud, et turbaala on suurim süsiniku reservuaar biosfääris, mis on akumulierenud isegi suurema koguse süsinikku, kui seda arvas Gorham (1991) (Yu, 2011).

Lõpuni ammendamata turbatootmisalast võib kujuneda oluline kasvuhoonegaaside emissiooni allikas (Maljanen *et al.*, 2010). Siiani on ebaselge põhjapoolsete turbaalade mõju kliima soojenemisele, mis järjekordselt viitab uuringute läbiviimise olulisusele süsiniku dünaamilisuse osas (Heikkinen *et al.*, 2002). Selleks, et määratleda kindla ökosüsteemi roll globaalses kliimamuutuses, on tähtis leida korrektseid andmeid gaasivahetusest biosfääri ja atmosfääri vahel (Burrows *et al.*, 2005; Drösler, 2010) ning tõestada andmete täpsust ja usaldatavust (Pumpanen *et al.*, 2001; Davidson *et al.*, 2002).

Soo ökosüsteemi  $\text{CO}_2$  voogude väljaselgitamiseks on kasutusel erinevaid meetodeid. Levinumad neist on kambrimeetod, kontsentratsiooni gradiendi meetod ja turbulentsse õhuvoo meetod (Kutsch *et al.*, 2010). Igal meetodil on oma nišš ja autorile teadaolevalt on eelnevalt loetletutest Eestis kasutusel kambrimeetod (Mander *et al.*, 2012; Järveoja *et al.*, 2013) ja turbulentsse õhuvoo meetod (Noe *et al.*, 2011).

Turbulentsse õhuvoo meetodi juures kasutatakse mikrometeoroloogilist süsteemi, mis kogub andmeid ökosüsteemi skaalas. Selle eeliseks kambrimeetodi ees peetakse, et ta ei häiri keskkonda ja temaga saab mõõta järjepidevalt, saades andmeid atmosfääri ja biosfääri gaasivahetuse kohta kogu aeg (Baldocchi *et al.*, 1988). Turbulentsse õhuvoo meetod ei sobi aga igale pinnamoole – mõõdetav ökosüsteem peab olema horisontaalne ja homogeenne ning atmosfääris peab valitsema muutumatu seisund (Yu *et al.*, 2013).

Kambrimeetodiga saab andmeid kindlalt piiritletud punktidest, nii on võimalik leida ka väiksemaid gaaside emissioone. Kambrimeetodika varieerub väga palju. Kasutusel on avatud ja suletud kambriid, milles viimane jaguneb omakorda dünaamilisteks ja staatilisteks (Denmead, 2008).

Magistritöö eesmärkideks on:

1. anda ülevaade CO<sub>2</sub> voogude määramisest suletud dünaamilise kambri ja suletud staatilise kambri meetodil,
2. süsinikubilansi koostamine Lavassaare jääkturbaala päiderooga taimestatud ning taimestamata katsealadel kahe erineva meetodiga määratud CO<sub>2</sub> voogude alusel.

Käesoleva töö teoreetiline osa keskendub valdavalt turbaalade mõjule CO<sub>2</sub> voos atmosfääri ja biosfääri vahel. Kirjeldades erinevate meetodite eripärasid pööratakse tähelepanu kambrimeetodi plussidele ja miinustele. Metoodikas kasutatud staatilise pimekambri ja dünaamilise läbipaistva kambriiga saadud tulemuste põhjal oli eesmärgiks selgeks teha, kui sarnased tulemused kahte kambrimeetodit kasutades on võimalik saada ning kas uurimisala on kasvuperioodil CO<sub>2</sub> allikas või siduja.

# 1. Ökosüsteemi CO<sub>2</sub> vood

Looduslike ökosüsteemide ja atmosfääri vahel on CO<sub>2</sub> pidevas liikumises. Selleks, et selgitada süsihappegaasi voogude teket, on oluline teada seda mõjutavaid tegureid, mõista süsiniku dünaamikat ning leida CO<sub>2</sub> allikad (Kuzyakov, 2006).

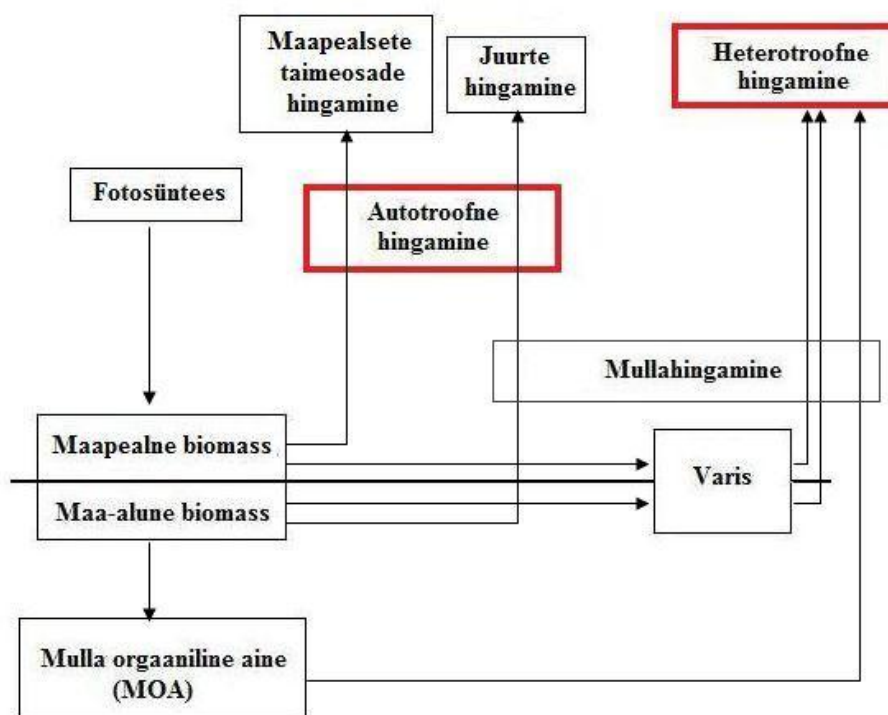
Kirschbaum & Mueller (2001) selgitavad, et taim vajab kasvamiseks süsinikku ja anorgaanilisi toitaineid. Süsinik omastatakse fotosünteesi käigus ning anorgaanilisi toitaineid (lämmastik ja fosfor) hangitakse mullast. Mulla orgaanilises aines (edaspidi MOA) on süsinik tihedalt seotud lämmastiku, fosfori ja väävliga. Nende ainete kättesaadavus määrab osaliselt, millises koguses süsinik mullas akumulereb. See on tingitud asjaolust, et taimede talitus on häiritud, kui mulla süsiniku ja toitainete suhe (nt C:N suhe) on alla optimaalse taseme (Kirschbaum & Mueller, 2001).

Sellised tegurid nagu temperatuur, mullaniiskus ning akumulereunud süsiniku ja toitainete osakaal mõjutavad kogu orgaanilise süsiniku ringlust mullas. Samuti on olulised süsinikuringluse mõjutajad savi, alumiiniumi ja raua sisaldus ning mulla pH. Näiteks, kui mulla pH langeb, väheneb ka mikroobne aktiivsus, mille käigus aeglustub orgaanilise süsiniku ringlus mullas, mis omakorda tähendab, et CO<sub>2</sub> emissioon kahaneb (Kirschbaum & Mueller, 2001).

Ökosüsteemi CO<sub>2</sub> vood võib üldiselt jagada kaheks komponendiks: heterotroofseks ja autotroofseks hingamiseks (vt joonis 1). Heterotroofid (mulla mikroorganismid ja mulla makrofauna) on organismid, kes hangivad elutegevuseks vajaliku energia, lagundades orgaanilisi ühendeid (Kuzyakov, 2006; Eesti Entsüklopeedia). Joonisel 1 on näha, et heterotroofide hingamine toimub lagundades surnud taimede maapealseid ja maa-aluseid jäänuseid ning MOAd.

Autotroofid on organismid, kes sünteesivad orgaanilisi aineid lihtsatest ühenditest nagu süsihappegaas, vesi ja mineraalsoolad. Autotroofide alla kuuluvad rohelised taimed ning ka mõned bakterite liigid (Eesti Entsüklopeedia). Ka maapealsete ja maa-aluste taimeosade elutegevuse käigus tekib CO<sub>2</sub> väljavoo atmosfääri (vt joonis 1). Oluline on mainida, et autotroofsete bakterite poolt põhjustatav CO<sub>2</sub> voog antud joonisel kajastust ei leia, kuna bakterite osa CO<sub>2</sub> produktisoonile on väga väike, võrreldes taimedega (Kuzyakov, 2006).

Jooniselt 1 võib näha, et ökosüsteemi skaalas vaadatuna eksisteerib 4 põhilist CO<sub>2</sub> allikat. Nendeks on maapealsete taimeosade hingamisel tekkiv CO<sub>2</sub>, maa-aluste taimeosade hingamisel tekkiv CO<sub>2</sub>, surnud taimeosade (nii maapealsete kui ka maa-aluste) lagunemisel tekkiv CO<sub>2</sub> ning mulla orgaanilise aine lagundamisel tekkiv CO<sub>2</sub>.



**Joonis 1.** Süsiniku voog ökosüsteemis (Kirschbaum & Mueller, 2001).

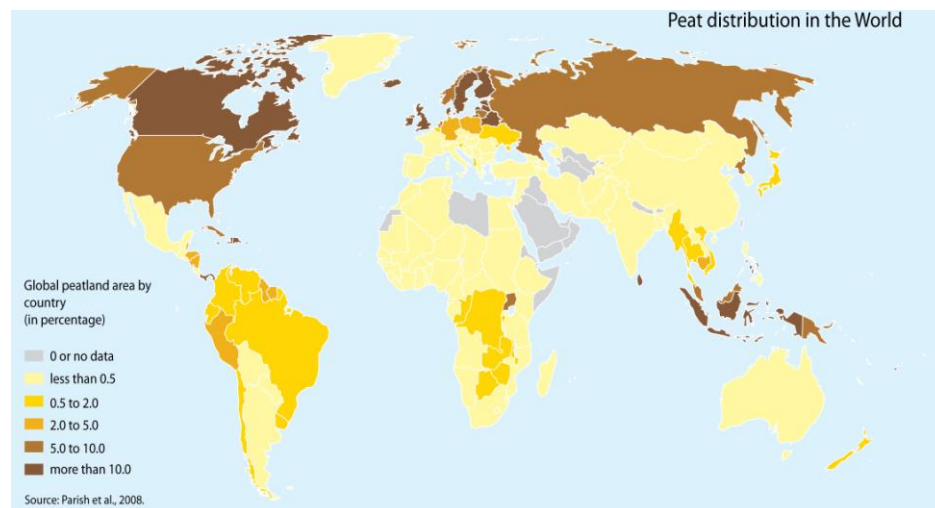
Taime maa-aluste osade poolt tekitatud CO<sub>2</sub> voogude all on mõeldud elusate juurte hingamist ehk nende elutegevusest tulenevat CO<sub>2</sub> emissiooni. Maapealsete taimeosade poolt vahendatud süsiniku vabanemine atmosfääri on aga põhjustatud elusate taimede maapealsete osade hingamise käigus tekkinud süsihappegaasist. Ka surnud taimede maa-aluste ja maapealsete osade (varise) edasisel lagunemisel heterotroofse hingamise käigus emiteerub süsihappegaas atmosfääri (Kuzyakov, 2006). Mulla orgaaniline aine on taimejäänuste mikrobioloogilisel lagundamisel alles jäänud substraadi süsinik muudetud kujul (Truu, 2009). Selle edaspidisel lagundamisel eraldub

samuti CO<sub>2</sub>. Juurehingamist koos heterotroofse hingamisega nimetatakse ka mullahingamiseks (vt joonis 1).

Kuzyakov (2006) kommenteerib, et loetletud süsinikdioksiidi allikatest osaleb MOA-tuletatud CO<sub>2</sub> kõige enam atmosfääri CO<sub>2</sub> kontsentratsiooni muutustes, kuna ta on suurim süsiniku reservuaar mullas. Siiski on ka taimede poolt emiteeritud või seotud CO<sub>2</sub> oluline, et mõista, kas ökosüsteem käitub CO<sub>2</sub> allika või kogujana (Kuzyakov, 2006).

## 1.1 Turbaalade roll süsinikuringes

Looduslikud turbaalad on tuhandeid aastaid akumulleenud süsinikku (Drösler, 2005). Hõlmates ainult 3% maakera pindalast, on turbaalade ökosüsteemi ladestunud koguni 1/3 kogu maakera mullasüsinikust (Gorham, 1991). See moodustab ligikaudu 75% atmosfääris leiduvast süsinikust (Parish *et al.*, 2008). Jooniselt 2 on näha, et 90% turbaaladest on jaotunud põhjapoolsetesse piirkondadesse (Yu, 2011), mis viitab ka turbaalade olulisusele Eestis.



**Joonis 2.** Turbaalade jaotus maailmas (Parish *et al.*, 2008). Joonisel on näha, mitu protsenti riigi pindalast kuulub turbaalade alla.

Süsiniku akumulatsioon on looduslikel turbaaladel kõrge, kuna biomassi produktsioon on mikroobsest lagundamisest kiirem. Soodsaimad olud turbaalade tekkeks ja turba ladestumiseks on neil maastikel, kus maapinnal püsivad piisavalt pikaajaliselt veega küllastunud tingimused (Paal & Leibak, 2013). Alalise veerohkuse ja hapnikuvaeguse tõttu jääb mullas osa orgaanilist ainet lagundamata. See osa lagundamata MOAst ladestubki sobivate akumulatsioonitingimuste korral ajapikku soomulla ehk turbana (Masing, 1988). Seetõttu käituvad looduslikud turbaalad süsiniku talletajatena (Francez, 2000).

Paljud turvasmullad on kuivendatud ning kasutusel metsanduses, põllumaana, karjamaana või turbatootmisalana (Maljanen *et al.*, 2010). Kuivendamise tõttu turvast enam juurde ei teki ning kokkupuutel õhuga hakkab järelejäänud turvas mineraliseeruma (Minkkinen *et al.*, 2002). Selle tagajärjel suureneb CO<sub>2</sub> emissioon kuivendatud turbaaladel (Minkkinen *et al.*, 2002; Paal *et al.*, 2011).

Eestis läbiviidud uurimuses (Mander *et al.*, 2012) leiti, et freesturbaala CO<sub>2</sub> väljavoog oli väiksem kui päiderooga taastatud aladel, vastavalt 2504 kg CO<sub>2</sub>-C ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> freesturbaal, 21 938 kg CO<sub>2</sub>-C ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> päiderooga taastatud väetatud alal ja 13 134 kg CO<sub>2</sub>-C ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> päiderooga taastatud väetamata alal. Vaatamata sellele käitus freesturbaala kui CO<sub>2</sub> allikas ning päiderooga taimestatud alad kui CO<sub>2</sub> sidujad, kuna taimed kompenseerisid emissiooni, kasutades atmosfäärisüsinikku kasvamiseks. Kokkuvõttes leiti süsinikubilanss, kus taastatud väetamata ja väetatud ala sidusid vastavalt -3322 kg CO<sub>2</sub>-C ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> ja -5983 kg CO<sub>2</sub>-C ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> ning freesturbaala emiteeris endiselt 2504 kg CO<sub>2</sub>-C ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> (Mander *et al.*, 2012).

Poolas looduslikul märgalal läbiviidud uurimuses kõikus süsinikubilanss 0,06 kuni -11,82 μmol CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> (2,59 kuni -509,5 mg CO<sub>2</sub>-C m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>) (Chojnicki *et al.*, 2010). Siit selgub, et looduslik turbaala on valdavalt C-siduja. Emissioonide kõikumised on peamiselt seotud õhu- ja mullatemperatuuri kõikumistega, kuid ka taimestiku struktuur ja fenoloogia ning vaadeldava ala veetase mängivad süsiniku dünaamikas olulist rolli (Chojnicki *et al.*, 2010).

## 2. CO<sub>2</sub> voogude mõõtmismeetodid

Olles talletanud suurel hulgal atmosfäärisüsinikku on turbaalad olulised globaalses kasvuhoonegaaside bilansis viimasest jääajast alates (Parish *et al.*, 2008). Seetõttu on kuivendatud lõpuni ammendamata endised turbatootmisalad ühed olulisemad CO<sub>2</sub> emissiooni allikad soo ökosüsteemidest (Maljanen *et al.*, 2010). Vajadusest mõista süsinikuringlust ökosüsteemi tasandil on kasutusel mitmeid meetodeid. Enamjaolt on kasutusel turbulentsse õhuvoo, kontsentratsiooni gradiendi ja kambrimeetodid (Kutsch *et al.*, 2010).

### 2.1 Turbulentsse õhuvoo meetod

Turbulentsse õhuvoo ehk *eddy covariance* (edaspidi EC) meetod võeti kasutusele 1975. aastal, et mõõta erinevate ökosüsteemide ja atmosfääri vahelist gaasivahetust (Baldocchi *et al.*, 1988). EC mõõtmistehnoloogia selgitamiseks võib tuua järgmise näite: kui ühel ajahetkel leiame, et 3 CO<sub>2</sub> molekuli liikus üles (ehk väljus ökosüsteemist) ja järgmisel hetkel liikus 2 molekuli alla (ehk seoti ökosüsteemi poolt), siis järeldatakse, et kogu voog sellel mõõtmisperioodil oli positiivne ehk üks CO<sub>2</sub> molekul jäi atmosfääri. Lõpptulemusena leitakse vertikaalse gaasivoo lineaarne kontsentratsioonimuutus, millest arvutatakse süsinikubilanss (Burba & Anderson, 2010).

Selleks, et saada EC meetodiga usaldusväärsed tulemused, peab vaadeldav ökosüsteem olema horisontaalselt tasane ning turbulents peab olema suhteliselt tugev, et toimiks CO<sub>2</sub> segunemine. EC süsteem, mis on varustatud helianemomeetri ja infrapunagaasianalüsaatoriga (IRGA – *infrared gas analyser*), paigutatakse torni otsa, mõõtmaks ökosüsteemi ja atmosfääri vahelist CO<sub>2</sub> voogu (Baldocchi *et al.*, 1988). Lisas 1 joonisel 1 on toodud eelkirjeldatud mõõtmismeetodi põhimõtteline skeem.

EC meetodi puuduseks on, et ta mõõdab kogu ökosüsteemi CO<sub>2</sub> emissioone ning ei näe üksikuid allikaid (Buchmann, 2002) nagu mulla orgaanilisest materjalist tulenev CO<sub>2</sub> või taimedest tulenev CO<sub>2</sub>. Vahel on aga oluline hinnata erinevatest allikatest tulenevaid emissioone eraldi, et mõista vaadeldava ökosüsteemi eripära (Kuzyakov, 2006).

## 2.2 Kontsentratsiooni gradiendi meetod

Kontsentratsiooni gradiendi meetodiga mõõdetakse CO<sub>2</sub> sisaldused mulla erinevates kihtides. Antud meetod on kasutusel harvemini kui kambri ja turbulentsse õhuvoo meetodid, kuna selle meetodikaga mõõdetud CO<sub>2</sub> voog sõltub suurel määral mulla difusioonitegurist, mis võib aga väga laias ulatuses kõikuda (Kutsch *et al.*, 2010). See tähendab, et CO<sub>2</sub> voog oleneb mulla kihtide poorsusest, pinnavee koostisest, kihtide paksusest ja kontsentratsiooni gradiendist kihtide vahel. Samas on gradiendimeetod kasulik, et eraldada maapealse vegetatsiooni ja mulla enda CO<sub>2</sub> voogusid (Kutsch *et al.*, 2010).

Põhiline mehhanism, mis transpordib CO<sub>2</sub> mullast atmosfääri, on molekulaarne difusioon. Difusioon mullas kujutab endast gaaside liikumist sealt, kus gaasi on palju, sinna, kus on seda vähem, ehk gaas liigub kontsentratsiooni vähenemise suunas (Freijer & Leffelaar, 1996). Tihti on CO<sub>2</sub> kontsentratsioon mullaõhus kõrgem kui atmosfääris, mis tingib mulla ja atmosfääri vahel suure kontsentratsiooni gradiendi (Kutsch *et al.*, 2010). Kontsentratsiooni gradiendi meetodiga arvutatakse gaasikontsentratsioon Fick-i difusiooni seaduse järgi, toetudes mullakihtidevaheliste kontsentratsioonide erinevusele (Maljanen *et al.*, 2003; Pihlatie *et al.*, 2007). Fick-i seadus ütleb, et gaasimolekulide voo tihedus difusioonil on võrdeline nende molekulide kontsentratsiooni gradiendiga (Freijer & Leffelaar, 1996). CO<sub>2</sub> kontsentratsiooni gradiente on aga raske teisendada voogudeks, kuna mulla difusioonikiirus on ebaühtlane ning muutub mulla niiskuse muutudes (Kutsch *et al.*, 2010).

Gaasivoo väljaselgitamiseks paigaldatakse Maljanen *et al.* (2003) järgi mulda horisontaalselt piklik plastiktoru. Toru avatud otsad suletakse ning toru pinnale puuritakse augud, et gaas pääseks sisse. Puuritud augud kaetakse veel omakorda nailonmaterjaliga, et mullaosakesed auke ei blokeeriks. Plastiktoru sisestatakse tavaliselt kahele erinevale sügavusele ning ühendatakse voolikuga, mille otsik ulatub mullast välja, et süstla abil gaasiproov proovipudelitesse koguda ning seejärel gaaskromatograafia gaasi kontsentratsioon leida (Maljanen *et al.*, 2003). Lisas 1 toodud jooniselt 2 on võimalik näha, kuidas kirjeldatud mõõtmisseade välja näeb.

Turcu *et al.* (2005) järgi on kontsentratsiooni gradiendi ja kambrimeetodiga leitud tulemused võrdlemisi sarnased. Esimese katse järel leiti, et gradiendi meetodi järgi on mulla CO<sub>2</sub> emissioon

2,61  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  (111,72 mg CO<sub>2</sub>-C m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>) ning kambriga mõõtes oli emissioon 2,79  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  (119,89 mg CO<sub>2</sub>-C m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>). Teise katse puhul erinesid gradiendi meetodi ja kambrimeetodi vood vastavalt 2,04  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  (87,2 mg CO<sub>2</sub>-C m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>) ja 2,49  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  (106,27 mg CO<sub>2</sub>-C m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>) (Turcu *et al.*, 2005).

Kambri ja gradiendi meetodi andmed on suhteliselt sarnased ning seetõttu eelistatakse kontsentratsiooni gradiendi meetodile kambrimeetodit, sest kambriga on võimalik lisaks mulla hingamisest tulenevatele voogudele mõõta ka taimede maapealsete osade mõju atmosfääri CO<sub>2</sub> kontsentratsiooni muutustele.

### 2.3 Kambrimeetod

Esimesena võeti kambrimeetod kasutusele Rootsi teadlase Henrik Lundegårdh-i poolt juba 1922. aastal. See oli peamine teadaolev meetod, mida kasutati looduslike ökosüsteemide ja atmosfääri vaheliste gaasivahetuste mõõtmiseks (Kutsch *et al.*, 2010).

Põhiliseks kambrimeetodi eeliseks on selle universaalsus – ta on kergelt mööda uurimisala kantav, teda saab kasutada ükskõik millise pinnamoega alal ning võrreldes teiste meetoditega on hind suhteliselt madal. Lisaks on kambrimeetod võimeline leidma 100 korda väiksemaid emissioone, kui seda suudavad mikrometeoroloogilised vahendid (Denmead, 2008).

Eristatakse kahte kambrimeetodit: avatud ja suletud kambrimeetod (Denmead, 2008; Kutsch *et al.*, 2010). Avatud kambrimeetod on kasutusel harvemini, kuna avatud kambrid on mehhaaniliselt keerulisemad. Lisaks on suuremaid kontsentratsioonimuutusi kergem leida suletud kambrimeetodi abil. Avatud kambri põhimõte seisneb selles, et konstantne õhuvool läbib kambri ülemist osa. Mõõdetakse kambrisse siseneva ja kambrist väljuva õhu kontsentratsiooni erinevust (Denmead, 2008).

Järgnevalt kirjeldatud terminite abil on võimalik selgitada kambri abil sageli otsitavaid parameetreid (Kirschbaum & Mueller, 2001):

- GPP (*gross primary production*) ehk ökosüsteemi primaarproduksioon. See näitab taimede poolt seotud süsiniku kogust fotosünteesi käigus. Siinjuures arvestatakse kogu süsinikku, mis on kindla ajaperioodi jooksul seotud.
- NPP (*net primary production*) on ökosüsteemi kogu primaarproduksioon, millest lahutatakse kindla perioodi autotroofsete organismide poolt hingatud süsiniku kogus. Mõeldud on eelkõige taimede (maapealse ja maa-aluse elusoleva osa) hingamist. Kokkuvõtvalt võib seda väljendada valemiga  $NPP = GPP - R_a$ .
- NEE (*net ecosystem exchange*) on ökosüsteemi süsinikubilanss. Selle abil on võimalik välja selgitada, kas vaadeldav ökosüsteem on CO<sub>2</sub> allikas või siduja. NEE leitakse, kui kogu primaarproduksioonist lahutatakse heterotroofsete organismide poolt kindlal ajaperioodil väljahingatud süsiniku hulk. Kasutusel on valem  $NEE = NPP - R_h$ .

Suletud kambrimeetod jaguneb staatiliseks ja dünaamiliseks. Staatilises kambris ei esine õhuringlust kambri ja sensori vahel, seega energiavajadust ei ole. Tavaliselt kogutakse õhuproov süstla abil eelevalukeeritud klaaspudelisse ning gaasikontsentratsioon mõõdetakse hiljem laboris. Dünaamilise kambri õhk on kambri ja gaasianalüsaatori vahel ringluses. See võimaldab leida gaasikontsentratsiooni muutust kambris. Eesmärgiks on lineaarne kontsentratsiooni muutus, viidates konstantsele gaasivoole pinnast ja/või maapealsete taimeosade fotosünteesile (Denmead, 2008).

Heinemeyer & McNamara (2011) tegid uurimuse, kus võrreldi staatilist meetodit dünaamilisega. Leiti, et erinevused gaasivoos on nähtavad juhul, kui arvestatakse kõiki staatilise kambri proove (st 7 kordust 75 minuti jooksul). Arvestades vaid esimesi proove (st proove, mis võetud ~10 minuti jooksul) olid C-voos dünaamilise ja staatilise kambriga mõõtes sarnased.

Dünaamilise kambri puhul võib olenevalt töö eesmärgist analüsaatori ühendada pime- või läbipaistva kambriga. Läbipaistva kambri abil leitakse NEE ehk *net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange* (Chojnicki *et al.*, 2010; Drösler, 2005), mida eesti keelde tõlgituna mõistame ökosüsteemi C-bilansina. Nagu eelnevalt mainitud, kujutab maapealsete ja maa-aluste osade hingamine autotroofset hingamist (Kirschbaum & Mueller, 2001). NEE mõõtmise juures on oluline arvestada mõlemaga.

Pimekambri abil on võimalik mõõta nii autotroofset kui heterotroofset hingamist. Mõnel juhul on kasutusel meetod, kus autotroofse hingamise tulemused eraldatakse heterotroofsest. Selleks eemaldatakse mõõdetavast punktist maapealsed taimeosad (*trenching technique*). Seejärel paigutatakse mulda rõngas, et takistada uute juurte kasvu rõngaalusesse mulda. Selliselt on võimalik mõõta heterotroofide hingamist (Heinemeyer *et al.*, 2011).

Eestis on siiani kambrimeetodit kasutatud ökosüsteemi süsinikubilansi leidmiseks turbaaladel selliselt, et staatilise pimekambriga mõõdetud süsiniku emissioonist lahutati maapealne NPP ja maa-alune NPP. NPP saamiseks võetakse nii maapealsed kui maa-alused biomassi proovid ning sellele järgneva töötlemise käigus leitakse laboris maapealse biomassi ja maa-aluse biomassi proovide C-sisaldus (Mander *et al.*, 2012; Järveoja *et al.*, 2013).

Võrreldes teiste eelnevalt kirjeldatud meetoditega on kambrimeetod universaalne. Sellega saab mõõta mosaiiksetel ökosüsteemidel. Kamber pakub võimalust võrrelda isegi väikesi gaasivoogude muutusi, mis võivad olla mõjutatud taimestiku kattest ja kooslustest, veetasemest ja inimtegevusest (Drösler, 2005). Kambrimeetodi mõõtmisvahenditega on võimalik tutvuda Lisas 2.

## **2.4 Kambrimeetodi puudused ja neile olemasolevad lahendused**

Aastakümneid on arendatud erinevaid meetodeid, et leida reaalsed andmed turbaala ökosüsteemi CO<sub>2</sub> voogude kohta. Uurimustöid on viidud läbi nii laborites kui ka välitingimustes. Tihti erinevad uurijate saadud tulemused üksteisest oluliselt ning on ebaselge, kas tulemuste varieeruvus on meetodist sõltuv ja/või oleneb see eksperimentaaltimingimustest (mulla, taimestiku, varustuse ja keskkonnatingimuste erinevus) (Kuzyakov, 2006). Seetõttu on oluline välja tuua, millised tingimused peavad olema täidetud, et vähendada meetodist sõltuvat erinevate uurijate tulemuste varieeruvust.

Järgnevalt on vaatluse alla võetud vaid suletud kambrimeetodiga seotud probleemid, kuna antud töö eesmärk on uurida just suletud kambreid. Peamised puudused, millega uurijad on kokku

puutunud suletud kambrimeetodit kasutades ning mis ei esine EC ja kontsentratsiooni gradiendi meetodite puhul, on:

- 1) vertikaalsest CO<sub>2</sub> kontsentratsiooni gradiendist tulenevad vead,
- 2) vertikaalne rõhugradiendi probleem:
  - a) ventilatsioonist tulenev,
  - b) horisontaalsest õhuliikumisest tulenev,
- 3) niiskuse ja temperatuuri kõikumine kambris,
- 4) kambri sisestamissügavusega ja rõngaga seotud küsimused.

#### **2.4.1 Vertikaalne CO<sub>2</sub> kontsentratsiooni gradient**

Vertikaalse CO<sub>2</sub> kontsentratsiooni gradiendi probleem on seotud vigadega CO<sub>2</sub> voo mõõtmistulemustes, mis tulenevad CO<sub>2</sub> kontsentratsiooni erinevusest kambrisisesest ja -välisest õhu vahel (Kutsch *et al.*, 2010). Pärast kambri paigaldamist maapinnale hakkab selles CO<sub>2</sub> kontsentratsioon muutuma, mis mõjutab loomulikku CO<sub>2</sub>-kontsentratsiooni gradienti mullaprofiilis (Conen & Smith, 2000).

Suletud staatilises kambris võib CO<sub>2</sub> kontsentratsioon tõusta palju kõrgemale välisõhus leiduvast CO<sub>2</sub> kontsentratsioonist. Tõus on tingitud sellest, et kamber katab mulda pikka aega (minimaalselt 20 min, vt lisa 3 tabel 1). Selline küllastusefekt muudab looduslikku kontsentratsiooni gradienti mullas ning CO<sub>2</sub> väljavool võib oluliselt väheneda (Nay *et al.*, 1994). Kui mullahingamine on kõrge, siis on ka kambris olev CO<sub>2</sub> kontsentratsioon kõrge, aga ainuke CO<sub>2</sub> transpordimehhanism mullast kambrisse on difusioon ning turbulentsi puudumise tõttu kontsentratsiooni alahinnatakse (Kutsch *et al.*, 2010).

Vertikaalse kontsentratsiooni gradiendi probleemi lahendus on kasutada dünaamilist kambrit. Kuna mõõtmised kestavad lühikest aega (maksimaalselt 5 minutit, vt lisa 3 tabel 1), katab kamber mulda lühemat aega. Sellega väheneb võimalus, et mulla loomulik kontsentratsiooni gradient muutub ning CO<sub>2</sub> voo alahindamise tõenäosus on väiksem (Davidson *et al.*, 2002).

## 2.4.2 Vertikaalne rõhugradient

Vertikaalse rõhugradiendi probleem on seotud kambriõhu ja atmosfääri õhu vahelise rõhu erinevusega. Juba väike rõhu erinevus kambris ja atmosfääri õhu vahel, näiteks 0,5 Pa, võib tekitada vigu CO<sub>2</sub> väljavoolu mõõtmistulemustes (Lund *et al.*, 1999).

Näiteks, kui rõhk kambri on väiksem kui atmosfääris, tingib see massilise CO<sub>2</sub> voo mullast kambri. Kui aga kambri rõhk on atmosfääri rõhust kõrgem, blokeerub looduslik CO<sub>2</sub> väljavool ning viib tulemuste alahindamiseni (Kutsch *et al.*, 2010).

Õhu ventileerimine on vajalik, et gaas oleks kambri homogeenelt jaotatud. Kasutusel on kaks võimalust, kuidas ventileerida õhku dünaamilises kambri. Üks võimalus on, et analüsaator, mis on ühendatud sissevoolu- ja väljavoolutoruga, võtab proovi kambri ülemisest osast ja tagastab võetud õhu kambri alumisse ossa. Teine võimalus on kambri ülemisse osasse integreeritud ventilaator, mis segab kambriõhku. Selline õhu segamine muudab loomulikku turbulentsi kambri ning sellega võib kaasneda rõhu erinevus kambris ja atmosfääri õhu vahel (Kutsch *et al.*, 2010).

EC ja gradiendi meetod ainukesena ei mõjuta looduslikku horisontaalset tuult. Kambri on aga võimatu reprodutseerida looduslike tuuletingimusi (Kutsch *et al.*, 2010). Atmosfääris esinev horisontaalne tuul võib mõjutada dünaamilise kambri mõõtmistulemusi nn. ventuuriefekti kaudu. Bain *et al.* (2005) leidsid, et tuule liikumine ava juures tingib õhu väljatõmbamise kambri ning tekitab sellega gaaside massilist väljavoolu poorsest mullast. Et ventuuriefekti ei tekiks, peab ava disainima vastavalt kambri volüümile ja prognoositud tuulekiirusele (Hutchinson & Livingston, 2001).

Davidson *et al.* (2002) leidsid, et tuulisel päeval oli rõhu kõikumine kambri -0,7 ja +0,9 Pa vahel. Nad hoiatasid, et uurimused, mis on näidanud väikest rõhu kõikumist kambri, mõõtes CO<sub>2</sub> voogu vajaksid uuenenud tähelepanu juhul, kui mõõtmised sai tehtud tuulistes tingimustes.

Ventilaatorist tulenevat turbulentsi on võimalik vähendada, paigutades kambri metallvõrgu, mis jääb ventilaatori ja pinnase vahele. Lisaks on soovitatav alati mõõta rõhku kambri, et vigu ennetada (Kutsch *et al.*, 2010). Pumpanen *et al.* (2004) mainivad, et parim variant turbulentsi

tekke vältimiseks on kasutada analüsaatori enda tehnoloogiat, kus analüsaator pumpab kambri ülemisest osast õhu välja ning tagastab selle kambri alumisse osasse. Nii toimub õhu segamine kõige turvalisemalt.

### **2.4.3 Niiskus ja temperatuur**

Niiskuse ja temperatuuri probleem esineb läbipaistvate kambrite juures ning pimekambri puhul esineb seda vähem. Drösler (2005) märkis, et juhul kui läbipaistvasse kambri ei olnud integreeritud kliimakontrolli vahendeid, kasvas niiskus kambri vähemalt 20% minutis. Selle tõttu tekkis kambri seintele kondensatsioonivee kiht. Kondensatsioon kambri seintel vähendab fotosünteesi kiirgust 20-30% võrra ning mõjutab nii taimede fotosünteesi protsessi.

Kambriõhu temperatuur võib päikeselisel ja soojal päeval proovivõtu ajal tõusta 10 kuni 15 kraadi võrra (°C). Sellega kaasneb CO<sub>2</sub> kontsentratsiooni gradiendi muutus. Temperatuuritõusu tõttu hakkab kambri õhk paisuma, mille tulemusena CO<sub>2</sub> surutakse kambri seintest välja õhurõhukompensatsiooni ava kaudu või läbi mulla (Kutsch *et al.*, 2010).

Kambriõhu jahutamiseks tuleb kambri seintele paigaldada jahutussüsteem (Kutsch *et al.*, 2010). Enamasti on jahutussüsteemina kasutusel jahutuskotid. Lisaks sellele, et need hoiavad kambri temperatuuri soojenemast, ei ole ka ohtu, et kambri sees õhuniiskus kasvaks ja tekitaks kondensatsiooni kambri seintele. Kondensatsioonivee koguneb jahutuskoti pinnale ning ei mõjuta kambriõhu niiskust ega sellega ka mullaniiskust (Drösler, 2005). Kuna temperatuur on kõige kõrgem pärastlõunal, on ohutum võtta gaasiproovid enne lõunat, et vähendada võimalike vigade tõenäosust veelgi.

### **2.4.4 Kambrikaela sügavus ja rõngas**

Kambriõhu ja atmosfääriõhu vaheliste lekete vältimiseks on oluline sisestada kambrikael vajalikule sügavusele (juhul, kui rõngast ei kasutata). Hutchinson & Livingston (2001) leidsid, et madala kuni keskmise poorsusega aladel on piisav, kui kambrikael on 2,5 cm sügavusel. Kõrge

poorsusega aladel on hea kambrikaela sügavus 9 cm, et vähendada horisontaalsest difusiooni muutusest tulenevaid vigu. Kambri rõnga paigutamine on olnud kasutusel üldiselt selleks, et kamber püsiks stabiilselt pinnal (Chojnicki *et al.*, 2010), sellega ennetatakse CO<sub>2</sub> väljavoolu kambrist.

#### **2.4.5 Olemasolevate kambrisüsteemide võrdlus**

Enamasti on turbaaladel kasvuhoonegaaside mõõtmiseks kasutusel kambrimeetod, kuna ökosüsteem on pigem mosaiikne ja maastik ei ole alati homogenne (Drösler, 2005). Lisas 3 toodud tabelist 1 on näha väljavalitud uurijate metoodikaid ja märkusi. Enamik valitud uurijatest viisid mõõtmised läbi Soomes. Lisaks kaasati võrdlusesse Tšehhis, Taanis, Poolas, USAs, Saksamaal ja Inglismaal läbiviidud uuringutes kasutatud meetodeid.

Lisas 3 on näha, et paljud uurijad kasutavad nii pimedat kui läbipaistvat kambrist. Enamjaolt on läbipaistva kambri materjalina kasutusel pleksiklaas või polükarbonaat ning pimekambri puhul PVC (polüvinüülkloriid e. termoplastiline polümeer) või alumiinium. Materjalivalikul lähtuti, et kambrist on vaja tihti kanda ning paigutada seda ühelt rõngalt teisele. Eelnimetatud materjalid on kerged ning vastupidavad erinevates ilmastikutingimustes, seetõttu ongi enamik uurijaid valinud just need materjalid.

Kasutakse nii silindri- või kuubikujulisi kambreid. Kuubikujulise kambri põhjapindala algab 0,36 m<sup>2</sup> (ruudukujuline põhi 60×60 cm) ning kirjandusest suurim leitud kuubikujuline kamber on põhja mõõtudega 78×78 cm ja kõrgusega 50 cm. Antud kamber on põhjalikumalt kirjeldatud Matthias Drösleri doktoritöös (2005). Optimaalne kambri suurus on oluline, et gaasi kontsentratsiooni gradient kambris püsiks muutumatu ning ei mõjutaks gaasi difusiooni nullast (Davidson *et al.*, 2002).

Lisas 3 toodud andmetes on näha, et uuemates uuringutes on kambrisse integreeritud kaks ventilaatorit õhu ühtlasemaks jaotamiseks kambris ning kambriseinas on ava õhurõhu kompensatsiooniks. Ventilaatori kasutamine võib põhjustada CO<sub>2</sub> kontsentratsiooni üle- või alahindamist, mida on ka kirjeldatud peatükis 2.4.2. Jahutussüsteemi vajadus on läbipaistvate

kambrite puhul. See on seotud pimekambri aeglasema soojenemiskiirusega tänu valgust peegeldavale värvusele. Jahutussüsteemiks on üldiselt kasutusel jahutuskott, mis paigutatakse kambrisse mõõtmise ajaks (vt lisa 3 tabel 1).

Enamasti on kamber paigutatud rõngale, mis on sisestatud pinnasesse vajaliku sügavuseni, et kamber püsiks stabiilselt pinnal. Vaid mõnel juhul ei ole üldse mainitud, kas kamber on gaasi voo mõõtmiseks paigutatud rõngale või otse pinnasesse. Et tagada õhutihedus (st õhuliikumine kambri ja atmosfääri vahel on minimaalne), on tihti rõngaplatvormile kallatud vett. Mõnel juhul on kambri ja rõnga vahel õhutiheduse tagamiseks kasutatud kummitihendit.

Hiljutised uuringud kasutavad pigem dünaamilist kambrimeetodit, kuna CO<sub>2</sub> kontsentratsioonid on leitavad lühema ajaga ning sellest tulenevalt on tulemuste valearvestuste tõenäosus väiksem (vt peatükk 2.4). Mõõtmisaeg varieerub erinevates uurimustes dünaamilist meetodit kasutades suuresti. Kõige sagedasem oli 2-minutiline mõõtmisaeg. Optimaalne mõõtmisaeg sõltub aga kambri suurusest ja mõõdetavast ökosüsteemist. Suurema voo korral saadakse tulemused kiiremini kätte kui madala voo korral, mil kambri mõõtmisaeg on pikem. Enamasti on proove võetud 2-nädalaste intervallidega.

Lisas 3 selgus, et paljud uurijad ei kirjelda oma metoodikat täielikult, tihtipeale ei kirjeldata ala ettevalmistust, õhurõhu kompensatsiooniava disaini või olemasolu, kas kamber paigutatakse rõngale või otse mulda. Vaatamata sellele, et ava olemasolu peetakse oluliseks, puudub isegi hiljutistes uurimustes (vt Barodek *et al.*, 2011 või Urbanová *et al.*, 2012) õhurõhu kompensatsiooniava.

## 3. Materjal ja metoodika

### 3.1 Uurimisala kirjeldus

Uurimus viidi läbi Lavassaare soos, mis paikneb Pärnu maakonnas Halinga vallas. Eestit katab kokku ligi 30 000 ha turbamaardlaid, neist 9 371 ha (~30%) on mahajäetud ja 19 574 ha (65%) on aktiivsed turbamaardlad (Ramst & Orru, 2009). Lavassaare soomassiivi puhul on tegemist Lääne-Eesti madalikul asuva Eesti suurima sooga, mis hõlmab 21 868 ha, turbamaardla alla kuulub 19 746 ha ning sellest 1478 ha on turbatootmisväljad (Orru & Orru, 2003). Turbakaevandamisega tegeleb Lavassaare soos AS Tootsi Turvas (Mander *et al.*, 2012).

Lavassaare soomassiiv on kujunenud Balti mere taganemisest vettpidavatel Litoriiinamere ja Antsülusjärve saviliivadel ja liivsavidel, seetõttu võib turba all kohati leiduda 0,1-0,2 m paksune järvemudakiht (Orru, 1995). Lageraba on Lavassaare soostikus domineerivaks maastiku elemendiks, moodustades sellest 50-60% (Orru & Orru, 2003).

Käesoleva töö uurimisalal domineeris enne kaevanduste alustamist vähelagunenud turvasmuld (Fibric Histosol). Lõpuni ammendamata freesturbaväljadele allesjäänud pealmine jääkturbakiht koosneb aga peamiselt tugevalt lagunenud pilliroo-tarnaturbast (von Posti skaala järgi lagunemisastmega H7) (Mander *et al.*, 2012).

Alates 1922. aastast on Lavassaares kütteks turvast kaevandatud, mille tõttu on sinna tekkinud palju jääksooalaid (Orru & Orru, 2003). 2007. aastal alustati Lavassaare mahajäetud lõpuni ammendamata turbatootmisalal energiaheina kasvatamise katsetega (Paal, 2011). Katsealad taimestati päideroo (*Phalaris arundinaceae* L.) sordiga – „Pedja“. Osa katsealaid väetati mineraalsete ja orgaaniliste väetistega ning ülejäänud jäeti kontrollaladeks ehk väetamata aladeks (Paal, 2011). Käesolevas töös on päiderooga taimestatud ala katselapid rajatud varasemalt väetamata aladele.

### 3.2 Väli- ja laboratoorse teo meetodika

Proovivõtuala rajati 2012. aastal aladele, kus turbakihi sügavus mineraalse pinnani on 50-60 cm ning mulla pH = 5. Alad jaotati 12 katselapiks suurusega 2,5×10 m, millest 6 paiknesid päiderooga taimestatud ja ülejäänud freesturbaaladel (vt joonis 3). Katselapid paiknesid kraavide vahel (nn laamid). Igal laamil asub 2 katselappi, millest üks on väetatud ja üks on väetamata ehk kontroll-lapp. Katselapid paiknesid kuivenduskraavidest ca 4 meetri kaugusel. Kontroll- ja väetatud lapi vahe oli vähemalt 4 m. Väetatud katselapid väetati mineraalväetisega (300 kg ha<sup>-1</sup>) toitainete suhtega 24N-6P-12K. Väetise kogus ja toitainete suhted määrati uurimisala turba testproovide keemilise koostise alusel.



**Joonis 3.** Uurimisala asukoht (58°34'20"N ja 24°23'15"E, Lavassaare, Pärnumaa) ja katselappide paigutus uurimisalal (Maa-amet). Rohelised ruudud tähistavad taimestatud laame ja sinised ruudud freesturba laame. Igal laamil asub 2 katselappi, millest üks on väetamata (K) ja üks väetatud (V). Igal katselapil on mulda sisestatud 3 PVC rõngast gaasiproovide kogumiseks.

Süsinikdioksiidi voogude mõõtmisi teostati staatilise pimekambril ja dünaamilise läbipaistva kambril. Dünaamilise kambriga leidsid mõõtmised aset 2013. aasta juunist

kuni 2013. aasta oktoobrini. Erandina alustati staatilise kambriga mõõtmisi mais, sest eesmärk oli koostada C-bilanss ning alljärgnevalt on selgitatud maikuu mõõtmiste olulisus C-bilansi leidmisel staatilise kambriga. Välitööd viidi läbi 2-nädalase intervalliga.

Staatilise pimekambriga mõõtmistel kasutati valgeid 65-liitriseid PVC-kambreid (diameeter 50 cm, kõrgus 40 cm). Kamber asetati õhukindlalt 15 cm sügavuseni mulda vajutatud plastikrõnga platvormile, mis oli täidetud veega. Proove koguti neljalt katselapilt korruga ehk paralleelselt ühelt taimestatud laamilt (väetatud ja väetamata katselapp) ja ühelt freesturba laamilt (väetatud ja väetamata katselapp). Tulemustes on kasutatud katselapi mõiste asemel ala, siis kui keskmistati kõikide sarnase töötusega katselappide CO<sub>2</sub> vood. Juhul kui vaatluse all oligi üks kindel katselapp (nt 3. taimestatud ala väetatud katselapp) siis seda mõistet kasutati.

Staatilise pimekambriga meetodiga koguti proove igal lapil 3 korduses (1., 2. ja 3. rõngas). Gaasiproovid koguti 100 ml eevakueeritud (0,3 mbar) klaaspudelitesse. Proovid võeti alates kambriga paigutamisest rõngale, esmalt koguti 0 minuti proov ning seejärel 20. minuti, 40. minuti ja 60. minuti proovid nii, et kamber asetses kogu aja häirimatult rõngal.

CO<sub>2</sub>, kuid ka lisaks CH<sub>4</sub> ja N<sub>2</sub>O sisaldus kogutud proovides määrati Tartu Ülikooli laboris gaas-kromatograafia Shimadzu 2014 GC, mis on varustatud elektron-detektoriga (ECD) ja leekionisatsiooni detektoriga (FID). Gaasivoo intensiivsus arvutati gaasikontsentratsiooni lineaarse muutuse alusel võttes arvesse pimekambriga ruumala ja kambriga kaetud pindala (Mander *et al.*, 2012) CH<sub>4</sub> ja N<sub>2</sub>O proovide kontsentratsiooni käesolevas töös ei käsitleta, kuna keskendutakse CO<sub>2</sub> uurimisele. Determinatsioonikordaja R<sup>2</sup> lävendiks oli 0,95.

Staatilist kambrimeetodit kasutades arvutati NEE järgmise valemi järgi:

$$NEE (\text{mg CO}_2\text{-C m}^{-2} \text{ p}^{-1}) = Rh - NPP_{mp} - NPP_{ma}$$

- Rh – heterotroofne hingamine, mis leiti lahutades staatilise kambriga leitud emissioonist autotroofne hingamine (54% ökosüsteemi hingamisest, vt Shurpali *et al.*, 2008)
- NPP<sub>mp</sub> – maapealsesse biomassi seotud C hulk
- NPP<sub>ma</sub> – maa-alusesse biomassi seotud C hulk

Selleks, et leida maapealse ja maa-aluse biomassi produktsioon ja C sisaldus võeti 2013. aasta mais ja septembris igalt katselapilt maa-pealse ja maa-aluse biomassi proovid viies korduses,

millest määrati OÜ Keskkonnauuringute Keskuse Tartu filiaali laboris üldsüsiniku ( $C_{\text{üld}}$ ) sisaldus (vt Mander *et al.*, 2012).

Maapealse biomassi produktsiooni leidmiseks lõigati kääridega taimestatud katselappidelt 0,5×0,5 m suurustelt ruutudelt kasvavad taimed. Esialgu kaaluti õhkuiva proovi kaal ning seejärel kuivatati proovid termokapis (Gallenkamp Sanyo OMT) 70 °C juures 72 h, mille järel määrati absoluutkuiva maapealse taimeproovi kaal. Kaalumisel kasutati Kern GS 6200-1 kaalu, mille mõõtetäpsus on 0,1 g.

Maa-aluse biomassi produktsiooni väljaselgitamiseks võeti 10 cm läbimõõduga puuriga kuni 30 cm sügavuseni proovikehad, mille järel juured pesti kraaniveega turbast välja. Proovid pesti 0,2 mm sõelaga, kust nähtavad juured ning alles jäänud turbamass koguti eraldi. Proovid kuivatati termokapis 48 h 70 °C ning seejärel kaaluti (vt Mander *et al.*, 2012).

Maapealsesse biomassi seotud C hulga arvutamisel kasutati 2013. a septembris kogutud biomassi kuivainesaagikuse ning laboris määratud  $C_{\text{üld}}$  sisalduse andmeid. Maa-alusesse biomassi seotud C hulga arvutamiseks kasutati aga 2013. aasta mais ja septembris kogutud biomassi kuivainesaagikuse keskmisi ning  $C_{\text{üld}}$  sisalduse andmeid. Maa-aluse biomassi produktsiooni arvutamiseks korrutati biomasside keskmised tulemused lisaks läbi juurekäibega (väetamata alal 0,7-ga ja väetatud alal 0,95-ga) (vt Mander *et al.*, 2012).

Tingitult asjaolust, et maa-aluse biomassi proovid võeti mais oli oluline C-bilansi tulemuste õigsuse huvides arvestada ka maikuu heterotroofse hingamisega, mistõttu alustatigi staatilise pimekambri proovivõtuga mais. Dünaamilise kambri süsteem valmis mai lõpus, mistõttu alustati proovivõtuga juunis.

Ökosüsteemi CO<sub>2</sub> bilansi (NEE) otseseks mõõtmiseks kasutati suletud dünaamilist kambrimeetodit. CO<sub>2</sub> kontsentratsioon mõõdeti infrapunasensoriga varustatud analüsaatoriga PP Systems EGM-4. Analüsaator oli varustatud pumbaga, mis pumpas 350 ml õhku minutis. EGM-4 analüsaator mõõtis 1,2 sekundi tagant. Näit salvestati iga 4,8 sekundi tagant 4 mõõtmise keskmistatud väärtusena (PP Systems, 2013).

Mõõtmised toestati PVC materjalist valmistatud läbipaistva kambri, mille fotosünteetiliselt aktiivse kiirguse (PAR, *photosynthetically active radiation*) läbilaskvus oli 75%. Kamber mahuga 65 l (diameeter 50 cm, kõrgus 40 cm) oli varustatud termomeetriga, mis mõõtis kambriõhu temperatuuri ja PAR-i anduriga PAR mõõtmiseks. Kamber ja analüsaator olid ühendatud kahe voolikuga: analüsaatori sissevoolutoru kogus prooviõhku kambri ülemisest osast ja analüsaatori väljavoolutoru juhatas prooviõhku kambri alumisse ossa. Nii toimus kambriõhu ventileerimine ohutult Pumpaneni *et al.* (2004) soovitude järgi.

Läbipaistva kambri võeti proove igalt katselapilt 2 korduses (1. ja 3. rõngas). Iga mõõtmisessioon kestis 2 kuni 4 minutit seega saadi igal mõõtmiskorral 25 kuni 50 mõõtmistulemust. Paigutades kambri rõngale, sai ökosüsteem häiritud, seega esimesed 2 mõõtmistulemust jäeti vooarvutusest välja. Gaasivoo intensiivsus arvutati gaasikontsentratsiooni lineaarse muutuse alusel, võttes arvesse kambri ruumala ja kambri kaetud pindala. Determinatsioonikordaja  $R^2$  lävendiks oli 0,95 ning kontsentratsioonitõusu muutust, mis jäi alla 5 ppm-i ei võetud voo arvestusse.

Igal proovivõtukorral mõõdeti ka põhjaveetase ja mullatemperatuur. Põhjaveetase määrati 1 m sügavusele sisestatud piesomeetrite abiga. Igal katselapil oli 2 piesomeetrit. Mulla temperatuurid mõõdeti 5, 10, 20, 30 ja 40 cm sügavuselt. Lisaks teostati igal proovivõtul põhjavee kvaliteedi mõõtmised portatiivse seadmega YSI Professional Plus. Mõõdeti järgmisi näitajaid: veetemperatuur, pH, elektrijuhtivus, redokspotentsiaal, lahustunud O<sub>2</sub> sisaldus ja lahustunud hapniku küllastusaste (%). Õhutemperatuuri ja sademete andmed saadi Pärnu meteoroloogiajaamast. Lisas 2 on pildid välitöödel kasutatud vahenditest ja uurimisobjektist.

Eelnevalt kirjeldatud pimekambreid kasutades viidi juulis (02.07.2013) läbi lisakatse, kus portatiivse analüsaatoriga mõõdeti 20 minutit (näit salvestati 1 minuti tagant) ning gaasiproovid gaaskromatograafia analüüsamiseks võeti 60 minuti jooksul 5 korral (0, 10, 20, 40, 60 minutit). Meetodite võrdlusesse võeti 60 minuti kontsentratsioonitõusud, mistõttu portatiivse analüsaatori kontsentratsioonitõus teisendati ühe tunni kohta.

### 3.3 Statistiline analüüs

Statistilise andmeanalüüsi teostamisel kasutati Statistica 7 (Statsoft Inc) programmi. Muutujate normaaljaotuse kontrollimiseks kasutati Kolmogorov-Smirnovi, Lillieforsi ja Shapiro-Wilki teste. Erinevate meetoditega mõõdetud kasvuhonegaaside emissioonide jaotus ei vastanud normaalsele, seega kasutati mitteparameetrilisi meetodeid.

Kruskal-Wallis ANOVA testis võeti vaatluse alla kõikide alade (taimestatud kontrollala, taimestatud väetatud ala, freesturba kontrollala, freesturba väetatud ala) ja katselappide (I, II, III) voogude omavahelist usalduväärset erinevust.

Süsihappegaasi voo ja erinevate keskkonnategurite vaheliste seoste analüüsil rakendati regressioonanalüüsi determinatsioonikordajaid ( $R^2$ ). Omavahel võrreldi dünaamilise läbipaistva ja staatilise pimekambriga leitud kontsentratsioonitõuse freesturbaalal. Lisaks võrreldi portatiivse analüsaatori ja gaaskromatograafiga analüüsitud kontsentratsioonitõuse kasutades pimekambrid taimestatud- ja freesturbaalal ning dünaamilise läbipaistva kambri ja kombineeritud meetodiga leitud C-bilanssi mõõtmisperioodi kohta.

Seoseid otsiti läbipaistva dünaamilise kambriga mõõdetud C-bilansi ja PAR-i vahel ning kambriõhu temperatuuri vahel. Staatilise pimekambriga mõõdetud emissioonide seoste leidmiseks kasutati mullatemperatuuri ja mullaniiskuse andmeid.

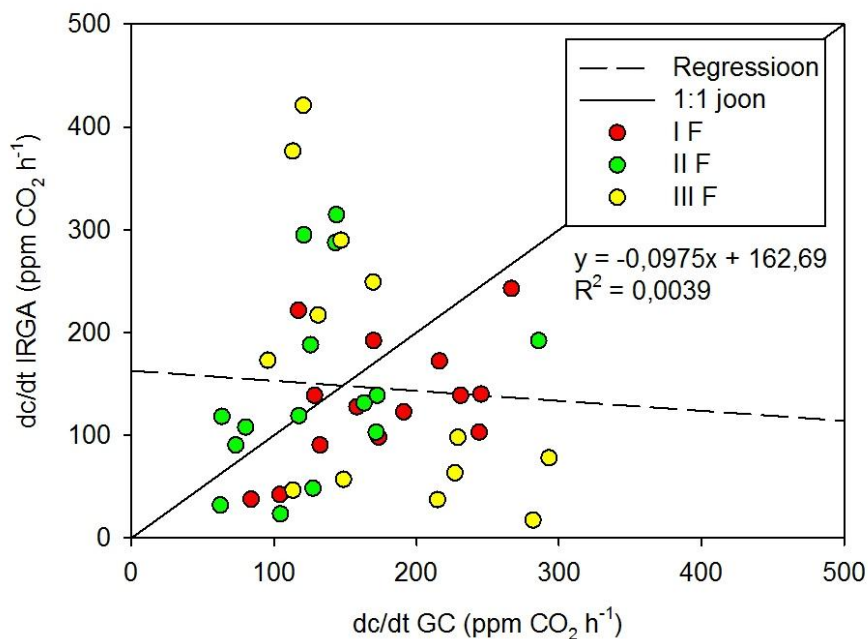
Autor osales välitöödel ning kasutas CO<sub>2</sub> voo mõõtmistel dünaamilist läbipaistvat kambrist. Lisaks võttis osa biomassiproovide kogumisest ning sellele järgnevate ettevalmistuste tegemisest, et selgitada välja maapealse ja maa-aluse biomassi produktsioon.

## 4. Tulemused ja arutelu

### 4.1 Staatilise ja dünaamilise kambriga mõõdetud CO<sub>2</sub> voogude võrdlus

Käesoleva töö staatilise ja dünaamilise kambriga mõõdetud CO<sub>2</sub> vooge võrreldi kahel viisil. Esiteks võrreldi freesturba kontrollalal dünaamilise läbipaistva (mõõtmisaeg 2-4 min) ja staatilise pimekambriga (mõõtmisaeg 1 h) meetodidega leitud voogusid. Kuna freesturba kontrollalal taimestikku ei esine, mõõdab nii läbipaistev kui pimekamber mulla CO<sub>2</sub> emissiooni. Teiseks võrreldi pimekambriga leitud vooge taimestatud ja freesturba ühel laamil, kasutades paralleelselt dünaamilist (mõõtmisaeg 20 min) ja staatilist meetodit (mõõtmisaeg 1 h).

Joonisel 4 on kujutatud dünaamilise läbipaistva kambriga ja staatilise pimekambriga mõõdetud CO<sub>2</sub>-C vood freesturba kontrollalal 2013. aasta mõõtmisperioodil kuude kaupa (juunist-oktoobrini).



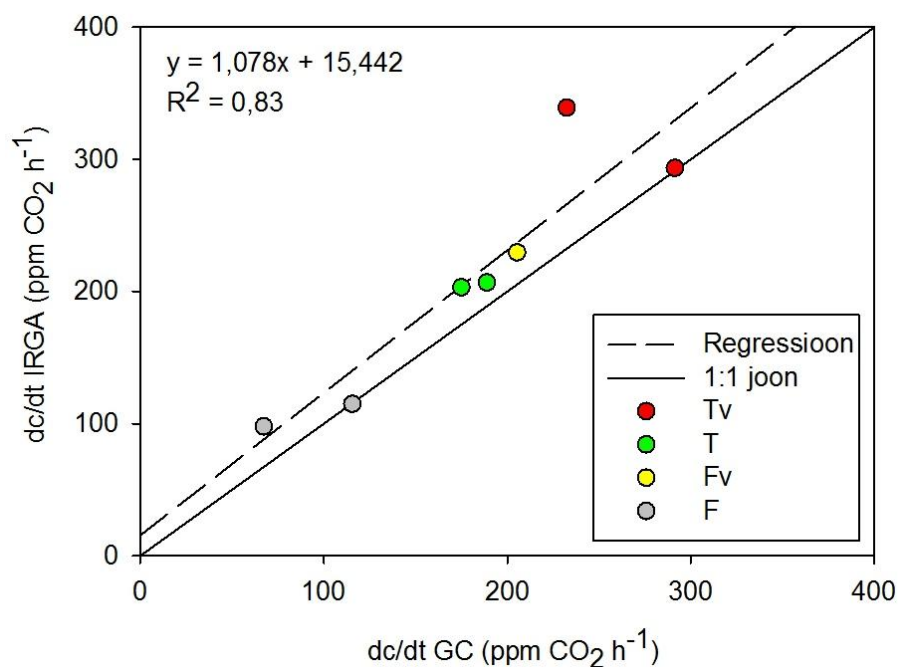
**Joonis 4.** Staatilise pimekambriga ( $dc/dt GC$ ) ja dünaamilise läbipaistva kambriga ( $dc/dt IRGA$ ) mõõdetud CO<sub>2</sub> kontsentratsioonitõusude võrdlus väetamata freesturbaalal kuude kaupa (juunist-oktoobrini 2013. a). (I F – esimene freesturba kontroll-lapp, II F – teine freesturba kontroll-lapp, III F – kolmas freesturba kontroll-lapp).

Joonisel 4 selgub, et dünaamilise läbipaistva kambri ja staatilise pimekambriga mõõdetud voogude vahel seost ei ole. Jälgides esimest ja teist freesturba kontroll-lappi on seosed natukene tugevamad kui kolmandal freesturba kontroll-lapil. Nõrgad seosed võivad tuleneda dünaamilise läbipaistva kambri jahutuse puudumisest ja lühikesest proovivõtuajast. Lisaks võis kahe proovi võtmise ajavahe olla väga suur ja tekitada kontsentratsioonitõusudes suure varieeruvuse, kuigi dünaamilise läbipaistva kambri proov võeti samast kohast, kust ka staatilise. Siit võib järeldada, et päeva jooksul on CO<sub>2</sub> emissiooni varieeruvus ulatuslik ning seoses sellega, et dünaamilise kambri mõõtmisaeg on lühike tuleks paremate tulemuste saamiseks dünaamilise kambriga päevas teha kaks mõõtmisringi.

Teised uurijad on võrrelnud staatilise kambri tulemuste erinevust dünaamilise kambri tulemustega, kasutades pimekambreid (Rochette *et al.*, 1992; Drösler, 2005; Heinemeyer & McNamara, 2011). Rochette *et al.* (1992) leidsid, et staatiline ja dünaamiline meetod leiavad erinevad CO<sub>2</sub> vood. Nende tööst selgus, et staatiline kambrimeetod näitab kõrgemaid tulemusi kui dünaamiline kambrimeetod.

Kambrimeetodite võrdluseks viidi juuli alguses läbi lisakatse, pimekambritega mõõdeti CO<sub>2</sub> voogu ühel päiderooga taimestatud laamil ja ühel freesturbalaamil. Portatiivse analüsaatoriga mõõdeti 20 minutit ning gaasiproovid gaaskromatograafiga analüüsimiseks võeti 60 minuti jooksul. Tulemused on toodud joonisel 5.

Joonisel 5 on näha, et staatilise pimekambriga emissioon kirjeldab 83% dünaamilise pimekambriga emissiooni hajuvusest. Seega, kui staatilise kambriga mõõdetud emissioon kasvas 1 ühiku (ppm CO<sub>2</sub> h<sup>-1</sup>) võrra, siis dünaamilise kambriga mõõdetud emissioon kasvas 1,1 ühiku (ppm CO<sub>2</sub> h<sup>-1</sup>) võrra. Regressioonijoon näitas, et dünaamiline meetod võrreldes staatilise meetodiga, hindas kontsentratsiooni üle.



**Joonis 5.** Pimekambritega mõõdetud staatilise- (dc/dt GC) ja dünaamilise meetodi (dc/dt IRGA) CO<sub>2</sub> kontsentratsioonitõusude vaheline lineaarne seos juulis läbiviidud katses (02.07.2013). (T – III taimestatud kontroll-lapp, Tv – III taimestatud väetatud lapp, F – I freesturba kontroll-lapp, Fv – I freesturba väetatud lapp).

Joonisel 5 kujutatud tulemused sarnanevad Heinemeyer & McNamara (2011) leitud tulemustega, kus dünaamilise meetodiga mõõdetud emissioonid olid kõrgemad kui staatilise meetodiga mõõdetud emissioonid. Nende katses oli erinevusi näha vaid siis, kui staatilise kambri proovivõtuaeg kestis 75 minutit ja dünaamilise kambri proovivõtuaeg 5 minutit. Kui CO<sub>2</sub> proov võeti staatilisest kambrist 10 minuti jooksul, olid tulemused erinevate kambrimeetoditega leitud voogude vahel sarnased (Heinemeyer & McNamara, 2011). Samalaadsed tulemused leidis ka Drösler (2005), kes võttis CO<sub>2</sub> proovid esimeste minutite jooksul pärast kambri paigutamist rõngale ning leidis, et erinevate meetoditega leitud voo väärtused olid väga sarnased.

Drösleri (2005) töös oli staatilise ja dünaamilise kambriga leitud tulemuste seos peaaegu 1:1, determinatsioonikordajaga ( $R^2$ ) 0,99. Ka meie tööst on näha, et mõnel mõõtmiskorral oli kahe meetodiga leitud kontsentratsiooni muutused kambri olnud samasugused, st paiknenud 1:1 joonel. Kuna antud töö katses ei lühendatud CO<sub>2</sub> proovivõtu aega, nagu on teinud teised uurijad

(Drösler, 2005; Heinemeyer & McNamara, 2011), vaid hoopis pikendati 60 minutini, siis meie kahe meetodiga saadud tulemuste erinevused võivad olla tingitud rõhukõikumisest kambris. Kuna seda parameetrit ei mõõdetud, et välja selgitada võimalikke vigu, siis tuleks seda tulevikus teha, et leida emissioonide kõikumise võimalikud põhjused (Lund *et al.*, 1999).

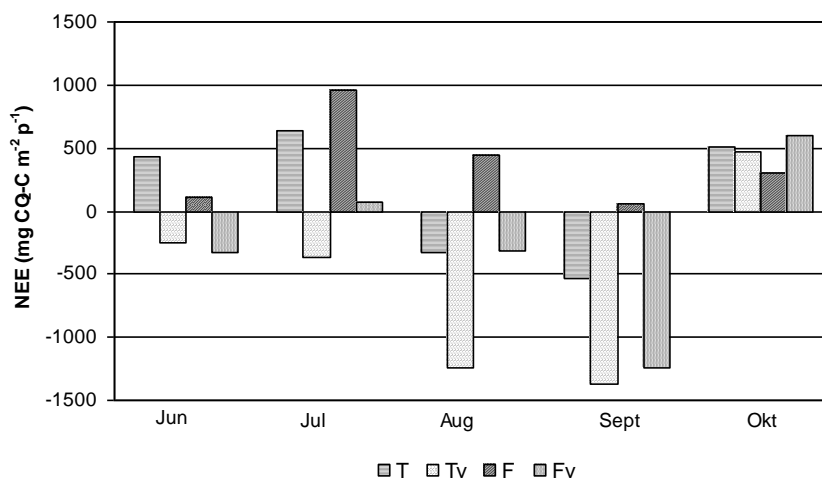
Erinevatest uurimustest selgub, et isegi siis, kui staatilise ja dünaamilise kambrimeetodiga mõõdetud vood ei olnud sarnased, on autorid (Rochette *et al.*, 1992; Heinemeyer & McNamara, 2011; Drösler, 2005) leidnud tugevad seosed. Näiteks Rochette *et al.* (1992) leidsid, et kui CO<sub>2</sub> voog on kõrge, siis erinevused erinevate meetoditega mõõdetud voogude vahel on suuremad. Antud töö katseaeg pimekambritega tuleks tulevikus pikendada, et leida usaldusväärsed seosed.

## **4.2 Süsinikubilanss Lavassaare jääkturbaalal**

### **4.2.1 Dünaamilise läbipaistva kambriga leitud C-bilanss**

Selleks, et leida erineva töötusega alade ja katselappide usaldusväärset erinevust, kasutati Kruskal-Wallis ANOVA testi. Test näitas, et usaldusväärset erinesid omavahel ainult freesturba kontrollala ja taimestatud väetatud ala süsihappegaasi vood. Teiste alade vahel statistiliselt usaldusväärset erinevust ei olnud. Testides katseala kõikide katselappide vooge, leiti, et usaldusväärset erinevad olid ainult 2. ja 3. taimestatud väetatud katselapid omavahel.

Jooniselt 6 on näha, et taimestatud kontrollala (edaspidi ala T) oli mõõtmisperioodi alguses (juuni ja juuli) positiivse süsinikubilanssiga ehk CO<sub>2</sub> allikas, emiteerides juunis 432 mg CO<sub>2</sub>-C m<sup>-2</sup> p<sup>-1</sup> ja juulis 634 mg CO<sub>2</sub>-C m<sup>-2</sup> p<sup>-1</sup>. Augustis ja septembris muutus ala CO<sub>2</sub> sidujaks, sidudes augustis -329 mg CO<sub>2</sub>-C m<sup>-2</sup> p<sup>-1</sup> ja septembris -527 mg CO<sub>2</sub>-C m<sup>-2</sup> p<sup>-1</sup>.



**Joonis 6.** Dünaamilise läbipaistva kambriga mõõdetud süsinikubilanss (NEE) kõikidel katsealadel (juuni-oktoober 2013. a.) päeva kohta. (T – taimestatud kontrollala, Tv –taimestatud väetatud ala, F – freesturba kontrollala, Fv – freesturba väetatud ala).

Ka Soomes (Shurpali *et al.*, 2010) päiderooga taimestatud aladel oli sidumine kõige kõrgem augustis ja septembris. Shurpali *et al.* (2010) tõi välja põhjuseks, et päideroog seob CO<sub>2</sub> rohkem niiskematel mõõtmisperioodidel, sest on niiskelembene taime. Ka antud töö kasvuperioodi niiskemad kuud olid august ja september (vt lisa 4 tabel 2).

Taimestatud väetatud alal (edaspidi ala Tv) on märgata samasugust suundumust, et taimepoolne sidumine oli suurim augustis ja septembris, vastavalt -1242 mg CO<sub>2</sub>-C m<sup>-2</sup> p<sup>-1</sup> ja -1365 mg CO<sub>2</sub>-C m<sup>-2</sup> p<sup>-1</sup>. See on selgitatav Shurpali *et al.* (2010) leitud seostega. Kui võrrelda alasid T ja Tv, siis on näha, et ka juunis ja juulis on ala Tv süsinikku vähesel määral sidunud, samal ajal ala T emiteeris. See on seotud sellega, et väetamine mõjutab taimede biomassi produktsiooni võimet (Xiong & Kätterer, 2010) ning sidumine on väetatud alal suurem.

Freesturba kontrollala (edaspidi ala F) oli turba mineraliseerumise ja taimepuudumise tõttu kogu mõõtmisperioodi jooksul CO<sub>2</sub> allikas ning kõige enam emiteeris CO<sub>2</sub> juulis (957 mg CO<sub>2</sub>-C m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>). Mineraliseerumine ning keemilised protsessid on seda kiiremad, mida kõrgem on mullatemperatuur (McKenzie *et al.*, 1998). Suure osa mullaorganismide taluvuspiiriks on 20-40 °C (Agroinfo, 2011). Mullatemperatuur oli juunis kõrgem kui juulis ning seega võiks juunikuus

oodata kõrgemaid CO<sub>2</sub> emissioone (vt lisa 4 tabel 1). Jooniselt 6 võib aga näha, et emissioonid on kõrgemad juulis. See võib olla seotud sellega, et mõõtmised teostati hommikul ning kuna ööd olid juunis jahedamad kui juulis, siis hommikuse jahedama mulla emissioon võis olla juunis väiksem kui juulis.

Väetatud freesturbaala (edaspidi ala Fv) käitus enamjaolt CO<sub>2</sub> salvestajana, näidates suuremat negatiivset süsinikubilanssi kui taimestatud kontrollala. Seda võib seostada autotroofse ja heterotroofse hingamisega. Heterotroofse hingamise kõrge näit on seotud maapealsete ja maa-aluste osade varise hulgaga, mis on taimestatud kontrollalal kõrgem, sest taimestik on seal kasvanud alates 2007. aastast. Aladel Fv kasvavad väikesed üheaastased taimed, mis tekkisid sinna 2013. a juuni väetamise järel. Sellest võib järeldada, et heterotroofne hingamine ei olnud Fv alal kõrge. C-bilanss aga väljendub selliselt seal kasvava taimestiku süsiniku sidumise tõttu (väljaarvatud juulis ja oktoobris) (vt joonis 6).

Küsimust tekitab septembris ala Fv suur sidumine, mis ulatus peaaegu samale tasemele kui alal Tv. Seoses sellega, et alale Fv võisid mulda tekkida soodsate tingimuste tõttu (soe ja niiske) vetikad, lisandus vetikate fotosüntees taimede fotosünteesile ja C-sidumine sai kõrgem. Koosmõjus freesturbaala septembrikuu madala emissiooniga, mis nähtub freesturba kontrollalal, ja lisandunud vetikate C-sidumisega võis ala Fv C-bilanss langeda sellisele tasemele, nagu on näha joonisel 6.

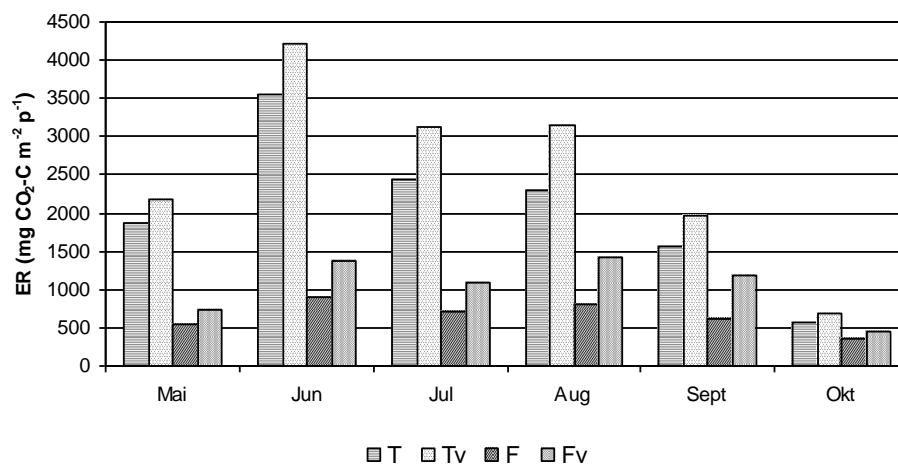
Kõikide alade kasvuperioodi süsinikubilanss on toodud tabelis 1, kus on võrdlusena näha ka antud töö kombineeritud staatilise ja taimse biomassi meetodiga leitud süsinikubilanss.

#### **4.2.2 Kombineeritud staatilise pimekambri ja taimse biomassi meetodiga leitud C-bilanss**

Kruskal-Wallis ANOVA testi järgi erinesid kõikidest uurimisaladest usaldusväärselt freesturba kontrollala ja freesturba väetatud ala süsihappegaasi vood. Taimestatud kontrollala ja taimestatud väetatud ala vahel usaldusväärset erinevust ei leitud. Lisaks on testis näha staatilise kambriga kõikidel aladel erinevatel katselapidel saadud tulemuste usaldusväärne erinevus. Usaldusväärsed

erinevused leiti 1. ja 3. taimestatud kontrollala katselappide voogude vahel. Kõikide taimestatud väetatud katselappide vood erinesid usaldusväärselt 3. ala väetatud katselapi CO<sub>2</sub> voogudest ning freesturba kontrollala ja väetatud ala katselapid 2. ala vastava töötusega katselapi voogudest.

Staatilise pimekambriga mõõdetud CO<sub>2</sub> emissioonid (mg CO<sub>2</sub>-C m<sup>-2</sup> p<sup>-1</sup>) erinevatel katsealadel on toodud joonisel 7. Siinkohal on kasutatud ka mai andmeid, kuna mais on võetud biomassi proovid ning valemis peab kajastuma selle kuu emissioon.



**Joonis 7.** Staatilise pimekambriga mõõdetud ökosüsteemi hinagmine (ER) erinevatel katsealadel päeva kohta (mai-oktoober 2013. a). (T – taimestatud kontrollala, Tv – taimestatud väetatud ala, F – freesturba kontrollala, Fv – freesturba väetatud ala).

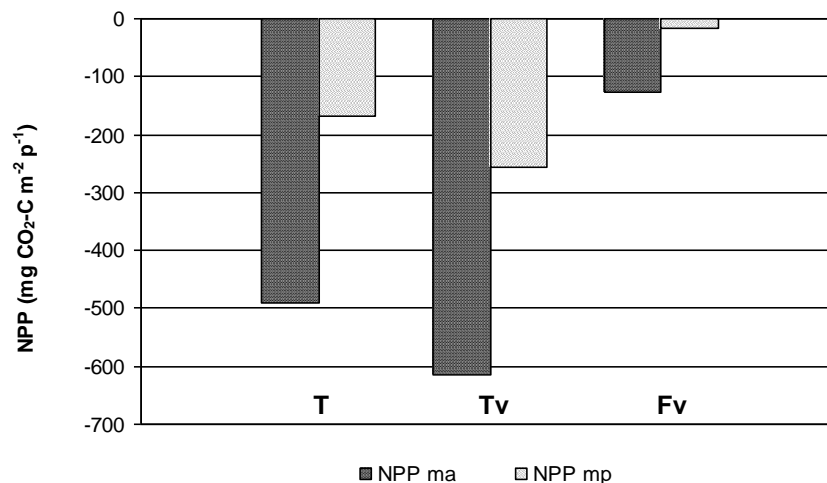
Kõige kõrgemad olid emissioonid päiderooga taimestatud aladel ja freesturba kontrollalal juunis. Taimestatud kontrollalal vastavalt 3555 mg CO<sub>2</sub>-C m<sup>-2</sup> p<sup>-1</sup> ja taimestatud väetatud alal 4214 mg C m<sup>-2</sup> p<sup>-1</sup> ning freesturba kontrollalal 902 mg CO<sub>2</sub>-C m<sup>-2</sup> p<sup>-1</sup>. Väetatud freesturbaalal oli kõrgeim emissioon augustis (1427 mg CO<sub>2</sub>-C m<sup>-2</sup> p<sup>-1</sup>). Kõik katsealad emiteerisid kõige vähem CO<sub>2</sub> oktoobris.

Leitud emissioonid on väga sarnased Shurpali *et al.* (2008) leitud emissioonidega nii väetatud päiderooga taimestatud kui ka freesturbaaladel. Väetatud, päiderooga taastatud alal leiti, et kõige kõrgem emissioon oli 4118 mg CO<sub>2</sub>-C m<sup>-2</sup> p<sup>-1</sup> ja freesturbaalal osutus kõige kõrgemaks

emissiooniks 1344 mg CO<sub>2</sub>-C m<sup>-2</sup> p<sup>-1</sup>. Shurpali *et al.* (2008) kasutasid ökosüsteemi hingamise (ER) mõõtmiseks dünaamilist pimekambrit.

Käesoleva töö staatilise kambriga mõõdetud taimestatud kontrollala emissioonidest on näha, et mais olid CO<sub>2</sub> emissioonid madalamad (1864,7 mg CO<sub>2</sub>-C m<sup>-2</sup> p<sup>-1</sup>), kuid juunis emissioon suurenes järsult (3555 mg CO<sub>2</sub>-C m<sup>-2</sup> p<sup>-1</sup>). See on seotud juunis tõusnud õhutemperatuuriga (vt lisa 4 tabel 2), kui turba soojenemisega kiirenesid mullas toimuvad protsessid ning emissioon muutus järsult suuremaks. Seejärel on emissioonid hakanud langema seoses mullatemperatuuri kahanemisega. See seos nähtub ka käesoleva töö jooniselt 13 (vt lk 40). Taimestatud väetatud ala emiteerib CO<sub>2</sub> kõikidest teistest aladest enim, sest taimne biomass on kõige suurem, seega autotroofse ning heterotroofse hingamise käigus tekib koguliselt suurem hulk CO<sub>2</sub>.

Freesturba kontrollala emissioon oli kõrgeim juunis ning väetatud freesturbaalal augustis. Freesturba väetatud ala emissioon võis augustis kõrgem olla, sest siis saavutasid alal kasvavad taimed maksimaalse juurdekasvu ning augustikuu niisked tingimused võisid soosida seda veelgi, emiteerides seetõttu CO<sub>2</sub> kõige rohkem. F ala juunikuu kõrge emissioon oli tingitud kõrgetest mullatemperatuuridest (vt lisa 4 tabel 1), mis kiirendasid mineraliseerumisprotsessi.



**Joonis 8.** Maa-aluse ja maapealse biomassi produktsioon (vastavalt NPP<sub>ma</sub> ja NPP<sub>mp</sub>) päeva kohta. (T – taimestatud kontrollala, Tv – taimestatud väetatud ala, Fv – väetatud freesturbaala).

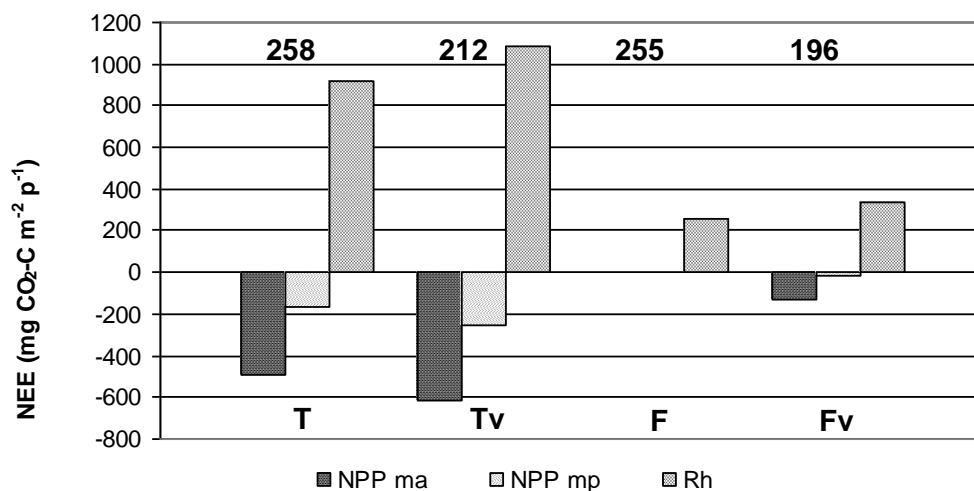
Joonisel 8 on näha biomassi proovidesse seotud C-hulk 2013. a maist oktoobrini kolmel alal. Freesturba kontrollalal sidumist ei toimunud, sest seal ei kasvanud taimed. Leitud andmete põhjal selgus, et päiderooga taimestatud väetatud alal (Tv) on nii maa-alune kui ka maapealne biomassi tootmine teiste aladega võrreldes suurim, sidudes vastavalt -614 ja -257 (mg CO<sub>2</sub>-C m<sup>-2</sup> p<sup>-1</sup>).

Käesoleva töö mõõtmisperioodil leiti, et kõige enam kasvas maa-alune biomassi. See võib olla seotud kuiva aastaga, mis sundis taimi hankima vett sügavamatest kihtidest ning selleks oli tarvis suuremat maa-alust biomassi. Ka Shurpali *et al.* (2008) päideroo biomassi proovidest selgus, et maa-alune biomassi oli suurem kui maapealne.

Ge *et al.* (2011), kes on põhjalikult uurinud päideroo kasvu mõju erinevatele kliimatingimustele leidsid, et nii maa-aluse kui maapealse biomassi juurdekasv on madala veetaseme korral väiksem kui kõrgema veetaseme korral, kuna sellistes tingimustes on taimede C akumuleerimisvõime takistatud. Lisaks on optimaalseks temperatuurivahemikuks taimse biomassi primaarproduksioonile 20-25 °C, seda temperatuuri ületades hakkab biomassi kasv aeglustuma (Shurpali *et al.*, 2009).

Kõige vähem süsinikku sidus biomassi proovide tulemuste järgi väetatud freesturbaala (Fv) biomassi, nii maa-alune kui maapealne vastavalt 127 ja 16 mg CO<sub>2</sub>-C m<sup>-2</sup> p<sup>-1</sup>. Taimed katsid ala Fv hõredalt ja seetõttu oli selle ala C-sidumine väiksem.

Joonisel 9 on välja toodud kõik näitajad, mis olid kasutusel süsinikubilansi leidmisel kombineeritud staatilise pimekambri ja taimse biomassi meetodi juures. Lisaks on graafikule märgitud ka nimetatud meetodi abil leitud süsinikubilanss.



**Joonis 9.** Maa-aluse ja maapealse biomassi produktsioon (vastavalt NPPma ja NPPmp) ja arvutuslikult leitud heterotroofne hingamine ja C-bilanss kõikidel katsealadel mõõtmisperioodil mai-juuni 2013. a. (T – taimestatud kontrollala, Tv – taimestatud väetatud ala, F – freesturba kontrollala, Fv – väetatud freesturbaala).

Joonisel 9 on näha, et emissioon ületas taimedepoolse CO<sub>2</sub> sidumise ning selle meetodiga leitud tulemuste järgi käituvad Lavassaare jääkturbaala kõik katsealad kasvuperioodil kui süsihappegaasi allikad. Kõige suuremaks allikaks osutus nende tulemuste järgi ala T ja väikseimaks ala Fv.

Süsinikubilansi tulemused on kujunenud selliseks, kuna staatilise pimekambri mõõtmised keetsid vaid kasvuperioodil, kui autotroofne ja heterotroofne hingamine on kõige kõrgemad. Tulemusi keskmistades ja teisendades leitakse palju kõrgemad emissioonid kui aastase mõõtmisperioodi korral, kuna pole arvestatud külmaperioodi madalamate emissioonidega. Lisaks on näha, et madal veetase (vt lisa 4 tabel 3) mõjutas taimede kasvu ning biomassi C-sidumine oli madal, mis viis kõrgema C-bilansini.

### 4.2.3 Kahe meetodiga leitud C-bilansi võrdlus

Taimestatud alade süsinikubilanss saadakse, kui heterotroofse hingamise emissioonist lahutatakse keskmise maapealse ja maa-aluse biomassi NPP. Tabelis 1 on toodud kombineeritud meetodi abil leitud süsinikubilanss mõõtmisperioodil mai-oktoober ja dünaamilise läbipaistva meetodiga leitud süsinikubilanss juuni-oktoober 2013. aastal.

**Tabel 1.** Kombineeritud staatilise pimekambriga ning maapealse ja maa-aluse biomassi NPP tulemustest arvatud süsinikubilanss kasvuperioodil mai-oktoober ja dünaamilise läbipaistva kambriga leitud süsinikubilanss kasvuperioodil juuni-oktoober kõikidel aladel kokku. (T – taimestatud kontrollala, Tv – taimestatud väetatud ala, F – freesturba kontrollala, Fv – freesturba väetatud ala). Tabelis toodud andmed on teisendatud ühikuteks CO<sub>2</sub>-C mg m<sup>-2</sup> p<sup>-1</sup>.

	T	Tv	F	Fv
Dünaamilise kambriga meetod	120	-552	432	-192
Kombineeritud meetod	258	212	255	196

Tabelist 1 selgub, et kahe meetodiga leitud C-bilansside erinevus on suur. Päiderooga taastatud turbaaladel läbi viidud CO<sub>2</sub> mõõtmistest on leitud, et sõltuvalt meetodist, aastast ja asukohast võivad alad käituda nii süsiniku allika (Kandel *et al.*, 2013) kui ka sidujana (Shurpali *et al.*, 2010; Mander *et al.*, 2012;).

Kandel *et al.* (2013) töös läbipaistva kambriga leitud C-bilansi (69 g CO<sub>2</sub>-C m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>) andmeid kontrolliti pimekambriga mõõdetud emissioonide ja arvatud biomassi primaarproduktiooni andmetega. Selgus, et arvatud NEE voog võis ulatuda 307 g CO<sub>2</sub>-C m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>. Seega on ka nende tulemustes vahel suur erinevus, nagu on näha käesoleva töö C-bilansi võrdluse tulemustes (vt tabel 1).

Sarnaste tulemusteni jõudsid ka Elsgaard *et al.* (2012), kes jälgisid NEE erinevust arvatud NEE ja mõõdetud NEE vahel ning leidsid, et arvatud NEE näitas suuremaid CO<sub>2</sub> voogusid kui läbipaistva kambriga mõõdetud NEE. Tehtud testidest järeldati, et arvatud (NEE = ER – GPP) NEE hindab tulemused natuke üle.

Freesturba kontrollala staatilise pimekambriga leitud süsinikubilanss on madalam kui dünaamilise läbipaistva kambriga leitud süsinikubilanss. See läheb kokku joonisel 5 kujutatud katsega. Kui aga võtta vaatluse alla taimestatud kontrollala, siis näeme vastupidist ning sellisel juhul on meie tulemused võrreldavad Taanis (vt Elsgaard *et al.*, 2012) tehtud C-bilansi erinevustega meetodist sõltuvalt.

Kõige ulatuslikumad on erinevused väetatud aladel. Taimestatud väetatud alal on dünaamilise läbipaistva kambri meetodiga leitud süsinikubilanss  $-552 \text{ mg CO}_2\text{-C m}^{-2} \text{ p}^{-1}$  ja kombineeritud staatilise ja biomassi produktsiooni meetodiga vastavalt  $212 \text{ mg CO}_2\text{-C m}^{-2} \text{ p}^{-1}$ . Väetatud freesturbaalal on dünaamilise kambrimeetodiga ja kombineeritud meetodiga leitud süsinikubilanss vastavalt  $-192$  ja  $196 \text{ mg CO}_2\text{-C m}^{-2} \text{ p}^{-1}$ .

Autorile teadaolevalt ei ole sarnaseid tulemusi enne päiderooga taastatud aladelt saadud. Soomes (Shurpali *et al.*, 2009) kasutati küll teistsugust tehnoloogiat päiderooga taastatud turbaalade NEE mõõtmiseks, kuid väetatud alal leiti, et maksimaalne aastane emissioon oli  $-18\,645 \text{ mg CO}_2\text{-C m}^{-2} \text{ p}^{-1}$ . Eestis (Mander *et al.*, 2012) on leitud taimestatud väetatud ala kõrge sidumine vastavalt  $-910 \text{ mg CO}_2\text{-C m}^{-2} \text{ p}^{-1}$  kasutades kombineeritud staatilise pimekambriga ja biomassi meetodit. Chojnicki *et al.* (2010) tegid Poolas NEE mõõtmised dünaamilise läbipaistva kambriga teistsuguse taimestusega aladel ning kasvuperioodi kohta kõikides NEE  $2295 \text{ mg CO}_2\text{-C m}^{-2} \text{ p}^{-1}$  ja  $-8600 \text{ mg CO}_2\text{-C m}^{-2} \text{ p}^{-1}$  vahel. Käesolevas töös leitud NEE ei ulatunud nii kõrgele tasemele, kui on leitud teiste uurijate poolt.

Kanadas (Flanagan *et al.*, 2002) EC meetodiga rohumaal NEE mõõtmistes varieerus keskmine C-bilanss olenevalt niiskustingimustest laias sakaalas. Näiteks niiskel aastal oli NEE  $-14\,502 \text{ mg CO}_2\text{-C m}^{-2} \text{ p}^{-1}$  ja kuival aastal kõigest  $-5179 \text{ mg CO}_2\text{-C m}^{-2} \text{ p}^{-1}$  mõõdeti samal alal, sama meetodiga.

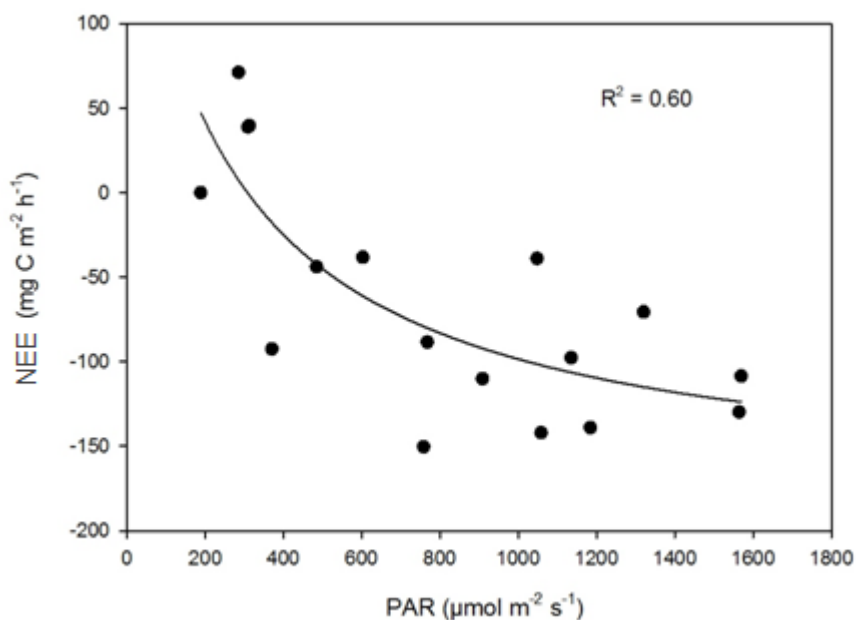
Tulemused varieeruvad väga laias ulatuses olenevalt kliimatingimustest, asukohast, meetodikast ja taimestikust ning seetõttu on äärmiselt raske leida teiste uurijatega sarnaseid tulemusi. Kasutades erinevat meetodikat (nt Kandel *et al.*, 2013), võivad tulemused kõikuda laias ulatuses vaatamata sellele et mõõtmised tehti samas kohas. Ka sama meetodit kasutades, kuid olenevalt aastast võib kõikumine olla ulatuslik (nt Flanagan *et al.*, 2002; Shurpali *et al.*, 2010). Siit

järeldub, et Eesti-siseselt on uurimuste läbiviimisega vaja jätkata, et dünaamilise ja staatilise kambri tulemusi võrrelda ja leida optimaalne meetod C-bilansi hindamiseks. Autori arvamuse kohaselt on soovitatav läbipaistvat kambrit jahutada ning staatilise kambri mõõtmisaega lühendada.

## 4.3 Mõõtmistulemuste seosed keskkonnaparaameetritega

### 4.3.1 Dünaamilise läbipaistva kambri meetodiga leitud CO<sub>2</sub> voogude seosed

Dünaamilise läbipaistva kambri leitud CO<sub>2</sub> voogude vahel otsiti seoseid fotosünteetiliselt aktiivse kiirguse ja kambri temperatuuriga, sest need on ühed olulisemad NEE-d mõjutavad paraameetrid, millega on seoseid leidnud ka paljud teised uurijad ( vt Bubier *et al.*, 2003; Burrows *et al.*, 2005; Drösler, 2005; Chojnicki *et al.*, 2010).

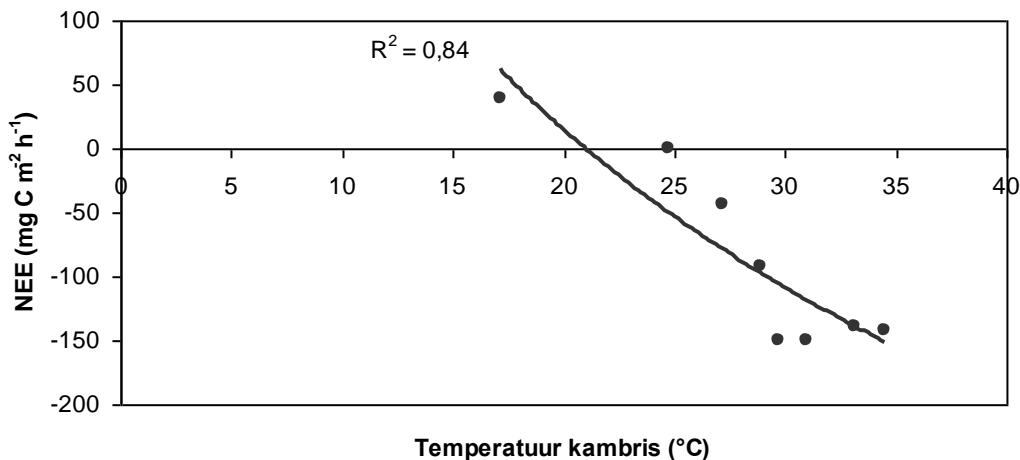


**Joonis 10.** Dünaamilise läbipaistva kambri mõõdetud NEE ja fotosünteetiliselt aktiivse kiirguse (PAR, μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>) vaheline hüperboolne seos III taimestatud väetatud katselapil perioodil juuni-oktoober 2013. a.

Joonisel 10 on toodud päiderooga taimestatud 3nda katseala väetatud katselapi NEE ( $\text{mg CO}_2\text{-C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ) voo ja fotosünteetiliselt aktiivse kiirgusega (PAR,  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) leitud seosed. Korrelatsiooni analüüsiks valiti ainult 3. taimestatud ala väetatud katselapp, kuna seal oli kõige suurem taimede kasv, seetõttu ka seosed paremini nähtavad. Teistel uuritavatel aladel ei olnud  $\text{CO}_2$  voo ja PAR-i seos tugev.

Jooniselt 10 on näha, et NEE ja PAR-i vahelist sõltuvust kirjeldab hüperboolne seos. Determinatsioonikordaja ( $R^2$ ) näitab, mitu protsenti võimaldab mõõdetud PAR kirjeldada ala  $\text{CO}_2$  emissiooni hajuvusest. Siin kirjeldas 3. taimestatud alal mõõdetud PAR süsihappegaasi voogu 60% ulatuses. Jooniselt on näha, et PAR-i suurenedes olid taimed võimelised siduma rohkem süsinikku.

Uurijad on leidnud, et taimede valguskiirguse kasutamise efektiivsus on kasvuperioodi alguses madalaim. Seejärel kasvuperioodi keskel järsult kasvades stabiliseerub see kasvuperioodi lõpus (Drösler, 2005; Bubier *et al.*, 2003; Burrows *et al.*, 2005, Chojnicki *et al.*, 2010).



**Joonis 11.** Dünaamilise kambri õhutemperatuuri ja süsinikubilansi vaheline eksponentsiaalne seos kolmandal taimestatud väetatud katselapil mõõtmisperioodil juuni-oktoober 2013. a.

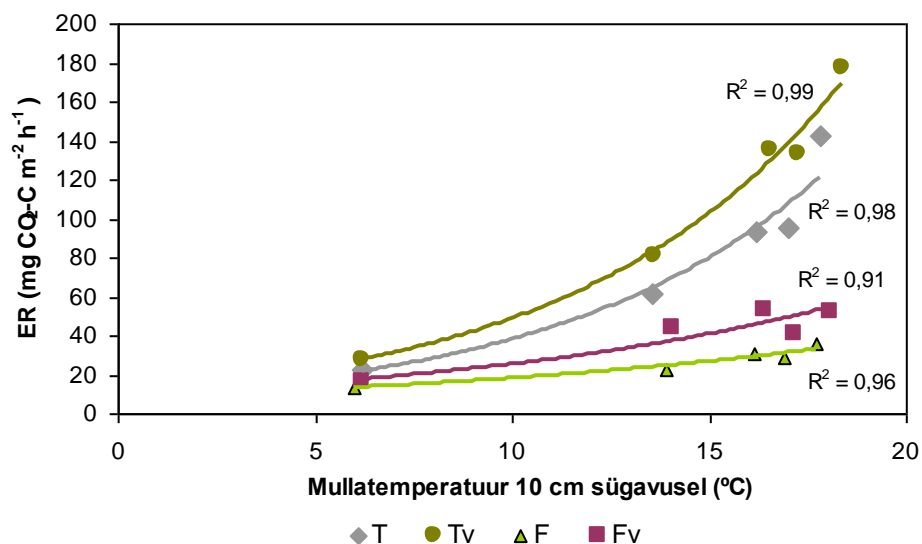
Joonisel 11 on näha, et temperatuur mõjutab  $\text{CO}_2$  sidumise võimet. Kambriõhu suure temperatuuritõusu tõttu võib tekkida oht, et õhk kambris paisub ning muudab kambri ja

atmosfääri rõhuerinevuse suureks, blokeerides sellega emissiooni (Kutsch *et al.*, 2010). Seega võis dünaamilise kambri jahutuse puudumise tõttu mullahingamine olla tihti peale alahinnatud ja sellega kaasnes C-bilansi ülehindamine ehk suurem sidumine. Lisas 5 toodud pildil on näha uue disainiga kambrit, mida hakatakse tulevikus kasutama, et võimalikke vigu edaspidi vältida.

### 4.3.2 Staatilise pimekambriga meetodiga leitud tulemuste seosed

Staatilise kambimeetodiga mõõdetud emissioonidega peeti oluliseks leida seosed mullatemperatuuri ja mullaniiskusega, sest need on põhilised parameetrid, mis ökosüsteemi hingamist (ER) mõjutavad (Flanagan *et al.*, 2002).

Joonisel 12 on kujutatud 10 cm sügavusel mõõdetud mullatemperatuuride (°C) ja süsihappegaasi emissiooni ( $\text{mg CO}_2\text{-C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ) vahelised seosed kõigil neljal uurimisalal mõõtmisperioodi jooksul (juuni-oktoober 2013. a). Determinatsioonikordaja ( $R^2$ ) näitab, mitu protsenti võimaldab 10 cm sügavusel mõõdetud mullatemperatuur kirjeldada ala  $\text{CO}_2$  emissiooni hajuvusest.

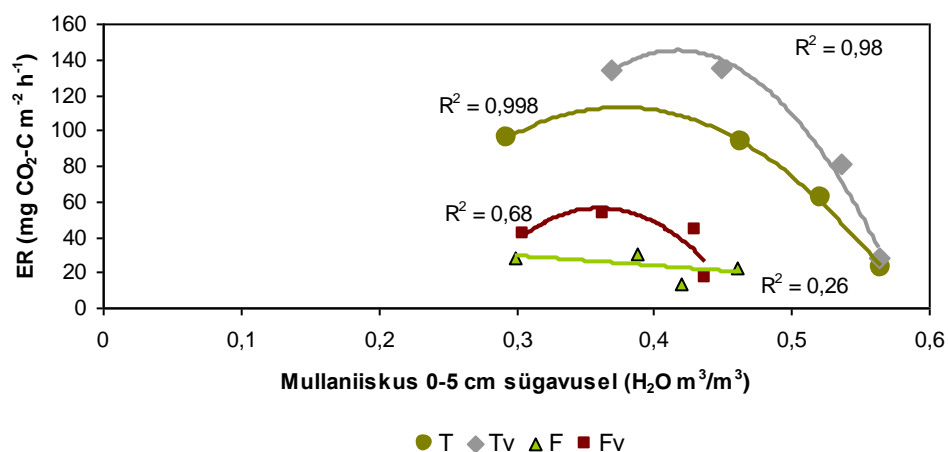


**Joonis 13.** Mullatemperatuuri ja staatilise pimekambriga mõõdetud  $\text{CO}_2$  emissiooni seos 10 cm sügavusel kõigil neljal alal uurimisperioodil (juuni-oktoober 2013. a). (T – taimestatud kontrollala, Tv – taimestatud väetatud ala, F – freesturba kontrollala, Fv – freesturba väetatud ala).

Joonisel 12 on näha, et mullatemperatuuri kasvades kasvab ka CO<sub>2</sub> emissioon ehk seos oli positiivne. Väetatud freesturbaalal on 10 cm sügavusel mõõdetud mullatemperatuuri ja CO<sub>2</sub> emissiooni vahelise seose determinatsioonikordaja neljast alast väikseim ( $R^2 = 0,91$ ). See näitab, et 91% CO<sub>2</sub> emissiooni hajuvusest väetatud freesturbaalal on kirjeldatav 10 cm sügavusel mõõdetud mullatemperatuuriga. Suurim determinatsioonikordaja ( $R^2 = 0,99$ ) mullatemperatuuri ja CO<sub>2</sub> emissiooni vahel on taimestatud väetatud alal.

Sarnase eksponentsiaalse seose leidsid ka teised uurijad (Drösler, 2005; Elsgaard *et al.*, 2012), tugevaim seos oli pealmistes mullakihtides (5-10 cm). See tuleneb sellest, et pealmistes kihtides on maa-alust biomassi kõige enam, nii on temperatuuri mõju emissioonile kõige suurem just neis kihtides (Elsgaard *et al.*, 2012).

Joonisel 14 on kujutatud ökosüsteemi hingamise ja 0-5 cm sügavusel mõõdetud mullaniiskuse seosed juulist oktoobrini 2013. a. Juunikuu tulemused jäeti antud analüüsist välja, kuna alates juulikuust rakendati nõuetekohast mõõtmismeetodit (st mullaniiskuse sensor sisestati turbasse horisontaalselt).



**Joonis 14.** Staatilise pimekambriga mõõdetud ökosüsteemi hingamise (ER) seos 0-5 cm sügavusel mõõdetud mullaniiskusega kõigil neljal alal uurimisperioodil juuli-oktoober 2013. a. (T – taimestatud kontrollala, Tv – taimestatud väetatud ala, F – freesturba kontrollala, Fv – freesturba väetatud ala).

Joonisel 14 on näha, et mullaniiskus mõjutas kõige rohkem päiderooga taimestatud alasid ja vähem freesturba alasid. Bubier *et al.* (2003) selgitavad, et pinnavee taseme langusel (k.a mullaniiskuse vähenemisel) on turvas aereeritum, mis tähendab, et mikroobidel ja juurtel on ligipääs hapnikule suurem. Seega on hingamine aktiivsem (st CO<sub>2</sub> produktisoon suurem). Ka joonisel 14 on kujutatud, et mullaniiskuse kasvades on aereerituse vähenemise tõttu emissioon kahanenud, sest mikroobide ja juurte ligipääs hapnikule oli takistatud. Freesturba alade nõrgem seos on tingitud juurestiku puudumisest (ala F) või vähesusest (ala Fv).

## Kokkuvõte

Turbaalad katavad vaid väikese osa maakera pindalast, kuid mängivad suurt rolli ökosüsteemide biosfääri ja atmosfääri vahelises CO<sub>2</sub> vahetuses. Selleks, et mõista, kui suur mõju on turbaaladel atmosfääri CO<sub>2</sub> kontsentratsiooni muutustele, on kasutusel mitmeid tehnoloogiaid. Populaarsemad neist on kambrimeetod, turbulentse õhuvoo meetod ja kontsentratsiooni gradiendi meetod, millest kaks esimest on kasutusel ka Eestis.

Kambrimeetod arendati biosfääri ja atmosfääri vahelise gaasivahetuse mõõtmiseks esimesena ning selle pikaajalise rakendamise käigus on selgunud mitmed meetodilised puudused. Tänapäeval rakendavad uurijad varasemaga võrreldes märgatavalt arenenumaid kambrimeetodi tehnoloogiaid, selgitamaks erinevas staadiumis turbaalade käitumist CO<sub>2</sub> allikana või sidujana.

Enamasti on kasutusel suletud dünaamiline ja staatiline kambrimeetod. Kambrimeetodeid kasutades tuleb vigade vältimiseks tähelepanu pöörata mitmetele erinevatele aspektidele. Näiteks staatilise pimekambri pikk proovivõtuaeg võib tekitada vertikaalse CO<sub>2</sub> kontsentratsiooni gradiendi, seetõttu soovitatakse kasutada dünaamilist kambrit, kus proovivõtuaeg on lühem. Lisaks võib kambrimeetodi kasutamisel probleemiks osutuda ka vertikaalse rõhugradiendi tekkimine, mille avastamiseks on soovitatav mõõta kambri rõhku. Muuhulgas tuleb alati kontrolli all hoida võimalikke õhuniiskuse ja temperatuuri kõikumisi kambri ning mulda paigaldada rõngas, et proovivõtuajal kamber stabiilselt pinnal püsiks.

Käesolevas magistritöös kasutati CO<sub>2</sub> voogude mõõtmiseks staatilise pimekambri ja läbipaistva dünaamilise kambri meetodit Lavassaares lõpuni ammendamata turbaaladel. Süsinikdioksiidi voogu võrreldi 4 erineval katsealal: päiderooga (*Phalaris arundinacea* L.) taimestatud kontrollalal (ala T), päiderooga taimestatud väetatud alal (ala Tv), freesturba kontrollalal (ala F) ja freesturba väetatud alal (ala Fv).

Staatilise ja dünaamilise pimekambri võrdlusest selgus, et dünaamiline kamber hindab emissiooni üle. Ka teistes uuringutes on sarnast suundumust leitud. Samalaadsetes võrdlustes on proovivõtuajaga lühendades leitud erinevate kambrimeetoditega mõõdetud voogude vahel suurt sarnasust, kuna lühem proovivõtuaeg vähendab rõhukõikumisega seotud vigu CO<sub>2</sub> voos.

Kahe erineva meetodiga leitud C-bilansid varieerusid laias ulatuses. Kõige suuremad erinevused leiti alade Tv ja Fv vahel. Taimestatud väetatud ala dünaamilise läbipaistva kambri meetodiga leitud C-bilanss oli  $-552 \text{ mg CO}_2\text{-C m}^{-2} \text{ p}^{-1}$  ja kombineeritud staatilise pimekambri ja taimse biomassi meetodiga vastavalt  $212 \text{ mg CO}_2\text{-C m}^{-2} \text{ p}^{-1}$ . Väetatud freesturbaalal olid nimetatud meetoditega saadud tulemused aga vastavalt  $-192$  ja  $196 \text{ mg CO}_2\text{-C m}^{-2} \text{ p}^{-1}$ . Ka teiste uurijate järgi on C-bilansi varieeruvus mõõdetud ja arvutatud meetodite vahel suur.

Käesolevas töös leiti, et dünaamilise läbipaistva kambri saadud süsinikubilanss oli tugevalt mõjutatud kambri õhutemperatuuri ( $R^2 = 0,83$ ) ja fotosünteetiliselt aktiivse kiirguse ( $R^2 = 0,60$ ) poolt. Staatilise pimekambriga leitud ökosüsteemi hingamine oli tugevalt seotud mullatemperatuuri ja mullaniiskusega.

Tulemuste põhjal võib järeldada, et:

- Dünaamilise kambrimeetodiga mõõdetud kontsentratsioonid olid kõrgemad kui staatilise kambri saadud kontsentratsioonid, seega tuleks staatilise kambri proovivõtuaega lühendada.
- Lavassaare jääkturbaala käitus mõõtmisperiodil kombineeritud staatilise pimekambri ja taimse biomassi meetodit kasutades  $\text{CO}_2$  allikana ning dünaamilist läbipaistvat kambrist kasutades mõnel juhul ka  $\text{CO}_2$  sidujana.

Soovituslik on dünaamilise kambrimeetodi lühikese proovivõtuaja tõttu parema  $\text{CO}_2$  voo hinnangu saamiseks teha päeva jooksul kaks mõõtmisringi. Parendatud dünaamilist läbipaistvat kambrist kasutades tuleb lisaks mõõta ka dünaamilise pimekambriga ja staatilise pimekambriga, et leida parim võimalik meetod  $\text{CO}_2$  voogude määramiseks ning hinnata turbaalade  $\text{CO}_2$  vooge Eestis.

## Summary

### Using two different methods to assess the C balance in Lavassaare degraded peatland site

Covering only 3% of the Earth's land area, peatlands have provided a small but consistent sink for atmospheric carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) for thousands of years. Therefore, peatlands can be regarded as one of the most important carbon reservoirs, however, due to human impact many of these ecosystems have now become a source of CO<sub>2</sub>. To understand the effects of peatlands on climate change, different methods have been developed to measure the CO<sub>2</sub> exchange between biosphere and atmosphere. The most common measuring techniques are the chamber method and eddy covariance method which are also used in Estonia.

The main objectives of the study were to:

- obtain an overview of closed dynamic and closed static chamber methods CO<sub>2</sub> flux measurements,
- construct a carbon balance for Lavassaare degraded peatland site while using CO<sub>2</sub> fluxes found with two different methods.

Static and dynamic chamber methods are one of the most practical measurement tools for peatland ecosystem CO<sub>2</sub> exchange studies. In order to avoid possible artifacts linked with the use of chambers it is, however, important to consider several different aspects. For example the long measuring time in case of the static chamber method can influence the vertical CO<sub>2</sub> concentration gradient; thus it is recommended to use dynamic chambers where the measurement cycle is shorter. In addition, with the application of chamber methods the vertical pressure gradient needs to be taken into consideration and therefore several studies have suggested measuring pressure inside the chamber. Among other things it is also important to control temperature and moisture fluctuation in the chamber and insert a collar in the soil for stabilizing the chamber while measurement.

The study sites have been chosen within the largest Estonian peat extraction area, Lavassaare. There were 4 different treatments: reed canary grass control plots (RCG C), reed canary grass

fertilized plots (RGC F), bear peat control plots (BP C) and fertilized bear peat plots (BP F). We used static opaque and dynamic transparent chambers to assess if these 2 different methods result in similar CO<sub>2</sub> flux and C balance estimates (NEE, net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange). The fluxes of CO<sub>2</sub> were measured on a biweekly basis.

The experimental results of the present study showed that in comparison to the static chamber technique, the dynamic method gave higher values of concentration and therefore overestimated the flux. There are other studies that have found similar results. Additionally, experiments with shortened measuring times for the static chamber technique have shown very similar flux rate estimates for the two different methods, due to smaller probability of pressure artifacts occurring within the chamber.

The carbon balance estimates obtained with the two different methods varied greatly. The biggest differences were found on RCG F and BP F plots. On the RCG plots, the results with the dynamic transparent chamber showed -552 mg CO<sub>2</sub>-C m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> and the results of the combined method 212 mg CO<sub>2</sub>-C m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>. The respective C balance results on the BP F plots were -192 mg CO<sub>2</sub>-C m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> with the dynamic transparent chamber and 196 mg CO<sub>2</sub>-C m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> with the combined method. Other studies have revealed a similar trend where measured and calculated methods showed differences in results.

In the present study it was found that dynamic transparent chamber measured C balance was strongly correlated with air temperature inside the chamber ( $R^2 = 0,83$ ) and with photosynthetically active radiation ( $R^2 = 0,60$ ). The ecosystem respiration found with the static chamber method, however, correlated strongly with soil temperature and soil moisture.

Based on the result of this study it can be concluded that:

- With higher concentration rise in dynamic chamber compared to static chamber it is deduced to shorten the measurement time of static chamber.
- Peatland of Lavassaare acted during the measurement period with combined static opaque chamber and plant biomass method as CO<sub>2</sub> source and dynamic transparent chamber method showed peatland in some cases as CO<sub>2</sub> accumulator.

In conclusion, the short measuring times in closed dynamic chambers could allow to obtain a better estimation of fluxes if several measurement cycles would be done within one sampling session. Further studies should be made while using developed dynamic transparent chambers and parallelly utilizing dynamic and static opaque chambers to find the best suitable method to determine the CO<sub>2</sub> flux from Estonian peatlands.

## Tänuavaldused

Autor avaldab suurt tänu oma juhendajatele Martin Maddison ja Järvi Järveojale oskusliku juhendamise ja õpetamise eest. Lisaks soovin tänada Tartu Ülikooli akadeemilise väljandusoskuse keskust (AVOK), kes aitasid kaasa käesoleva magistritöö valmimisele.

Käesoleva magistritööga seotud kulutused on kaetud järgmistest finantsallikatest: EL Keskkonnakaitse ja -tehnoloogia teadus- ja arendustegevuse programmi KESTA projekt "Eesti Keskkonnaobservatooriumi biosfääri ja atmosfääri alane teadus- ja arendustegevus (BioAtmos)" (3.2.0802.11-0043), (SLOOM12022T), „Globaalne soojenemine ja maastike aineringe. Maastike struktuuri ja funktsioonide muutused seoses globaalse kliima soojenemise ja inimtegevusega ning aineringe modelleerimine ja ökotehnoloogiline reguleerimine“ (IUT2-16 ja „Keskkonnamuutustele kohanemise tippkeskus“ (F11100PKTF).

## Kasutatud kirjandus

- Alm, J., Talanov, A., Saarnio, S., Silvola, J., Ikkonen, E., Aaltonen, H., Nykänen, H., Martikainen, P.J., 1997. Reconstruction of the carbon balance for microsites in a boreal oligotrophic pine fen, Finland. *Oecologia*, 110: 423–431.
- Badorek, T., Tuittila, E.-S., Ojanen, P., Minkkinen, K., 2011. Forest floor photosynthesis and respiration in a drained peatland forest in southern Finland. *Plant Ecology & Diversity*, 4: 2-3, 227-241.
- Bain, W.G., Hutyra, L., Patterson, D.C., Bright, A.V., Daube, B.C., Munger, J.W., Wofsy, S.C., 2005. Wind-induced error in the measurement of soil respiration using closed dynamic chambers. *Agricultural and Forest Meteorology*, 131: 225–232.
- Baldocchi, D.D., Hincks, B.B., Meyers, T.P., 1988. Measuring Biosphere-Atmosphere Exchanges of Biologically Related Gases with Micrometeorological Methods. Ecological Society of America. *Ecology*, 69 (5): 1331-1340.
- Bubier, J., Crill, P., Mosedale, A., Frohling, S., Linder, E., 2003. Peatland responses to varying interannual moisture conditions as measured by automatic CO<sub>2</sub> chambers. *Global Biogeochemical cycles*, 17 (2): 1066.
- Buchmann, N., 2002. Plant ecophysiology and forest response to global change. *Tree Physiology*, 22: 1177–1184.
- Burba, G & Anderson, D., 2010. A Brief Practical Guide to Eddy Covariance Flux Measurements. Overview of EC principles. *LI-COR Biosciences*.
- Burrows, E., Bubier J.L., Mosedale, A., Cobb, G.W., Crill, P.M., 2005. Net ecosystem exchange of carbon dioxide in a temperate poor fen: a comparison of automated and manual chamber techniques. *Biogeochemistry*, 76: 21–45.
- Chojnicki, B.H., Michalak, M., Acosta, M., Juszczak, R., Augustin, J., Drösler, M., Olejnik, J., 2010. Measurements of Carbon Dioxide Fluxes by Chamber Method at the Rzecin Wetland Ecosystem, Poland. *Polish Journal of Environmental Studies*, 19 (2): 283-291.
- Conen, F. & Smith, K.A., 2000. An explanation of linear increases in gas concentration under closed chamber used to measure gas exchange between soil and atmosphere. *European Journal of Science*, 51: 111-117.
- Davidson, E.A., Savage, K., Verchot, L.V., Navarro, R., 2002. Minimizing artifacts and biases in chamber-based measurements of soil respiration. *Agricultural and Forest Meteorology* 113: 21–37.
- Denmead, O.T., 2008. Approaches to measuring fluxes of methane and nitrous oxide between landscapes and the atmosphere. *Plant Soil*, 309: 5–24.

Drösler, M., 2005. Trace gas exchange and climatic relevance of bog ecosystem, Southern Germany. PhD Dissertation, Lehrstuhl für Vegetationsökologie, Department für Ökologie, Technischen Universität München, 2005.

Elsgaard, L., Görres, C-M., Hoffmann, C.C., Blicher-Mathiesen, G., Schelde, K., Petersen, S.O., 2012. Net ecosystem exchange of CO<sub>2</sub> and carbon balance for eight temperate organic soils under agricultural management. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 162: 52 – 67.

Flanagan, L.B., Wever, L.A., Carlson, P.J., 2002. Seasonal and interannual variation in carbon dioxide exchange and carbon balance in a northern temperate grassland. *Global Change Biology*, 8: 599-615.

Freijer, J. I., Leffelaar, P.A., 1996. Adapted Fick's law applied to soil respiration. *Water Resources Research*, 32 (4): 791 – 800.

Francez, A-J., 2000. La dynamique du carbone dans les tourbières à Sphagnum, de la sphaigne à l'effet de serre. *Année Biologique*, 39: 205-270.

Gorham, E., 1991. Northern peatlands: role in the carbon cycle and probable responses to climatic warming. *Ecological Applications*, 1: 182–195.

Heikkinen, J.E.P., Elsakov, V., Martikainen, J.P., 2002. Carbon dioxide and methane dynamics and annual carbon balance in tundra wetland in NE Europe, Russia. *Global biogeochemical cycles*, 16 (4): 1115.

Heinemeyer, A., Di Bene, C., Lloyd A.R., Tortorella, D., Baxter, R., Huntley B., Gelsomino, A., Ineson, P., 2011. Soil respiration: implications of the plant-soil continuum and respiration chamber collar-insertion depth on measurement and modelling of soil CO<sub>2</sub> efflux rates in three ecosystems. *European Journal of Soil Science*, 62: 82–94.

Heinemeyer, A., McNamara, N.P., 2011. Comparing the closed static versus the closed dynamic chamber flux methodology: Implications for soil respiration studies. *Plant Soil*, 346: 145–151.

Hutchinson, G.L., Livingston, G.P., 2001. Vents and seals in non-steady-state chambers used for measuring gas exchange between soil and the atmosphere. *European Journal of Soil Science*, 52: 675–682.

Järveoja, J., Laht, J., Maddison, M., Soosaar, K., Ostonen, I., Mander, Ü., 2013. Mitigation of greenhouse gas emissions from an abandoned Baltic peat extraction area by growing reed canary grass: life-cycle assessment. *Regional Environmental Change*, 13: 781–795.

Kandel, T.P., Elsgaard, L., Laerke, P.E., 2013. Measurement and modelling of CO<sub>2</sub> flux from a drained fen peatland cultivated with reed canary grass and spring barley. *GCB Bioenergy*, 5: 548–561.

- Kirschbaum, M.U.F. and Mueller, R., 2001. Net Ecosystem Exchange. Cooperative Research Centre for Greenhouse Accounting. Lk 2-4.
- Kutsch, W.L., Bahn, M. & Heinemeyer, A. (eds), 2010. Soil Carbon Dynamics: an integrated methodology. Cambridge University Press, Cambridge, UK. Chapter: "Field measurements of soil respiration: principles and constraints, potentials and limitations of different methods" by Pumpanen, J., Longdoz, B., and Kutsch, W.L.
- Kuzyakov, Y., 2006. Sources of CO<sub>2</sub> efflux from soil and review of partitioning methods. *Soil Biology & Biochemistry*, 38: 425–448.
- Laine, A., Byrne, K.A., Kiely, G., Tuittila, E-S., 2007. Patterns in Vegetation and CO<sub>2</sub> Dynamics along a Water Level Gradient in a Lowland Blanket Bog. *Ecosystems*, 10: 890–905.
- Lund, C.P., Riley, W.J., Pierce, L.L, Field, C.B., 1999. The effects of chamber pressurization on soil-surface CO<sub>2</sub> flux and the implications for NEE measurements under elevated CO<sub>2</sub>. *Global Change Biology*, 5: 269–281.
- McKenzie, C., Schiff, S., Aravena, R., Kelley, C., St. Louis, V., 1998. Effect of temperature on production of CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> from peat in a natural and flooded boreal forest wetland. *Climate Change*, 40: 247-266.
- Maljanen, M., Liikanen, A., Silvola, J., Martikainen, P.J., 2003. Measuring N<sub>2</sub>O emissions from organic soils by closed chamber or soil/snow N<sub>2</sub>O gradient methods. *European Journal of Soil Science*, 54: 625–631.
- Maljanen, M., Sigurdsson, B.D., Guomundsson, J., Oskarsson, H., Huttunen, J.T., Martikainen, P.J., 2010. Greenhouse gas balances of managed peatlands in the Nordic countries - present knowledge and gaps. *Biogeosciences*, 7: 2711-2738.
- Masing, V., 1988. Soode mõiste, levik ja väärtus. – Rmt-s: Valk, U. (koost.), Eesti sood. Valgus, Tallinn, lk 7-21.
- Minkinen, K., Korhonen, R., Savolainen, I., Laine, J., 2002. Carbon balance and radiative forcing of Finnish peatlands 1900-2100 the impact of forestry drainage. *Global Change Biology*, 8: 785-799.
- Nay, S.M., Mattson, K.G., Bormann, B.T. 1994. Biases of Chamber Methods for Measuring Soil CO<sub>2</sub> Efflux Demonstrated with a Laboratory Apparatus. *Ecology*, 75 (8): 2460-2463.
- Noe, S.M., Kimmel, V., Huve, K., Copolovici, L., Portillo-Estrada, M., Puttsepp, U., Jogiste, K., Niinemets, U., Hortnagl, L., Wohlfahrt, G., 2011. Ecosystem-scale biosphere-atmosphere interactions of a hemiboreal mixed forest stand at Jarvselja, Estonia. *Forest Ecology and Management*, 262 (2): 71-81.

Ojanen, P., Minkkinen, K., Lohila, A., Badorek, T., Penttila, T., 2012. Chamber measured soil respiration: A useful tool for estimating the carbon balance of peatland forest soils? *Forest Ecology and Management*, 277: 132–140.

Orru, M., 1995. Eesti turvasood (teatmik). Eesti Geoloogiakeskus, Tallinn, lk 133 – 135.

Orru, M., Orru, H., 2003. Kahjulikud elemendid Eesti turbas. Eesti Geoloogiakeskus, Tallinn, lk 49 – 51.

Paal, J. 2011. Jääksood, nende kasutamine ja korrastamine. Tartu 2011.

Paal, J., Leibak, E. 2013. Eesti soode seisund ja kaitstus. Tartu: AS Regio.

Parish, F., Sirin, A., Charman, D., Joosten, H., Minayeva, T., Silviu, M. and Stringer, L. (Eds.), 2008. Assessment on Peatlands, Biodiversity and Climate Change: Main Report. Global Environment Centre, Kuala Lumpur and Wetlands International, Wageningen.

Pihlatie, M., Pumpanen, J., Rinne, J., Ilvesniemi, H., Simojoki, A., Hari, P., Vesala, T., 2007. Gas concentration driven fluxes of nitrous oxide and carbon dioxide in boreal forest soil. *Tellus*, 59B: 458–469.

PP Systems., 2013. EMG-4 Environmental Gas Monitor for CO<sub>2</sub>. Operator's Manual Version 4.19.

Pumpanen, J., Ilvesniemi, H., Keronen, P., Nissinen, T.P., Vesala, T., Hari, P. 2001. An open chamber system for measuring soil surface CO<sub>2</sub> efflux: Analysis of error sources related to the chamber system. *Journal of Geophysical research*, 106 (D8): 7985-7992.

Pumpanen, J., Kolari, P., Ilvesniemi, H., Minkkinen, K., Vesala, T., Niinistö, S., Lohila, A., Larmola, T., Morero, M., Pihlatie, M., Janssens, I., Yuste, J.C., Grünzweig, J.M., Reth, S., Subke, J.-A., Savage, K., Kutsch, W., Østreg, G., Ziegler, W., Anthoni, P., Lindroth, A., Hari, P. 2004. Comparison of different chamber techniques for measuring soil CO<sub>2</sub> efflux. *Agricultural and Forest Meteorology*, 123: 159–176.

Ramst, R., Orru, M., 2009. Eesti mahajäetud turbatootmisalade taastaimestumine. Eesti Põlevloodusvarad ja –jäätmed, nr 1–2, lk 6–7.

Rochette, P., Gregorich, E. G. and Desjardins, R. L., 1992. Comparison of static and dynamic closed chambers for measurement of soil respiration under field conditions. *Canadian Journal of Soil Science*, 72: 605-609.

Shurpali, N.J., Hyvönen, N.P., Huttunen, J.T., Biasi, C., Nykänen, H., Pekkarinen, N., Martikainen, P.J., 2008. Bare soil and reed canary grass ecosystem respiration in peat extraction sites in Eastern Finland. *Tellus*, 60B: 200–209.

- Shurpali, N.J., Hyvönen, N.P., Huttunen, J.T., Clement R.J., Reichstein, M., Nykänen, H., Biasi, C., Martikainen, P.J., 2009. Cultivation of a perennial grass for bioenergy on a boreal organic soil – carbon sink or source? *GCB Bioenergy*, 1: 35–50.
- Shurpali, N.J., Strandman, H., Kilpeläinen, A., Huttunen, J.T., Hyvönen, N.P., Biasi, C., Kellomäki, S., Martikainen, P.J., 2010. Atmospheric impact of bioenergy based on perennial crop (reed canary grass, *Phalaris arundinacea*, L.) cultivation on a drained boreal organic soil. *GCB Bioenergy*, 2: 130–138.
- Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Alley, R. B., Berntsen, T., Bindoff, N. L., Chen, A., Chisthaisong, A., Gregory, J. M., Hegerl, G. C., Heimann, M., Hewitson, B., Hoskins, B. J., Foos, F., Jouel, J., Kattsov, V., Lohmann, U., Maysuno, T., Molina, M., Nicholls, N., Overpack, J., Raga, G., Ramaswamy, V., Ren, J., Rusticucci, M., Somerville, R., Stocker, T. F., Whetton, P., Wood, R. A., and Wratt, D., 2007. Technical summary, in: *Climate Change 2007: The physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007 (19-91)*.
- Truu, J., 2009. Vee- ja mullamikrobiologia 3. loeng. Tartu Ülikool.
- Tuittila, E-S., Vasander, H., Laine, J., 2004. Sensitivity of C Sequestration in Reintroduced Sphagnum to Water-Level Variation in a Cutaway Peatland. *Restoration Ecology*, 12 (4): 483–493.
- Turcu, V.E., Jones, S.B., Or, D., 2005. Continuous Soil Carbon Dioxide and Oxygen Measurements and Estimation of Gradient-Based Gaseous Flux. Soil Science Society of America. *Vadose Zone Journal*, 4: 1161–1169.
- Urbanová, Z., Pícek, T., Hájek, T., Bufková, I., Tuittila, E-S., 2012. Vegetation and carbon gas dynamics under a changed hydrological regime in central European peatlands. *Plant Ecology & Diversity*, 5 (1): 89-103.
- Xiong, S & Kätterer, T., 2010. Carbon-allocation dynamics in reed canary grass as affected by soil type and fertilization rates in northern Sweden. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B - Soil & Plant Science*, 60 (1): 24-32.
- Yu, L., Wang, H., Wang, G., Song, W., Huanf, Y., Li, S-G., Liang, N., Tang, Y., He, J-S., 2013. A comparison of methane emission measurements using eddy covariance and manual and automated chamber-based techniques in Tibetan Plateau alpine wetland. *Environmental Pollution*, 181: 81- 90.
- Yu, Z., 2011. Holocene carbon flux histories of the world's peatlands: Global carbon-cycle implications. *The Holocene*, 21: 761.

## **Internetiallikad**

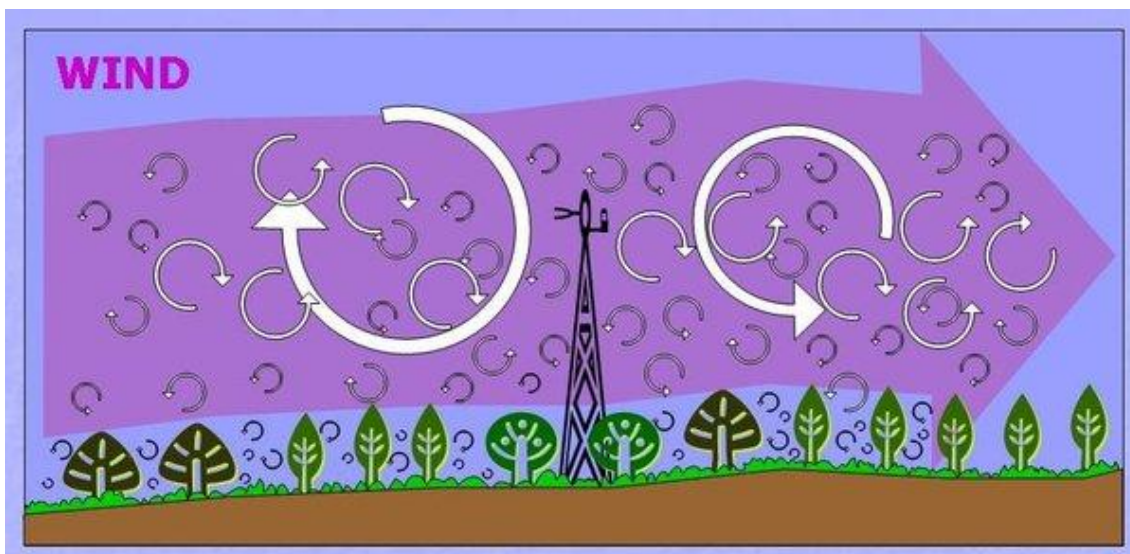
Agroinfo, 2011. Factors Affecting Distribution, Activity and Population of Soil Microorganisms (<http://www.agriinfo.in/?page=topic&superid=5&topicid=152>). Kättesaadav 19.05.2014.

Eesti Entsüklopeedia (<http://entsyklopeedia.ee/kategooria/loodus>). Kättesaadav 16.04.2014.

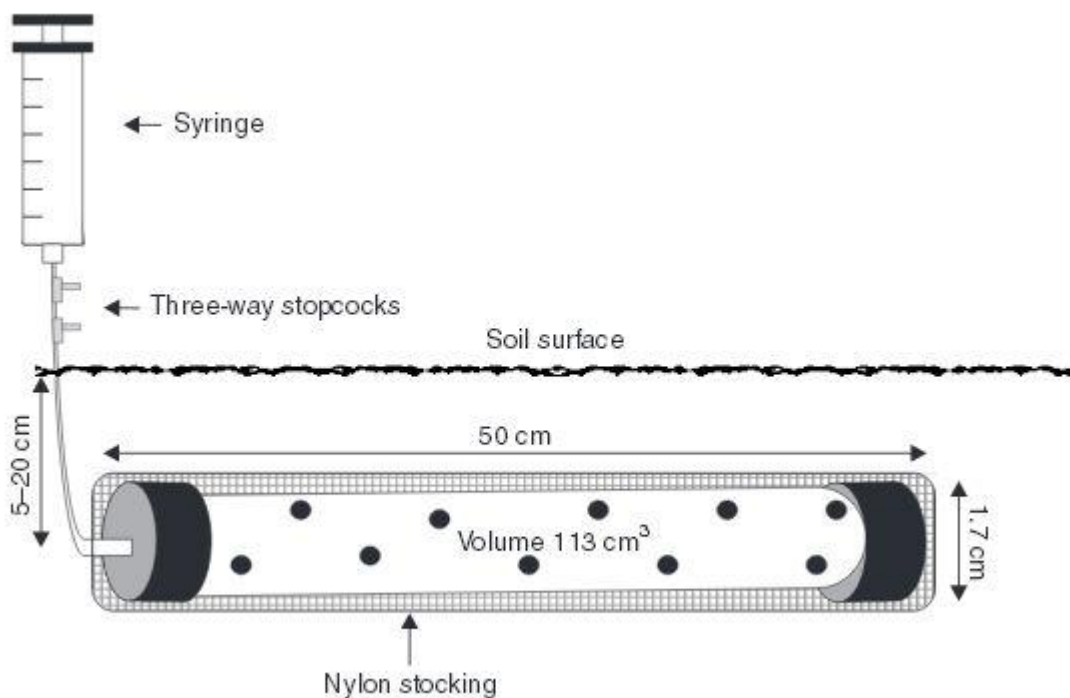
Maa-ameti geoportaal (<http://geoportaal.maaamet.ee>). Kättesaadav 19.04.2014.

**Lisad**

## Lisa 1



**Joonis 1.** Turbulentse õhuvoo meetodika põhimõtteline skeem (Burba & Anderson, 2010).



**Joonis 2.** Konsentratsiooni gradiendi meetodi seade (Maljanen *et al.*, 2003).

## Lisa 2



**Joonis 1.** Lavassaare freesturbaalal gaasivoogude mõõtmine staatilise pimekambriga.



**Joonis 2.** Lavassaare freesturbaalal NEE mõõtmine dünaamilise läbipaistva kambriga.



**Joonis 3.** Lavassaare päiderooga taimestatud ala CO<sub>2</sub>-C mõõtmised staatilise pimekambriga (Foto: Martin Maddison).

### Lisa 3

**Tabel 1.** Väljavalitud uurijate meetodika kirjeldus ja kommentaarid.

KAMBER						Ala ettevalmistus	RÕNGAS		MÕÕTMINE				Kommentaari/Tulemused
Autor	Tüüp, materjal	Mõõdud	Dünaamiline/ Staatileine	Jahutus	Ventilaator/ Rõhukompensatsiooniava		Sügavus	Ühendus kambriga	Analüsaator	Aeg	Kordus	Sagedus	
Chojnicki <i>et al.</i> , 2010 (Poola)	Läbipaistev, pleksiklaas (3mm)	77x77, h=50 cm	Suletud dünaamiline	Jahutuskotid	2 ventilaatorit + ava		17 cm	Kummitihend + Kaks elastilist võõd mis kinnitavad kambri tihedalt vastu raami	MYCO2, Edingburgh Instruments, UK	2-3 või 1,5-2 min		3 nädalaste vahedega	Ökosüsteemi hingamise võtmetegur on õhu temperatuur.
	Pime, PVC (3mm)												
Urbanová <i>et al.</i> , 2012 (Tšehhi)	Läbipaistev, pleksiklaas	65x65, h=40 cm	Suletud dünaamiline	Jahutusvee ringvool	2 ventilaatorit	Rõngad paigutati mulda 2008 aastal, mõõtmistega alustati 2009 aastal	15 cm	Vesi plastikust rõngal	EMG-4, PP-systems, UK	1,5-2 min	15 s intervallidega	2-3 nädalaste vahedega	Taimestiku kooslused mõjutavad C voogu kõige enam. Tulemused varieerusid erineva taimestikuga alal - 600 ja 800 mg CO <sub>2</sub> -C m <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup>
	Pime		Suletud staatileine	Ei	1 ventilaator				20 minutit pärast kambri paigutust	3 kordust			
Elsgraad <i>et al.</i> , 2012 (Taani)	Läbipaistev, pleksiklaas	60x60 h=41 cm	Suletud dünaamiline	Metallist jahutus riba kontaktis jahutussüsteemiga	2 ventilaatorit + 2 ava	Taimestik lõigati ja eemaldati. Enne kambri paigutamist aereeriti kamber seni kuni konsentratsiooni kambri oleks 360-380 ppm.	10 cm	Kummist rihmad, mis ulatuvad kambri rõngani hoiavad kambri õhukindlana rõnga peal	LI-840 CO <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> O Analyzer; LI-COR Inc	2 min	4 kordust	3 nädalaste vahedega	Temperatuur on ökosüsteemi hingamise suurim mõjutaja. NEE kõikus 3,5 kuni 13,6 mg C ha <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup>
Heikinen <i>et al.</i> , 2002 (Soome)	Läbipaistev	Volüüm 0,104 m <sup>3</sup>	Suletud dünaamiline	Automaatne jahutussüsteem	Ventilaator	Rõngad paigutati pinnasesse nädal enne mõõtmisi	15 cm	Vesi plastikust rõngal	LI-840 CO <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> O Analyzer; LI-COR Inc	3 min	30 s intervallidega	Iga nädal	NEE kõikus -104 mg kuni 249 mg CO <sub>2</sub> -C m <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup> vahel
	Pime, alumiiniumist	60x60, h=30 cm	Suletud staatileine						20 min	3, 10, 15 ja 20 minuti proov			
Laine <i>et al.</i> , 2007 (Soome)	Läbipaistev, pleksiklaas	60x60, h=33 cm	Suletud dünaamiline	Jah	Ava	Rõngad paigutati pinnasesse 2003 aastal			EMG-4, PP-systems, UK	1-4 min	15 s intervallidega	2-4 korda nädalas	NEE -115 kuni 768 g CO <sub>2</sub> m <sup>-2</sup> a <sup>-1</sup> .
Alm <i>et al.</i> , 1997 (Soome)	Läbipaistev	Volüüm 72 dm <sup>3</sup>	Suletud dünaamiline	Ei	Ava				LCA-2 (Analytical Development Company)	2,5-3 min	30 s intervallidega	3 korda nädalas	Kõrgeim leitud emissioon kasvuperioodil 13,33 mol CO <sub>2</sub> -C m <sup>-2</sup> p <sup>-1</sup>

Drösler, 2005 (Saksamaa)	Läbipasitev, pleksiklaas (3mm)	78x78, h=50 cm	Suletud dünaamiline	Jahutuskotid	Ventilaator + ava	6 nädalat enne mõõtmiste alustamise	10 cm	Kõrged rõnga seinad ja kummist ümbrised kambri otstes	Li-800 gas-analyser (Licor, Lincoln, NE, USA)	2 min	30 s intervallidega	Iga nädal	Taastatud alald ei käitunud kui C kogujad, kuid võrreldes taastamata aladega on taastatud alad võimelised siduma rohkem süsinikku
Ojanen <i>et al.</i> , 2012 (Soome)	Pime, PVC	d=31,6 cm h=14,9 cm	Suletud dünaamiline	Ei	Ei		30 cm		PP-systems, EGM-4	1,3 min		2 korda kuus	CO <sub>2</sub> voog -2120 m <sup>-2</sup> a <sup>-1</sup>
Heinemeyer & McNamara, 2011 (Inglismaa)	Pime, PVC	d=20 cm volüüm 4,503 cm <sup>3</sup>	Suletud dünaamiline	Ei	Ava	Eksperimentaalaad			Li-Cor 8100, Lincoln, Nebraska, USA	5 min	1 s intervallidega		Keskmine mulla hingamine 58±12 mg C m <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup>
Heinemeyer <i>et al.</i> , 2011 (Inglismaa)	Pime	0 sügavusel d=10 cm, h=45 cm, sügavamal volüüm 4,07 l	Suletud dünaamiline			Ettevalmistus 2006, mõõtmistega alustati 2007	0, 5, 10 ja 20 cm		Li-Cor 8100, Lincoln, Nebraska, USA	1-2 min	Iga sekund		Keskmine autotroofne hingamine mõõtmisperioodil oli 0,52 □ mol CO <sub>2</sub> m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>
Badorek <i>et al.</i> , 2011 (Soome)	Läbipasitev, polükarbonaat		Suletud dünaamiline	Jah	Ventilaator	2007 paigutati rõngad ja 2008 alustati mõõtmistega	20 cm		EMG 4, PP-systems	2 min	10 s intervallidega	1-2 nädalaste intervallidega	Keskmine gaasivahetus varieerus -0,9 g CO <sub>2</sub> m <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup> kuni 1,4 g CO <sub>2</sub> m <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup>
Tuittila <i>et al.</i> , 2004 (Soome)	Läbipaistev, plastik	60x60 h=30 cm	Suletud dünaamiline	Ei	Ava		30 cm	Vesi plastikust rõngal	ADC, LCA 2, Analytical Development Company, U.K.	2-4 min	30 s intervallidega	1-3 nädalaste intervallidega	Nad leidsid, et mullaniiskuse on kõige olulisem CO <sub>2</sub> vahetuse mõjutaja ammentatud turbaaladel
Burrows <i>et al.</i> , 2005 (USA)	Läbipasitev, lexan ja teflan (3,2 mm)	45,7x45,7, h=34-68 cm	Suletud dünaamiline	Ringlev külm vesi	2 ventilaatorit		10-15 cm	Vesi plastikust rõngal	LiCor 6200	2,5 min	30 s intervallidega	Iga nädal	Voog kõikus -10,8 kuni 12,7 μmol CO <sub>2</sub> m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>

## Lisa 4

**Tabel 1.** Mullatemperatuur (°C) Lavassaare jääturbaala 2013. aasta mõõtmisperiodil kõikidel katsealadel neljas erinevas kihis. (T – taimestatud kontrollala, Tv – taimestatud väetatud ala, F – freesturba kontrollala, Fv – väetatud freesturbaala).

Ala	Temperatuuri mõõtmise sügavused	Temperatuur					
		Mai	Juuni	Juuli	August	September	Oktoober
<b>T</b>	10 cm	13,33	17,8	17,01	16,18	13,56	6,22
	20 cm	13,37	15,32	16,2	15,85	13,57	8,77
	30 cm	12,53	13,85	15,8	15,72	13,5	9,2
	40 cm	12,78	12,85	14,5	14,78	13,11	9,9
<b>Tv</b>	10 cm	12,30	18,37	17,26	16,53	13,60	6,22
	20 cm	12,45	15,62	16,51	16,38	13,67	8,72
	30 cm	10,90	14,25	16,11	16,23	13,67	9,23
	40 cm	11,32	13,12	15	15,36	13,33	9,98
<b>F</b>	10 cm	10,88	17,70	16,91	16,15	13,90	6,00
	20 cm	11,03	14,55	15,52	15,48	13,15	8,43
	30 cm	9,48	13,48	14,68	14,75	12,9	9,57
	40 cm	10,10	12,27	13,51	13,93	12,62	9,93
<b>Fv</b>	10 cm	9,60	18,08	17,14	16,42	14,05	6,22
	20 cm	9,72	14,6	15,8	15,67	13,38	8,63
	30 cm	8,35	13,7	15,12	15,13	13,15	9,7
	40 cm	8,32	12,4	13,99	14,32	12,9	10,05

**Tabel 2.** Pärnu kuu keskmine õhu temperatuur (°C) ja sademete summa (mm) mõõtmisperioodi kohta (Pärnu meteoroloogiajaam).

	Mai	Juuni	Juuli	August	Sept.	Okt.	Mõõtmisperioodi keskmine
Õhu temperatuur (°C)	13,8	17,8	17,7	17,2	11,8	7,4	14,38
Sademed (mm)	45,4	31,1	42,6	84,7	55	62,2	53,5

**Tabel 3.** Lavassaare jääturbaala mullaniiskus ( $\text{H}_2\text{O m}^3 \text{ m}^3$ ) 0-5 cm sügavusel kõikidel aladel mõõtmisperioodil kuude kaupa. (T – taimestatud kontrollala, Tv – taimestatud väetatud ala, F – freesturba kontrollala, Fv – väetatud freesturbaala).

Mullaniiskus ( $\text{m}^3/\text{m}^3$ ) 0-5 cm sügavusel					
Ala	Juuni	Juuli	August	Sept.	Okt.
<b>T</b>	0,47	0,29	0,46	0,52	0,56
<b>Tv</b>	0,53	0,37	0,45	0,54	0,56
<b>F</b>	0,33	0,30	0,39	0,46	0,42
<b>Fv</b>	0,34	0,31	0,36	0,43	0,43

**Tabel 4.** Pinnaveetase (cm maapinnast) Lavassaare katsealal piesomeetrites. (T – taimestatud kontrollala, Tv – taimestatud väetatud ala, F – freesturba kontrollala, Fv – väetatud freesturbaala).

	Mai	Juuni	Juuli	August	September	Oktoober
T	-28,78	-51,82	-52,39	-48,54	-34,71	-40,68
Tv	-26,14	-45,87	-53,85	-44,06	-30,42	-36,67
F	-40,83	-49,71	-47,25	-38,25	-45,47	-35,5
Fv	-46,47	-62	-54	-55,5	-50,69	-53,17

## Lisa 5



**Joonis 1.** Ventilaatori ja jahutussüsteemiga varustatud uus dünaamiline läbipaistev (95%) kamber (vasakul) ja antud töös kasutatud dünaamiline läbipaistev (75%) kamber (paremal). Keskel tagaplaanil on staatiline pimekamber (foto Martin Maddison).

## **Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks**

Mina Liisa Aro

(sünnikuupäev: 19.04.1989)

Annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

„Kahe erineva meetodi kasutamine C-bilansi määramiseks Lavassaare jääkturbaala näitel”,

mille juhendajad on Martin Maddison ja Järvi Järveoja

- 1.1.reprodutseerimiseks säilitamise ja üldsusele kättesaadavaks tegemise eesmärgil, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace-is lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
  - 1.2.üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tartu Ülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace´i kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.
2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
  3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Tartus, 25.05.2014