

## Lisa 1

### Uurimisprojekti “Süsiniku- ja lämmastikuringe muudetud niiskusrežiimiga metsades” lõpparuande täispikk versioon

#### Projekti lühikokkuvõte

Lõppenud TÜ ning EMÜ vahelises ühisprojekti hindas EMÜ töörühm erinevate kõdusoo puistute (männikute, kuusikute, sookaasikute) biomassi, produktsiooni ning süsiniku (C) ja lämmastiku (N) sidumist taimestiku biomassis. TÜ rühm mõõtis kasvuhoonegaaside voogusid ning teostas mullakeemia, mulla mikrobioloogia ning põhjavee analüüsi. Hinnati ka aastast lämmastiku netomineralisatsiooni ning varise voogu. Kuivendatud puistud osutusid väga produktiivseteks metsakooslusteks. Jänesekapsa-kõdusoo kuusikus ulatus tüvemassi aastane produktsioon  $7,7 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ . Kõrge produktsioon kompenseeris ka süsihappegaasi ( $\text{CO}_2$ ) lendumise atmosfääri, mistõttu kõdusookuusikud olid reeglina kliima jahendajad, sidudes keskmiselt  $-11,65 \pm 3,27 \text{ t CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ . Ka kõdusoomännikud osutusid kliima jahendajateks ( $-8,61 \pm 1,56 \text{ t CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ) ning kõdusookaasikud süsiniku-neutraalseteks, emiteerides atmosfääri keskmiselt  $3,65 \pm 4,25 \text{ t CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ . Nii kaasikutes kui ka kuusikutes mõõdeti kõrged naerugaasi emissioonid (keskmiselt vastavalt  $4,0$  ja  $5,2 \text{ kg N}_2\text{O-N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ , maksimaalsed väärtused kuni  $1,44 \text{ mg N}_2\text{O-N m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ). Metaani ( $\text{CH}_4$ ) emissioon oli kõigis puistutes madal; domineeris nõrk sidumine mullas. Kõigi puistute lämmastikubilansis domineeris lisaks biomassis sidumisele molekulaarse lämmastiku ( $\text{N}_2$ ) lendumine. Edasisel majandamisel tuleks tähelepanu pöörata kõdusookaasikute C- ja N-bilansi kliimasõbralikumaks muutmisele.

#### Abstract

The main objective of the project was to characterise carbon (C) & nitrogen (N) balances in fully-drained peatland forests which are common in Estonia. In 2013-2016, three forest types (dominated by Scots pine, Norway spruce and Downy birch, three replicates in each) were studied for aboveground and belowground biomass, production of trees and understory, C and N storages in trees, fine roots and soils, as well as fluxes between the ecosystem and the atmosphere. Annual balance of main greenhouse gases (GHG) carbon dioxide ( $\text{CO}_2$ ), methane ( $\text{CH}_4$ ), and nitrous oxide ( $\text{N}_2\text{O}$ ) was created; metagenomic analysis of soil microbial biomass and denitrification control genes was carried out. Spruce forests of *Oxalis*-site type (OST) showed high annual productivity ( $7.7 \text{ t woody biomass ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ) which compensated GHG emission from ongoing peat moeralisation: these forests were generally climate coolers sequestering  $-11.65 \pm 3.27 \text{ t CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  (average  $\pm$  standard error). Likewise, pine forests of *Vaccinium*-site type were climate coolers showing sequestrating values of  $(-8.61 \pm 1.56 \text{ t CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1})$ , whereas OST birch forests were C-neutral emitting  $3.65 \pm 4.25 \text{ t CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ . In both birch and spruce forests high  $\text{N}_2\text{O}$  emission was measured: annual average  $4.0$  and  $5.2 \text{ kg N}_2\text{O-N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ , respectively; max values reaching  $1.44 \text{ mg N}_2\text{O-N m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ .  $\text{CH}_4$  flux (dominatingly consumption) was low in all forests studied.  $\text{N}_2$  emission in addition to assimilation in biomass was the main flux in N budget.

#### Sissejuhatus

Kõdusoometsade (kuivendatud soometsade) pindala ulatub Eestis ca 14%-ni kõigist metsadest. Kuivendamise mõjul puude kasvutingimused paranevad, mis läbi suureneb puistu produktsioon: hinnanguliselt suurendab kuivendamine Eestis keskmisena puistute juurdekasvu  $0,8-1,0 \text{ m}^3$  võrra hektari kohta aastas. Kuivendamine aga põhjustab ka intensiivset turbas akumulunud orgaanilise aine mineraliseerumist (lagunemist), mille tagajärgedeks on oluline süsiniku (C) ja taimetoitainete, eriti lämmastiku (N) kadu kuivendatud alalt. Lisaks leostumisele ja veega ärakandele toimub ka oluline gaasiliste ühendite lendumine, millest olulisimad on kasvuhoonegaasidena (KHG) toimivad süsihappegaas ( $\text{CO}_2$ ), metaan ( $\text{CH}_4$ ) ja naerugaas ( $\text{N}_2\text{O}$ ). Nimetatud gaaside kontsentratsiooni järsk suurenemine atmosfääris on globaalse soojenemise peamiseks põhjuseks (IPCC 2013). Kuivendatud soometsade C ja N bilansi on korrektselt, kõiki olulisi voogusid ja varusid arvesse võttes, hakatud määrama alles viimastel aastatel. Maailmakirjandusest leiab aga

vastakaid arvamusi. Lohila jt (2011) näitavad, et Soomes kuivendatud turbamullal kasvavas männikus on fotosünteesis seotud CO<sub>2</sub> kogused oluliselt suuremad kui mullast lenduv CO<sub>2</sub> voog. Arvestades ka CH<sub>4</sub> ja N<sub>2</sub>O voogusid, on tegu olulise C sidujaga. Tõenäoliselt on sama ka teiste analoogsetes tingmistes kasvavate männikutega. Seega toimivad need metsad kliima jahutajatena. Hiljuti avaldatud He jt (2016) artikkel näitab, et Rootsis kuivendatud soomuldadel (endised põllumajandusliku kasutusega mullad) kasvavates kuusikutes on bilanss vastupidine. Ühtlasi on need metsad ka olulised N<sub>2</sub>O emiteerijad. Eestis analoogsed andmed puudusid, mistõttu kavandatigi küesolev RMK finantseeritud uurimisprojekt. Selle täitjateks on nii Tartu Ülikooli kui ka Eesti Maaülikooli teadlased.

Projekti peamiseks eesmärgiks oli hinnata kuivendamise mõju kõdusoometsade C ja N ringe varudele ja voogudele ning koostada C ja N bilansid peamistele kõdusoometsa tüüpidele. Alleesmärkideks oli hinnata:

- kuivenduse mõju kõdusoometsade produktiivsusele.
- puuliigi mõju kasvuhooonegaaside emissioonile ja C, N ringele kõdusoometsades.
- kuivendusrežiimi kestvuse ja intensiivsuse mõju kasvuhooonegaaside CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> ja N<sub>2</sub>O emissioonile.
- veerežiimi fluktuatsioonide mõju kasvuhooonegaaside emissiooni dünaamikale.
- metsamajanduse (lageraie) mõju kuivendatud ala C ja N bilansile.

Samuti püstitati eesmärgiks rajada püsikatsealad, mille baasil oleks võimalik hinnata kuivendamise pikaajalist mõju metsaökosüsteemi arengule ning aineringetele.

Töö peamise hüpoteesi kohaselt ei suudaks kuivendusest tingitud puistu produktiooni (fotosünteesis süsihappegaasi CO<sub>2</sub> sidumise) intensiivistumine korvata turba mineraliseerumisest tulenevat CO<sub>2</sub> ning teiste kasvuhooonegaaside emissiooni, mistõttu vähemalt osa kõdusoometsi on olulised globaalse soojenemise allikad.

Käesolev aruanne võtab kokku 3 aasta jooksul välitöödel ja laboratooriumides uuringute käigus saadud peamised tulemused. Osa kogutud proove ning töödeldud andmeid on veel analüüsimisel ning vastavad artiklid seetõttu veel ettevalmistamise faasis. 2015.a suvel on kavas ka veel täiendavad mõõtmised (vt. Materjal ja meetodika alapeatükid).

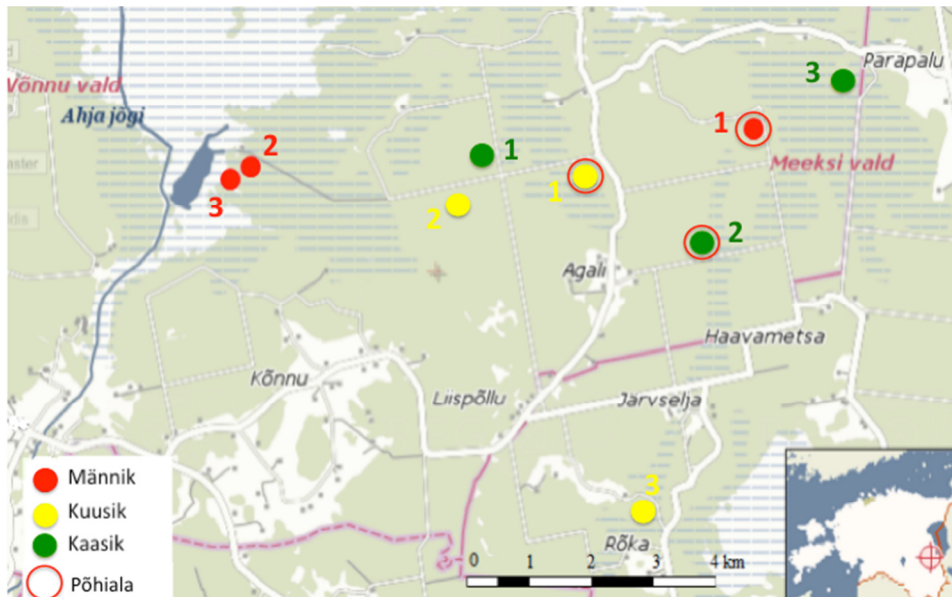
## Materjal ja meetodika

### **Katsealad**

Uuringute teostamiseks valiti eelneva andmebaaside ning võimalike alade takseerikirjelduste läbitöötamise alusel 2013.a. suveperioodil Järvselja õppe- ja metskonna kõdusoometsades 9 katseala mõõtmetega 100X50m – kolm männikus, kolm kuusikus ja kolm sookaasikus (joonised 1 ja 2). Sookaasikutes ja kuusikutes on tegemist jänesekapsa-kõdusoo kasvukohatüüpi metsadega, männikud on aga mustika-kõdusoo kasvukohatüüpi metsad. Kõigil aladel oli turbakihi tusedus vähemalt 50 cm. Katsealade lühem külj piirnes kuivenduskraaviga. Igale alale paigaldati kraavist 5, 15, 40 ja 80 m kaugusele neljas korduses rõngad gaasiproovide kogumise kambrite tarbeks ning igale transektijoonele piesomeetrid (perforeeritud ning geotekstiilist filtermaterjaliga mähitud plastmasstorud, diameeter 50 mm, pikkus 1 m).

Igast metsatüübist valiti kolm nn põhiala, kus teostati põhjalikumad puistu ning mulla- ja põhjavee parameetrite uuringud (joonised 1 ja 3).

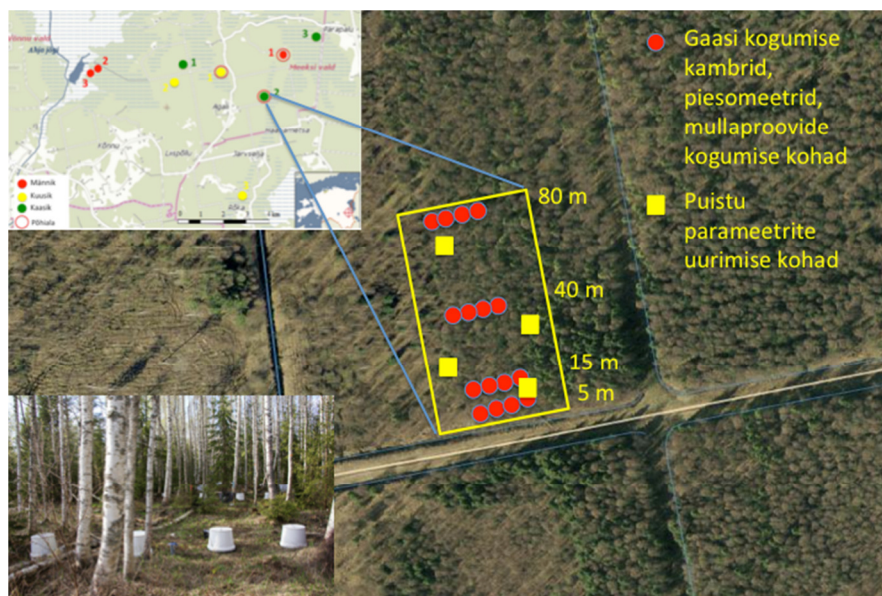
Lisaks kasutati töös lageraie efekti analüüsiks hall-lepiku katseala Agalis (Becker et al 2016).



Joonis 1. Kõdusoometsade katsealade paiknemine Järvselja õppe- ja katsemetskonnas. 1-3 – katsealade numbrid.



Joonis 2. Kõdusoometsade põhialad gaasiproovide kogumise kambritega (november 2014). A – männik, B – kuusik, C – kaasik.



Joonis 3. Staatiliste gaasikogumiskambrite ning puistu parameetrite uurimiskohtade (mudelpuud, varisekastid) paigutus kaasiku uurimisala näitel (Maa-ameti kaardi baasil).

### Puistute tagavara, juurdekasvu, biomassis C ja N sidumise analüüsid

Kõigil aladel rajati proovitükid, mis takseeriti. Katsealadel hinnati puistute maapealse biomass ja tootlikkuse. Selleks valiti igalt alalt klappimisandmete põhjal 5-9 mudelpuud, mis langetati, fraktsioneeriti ja kaaluti kohapeal. Igast fraktsioonist (tüved, oksad) eraldati alamproovid, need viidi laborisse, kus toimus edasine analüüs (fraktsioneerimine,

kuivainesisalduse määramine, keemiline analüüs). Tüvepuidu jooksev aastane juurdekasv leiti mudelpuude aastarõngaste laiuse põhjal, kasutades vastavat aparatuur ja tarkvara (WinDendro Regent Instr. ja TSAP-Win Time Series Analysis for Dendrochronology). Kasutatud meetodikat on detailselt kirjeldatud mitmetes varasemates töödes (Uri et al., 2002; 2012). EMÜ metsaosakonna laboris määrati fraktsioonidest kuivaine sisaldus, samuti eraldati proovid keemilisteks analüüsideks EMÜ Taimebiokeemia laboris.

### **Maapelite varisevoog**

Kolmele põhialale installeeriti varisekogujad (7 igale alale), kust kahe aasta jooksul kuuajalise sammuga koguti maapealset varist (okkad, lehed, oksad jms.). Sookaasikus toimus sügisel, intensiivse lehtede varisemise perioodil, korjamine kahenädalase sammuga. Varis fraktsioneeriti laboris ning EMÜ Taimebiokeemia laboris määrati erinevate fraktsioonide C ja N sisaldused. Saadavad tulemused võimaldavad hinnata aasta jooksul läbi varise maapinnale jõudvat C ja N voogu (Uri et al 2012).

### **Alustaimestiku biomass analüüs**

Alustaimestiku biomassi, produktsiooni ning C ja N sisaldust hinnati EMÜ tööruhma poolt sookaasiku põhialal, kus kasvasid valdavalt rohttaimed. Männiku põhialal tehti vastav analüüs TÜ tööruhma poolt. Kuusikus oli alustaimestiku osakaal minimaalne.

Kümnest juhuslikust punktist üle ala koguti taimede maapealne biomass 0,5 m<sup>2</sup> suuruselt alalt. Selleks asetati maapinnale puitraam mõõtmetega 0,5x1,0 m. Võimalikult maapinna lähedalt lõigati maha kõik kasvavad taimed ja pakiti kilekotti. Laboris proovid kaaluti, eraldati alamproov kuivainesisalduse ning C ja N sisalduse määramiseks. Proovid kuivatati 70 °C juures ja kaaluti. Hiljem proovid jahvatati ning määrati nende C,N sisaldus.

Rohttaimede maa-aluse osa hindamiseks võeti samadest ruutudest mullapuuriga (ahenev südamik, d=5,4 cm) mullamonoliidid, millest pesti välja juured. Hiljem juureproovid sorteeriti laboris binokulaari all, eraldati alustaimestiku juured, kuivatati, kaaluti ning määrati C ja N sisaldused.

### **Juurte ja risosfääri uuringud**

Peenjuurte (d<2mm) biomassi ja produktsiooni hinnati EMÜ tööruhma poolt kahes sookaasikus (põhiala + 1. lisaala) ning TÜ tööruhma poolt männiku ja kuusiku põhialadel.

Biomassi hinnati mullamonoliitide põhjal. Üle kogu ala võeti sügisel 2014. a. mullapuuriga (d=40cm) juhuslikult 15 mullamonoliiti, mis jagati erinevateks sügavuskihtideks (0-10; 10-20 jne kuni 40 cm sügavuseni). Erinevatest kihtidest pesti välja peenjuured, mis sorteeriti laboris (puude juured, elus ja surnud juured, rohttaimede juured jne). Proovid kuivatati ja kaaluti, arvutati peenjuurte biomass ja nekromass.

Peenjuurte produktsiooni hinnati suhtelisel uudsel juurevõrkude meetodil (Hirano *et al.*, 2009; Lukac and Godbold, 2010; Ohashi *et al.*, 2015). Alale paigaldati 100 juurevõrku (25x7 cm) ca 20 cm sügavusele. Aasta möödudes võeti neist esimesed 25 üles, töödeldi laboris ja eraldati peenjuured.

### **Lämmastiku netomineralisatsioon**

Lämmastiku netomineralisatsioon (NNM) on üks peamisi transformatsiooniprotsesse mullas, mille käigus mulla orgaanilisest lämmastikust tekib taimedele omastatav mineraalne lämmastik. Aastase NNM voo hindamiseks kasutati inkubeeritud polüetüleenkilekottide meetodil (Eno 1960; Uri et al 2003; 2008), mis põhineb mineraalse lämmastiku kontsentratsioonide muutustel isoleeritud keskkonnas, kus ka taimejuurte mõju on välistatud. Katsed installeeriti kolmele põhialale (männik, kuusik, sookaasik) mais 2014. a. ja proove inkubeeriti kuuajalise sammuga (väljaarvatud talv, kui maapind oli külmunud) kuni 2015. a. maikuuni (1 aasta). Kasutatud meetodika on detailselt kirjeldatud töödes (Uri et al 2003, 2008).

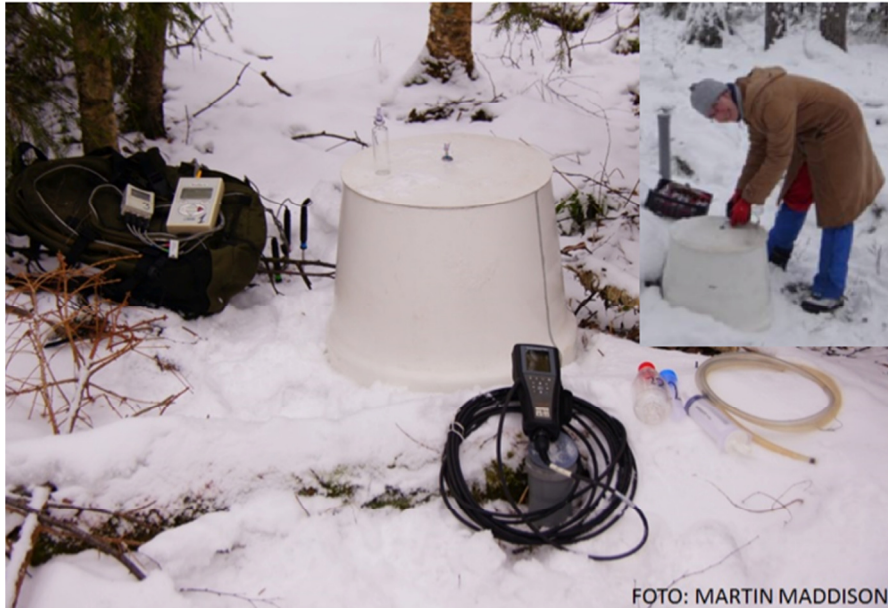


FOTO: MARTIN MADDISON

Joonis 4. Gaasiproovide kogumine ning mulla- ja põhjavee parameetrite mõõtmine kuusiku (suurem pilt) ja männiku (väiksem pilt; Raili Torga proove võtmas) põhialadel 2016.a. jaanuaris. Piltidel on näha gaasi kogumise kambrid, piesomeeter ning mullaniiskuse ja –temperatuuri mõõtmise sondid.

#### Gaasi, mulla ja põhjavee analüüsid

Kõigil 9-l alal koguti ajavahemikus november 2013 kuni märts 2016 sagedusega 1-2 korda kuus suletud kambri meetodil (Hutchinsonson & Livingston 1993; Mander et al 2003; 2014; joonis 4) gaasiproovid; TÜ geograafia osakonna (TÜGO) laboris määrati gaasiproovides CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> ja N<sub>2</sub>O kontsentratsioonid ning vood, kasutades kahte ECD, TCD ning FID detektoritega varustatud Shimadzu GC-2014 gaas-kromatograafi ning Lofffield-tüüpi automaatsisestajat (joonis 5). Kokku analüüsiti ca 17500 gaasiproovi. Igal proovivõtu sessioonil mõõdeti piesomeetrites veetaseme sügavus ning mõõdeti portatiivse YSI-analüsaatoriga põhjavee temperatuur, pH, O<sub>2</sub> sisaldus ja küllastusaste, redoks-potentsiaal ning elektrijuhtivus. Vegetatsiooniperioodil 2014-2015 võeti kuuel korral piesomeetritest veeproovid ning määrati TÜGO ning EKUK laborites üldN, üldC, DOC, NH<sub>4</sub>, NO<sub>3</sub>, üldP, PO<sub>4</sub>, SO<sub>4</sub> ning Ca sisaldus.



Joonis 5. Shimadzu GC-2014 gaas-kromatograaf ja Lofffieldi tüüpi automaatne proovisisestaja.

Mullaproovid (kompleksproov iga kambriõnga lähedusest 0-10 cm paksusest pindmisest turbakihist) koguti kord aastas oktoobris/novembris. EMÜ Taimebiokeemia laboris määrati

proovides pH väärtus ning kuivaine, üldC, üldN, üldP, üldS, NH<sub>4</sub>, NO<sub>3</sub>, PO<sub>4</sub>, SO<sub>4</sub>, K ja Ca sisaldus. Kord aastas igalt alalt kogutud intaktsetes mullaproovides (muutmata struktuuri ja veesisaldusega, kogutud kaantega suletud terrasilindritesse) määrati TÜ geograafia osakonna laboris Shimadzu GC-2014 baasil ehitatud spetsiaalse inkubatsioonisüsteemi abil (joonis 6) He-O<sub>2</sub> meetodil (Butterbach-Bahl et al 1997; Mander et al 2014) N<sub>2</sub> emissioon ning võrdluseks gaasiproovidest määratud tulemustele ka N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub> ja CO<sub>2</sub> emissioonid.



Joonis 6. He-O<sub>2</sub> meetodi baasil mullaproovides N<sub>2</sub> emissiooni mõõtmise süsteem.

Põhialadele paigaldati kraavist 15 ja 40m kaugusele transektijoonetele (10, 20, 30 ja 40 cm sügavusele) aastaringsetl töötavad mulla niiskuse ja temperatuuri registreerimise andurid.

Agali hall-lepiku katsealal mõõdeti nii raiesmikul kui kõrvalasuvast kasvavas lepikus staatiliste ja automaatkambritega kasvuhoonegaaside voogusid. Staatilise kambri meetodi iseloomustus on esitatud eespool. Aerodyne TILDAS kvant-kaskaadlaseri süsteemi abil, mis oli multiplekseri abil ühendatud 12 automaatkambri (6 kambrit raiesmikul, 6 kasvavas lepikus), määrati CH<sub>4</sub> ja N<sub>2</sub>O vood (kokku igas kambri 20 korda ööpäevas).

2016.a. suvel on täiendava uuringu käigus kavast põhialadel *eddy covariance* seadmetega varustatud mobiilse masti abil mõõta 4-6 nädala pikkuse mõõtmisesiooni vältel CO<sub>2</sub> voog LiCori analüsaatoriga, CH<sub>4</sub> ja N<sub>2</sub>O voog aga Aerodyne TILDAS kvant-kaskaadlaseriga.

### Mulla mikroorganismide metagenoomiline ning denitrifikatsiooni ja metanogeneesi funktsionaalsete geenide analüüs

Mullaproovid mullast elavate mikroobide koguhinnanguks ehk metagenoomiliseks analüüsiks (Illumina-põhise püroseqveneerimise, kvalitatiivse PCR ning järgneva bioinformaatilise modelleerimise alusel) ning denitrifikatsiooni ja metanogeneesi kontrollivate geenikoopiate arvukuse määramiseks koguti kõigi põhialade transektidelt 0-10cm sügavusest turbakihist novembris 2014.

Mullast määrati järgmised mikrobioloogilised näitajad: bakterite arvukus, arhede arvukus, denitrifikatsiooni protsessis N<sub>2</sub>O tootmist kontrollivaid *nir* (*nirS* ja *nirK*) tüüpi geene omavate bakterite arvukus, samuti N<sub>2</sub>O tarbimist (N<sub>2</sub>-ks muundamist) kontrollivaid *nosZ* (*nosZI* ja *nosZII*) tüüpi geene omavate bakterite arvukus. Täiendavalt on kavast säilitatud osaproovides määrata ka metanogeneesi (metaani tootmine) kontrollivat funktsionaalset geeni *mcrA* omavate arhede ning metanotroofsete (metaani tarbijate ehk CO<sub>2</sub>-ks muundajate) mikroorganismide arvukus, kes omavad *pmoA* ja *dsrAB* geene. Mikroorganismide koostus on olulise tähtsusega nii C kui N bilansi analüüsil. Lähemat informatsiooni kasutatud meetodite kohta leiab Preem et al (2012) ning Ligi et al (2014a,b; 2015) tööst.

### **FDEMI meetod kasvuhoonegaaside voogude kiireks suurepindalaliseks hindamiseks**

Kõigil kolmel põhialal rakendati 2015.a. oktoobris muudetava sageduspiirkonnaga elektromagnetilise induktsiooni (*Frequency Domain ElectroMagnetic Induction; FDEMI*) meetodit esmakordselt turbamuldades kasvuhoonegaaside voogude hindamiseks (joonis 7). GPS-iga ühendatud elektromagnetilisel induktsioonivool töötav seade võimaldab kiiresti määrata elektrijuhtivust ja -takistust kuni 3 m paksuses pinnaseprofiilis. Saadud elektrijuhtivuse välja karakteristikuid korreleeriti pinnase füüsikalise-keemiliste omadustega (turbalasuundi kuivainesisaldus ja lagunemisaste) ning kambrites mõõdetud kasvuhoonegaaside voogudega. Seni ainus teadaolev analoogne eksperiment teostati Itaalias mineraalmuldadest CO<sub>2</sub> emissiooni hindamiseks (Lardo et al 2016).



Joonis 7. FDEMI meetod kasvuhoonegaaside (KHG) voogude kiireks suurepindalaliseks määramiseks. Turbamuldade ning atmosfääri vaheliste KHG voogudega seostatakse FDEMI abil mõõdetud elektrijuhtivust teadaolevalt esmakordselt.

## Tulemused

### **Kõdusoometsade biomass, tootmine, biomassis C ja N sidumine, maapealne varisevoog ning N netomineralisatsioon**

Järgneva osa tulemused kajastavad kokkuvõtlikult Eesti Maaülikooli töörühma poolt tehtud uuringuid. Peenjuurte andmestiku ning alustaimestiku uuringute osas esitatakse täiendavad andmed, mis on saadud TÜ poolse uurimisrühma poolt.

### **Maapealse biomassi tootmine, süsiniku ja lämmastiku sidumine**

Järgnevates tabelites 1-9 esitatakse puistute biomassi ja tootmise olulisemad tulemused, mida hiljem kasutatakse C ja N bilansside hindamisel.

### **Männikud**

Tabel 1. Männi katsealade takseerandmed mustika-kõdusoo (MO) kasvukohatüübis

Kv ja er.	Vanus	N tk/ha	H, m	D1,3 cm	G m <sup>2</sup> /ha	M m <sup>3</sup> /ha	Bon	KKt
Js 66-37	110	820	24	25	38,9	198	II	MO
Js 95-2	90	1020	20	19	34,3	146	III	MO
Js 150-3*	65	620	23	22	20,1	103	I	MO

\* põhiala

Tabel 2. Maapealne biomass ja selles akumulunud süsinik (C) männikutes

Kv ja er.	Vanus	Tüved	Oksad	1a. võrsed	Okkad	Biomass kokku	Akumul. C
		t ha <sup>-1</sup>					
JS 66-37	110	199,0	12,5	1,36	5,65	218,5	109,3
JS 95-2	90	155,4	9,2	0,85	3,95	169,4	84,7
JS 150-3*	65	103,6	5,5	0,34	2,81	112,3	56,1

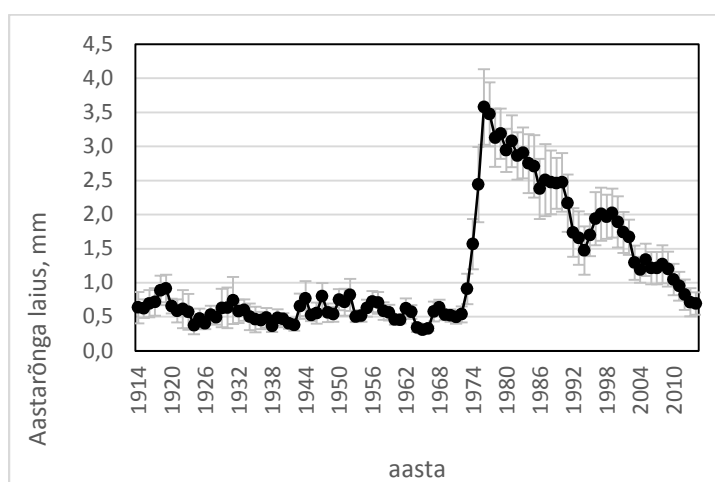
\* põhiala

Tabel 3. Männipuistute maapealse osa aastane tootmine ning selles seotud süsinik (C) ning lämmastik (N)

Kv ja er.	Vanus	Tüve- puit t ha <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup>	Koore %	Tüved	Oksad	Võrsed	Okkad	<b>Kokku</b>	Seotud C	Seotud N kg ha <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup>
				t ha <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup>						
JS 66-37	110	3,1	4,55	3,24	0,20	1,36	3,25	<b>8,05</b>	4,03	54,5
JS 95-2	90	1,6	5,91	1,69	0,10	0,85	3,00	<b>5,64</b>	2,82	45,8
JS 150-3*	65	2,6	5,02	2,70	0,15	0,34	1,46	<b>4,65</b>	2,33	22,9

\* põhiala

Kuivenduse mõju männikute juurdekasvule on ilmne, kahe katseala (nn. lisaalad) mudelpuude radiaaljuurdekasvude dünaamika (joonis 8) näitab mändide radiaaljuurdekasvu olulist suurenemist kuivendamise järgsel perioodil vahetult peale 1970. aastat.



Joonis 8. Mudelpuude tüve radiaaljuurdekasvude dünaamika kuivendatud mustika-kõdusoo männikus. Esitatud aasta keskmine radiaaljuurdekasv ja selle standardviga, n=7

Märkimisväärne on aga ka radiaaljuurdekasvude kahanemine peale maksimumi saavutamist. Käesolevaks ajaks on see jõudnud samale tasemele kui enne kuivendamist, mis on puude kasvukõverast tulenev efekt aga teatud osa on siin etendanud ka süsiniku ja toitainete (lämmastiku) kadu kuivendamise tagajärjel.

### Kuusikud

Tabel 4. Kuuse katsealade takseerandmed jänesekapsa-kõdusoo (JO) kasvukohatüübis

Kv ja er.	Vanus	N tk/ha	H, m	D1,3 cm	G m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup>	M m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	Bon	KKt
Js 140-6*	55	942	17	18,4	25	208	II	JO
Js 134-9	58	1455	18	16,7	32,1	267	II	JO
Js 284-16	55	1225	18	15,6	23,4	213	II	JO

\* põhiala



Tabel 5. Kuusikute maapealne biomass ja selles akumulatsioon süsinik

Kv ja er.	Vanus	Tüved	Oksad	1a. võrsed	Okkad	Biomass	Akumulatsioon C
		t ha <sup>-1</sup>					
Js 140-6*	55	104,7	13,8	1,8	10,1	130,6	65,3
Js 134-9	58	135,0	17,4	1,1	11,1	164,6	82,3
Js 284-16	55	103,2	5,6	0,4	4,9	114,2	57,1

\* põhiala

Tabel 6. Kuusepuistute maapealse osa aastane tootmine ja selles seotud süsinik (C) ning lämmastik (N)

Kv ja er.	Vanus	Tüve- puu	Koore %	Tüved	Oksad	Võrsed	Okkad	Kokku	Seotud C	Seotud N
		t ha <sup>-1</sup>								kg ha <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup>
Js140-6*	55	7,1	8,1	7,7	1,0	1,8	5,3	<b>15,8</b>	7,9	<b>99,9</b>
Js134-9	58	4,8	9,4	5,3	0,7	1,1	4,6	<b>11,6</b>	5,8	<b>78,0</b>
Js284-16	55	4,0	7,8	4,3	0,2	0,4	1,9	<b>6,6</b>	3,4	<b>33,0</b>

\* põhiala

### Kaasikud

Tabel 7. Sookase katsealade takseerandmed jänesekapsa-kõdusoo kasvukohatüübis

Kv ja er.	Vanus	N tk/ha	H, m	D1,3 cm	G m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup>	M m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	Bon
Js 107-1	38	1425	19	14	21,9	190	I
Js 191-4*	30	1660	15	14	24,5	193	I
Js 124-3	38	1700	15	12	18,8	128	II

\*põhiala

Tabel 8. Sookaasikute maapealne biomass ja selles akumulatsioon süsinik

Kv ja er.	Vanus	Tüved	Oksad	1a. võrsed	Biomass kokku	Seotud C
		t ha <sup>-1</sup>				
Js 107-1	38	102,6	5,6	0,3	108,5	54,3
Js 191-4 *	30	103,7	13,7	1,2	118,6	59,3
Js 124-3	38	64,3	11,2	0,8	76,3	38,2

\*põhiala

Tabel 9. Sookaasikute maapealse osa aastane tootmine ja selles seotud süsinik (C) ning lämmastik (N)

Kv ja er.	Vanus	Tüvepuu					Kokku prod.	Seotud C	Seotud N
		Tüved	Oksad	Võrsed	Lehed				
t ha <sup>-1</sup>								kg ha <sup>-1</sup>	
Js107-1	38	5,4	6,0	0,3	0,3	3,5	<b>10,1</b>	5,05	98,4
Js191-4*	30	4,5	4,9	0,4	1,2	3,6	<b>10,1</b>	5,05	110,5
Js124-3	38	3,1	3,7	0,8	0,8	3,4	<b>8,7</b>	4,35	103,2

\*põhiala

## Maapealne varisevoog

Maapealse varisevoogu mõõtmise tulemused uuritud metsade põhialadel on järgnevad.

### Männik

Aastane (aprill 2015 – aprill 2016) okkavarise kogus männikus oli 2,3 t ha<sup>-1</sup> ja sellest ca 70% varises perioodil september – november. Kogu varise aastane voog oli 3,2 t ha<sup>-1</sup> (lisanduvad oksad ja nn “muu” varis: käbid, kooretükid jne; kokku 0,9 t ha<sup>-1</sup>). Okkavarise keskmine N sisaldus oli 0,34% ja C sisaldus 52,3%; okkavarisega jõudis aastas mulda 7,7 kg N ha<sup>-1</sup> ja 1,20 t C ha<sup>-1</sup>.

### Kuusik

Aastane (aprill 2015 – aprill 2016) okkavarise kogus kuusikus oli 2,4 t ha<sup>-1</sup>, intensiivsem varisemine toimus oktoobris-novembris. Kogu varise aastane voog oli 4,97 t ha<sup>-1</sup> (lisandub okste jm varis, kokku 2,57 t ha<sup>-1</sup>). Okkavarise keskmine N sisaldus oli 0,80% ja C sisaldus 47,2%. Läbi okkavarise jõudis aasta jooksul mulda 19,3 kg N ha<sup>-1</sup> ja 1,13 t C ha<sup>-1</sup>.

### Kaasik

Kaasikus oli kogu aastase varisevoogu hulk 3,9 t ha<sup>-1</sup>, sellest lehevaris moodustas 3,4 t ha<sup>-1</sup>. Lehevarise keskmine N ja C sisaldus oli vastavalt 1,1% ja 49,6%. Läbi lehevarise jõudis aasta jooksul mulda 37,4 kg N ha<sup>-1</sup> ja 1,63 t C ha<sup>-1</sup>.

## Alustaimestik

Sookaasiku põhialal oli rohttaimede maapealse osa biomass 0,4 t ha<sup>-1</sup> ning maa-aluse osa biomass 0,16 t ha<sup>-1</sup>. Rohttaimede biomass on võrdne nende produktiooniga. Rohttaimede maapealse osa keskmine N sisaldus oli 2,87% ja C sisaldus 43,3%, maa-aluses osas olid vastavad näitajad 1,98% ning 46,4%. Alustaimestiku aastases produktioonis (maapealne+maa-alune osa) seoti lämmastiku kokku 14,7 kg N ha<sup>-1</sup> ja süsinikku 247 kg ha<sup>-1</sup>.

## Peenjuurte biomass ja produktioon

Sookaasikute, kuusiku ja männiku põhialade puude peenjuurte biomassi ja produktiooni määramise tulemused on esitatud tabelis 10.

Tabel 10. Puude peenjuurte biomass ja produktioon sookaasikutes

Puistu	Biomass (t ha <sup>-1</sup> )					Produktioon (t ha <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup> )		Käibe kiirus (a <sup>-1</sup> )	Eluiga (a)	C voog mulda (t ha <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup> )
	Sügavuskiht (cm)					Sügavuskiht (cm)				
	0-10	10-20	20-30	30-40	0-40	0-20	0-40			
Kase põhi-ala	0,88	0,28	0,20	0,05	<b>1,42</b>	2,33	<b>2,42</b>	1,71	0,58	1,19
Kase 1. ala	1,01	0,23	0,06	0,18	<b>1,48</b>	2,60	<b>3,02</b>	2,04	0,49	1,48
	Sügavuskiht (cm) kuusikutes ja männikutes					Sügavuskiht (cm)				
	<i>O<sub>L+F</sub></i>	0-10	10-30	30-50	0-40		0-40			
Kuuse põhi-ala	0,90	0,98	0,98	1,06	<b>3,17</b>		<b>4,52</b>	1,43	0,70	2,26
Männi põhi-ala	1,39	0,75	0,39	1,18	<b>2,60</b>		<b>2,98</b>	1,18	0,85	1,49

## Lämmastiku netomineralisatsioon

Üldjoontes on kõikides uuritud puistutes sarnane aastane NNM intensiivsuse dünaamika. Kuid nii aastase summaarse NNM voo kui ka  $\text{NO}_3\text{-N}$  ja  $\text{NH}_4\text{-N}$  osakaal on männikus kahest ülejäänud puistust erinev. Kui kaasikus ja kuusikus moodustas peamise osa NNM-ist nitrifikatsioon, siis männikus domineerib ammonifikatsioon (tabel 11). See on seletatav erinevate mullatüüpidega: nii kuusik, kui kaasik kasvavad jänesekapsa kõdusoo, mis on tekkinud madal soo turvasmuldade kuivendamisel. Männik kasvab mustika-kõdusoo kasvukohatüübis, mis on tekkinud õhukese siirdesoomulla kuivendamisel. Mulla pH ning C:N suhe on peamised faktorid, mis mõjutavad nimetatud protsesside osakaalu. Aastane NNM voog ja puistu maapealse osa aastane lämmastikunõudlus on samas suurusjärgus (Tabelid 3, 6, 9, 10).

Tabel 11. Aastane lämmastiku netomineralisatsiooni summaarne voog uuritud puistutes

Puistu	Nitrifikatsioon	Ammonifikatsioon	Kokku mineraliseerunud
	kg ha <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup>		
Männik	-0,1	17,3	17,2
Kuusik	93,0	5,0	98,0
Kaasik	131,1	-1,8	129,3

Järgnevad joonised 9-11 esitavad lämmastiku netomineralisatsiooni eksperimendi tulemused uuritud kõdusoometsades.

\*Joonis ei kuulu avaldamisele. Joonisega tutvumiseks võtta ühendust Ülo Manderi või Veiko Uriga\*

Joonis 9. Lämmastiku netomineralisatsiooni aastane dünaamika mustika-kõdusoo männikus.

\*Joonis ei kuulu avaldamisele. Joonisega tutvumiseks võtta ühendust Ülo Manderi või Veiko Uriga\*

Joonis 10. Lämmastiku netomineralisatsiooni aastane dünaamika jänesekapsa-kõdusoo kuusikus.

\*Joonis ei kuulu avaldamisele. Joonisega tutvumiseks võtta ühendust Ülo Manderi või Veiko Uriga\*

Joonis 11. Lämmastiku netomineralisatsiooni aastane dünaamika jänesekapsa-kõdusoo kaasikus.

## Mulla keemilised parameetrid ning neid määravad tegurid

Kaks peamist muldade keemilist koostist määravad tegurit, mis valiti juba proovialade paigutusega, olid uurimisalade valdav puuliik (harilik mänd, harilik kuusk ja sookask) ning kaugus kuivenduskraavist. Puuliigi mõju oli peakomponentide analüüsi (PCA) alusel selgesti eristuv, esimene telg, mis iseloomustab peamiselt toitainete sisaldust (lahustuva orgaanilise aine DOC vastaspoolsuse taustal), kirjeldas 48,3 % võimalikust varieeruvusest, mis on suhteliselt hea tulemu (joonis 12).

\*Joonis ei kuulu avaldamisele. Joonisega tutvumiseks võtta ühendust Ülo Manderi või Veiko Uriga\*

Joonis 12. Puuliigi mõju mulla keemilistele näitajatele peakomponentide analüüsi (PCA) alusel. Puuliigi poolt kirjeldatud mulla keemiliste parameetrite hajuvus on 24,5%, PCA esimene ja teine telg kirjeldavad vastavalt 48,3 ja 18,3%.

Ka kuivenduskraavist kauguse alusel oli PCA analüüsil teatav eristumine märgatav, ehkki 5 ja 15 meetri kaugusel kogutud proovid praktiliselt ei erinenud. Silma torkab sulfaatiooni tugev seos esimese teljega, mis tõenäoliselt iseloomustab redoks-potentsiaali (anaeroobsuse) gradienti (joonis 13). Teiste mulla keemiliste parameetrite puhul selget kauguset sõltuvust ei ilmnenud. Pühjuseks on kaasiku põhiala puhul kopratammi paisutav mõju, mis 2015. Aastast alates veerežiimi mõjutab aga ka fakt et kuivendatud turbalasundi füüsikalise-keemilised omadused varieeruvad isegi väikese vakatseala ulatuses. See on hästi jälgitav ka FDEMI meetodi rakendamisel.

\*Joonis ei kuulu avaldamisele. Joonisega tutvumiseks võtta ühendust Ülo Manderi või Veiko Uriga\*

Joonis 13. Kuivenduskraavist kauguse mõju mulla keemiliste näitajatele peakomponentide analüüsi (PCA) alusel. Kraavist kauguse poolt kirjeldatud mulla keemiliste parameetrite hajuvus on 2,4%, PCA esimene ja teine telg kirjeldavad vastavalt 48,3 ja 18,3%.

### **Kasvuhoonegaaside emissioon kõdusoometsades**

Üldiselt võib öelda, kõigi kolme kasvuhoonegaasi lenduise/sidumise ajaline dünaamika on väga sarnane paljudes teistes ökosüsteemiuringutes saadud tulemustele. Süsihappegaasi käik (joonised 14 ja 17) järgib väga selgelt mullatemperatuuri aastast dünaamikat, kusjuures kaasikutes on oluliselt kõrgem mullahingamise intensiivsus (CO<sub>2</sub> emissioon) kui männikutes ja kuusikutes (joonis 21A). Seejuures ei erine kuusikute ja männikute CO<sub>2</sub> emissioon Kruskal-Willise testi alusel teineteisest oluliselt.

\*Joonis ei kuulu avaldamisele. Joonisega tutvumiseks võtta ühendust Ülo Manderi või Veiko Uriga\*

Joonis 14. Süsinikdioksiidi (CO<sub>2</sub>) emissiooni (ökosüsteemi hingamise) sesoonne dünaamika keskmistatuna üle kõigi uurimisalade.

Metaanivoogude aastane dünaamika (joonised 15 ja 18) järgis samuti sesoonset rütmi, kusjuures, kui välja arvata üksikud emissiooni-piigid kaasikutes suve- ja kevadperioodil (ilmselt oli tegemist koprtammi mõjuga), näitasid kõigi uurimisalade turbamullad nõrka metaani tarbimist (oksüdeerimist), mis on tüüpiline kuivendatud soodele. Seejuures eristusid teistest oluliselt kuusikute mullad, kus sidumine oli suurem (joonis 21B). Metaani sesoonne dünaamika ei sültu mitte niivõrd pinnas etemperatuurist kui sesoonsetest niiskusesialduse muutustest.

\*Joonis ei kuulu avaldamisele. Joonisega tutvumiseks võtta ühendust Ülo Manderi või Veiko Uriga\*

Joonis 15. Metaani (CH<sub>4</sub>) voo sesoonne dünaamika keskmistatuna üle kõigi uurimisalade.

Naerugaasi lendumise dünaamika oli sellele gaasile küllaltki tüüpiline, näidates vähest või üldse mitte sõltuvust sesoonsetest teguritest (joonised 16 ja 19). Üsna tüüpiline on ka see, et kuusikutes oli emissioon oluliselt suurem just talvel ja sügisel. Siiski oli selgelt suurim lendumine kaasikutes, kusjuures maksimumväärtused ulatusi rekordiliste väärtusteni (kuni 1,442 mg N<sub>2</sub>O-N m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> (joonised 19 ja 21C), mis ületab isegi troopika ja lähistroopika kuivendatud turbamuldadel mõõdetud väärtusi. Selgelt väiksem ja üldiselt väga madal oli N<sub>2</sub>O emissioon männikutes (joonis 21C).

\*Joonis ei kuulu avaldamisele. Joonisega tutvumiseks võtta ühendust Ülo Manderi või Veiko Uriga\*

Joonis 16. Naerugaasi (N<sub>2</sub>O) voo sesoonne dünaamika keskmistatuna üle kõigi uurimisalade.

\*Joonis ei kuulu avaldamisele. Joonisega tutvumiseks võtta ühendust Ülo Manderi või Veiko Uriga\*

Joonis 17. Uuritud kõdusoometsade süsinikdioksiidi (CO<sub>2</sub>) emissiooni (ökosüsteemi hingamise) mediaani, 25% ja 75% kvartiilide ning miinimum- ja maksimumväärtuste sesoonne dünaamika. Eraldi on tähistatud skaalast välja ulatuvate voogude maksimaalsed väärtused.

\*Joonis ei kuulu avaldamisele. Joonisega tutvumiseks võtta ühendust Ülo Manderi või Veiko Uriga\*

Joonis 18. Uuritud kõdusoometsade metaanivoogude mediaani, 25% ja 75% kvartiilide ning miinimum- ja maksimumväärtuste sesoonne dünaamika. Eraldi on tähistatud skaalast välja ulatuvate voogude maksimaalsed väärtused.

\*Joonis ei kuulu avaldamisele. Joonisega tutvumiseks võtta ühendust Ülo Manderi või Veiko Uriga\*

Joonis 19. Uuritud kõdusoometsade naerugaasivoogude mediaani, 25% ja 75% kvartiilide ning miinimum- ja maksimumväärtuste sesoonne dünaamika. Eraldi on tähistatud skaalast välja ulatuvate voogude maksimaalsed väärtused.

Saadud tulemused on üsnagi eeldatavad kuivendatud orgaaniliste muldade kohta: mullahingamise (CO<sub>2</sub> emissiooni) väärtused osutusid kõrgeteks (0 – 550 mg CO<sub>2</sub>-C m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>), CH<sub>4</sub> voog oli nõrk (-76 kuni 320 µg CH<sub>4</sub>-C m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>) ning N<sub>2</sub>O emissiooni väärtused kõrged (-1 kuni 760 µg N<sub>2</sub>O-N m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>). Võrreldes neid tulemusi vastavate looduslike soode voogudega võib öelda, et CO<sub>2</sub> emissioon on kuivendatud soodes kuni 120 korda kõrgem, CH<sub>4</sub> voog 2-400 korda madalam ning N<sub>2</sub>O voog kuni 400 korda kõrgem (joonis 21). Aastakeskmise N<sub>2</sub>O voog oli kõdusookaasikutel 3,1 kg N<sub>2</sub>O-N ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>, mis on suhteliselt kõrge, kuid tavaline kuivendaud soometsades.

\*Joonis ei kuulu avaldamisele. Joonisega tutvumiseks võtta ühendust Ülo Manderi või Veiko Uriga\*

Joonis 21. Süsihappegaasi (A), metaani (B) ja naerugaasi (C) voogude keskmised, mediaani, 25% ja 75% kvartiilide ning miinimum- ja maksimumväärtused uuritud kõdusoometsades. Numbrid tähistavad keskmisi (normaalne) ja mediaani väärtusi (kursiivis), väikesed tähed olulisi erinevusi (Kruskal-Wallis test, p<0.05) metsatüüpide vahel. Roheline joon tähistab vastavate voogude keskmisi väärtusi looduslikes (lähte)soodes. Eraldi on tähistatud skaalast välja ulatuvate voogude maksimaalsed väärtused.

### Süsiniku bilanss uuritud kõdusoometsades

Võttes kokku aastakeskmise produktsiooni ja keskmised C sisaldused puistu ja alustaimestiku maapeelses osas, kõigis juurtes ning aastakeskmised kasvuhoonegaaside vood (arvestades kambrite abil mõõdetud summarstest ökosüsteemi hingamisest maha juurte hingamise, ehk võttes arvesse vaid mulla mikroobse (heterotroofse) hingamise, mis moodustab orgaanilistel muldadel kasvavates metsades ca 65% ökosüsteemi maa-aluse osa hingamisest (Berggren Kleja et al., 2008; Uri et al., 2017), võime väita, et uuritud kõdusookaasikutel ja kõdusoomännikutel on selgelt kliima jahendajad, sidudes keskmiselt vastavalt -11,65±3,27 ja -8,61±1,56 t CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> (joonis 22).

\*Joonis ei kuulu avaldamisele. Joonisega tutvumiseks võtta ühendust Ülo Manderi või Veiko Uriga\*

Joonis 22. Süsihappegaasi bilanss uuritud kõdusoometsades. Näidatud on voogude keskmised ja standardvea väärtused. Punasega on tähistatud atmosfääri lenduvad vood, sinisega atmosfäärist seotud CO<sub>2</sub>. Kõik vood on arvutatud CO<sub>2</sub> ühikuteks. CH<sub>4</sub> ja N<sub>2</sub>O puhul kasutati IPCC (2013) kiirgusliku mõju tegureid vastavalt 34 ning 298.

Kõdusookaasikutest olid kaks prooviala süsiniku emiteerijad (esimesel ja kolmandal proovialal keskmiselt vastavalt 7,32 ja 8,40 t CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>). Teisel uurimisalal (vaata proovialade paigutus joonisel 1) oli aga tegemist süsiniku aastakeskmise sidumisega (4,78 t CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>). Tänu

summaarse bilansi (globaalse soojenemise potentsiaali) suurele varieerumisele erinevatel proovialadel, võib väita, et keskmiselt on kõdusookaasikud süsiniku-neutraalsed, emiteerides atmosfääri keskmiselt  $3,65 \pm 4,25 \text{ t CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  (joonis 22). Kuusikute kõrge produktsioon ( $7,7 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ) kompenseerib ka suhteliselt kõrged kasvuhoonegaaside vood. Kõigis uuritud kõdusoometsades oli kõigist KHG-dest ülekaalukalt suurima osakaaluga  $\text{CO}_2$  emissioon, kusjuures  $\text{N}_2\text{O}$  vood moodustavad kuusikutes, kaasikutes ja männikutes vastavalt 12,7, 8,0 ja 4,8 % KHGde globaalse soojenemise potentsiaalid (joonis 22). Metaani osakaal üldises süsinikubilansis oli ootuspäraselt madal muutudes keskmiselt -0,15st männikutes kuni -0,04 t  $\text{CO}_2\text{-eq ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  kaasikutes (joonis 22).

Tabel 12. Kõdusoometsade uurimisalade produktsioon, kasvuhoonegaaside emissioonid, metsaökosüsteemi ja atmosfääri vaheline CO<sub>2</sub> bilanss (NEE = *net ecosystem exchange*) ning summaarne globaalse soojenemise potentsiaal (SUM GWP (*global warming potential*)).

Nr. kaardil (joon . 1)	Kv. ja er.	Va-nus	Puistu maapealne osa										Puistu maa-alune osa						Seotud CO <sub>2</sub> maa peal ja all	Kogu CO <sub>2</sub> hinh-gamine	Hete-ro-troof-ne CO <sub>2</sub> hinh-gamine	NEE	CH <sub>4</sub> -CO <sub>2</sub> -eq	N <sub>2</sub> O-CO <sub>2</sub> -eq	SUM GWP						
			Produktsioon					Seotud süsinik puude maapealses osas					Seotud süsinik alus-taimestiku maapealses osas					Produktsioon								Seotud maa all					
			Tüve-puit	Koor	Tü-ved	Ok-sad	Võr-sed	Ok-kad	Kok-ku	C	CO <sub>2</sub>	C	CO <sub>2</sub>	C	CO <sub>2</sub>	Alus-tai-mes-tiku juu-red	Kok-ku	C	CO <sub>2</sub>	C	CO <sub>2</sub>	C	CO <sub>2</sub>	C	CO <sub>2</sub>	C	CO <sub>2</sub>	C	CO <sub>2</sub>	C	CO <sub>2</sub>
	a		t C ha <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup>	%	t C ha <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup>					t CO <sub>2</sub> ha <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup>		t C ha <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup>		t CO <sub>2</sub> ha <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup>		t C ha <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup>		t C ha <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup>				t CO <sub>2</sub> ha <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup>									
<b>Männikud</b>																															
2	JS 66-37	110	3,1	4,55	3,24	0,2	1,36	3,25	8,05	4,03	14,78	0,8	2,93	3,0	0,96	1,5	5,46	2,73	10,0	7,6	27,72	23,29	15,14	12,6	-0,205	1,06	11,73				
3	JS 95-2	90	1,6	5,91	1,69	0,1	0,85	3	5,64	2,82	10,34	0,8	2,93	3,0	0,53	1,5	5,03	2,51	9,22	6,1	22,49	22,37	14,54	7,95	-0,16	1,07	7,04				
1(põhi-ala)	JS 150-3	65	2,6	5,02	2,7	0,15	0,34	1,46	4,65	2,33	8,54	0,8	2,93	2,98	0,64	1,61	5,23	2,61	9,58	5,7	21,06	21,66	14,08	6,98	-0,085	0,00	7,07				
<b>Keskmine</b>											<b>11,22</b>	<b>2,93</b>					<b>9,60</b>					<b>14,59</b>	<b>-0,15</b>	<b>0,71</b>	<b>8,61</b>						
<b>St.viga</b>											<b>1,85</b>	<b>0,00</b>					<b>0,23</b>					<b>0,31</b>	<b>0,04</b>	<b>0,36</b>	<b>1,56</b>						
<b>Kuusikud</b>																															
2	Js140-6	55	7,1	8,1	7,7	1	1,8	5,3	15,8	7,9	28,97	0,00	0,00	4,52	2,10	0,27	6,89	3,45	12,63	11,4	41,60	28,54	18,55	23,05	-0,11	6,48	16,68				
2	Js134-9	58	4,8	9,4	5,3	0,7	1,1	4,6	11,7	5,8	21,27	0,00	0,00	3,5	1,42	0,2	5,12	2,56	9,39	8,4	30,65	27,21	17,69	12,97	-0,1	0,3	12,77				
3	Js284-16	55	4	7,8	4,3	0,2	0,4	1,9	6,8	3,4	12,47	0,00	0,00	3,0	0,98	0,2	4,18	2,09	7,66	5,5	20,13	21,77	14,15	5,98	-0,06	0,53	5,51				
<b>Keskmine</b>											<b>20,90</b>	<b>0,00</b>					<b>9,89</b>					<b>16,80</b>	<b>-0,09</b>	<b>2,44</b>	<b>11,65</b>						
<b>St.viga</b>											<b>4,77</b>	<b>0,00</b>					<b>1,46</b>					<b>1,85</b>	<b>0,02</b>	<b>2,02</b>	<b>3,27</b>						
<b>Kaasikud</b>																															
1	Js107-1	38	5,4	11,1	6	0,3	0,3	3,5	7,8	3,9	14,3	0,2	0,73	2,5	1,20	0,1	3,80	1,90	6,97	6,00	22,01	43,3	28,15	-6,14	0,07	1,11	-7,32				
2(põhi-ala)	Js191-4	30	4,5	8,9	4,9	0,4	1,2	3,6	7,3	3,65	13,38	0,2	0,73	2,33	1,04	0,16	3,53	1,76	6,46	5,61	20,58	22,2	14,43	6,15	-0,07	1,44	4,78				
3	Js124-3	38	3,1	19,4	3,7	0,8	0,8	3,4	5,3	2,65	9,72	0,1	0,37	3,02	0,53	0,15	3,70	1,85	6,79	4,60	16,87	34,3	22,30	-5,42	-0,13	3,11	-8,40				
<b>Keskmine</b>											<b>12,47</b>	<b>0,61</b>					<b>6,74</b>					<b>21,62</b>	<b>-0,04</b>	<b>1,89</b>	<b>-3,65</b>						
<b>St.viga</b>											<b>1,40</b>	<b>0,12</b>					<b>0,15</b>					<b>3,97</b>	<b>0,06</b>	<b>0,62</b>	<b>4,23</b>						

Joonise 22 koostamiseks vajalikud andmed ja arvutused on esitatud tabelis 12. Kõdusoometsade lämmastikubilanss on koostamisel, sest täiendavad N<sub>2</sub> analüüsid veel toimuvad. Esialgsete tulemuste järgi moodustab aga N<sub>2</sub> gaasiliste lämmastikukadude valdava osa.

## Mulla mikroorganismide metagenoomiline ning denitrifikatsiooni funktsionaalsete geenide analüüs

C ja N ühendite muundumisprotsessid ning kasvuhoonegaaside lendumine metsa mullas on vahendatud mulla mikroorganismide poolt. Käesoleva uurimistöö eesmärgiks oli analüüsida kõdusoometsade mulla mikroobikoosluse struktuuri ja selle seost kasvuhoonegaaside CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> ja N<sub>2</sub>O lendumisega.

\*Joonis ei kuulu avaldamisele. Joonisega tutvumiseks võtta ühendust Ülo Manderi või Veiko Uriga\*

Joonis 23. Kuivenduskraavist kauguse mõju bakterite ja arhede arvukusele mullas erinevate puuliikidega aladel.

Mulla metagenoomika andmed on veel töötlemisel, seetõttu on esitatavad seosed veel esialgsed. Mulla bakterite ja arhede arvukus oli suurim männiku mullas (joonis 23), samuti oli seal suurim denitrifitseerivate mikroobide arv (joonis 24). Kauguse suurenedes kuivenduskraavist suurenes bakterite arvukus oluliselt männikus ja kuusikus, arhede arvukus sevastu näitas männikus vastupidist trendi (joonis 23).

\*Joonis ei kuulu avaldamisele. Joonisega tutvumiseks võtta ühendust Ülo Manderi või Veiko Uriga\*

Joonis 24. Kuivenduskraavist kauguse mõju eri tüüpi denitrifitseerivatele bakteritele mullas (*nir* geeni ja *nosZ* geeni arvukuse ning *nir/nosZ* suhte alusel) erinevate puuliikidega aladel.

\*Joonis ei kuulu avaldamisele. Joonisega tutvumiseks võtta ühendust Ülo Manderi või Veiko Uriga\*

Joonis 25. *nosZII* geeni omavate denitrifitseerijate ning N<sub>2</sub>O lendumise seos.

Täielikku denitrifikatsiooni rada omavate mikroobide osakaal (*nosZ* geeni arvukuse ja *nir/nosZ* suhte alusel) oli suurim kaasiku mullas (joonis 24). Kõdusoometsades mõõdetud CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> ja N<sub>2</sub>O emissioonide väärtused olid seotud mulla mikroobikoosluse struktuuriga erinevalt ja seosed olid sõltuvad puistu peapuuliigist. Männikus ja kuusikus oli N<sub>2</sub>O voo suurus peamiselt mõjutatud nitrifitseerivate arhede arvukusest pinnases. Kaasikus on peamiseks N<sub>2</sub>O voo allikaks mittetäielikku denitrifikatsioonirada omavad mikroobid (tugevaim positiivne korrelatsioon *nosZII* geeni arvukuse ning N<sub>2</sub>O emissiooni vahel, joonis 25). Kaasikus oli ka suurim N<sub>2</sub> emissioon (andmed on veel esialgsed), mis näitab, et seal on väga intensiivne lämmastukuringe – lenduvad nii ohutu N<sub>2</sub> kui ka ohtlik N<sub>2</sub>O. Seejuures ei suuda isegi suurem *nosZ* geeni arvukus tagada N<sub>2</sub>O täielikku muundamist N<sub>2</sub>-ks. CO<sub>2</sub> ja CH<sub>4</sub> vood kuusikus olid seotud bakterite ja arhede arvukusega mullas.

## **FDEMI meetodi rakendamine kasvuhoonegaaside voogude kiireks suurepindaliseks hindamiseks**

Käesolev peatükk esitleb esialgseid tulemusi uue ja perspektiivse meetodi rakendamisest kõdusoometsade uurimise projekti raames. Tulemused (joonised 27-31) on esitatud kaasiku põhiala kohta, kuid ka männiku põhialal on FDEMI vs kambrite voogude seosed, samuti on kõigi gaaside *kriging*-diagrammid sarnased kaasiku omadele .

\*Joonis ei kuulu avaldamisele. Joonisega tutvumiseks võtta ühendust Ülo Manderi või Veiko Uriga\*

Joonis 26. FDEMI vertikaalkomponendi (0-1,5 m sügavusel) elektrijuhtivuse (mS/m) *kriging*-diagramm kuusiku põhialal (sagedus 15 kHz). Must punktiirjoon tähistab FDEMI detektori



liikumist; mõõtmisalal ca 1200 punkti elektrijuhtivuse näidu ning GPS koordinaatidega; 0,65 ha ala mõõtmisaeg ca 2 tundi. Pilt on illustratiivne, põhiskeem kehtib ka männiku ja kaasiku kohta, kuid kuusiku tiheda juurestiku tõttu(?) on elektrijuhtivuse skaala nihkunud, mistõttu andmed ei ole eelneva töötlemiseta kasutatavad.

\*Joonis ei kuulu avaldamisele. Joonisega tutvumiseks võtta ühendust Ülo Manderi või Veiko Uriga\*

Joonis 27. *FDEMI* meetodil erineva sagedusega määratud elektrijuhtivuse vertikaalkomponendi varieeruvus kaasiku põhialal.

\*Joonis ei kuulu avaldamisele. Joonisega tutvumiseks võtta ühendust Ülo Manderi või Veiko Uriga\*

Joonis 28. *FDEMI* elektrijuhtivuse ning gaasiemissioonide korrelatsiooni alusel arvutatud CH<sub>4</sub> voo *kriging*-diagramm kaasiku põhialal. CH<sub>4</sub> voo ühikud: µg CH<sub>4</sub>-C m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>.

\*Joonis ei kuulu avaldamisele. Joonisega tutvumiseks võtta ühendust Ülo Manderi või Veiko Uriga\*

Joonis 29. *FDEMI* elektrijuhtivuse ning gaasiemissioonide korrelatsiooni alusel arvutatud N<sub>2</sub>O voo *kriging*-diagramm kaasiku põhialal. CH<sub>4</sub> voo ühikud: µg N<sub>2</sub>O-N m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>.

\*Joonis ei kuulu avaldamisele. Joonisega tutvumiseks võtta ühendust Ülo Manderi või Veiko Uriga\*

Joonis 30. *FDEMI* järgi arvutatud ning kambrites mõõdetud keskmiste kasvuhoonegaaside voogude korrelatsioon kaasikus.

Mõõdetud CH<sub>4</sub> vood ja ka CO<sub>2</sub> emissioonid korreleeruvad hästi *FDEMI* mudeli järgi arvutatud tulemustega, sejuures hindas mudel nii metaani sidumist kui ka CO<sub>2</sub> emissiooni veidi alla (joonis 30). Naerugaasi puhuloli korrelatsioon nõrge aga siiski usaldusväärne. Selle kinitusek on ka N<sub>2</sub>O voo loogiline sesoonne dünaamika, kus see kahaneb kõrgema niiskusesisalduse puhul juunis, augustis, oktoobris ja novembris (joonis 29). Metaani puhul on sesoonne dünaamika samuti ilmne ja loogiline (joonis 28). Tugev korrelatsioon ja loogilised sesoonse dünaamika spektrid viitavad, et *FDEMI* signaal korreleerub mitte niivõrd suhteliselt muutliku põhjaveetaseme sügavuse ja sellega seotud turba niiskusega, kuivõrd eeskätt püsivaate turba omadustega nagu lagunemisaste, tihedus, tuhasus ja kuivaine sisaldus. Viimstega seoste uurimiseks on täiendavad turbaproovid kogutud ja lähemal ajal need ka analüüsitakse.

\*Joonis ei kuulu avaldamisele. Joonisega tutvumiseks võtta ühendust Ülo Manderi või Veiko Uriga\*

Joonis 31. Kambrites mõõdetud CH<sub>4</sub> voo ning *FDEMI* elektrijuhtivuse seos kaasiku põhialal (2014-2015 andmed). *FDEMI* meetod näib eeskätt sobivat metaani sidumise hindamiseks kuivendatud turbamuldadel.

Tugev negatiivne korrelatsioon (p<0.001) *FDEMI* elektrijuhtivuse ning turbas metaani oksüdeerimisega näib viitavat sellele, et *FDEMI* meetod sobib eeskätt metaani sidumise hindamiseks kuivendatud turbamuldadel (joonis 31).

Täiendavad *FDEMI* uuringud kõrgema niiskusega turbamuldadel on kavas sellel suvel.

## Projektiga haakuvad doktori- ja magistritööd

Lõppenud projektiga on otseselt seotud põhitäitja **Gunnar Morozovi** doktoritöö „Süsinikuringe muudetud veerežiimiga metsades“, juh. prof. Veiko Uri. G. Morozov on 2. aasta metsanduse doktorant ja projekti raamest saadud tulemused on tema tulevases doktoritöös olulisel kohal.

Käesoleva aasta augustis jõuab kaitsmiseni teise põhitäitja; **Hardo Beckeri** doktoritöö „Metsamajandamise mõju süsiniku – ja lämmastikuvoogudele ning varudele erinevates metsaökosüsteemides“, juh. prof. Veiko Uri. RMK toetatud uurimisprojektil on olnud väga

oluline roll noore teadlase kujunemisel ja ka selles, et doktorant on jõudmas töö kaitsmiseni nominaalajal (nominaalajal doktoritöö kaitsmine on metsanduses üsna harv). Tänu projektile oli võimalus noori kraadiõppureid oluliselt toetada, mis võimaldas neil tõsiselt pühenduda uurimistöele.

Metoodilisest aspektist (süsiniku ja lämmastiku aineriinge taastatavates jääkturbasoodes ning manipuleeritava õhuniiskusega metsaökosüsteemis ja raiesmikel) haakusid projektiga ka **Järvi Järveoja** ning **Raili Torga** doktoritööd, mis kaitsti vastavalt 2015.a. novembris (Järveoja) ning 2016.a aprillis (Torga) ja Kaie Kriiska koostamisel olev doktoritöö:

**Järvi Järveoja** (2015) *Fluxes of greenhouse gases CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O from abandoned peat extraction areas: The impact of bioenergy crop cultivation and peatland restoration*. Tartu Ülikooli geograafiaosakond, juhendajad prof. Ülo Mander ja dr. Martin Maddison

**Raili Torga** (2016) *The effects of elevated humidity, extreme weather conditions and clear-cut on greenhouse gas emissions in fast growing deciduous forests*. TÜ geograafia osakond, juhendajad prof. Ülo Mander ja prof. Krista Lõhmus

**Kaie Kriiska** (2017) *Carbon store and turnover in Estonian forest soils*. Tartu Ülikooli geograafia osakond, juhendajad dr. Ivika Ostonen-Märtn ja dr. Jane Frey

Järvi Järveoja ja Raili Torga osalesid aktiivselt käesoleva projekti vältöödel ning andmete töötlemisel; Kaie Kriiska doktoritöö raames arendati peenjuureproduktiooni mõõtmise metoodikat analüüsides just töömahukuse vähendamise võimalusi.

Projekti täitmisel osalesid ka mitmed magistriastme üliõpilased ja projekti raames kaitsti järgmised magistritööd:

EMÜ-s metsanduse erialal:

**Heiki Möll** (2015) juhendajad Veiko Uri; Mats Varik, Biomassi tootmine ja süsiniku bilanss 40-aastasest sookaasikus (*Betula pubescens*) jänesekapsa-kõdusoo kasvukohatüübis, Eesti Maaülikool, juhendajad prof. Veiko Uri ja dr. Mats Varik

**Mihkel Agarmaa** (2015) Mustika-kõdusoo kasvukohatüübi männikute (*Pinus sylvestris* L.) maapealne biomass ja kuivenduse mõju puude jämeduskasvule, Eesti Maaülikool, juhendajad prof. Veiko Uri ja dr. Jürgen Aosaar

TÜ-s keskkonnatehnoloogia erialal:

**Helina Maanso** (2015) Kasvuhoonegaaside emissioon kõdusoometsadest. TÜ geograafia osakond, juhendaja dr. Martin Maddison

## Tartu Ülikooli töörühma finantsaruanne

**Töötasud** (koos maksudega) moodustasid 13974,22, seega oluliselt vähem kui kavandati. (66 000 €). Tingitud oli see hädavajalike sisseostetavate teenuste summa olulisest suurenemisest, samuti uurimiseadmete ja -tarvikute kõrgemast maksumusest. Niisiis tasuti projektis osalejate töötasud suurel määral teistest allikatest. Töötasu maksti kogu projekti vältel Alar Teemuski (gaas-kromatograafi töörezhiimi tagamise ja gaasianalüüside eest), ühe –kuni kahekordselt Jane Freyle ja Raili Torgale (end. Hansen) (välitöödel proovide kogumise eest), Ivika Ostonen-Märtnile (risosfääriuuringute eest), Marika Truule ja Jaak Truule (mulla mikrobioloogiliste analüüside eest) ning üliõpilastele Marta Arulale ja Kaarel Kukele juureproovide töötlemise eest.

**Ostetud teenuste** summa (47562,85 €) kujunes kavandatust (22000 €) üle kahe korra suuremaks, sest laboriteenuste hinnad on väga kõrged. Siia alla kuulusid mulla- ja taimeanalüüside ning veeanalüüside eest tasumine (EMÜ Taimebiokeemia laboris ning Eesti Keskkonnauuringute Keskuse (EKUK) Tartu laboris), samuti tasumine TÜ Illumina sekveneerimisteenuste eest.

**Materjalide ja tarvikute** kulud moodustasid 21802,81 € (kavandatud 17 296 €). Need olid enamasti laboritesse vajaminevad kemikaalid, gaas-kromatograafias kasutatavad gaasid, laboritarvikud, praimerikomplektid, välitööseadmed (portatiivsete veemõõduseadmete elektroodid ja lisaseadmed, automaatsed gaasimõõtmiste kambrid ja neid toetavad tarvikud, staatilised kambrid, varisekogujad).

**Muude kulude** summa (6660,12 €, kavandatud 10 000 €) alla kuuluvad erinevad kulumaterjalid, tarvikud ja töövahendid (kotid, teibid, markerid, saetarvikud, kontoritarbed, IT tarvikud jne.), samuti täiendavad kulutused uuringute läbiviimiseks.

**Lähetuskulud** käesoleva projekti kuludest ei tehtud. Rohkete välitööde (alade rekognos, mõõteseadmete installeerimine, proovide kogumine, mõõtmiskampaaniad) sõidukulud tasuti muudest allikatest.

13.-17. juulil 2014.a. Bayreuthis (Saksamaa) toimunud Rahvusvahelisel ökosüsteemide seirealasel konverentsil BIOGEOMON ning 18.-22. aprillil 2016.a. Viinis (Austria) toimunud EGU (*European Geosciences Union*) Kongressil tutvustati projekti tulemusi. Ka need kulud kaeti muudest vahenditest.

## Avaldatud, avaldamiseks esitatud ning ettevalmistuses olevad artiklid

- Aosaar, J., Mander, Ü., Varik, M., Becker, H., Morozov, G., Maddison, M., Uri, V. 2016. Biomass production and nutrient balance of naturally afforested silver birch (*Betula pendula* Roth.) stand with high bioenergy potential. Accepted in *Silva Fennica*.
- Becker, H., Uri, V., Aosaar, J., Varik, M., Mander, Ü., Soosaar, K., Hansen, R., Teemusk, A., Morozov, G., Kutti, S., Lõhmus, K. 2015. The effects of clear-cut on net nitrogen mineralization and nitrogen losses in a grey alder stand. *Ecological Engineering* 85, 237-246.
- Järveoja, J., Peichl, M., Maddison, M., Soosaar, K., Vellak, K., Karofeld, E., Teemusk, A., Mander, Ü. 2016. Impact of water table level on annual carbon and greenhouse gas balances of a restored peat extraction area. *Biogeosciences* 13, 2637-2651.
- Järveoja, J., Peichl, M., Maddison, M., Teemusk, A., Mander, Ü. 2016. Full carbon and greenhouse gas balances of fertilized and non-fertilized reed canary grass cultivations on an abandoned peat extraction area in a dry year. *Global Change Biology – Bioenergy* 8, 952-968.
- Torga, R., Mander, Ü., Soosaar, K., Kupper, P., Tullus, A., Rosenvald, K., Ostonen, I., Kutti, S., Jaagus, J., Sõber, J., Maddison, M., Lõhmus, K. 2016. Weather extremes, humidity manipulation, and tree species shape soil greenhouse gas emissions. Under review in *Journal of Environmental Quality*.
- Uri, V., Kukumägi, M., Aosaar, J., Varik, M., Becker, H., Morozov, G., Karoles, K. 2017. Carbon budgets for downy birch (*Betula pubescens* Ehrh.) chronosequent stands growing on drained swamp. Under review in *Ecological Engineering*.
- Clément, R., Maddison, M., Henine, H., Teemusk, A., Mander, Ü. 20XX. Estimation of greenhouse gas fluxes from organic soils using the Frequency Domain Electromagnetic Induction (FDEMI) method. In preparation.
- Maddison, M., Uri, V., Ostonen, I., Aosaar, J., Varik, M., Becker, H., Soosaar, K., Torga, R., Järveoja, J., Teemusk, A., Morozov, G., Lõhmus, K., Mander, Ü. 20XX. Carbon budget in full-drained peatland forests. In preparation.
- Mander, Ü., Maddison, M., Truu, M., Truu, J., Espenberg, M., Ligi, T., Soosaar, K., Teemusk, A., Uri, V. 20XX. Drained peatland forests are significant sources of nitrous oxide. In preparation.
- Mander, Ü., Maddison, M., Uri, V., Ostonen, I., Aosaar, J., Varik, M., Becker, H., Soosaar, K., Torga, R., Järveoja, J., Teemusk, A., Morozov, G., Lõhmus, K. 20XX. Nitrogen budget in full-drained peatland forests. In preparation.

## Aruandes kasutatud kirjandusallikad

- Adams, M.A., Polglase, P.J., Attiwill, M.P., Weston, C.J. 1989. In situ studies on nitrogen mineralization and uptake in forest soils: some comments on methodology. *Soil Biology and Biochemistry* 21(39), 423-429.
- Becker, H., Uri, V., Aosaar, J., Varik, M., Mander, Ü., Soosaar, K., Hansen, R., Teemusk, A., Morozov, G., Kutti, S., Lõhmus, K. 2015. The effects of clear-cut on net nitrogen mineralization and nitrogen losses in a grey alder stand. *Ecological Engineering* 85, 237-246.
- Berggren Kleja, D., Svensson, M., Majdi, H., Jansson, P.-E., Langvall, O., Bergkvist, B., Johansson, M.-B., Weslien, P., Truus, L., Lindroth, A., Ågren, G.I. 2008. Pools and fluxes of carbon in three Norway spruce ecosystem along a climatic gradient in Sweden. *Biogeochemistry* 89, 7-25
- Brunner, I., Bakker, M.R., Björk, R.G., Hirano, Y., Lukac, M., Aranda, X., Børja, I., Eldhuset, T.D., Helmissaari, H.S., Jourdan, C., Konôpka, B., López, B.C., Miguel Pérez, C., Persson, H., Ostonen, I. 2013. Fine-root turnover rates of European forests revisited: an analysis of data from sequential coring and ingrowth cores. *Plant and Soil* 362, 1, 357-372.
- Butterbach-Bahl, K., Willibald, G. and Papen, H. 1997. A new method for simultaneous measurements of N<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O emissions from intact soil cores. *Proceedings of 11th World Fertilizer Congress of CIEC*. Vol. 2, pp 618-624.
- Eno, C.F. 1960. Nitrate production in the field by incubating the soils in polyethylene bags. *Soil Science*

- Society of America Proceedings* 24, 277-79.
- Hart, S.C., Stark, J.M., Davidson, E.A., Firestone, M.K. 1994. Nitrogen mineralization, immobilization and nitrification. Methods of soil analyses, Part 2. Microbial and Biochemical Properties. *SSSA Book Series*, vol. 5. USA, pp. 985–1018.
- He, H.X., Jansson, P.-E., Svensson, M., Björklund, J., Tarvainen, L., Klemedtsson, L., Kasimir, Å. 2011. Forests on drained agricultural peatland are potentially large sources of greenhouse gases – insights from a full rotation period simulation. *Biogeosciences* 13, 2305-2318.
- Hirano, Y., Noguchi, K., Ohashi, M., Hishi, T., Makita, N., Fujii, S., Finér, L. 2009. A new method for placing and lifting root meshes for estimating fine root production in forest ecosystems. *Plant Root* 3, 26–31.
- Hutchinson, G.L., Livingston, G.P. 1993. Use of chamber systems to measure trace gas fluxes. In: *Agricultural Ecosystems Effects on Trace Gases and Global Climate Change*, L.A. Harper, A.R. Mosier, J.M. Duxbury, D.E. Rolston (eds.), *ASA Spec. Publ. 55. Am. Soc. Agron.* Madison, WI, pp. 1–55.
- IPCC 2013. Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Lardo, E., Arous, A., Palese, A.M., Nuzzo, V., Celano, G. 2016. Electromagnetic induction: A support tool for the evaluation of soil CO<sub>2</sub> emissions and soil organic carbon content in olive orchards under semi-arid conditions. *Geoderma* 264, A, 188-194.
- Ligi, T., Oopkaup, K., Truu, M., Preem, J.-K., Nõlvak, H., Mitsch, W.J., Mander, Ü. Truu, J. 2014a. Characterisation of bacterial communities in soil and sediment of a created riverine wetland complex using high-throughput 16S rRNA amplicon sequencing. *Ecological Engineering* 72, 56-66.
- Ligi, T., Truu, M., Truu, J., Nõlvak, H., Kaasik, A., Mitsch, W.J., Mander, Ü. 2014b. Effects of soil chemical characteristics and water regime on denitrification genes (*nirS*, *nirK*, and *nosZ*) abundances in a created riverine wetland complex. *Ecological Engineering* 72, 47-55.
- Ligi, T., Truu, M., Oopkaup, K., Nõlvak, H., Mander, Ü., Mitsch, W.J., Truu, J. 2015. Genetic potential of N<sub>2</sub> emission via denitrification and ANAMMOX from the soils and sediments of a created riverine treatment wetland complex. *Ecological Engineering* 80, 181-190.
- Lohila, A., Minkkinen, K., Aurela, M., Tuovinen, J.-P., Penttilä, T., Ojanen, O., Laurila, T. 2011. Greenhouse gas flux measurements in a forestry-drained peatland indicate a large carbon sink. *Biogeosciences* 8, 3203–3218.
- Lukac, M., Godbold, D.L. 2010. Fine root biomass and turnover in southern taiga estimated by root inclusion nets. *Plant and Soil* 331 (1-2), 505-513.
- Mander, Ü., Kuusemets, V., Lõhmus, K., Mäuring, T., Teiter, S., Augustin, J. 2003. Nitrous oxide, dinitrogen, and methane emission in a subsurface flow constructed wetland. *Water Science and Technology* 48(5), 135-142.
- Mander, Ü., Well, R., Weymann, D., Soosaar, K., Maddison, M., Kanal, A., Lõhmus, K., Truu, J. Augustin, J. Tournebize, J. 2014. Isotopologue ratios of N<sub>2</sub>O and N<sub>2</sub> measurements underpin the importance of denitrification in differently N-loaded riparian alder forests. *Environmental Science and Technology* 48, 20, 11910-11918.
- Preem, J.-K., Truu, J., Truu, M., Mander, Ü., Oopkaup, K., Lõhmus, K., Helmisaari, H.-S., Uri, V., Zobel, M. 2012. Bacterial community structure and its relationship to soil physico-chemical characteristics in alder stands with different management histories. *Ecological Engineering* 49, 10-17.
- Uri, V., Lõhmus, K., Kund, M., Tullus, H. 2008. The effect of land use on net nitrogen mineralization on abandoned agricultural land: silver birch stand versus grassland. *Forest Ecology and Management* 255, 226–233.
- Uri, V., Lõhmus, K., Tullus, H. 2003. Annual net nitrogen mineralization in a grey alder (*Alnus incana* (L.) Moench) plantation on abandoned agricultural land. *Forest Ecology and Management* 184, 167–176.
- Uri, V., Tullus, H., Lõhmus, K. 2002. Biomass production and nutrient accumulation in short-rotation grey alder (*Alnus incana* (L.) Moench) plantation on abandoned agricultural land. *Forest Ecology and Management* 161 (1–3), 169–179.
- Uri, V., Varik, M., Aosaar, J., Kanal, A., Kukumägi, M., Lõhmus, K. 2012. Biomass production and carbon sequestration in a fertile silver birch forest chronosequence. *Forest Ecology and Management* 267, 112-126.