

Tartu Ülikool

Loodus- ja täppisteaduste valdkond

Ökoloogia ja maateaduste instituut

Geograafia osakond

Bakalaureusetöö geograafias (12 EAP)

**Puutüvede N<sub>2</sub>O ja CH<sub>4</sub>-vood kuivendatud kõdusoo segametsast**

**Eliisa Lehtme**

Juhendaja: PhD Kaido Soosaar

MSc Reti Ranniku

Tartu 2021

## **Annotatsioon**

### **Puutüvede N<sub>2</sub>O ja CH<sub>4</sub> vood kõdusoo segametsast**

Boreaalsed metsad on olulised metaani (CH<sub>4</sub>) ja diämmastikoksiidi (N<sub>2</sub>O) allikad. On tehtud mitmeid uuringuid, et uurida nende kasvuhoonegaaside vooge mullast ja puutüvedelt. Selle töö eesmärk oli teada saada, millised on naerugaasi ja metaanivood hariliku kuuse ja kase puutüvedest. Mõõtmised teostati kuuselt ja kaselt Agali II uurimisjaamas viie kuu jooksul nädalase intervalliga. Mõõtmisteks kasutati suletud gaasikambri meetodit ja kolme erinevat kõrgust maapinnast (10 cm, 80 cm, 170 cm). Tulemustest selgus, et kuuse CH<sub>4</sub> vood varieerusid suuremas vahemikus (−0,363 kuni 1,957 μg C m<sup>−2</sup> h<sup>−1</sup>) kui kasel (−0,318 kuni 1,775 μg C m<sup>−2</sup> h<sup>−1</sup>), olles suuremad kasel. N<sub>2</sub>O vood varieerusid kuusel ja kasel vastavalt vahemikus −0,209 kuni 0,285 μg N m<sup>−2</sup> h<sup>−1</sup> ja −0,038 kuni 11,432 μg N m<sup>−2</sup> h<sup>−1</sup>. Töös viidi läbi ka profiili mõõtmised kolmel erineval kõrgusel ning tulemused näitasid, et N<sub>2</sub>O vood vähenevad kõrguse kasvades. Saadud tulemustest selgus ka, et kase N<sub>2</sub>O emissioonidel on sesoone trend, kuid kuuse N<sub>2</sub>O ja CH<sub>4</sub> vood olid väga madalad ja selge trend puudus.

Märksõnad: diämmastikoksiid, kasvuhoonegaasid, metaan, mets, mulla niiskus, mulla temperatuur, suletud kambri meetod, tüvevood

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

## **Abstract**

### **N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> fluxes from tree stems in deciduous mixed forest**

Boreal forests are important sources of CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O. Several studies have been carried out to investigate the fluxes of these greenhouse gases from soil and tree stems. The aim of this study is to find out how the stems of spruce (*Picea abies*) and birch (*Betula pubescens*) exchange N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> with the atmosphere. Measurements were examined from tree stems of birch and spruce at the Agali II Research Station at weekly intervals for five months. Sampling was done using the closed gas chamber method and there three different heights above the ground were used (10 cm, 80 cm, 170 cm). The results showed that CH<sub>4</sub> fluxes of spruce stems varied in a larger range (−0,363 to 1,957 μg C m<sup>−2</sup> h<sup>−1</sup>) than fluxes of birch stems (−0,318 to 1,775 μg C m<sup>−2</sup> h<sup>−1</sup>). CH<sub>4</sub> fluxes of birch were higher. The N<sub>2</sub>O fluxes of spruce stems varied between −0,209 and 0,285 μg N m<sup>−2</sup> h<sup>−1</sup> and fluxes of birch stems varied between −0,038 and 11,432 μg N m<sup>−2</sup> h<sup>−1</sup>. In addition, three different heights were compared and the results showed that N<sub>2</sub>O fluxes

decreased with increasing heights. The results showed that N<sub>2</sub>O emissions have a seasonal trend, but spruce N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> fluxes were very low so there is no clear trend.

Keywords: CH<sub>4</sub>, closed chamber method, forest, greenhouse gases, N<sub>2</sub>O, soil moisture, soil temperature, tree stem fluxes

CERCS kood: P510 – Physical geography, geomorphology, pedology, cartography, climatology

## SISUKORD

SISSEJUHATUS.....	5
1 TEOREETILINE ÜLEVAADE.....	7
1.1 Kasvuhoonegaasid ja nende olulisus .....	7
1.1.1 Metaan.....	7
1.1.2 Naerugaas .....	8
1.2 Boreaalsed metsad .....	8
1.2.1 Kasvuhoonegaaside mullavood.....	10
1.2.2 Puutüvede vood.....	11
2 ANDMED JA METOODIKA .....	13
2.1 Uurimisala kirjeldus .....	13
2.2 Tüvevoogude mõõtmine .....	14
2.3 Andmete kvaliteedi kontroll ja voogude arvutamine .....	15
2.4 Meteoroloogiliste parameetrite mõõtmised .....	16
2.5 Andmeanalüüs .....	16
3 TULEMUSED .....	17
3.1 Sesoonne varieeruvus .....	17
3.1.1 Metaanivood.....	17
3.1.2 Naerugaasi vood.....	18
3.2 Puutüve vertikaalsed vood.....	19
3.3 Tüvevoogude seos meteoroloogiliste parameetritega.....	22
4 ARUTELU.....	23
KOKKUVÕTE.....	27
SUMMARY .....	28
TÄNUAVALDUSED .....	30
KASUTATUD KIRJANDUS .....	31
LISAD .....	37

## SISSEJUHATUS

Globaalne kliimamuutus on tänapäeva üks olulisemaid keskkonnaprobleeme. Seda põhjustavad mitmete kasvahoonegaaside, näiteks süsinikdioksiidi ( $\text{CO}_2$ ), diämmastikoksiidi ehk naerugaasi ( $\text{N}_2\text{O}$ ) ja metaani ( $\text{CH}_4$ ), emissioonid, mis tulenevad peamiselt inimtegevusest (Li, 2007; Kijewska & Bluszczyk, 2016; Tian *et al.*, 2016). Intensiivistuv inimtegevus on suurel hulgal mõjutanud kasvahoonegaaside kontsentratsioone Maa kliimasüsteemis ning need on kasvanud viimased paarsada aastat (Yue & Gao, 2018). Lisaks antropogeensetele voogudele on olulised ka looduslikud vood. Metaani eraldub umbes kolmandikust ja naerugaasi umbes 60% maapealsetest ökosüsteemidest. See näitab, et ökosüsteemidel on oluline roll metaani ja naerugaasi lendumisel atmosfääri. (Machacova *et al.*, 2013) Kasvahoonegaaside emissioonide mõistmiseks on oluline teada ka mulla, taime ja atmosfääri vastastikmõjusid (Vargas & Barba, 2019).

Boreaalsed metsad on olulised naerugaasi ja metaanivoogude allikad (Machacova *et al.*, 2015; Pitz *et al.*, 2018), kuid mõlemat kasvahoonegaasi tekib rohkesti ka märgaladest (Wuebbles & Hayhoe, 2002; Bridgham *et al.*, 2013). Peamiselt leidub lämmastikku ja süsinikku viljakates kuivendatud turbamuldades (Becker *et al.*, 2018), mis on olulised naerugaasi ja metaani emissioonide allikad. Lisaks mullale emiteerivad ja seovad kasvahoonegaase ka puutüved. Puutüved on olulisteks kasvahoonegaaside allikateks ning seetõttu on puutüvedelt voogude ja nendega kaasnevate protsesside uurimine väga oluline. On teada, et puutüved vahetavad atmosfääriga süsinikdioksiidi, naerugaasi ja metaani. On tõestatud, et puutüved suudavad hoida ja ka emiteerida metaani, millel on kõrge kontsentratsioon (Vargas & Barba, 2019). Varasemates uuringutes on täheldatud, et mõne puuliigi metaanivood vähenevad kõrguse kasvades (Terazawa *et al.*, 2007; Barba *et al.*, 2019; Sjögersten *et al.*, 2020). Siiani on kõige vähem uuritud naerugaasi puutüvede vooge.

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärk on teada saada, millised on naerugaasi ja metaanivood erinevatest puuliikidest, täpsemalt kase ja kuuse puutüvedest. Tulenevalt töö eesmärgist otsiti vastuseid järgnevatele uurimisküsimustele:

1. Kuidas erinevad naerugaasi ja metaanivood kuuse ja kase puutüvedest?
2. Kui suured on puutüvede naerugaasi ja metaanivood talvisel perioodil? Milline on voogude sesoonsus?
3. Millised on naerugaasi ja metaanivood mõlema puuliigi puutüvedelt erinevatelt kõrgustelt maapinnast?

Lähtuvalt töö uurimisküsimustest püstitati järgnevad hüpoteesid:

1. Naerugaasi vood on kase puutüvelt suuremad kui kuuse puutüvelt.
2. Naerugaasi talvised puutüvede vood on sulamis-külmumisprotsessi ajal suuremad.
3. Metaani emiteerub kõige rohkem maapinna lähedalt ja kõrguse kasvades vood vähenevad.

Töö koosneb neljast peatükist, mis omakorda jagunevad alapeatükkideks. Esimeses peatükis antakse kirjanduslik ülevaade kasvuhoonegaasidest ja nende olulisusest kliima soojenemisel, boreaalsetest metsadest ja nende olulisusest, kasvuhoonegaaside voogudest mullas ja kasvuhoonegaaside puutüvede voogudest. Teine peatükk kirjeldab töö metoodikat, kus tuuakse välja uurimisala kirjeldus, mõõte- ja andmeanalüüsi meetodid. Kolmandas peatükis kirjeldatakse tulemusi ning neljandas peatükis diskuteeritakse tulemuste üle ja antakse tulemustele kirjanduslik toetus.

## 1 TEOREETILINE ÜLEVAADE

Selles peatükis antakse ülevaade kahest kasvuhoonegaasist (metaanist ja naerugaasist) ja nende olulisust kliimasüsteemis, boreaalsetest metsadest, kasvuhoonegaaside mulla- ja puutüvede voogudest.

### 1.1 Kasvuhoonegaasid ja nende olulisus

#### 1.1.1 Metaan

Metaan on Maa atmosfääris rohkesti leiduv gaas, mille atmosfääri lendumisel mängivad olulist rolli maapealsed ökosüsteemid (Alexe *et al.*, 2015). Metaani eraldub umbes kolmandikust maapealsetest ökosüsteemidest ja seda toodavad mikroorganismid metanogeneesi protsessi käigus mullas (Machacova *et al.*, 2013). Looduslikult tekib metaan hapnikuvaeses pinnases mikroobse tegevuse tagajärjel, mille järel metaan emiteerub (Vainio, 2019). Kõige suuremad metaani varud paiknevad märgaladel (Machacova *et al.*, 2013). Uuringute tulemused näitavad, et metaani kontsentratsioon on atmosfääris aastatega tõusnud (Cicerone & Oremland, 1988; Wuebbles & Hayhoe, 2002; Tian *et al.*, 2016), mis tekitab kliima soojenemisel kasvuhooneefekti (Crémière *et al.* 2016).

Metaani eraldub atmosfääri nii looduslikest kui ka antropogeensetest allikatest (Nisbet *et al.*, 2014). Kuna metaani allikad on mitmekesised ja neid on palju, siis mõjutavad emissioonide koguseid paljud tegurid, sealhulgas energiakasutus (Cicerone & Oremland, 1988), põllumajandus (Marañón *et al.*, 2011), inimeste populatsiooni jaotus ja kliima (Wuebbles & Hayhoe, 2002). Inimtekkelised metaani emissioonid on seotud enamasti põllumajanduse (Marañón *et al.*, 2011) ja jäätmetega, näiteks jäätmete lagunemine (Singh *et al.*, 2017), riisipõldude harimine (Khalil & Shearer, 2006), biomassi põletamine ja prügilad. Samuti eraldub CH<sub>4</sub> gaasi, nafta ja kivisöe kaevandamisel (Kholod *et al.*, 2020). Looduslikud emissiooni allikad on märgalad, ookeanid ja hüdraadid (Wuebbles & Hayhoe, 2002). Fotokeemilised protsessid põhjustavad metaani oksüdeerumist atmosfääri (Cicerone & Oremland, 1988). Nende reaktsioonide kaudu on metaanil kõige suurem mõju troposfääris ja stratosfääris ning paljude ühendite tasemele, nagu osoon, veeaur ja hüdroksüülradikaalid (Baran *et al.*, 2015). Seetõttu on metaan oluline kasvuhoonegaas kliimasüsteemis (Cicerone & Oremland, 1988), eelkõige oma kasvu kiiruse poolest (Wuebbles & Hayhoe, 2002; Tian *et al.*, 2016).

### 1.1.2 Naerugaas

Dilämmastikoksiid ehk naerugaas on värvitu ja lõhnatu kasvuhoonegaas, mis moodustab umbes 6% globaalsest soojenemisest (Lemke & Farrell, 2008). Naerugaas on kahjulik ka Maa osoonikihile, mis kaitseb maapinda päikese ultraviolettkiirguse eest, sest dilämmastikoksiid põhjustab osoonikihi hõrenemist (Ravishankara *et al.*, 2009). Dilämmastikoksiid tekib atmosfääris erinevate seal toimuvate reaktsioonide tõttu, aga ka mikroobide abil nii maismaal kui ka vee ökosüsteemides (Lemke & Farrell, 2008). Naerugaasi eraldub maapealsetest ökosüsteemidest (Tian *et al.*, 2017), samuti suurel hulgal märgaladel (Bridgham *et al.*, 2013). Maapealsetel ökosüsteemidel on suur roll selle gaasi atmosfääri lendumisel (Nicolini *et al.*, 2013). Naerugaas tekib mullas, kui toimub anaeroobne dentrifikatsioon või aeroobne nitrifikatsioon (Wang *et al.*, 2021). Selle tekkimine sõltub taime vanusest, mulla veesisaldusest, redokspotentsiaalidest ja substraadi olemasolust (Machacova *et al.*, 2013).

Looduskeskkonnas mõjutab naerugaasi kontsentratsiooni kasvu kõige enam inimtegevus (Battye *et al.*, 2017). Suurim inimtekkeline naerugaasi emissiooni allikas on põllumajandusettevõtete tegevus, mille hulgas on ka põllumuldade emissioonid (Sheer *et al.*, 2020). Need emissioonid on eriti intensiivsed peale kuiva pinnase niisutamist või külmunud pinnase ülessulamist ja on mõjutatud nii mullatemperatuurist kui ka mulla veesisaldusest (Battye *et al.*, 2017). Lisaks mõjutavad naerugaasi emissioone ka fossiilkütuste põletamine (Moomaw, 2002) ning lämmastikväetiste ladustamine ja käitlemine, mis võib põhjustada naerugaasi emissioonide suurenemist (Millair *et al.*, 2002). Teised tegevused, nagu erinevad tööstusprotsessid ja jäätmete kõrvaldamine, ei mõjuta otseselt naerugaasi emissioone, vaid suurendavad mikroorganismide aktiivsust looduslikes ökosüsteemides, mis omakorda suurendavad lämmastiku kogust. (Lemke & Farrell, 2008).

## 1.2 Boreaalsed metsad

Boreaalne mets on üks suurimaid metsaökosüsteeme maailmas, ulatudes 50° põhjalaiusest kuni tsirkumpolaarse vööndini (Lorenz & Lal, 2010). Põhjapoolkeral parasvöötmes asuv mets ehk boreaalne mets pakub ökosüsteemiteenuseid nii kohalikul kui ka globaalsel tasemel (Taggart & Cross, 2008). Umbes kaks kolmandikku selle bioomi alast on kasutusel puidu tootmiseks. (Gauthier *et al.*, 2015). Boreaalsete metsade pindala on ligikaudu 920 miljonit hektarit ja see moodustab umbes kolm neljandikku maailma okasmetsadest (Machacova *et al.*, 2015). Boreaalsed metsad võivad globaalselt kliimat muuta süsiniku vabanemisega pinnasest, muutustega turbaalade metaanivoogudes või muutustega piirkondlikus energiavahetuses (Chapin & Danell, 2001; Hou *et al.*, 2020). Selleks, et boreaalseid metsi säilitada ja kaitsta

kliimamuutuste eest, peaks kasutusele võtma erinevad leevendusmeetmed (Gauthier *et al.*, 2015).

Kliimamuutus mõjutab biofüüsikalisi protsesse, pinnase arengut ja geneesi, biogeokeemilisi tsükleid ja organismide populatsioonide dünaamikaid (Vargas & Barba, 2019). Kliimamuutus mõjutab ka hüdroloogilisi protsesse, nagu sademed, igikeltsa sulamine ja aurustumine, sealhulgas on suur mõju nii vooluhulgale kui ka veetasemele järvedes ja turbaaladel (Ruckstuhl *et al.*, 2008). Kliima soojenemine suurendab boreaalsete turbaalade atmosfäärisüsiniku emissioone. See tähendab, et soojemad temperatuurid ja pikem kasvuperiood ei ole korrelatsioonis aastase süsiniku koguse suurenemisega (Wuebbles & Hayhoe, 2002). Kliimamuutustega suurenevad ka metsas olevad häiringud, nagu tulekahjud ja putukakahjustused. Kliima soojenemise tõttu on puude kasv ja juurdekasv suurem põhja suunas tundra piirkondadesse. Kliima soojenemise tulemusena võib metsa ja liikide koosluste arengus tekkida lühiajalisi viivitusi. Leevendusmeetmena on kasutusele võetud metsamajandamise strateegia, kus arvestatakse uuritava metsa süsinikdioksiidi tundlikkust, temperatuuri ja sademeid (Ruckstuhl *et al.*, 2008).

Metsad on peamised maapealsete süsinikdioksiidi ja metaanivoogude allikad (Pitz *et al.*, 2018). Borealse metsa pinnas on üks suurimaid süsiniku varusid erinevate ökosüsteemitüüpide hulgas ning suurem osa süsinikust paikneb igikeltsas või mägistel aladel. (Deluca & Boisvenue, 2012). Viimase paarikümne aasta jooksul on uuringutega tõestatud, et puud aitavad kaasa metaanivoogudele ja metsad võivad olla metaani netoallikaks (Vainio, 2019). Põhjapoolsed turbaalad sisaldavad 25–35% maailma pinnase süsiniku varudest (Ruckstuhl *et al.*, 2008) ning seal aeglustavad külmemad temperatuurid süsiniku sidumist ja eraldumist. Kliimamuutuse mõjul võivad sealsed süsiniku varud muutuda süsiniku allikateks (Deluca & Boisvenue, 2012). Boreaalsed metsad on olulised dilämmastikoksiidi looduslikud allikad, olgugi, et atmosfääris tekib seda väheses koguses. Nendes metsades kasvavad puuliigid emiteerivad looduslikult välitingimustes puutüvedest naerugaasi. See moodustab umbes 8% metsaaluse naerugaasi voogudest. Okaspuu liikidest nii harilik mänd (*Pinus sylvestris* L. Karst) kui ka harilik kuusk (*Picea abies*) emiteerivad naerugaasi rohkem, kui mulla veesisaldus suureneb (Machacova *et al.*, 2015). Metsade ökosüsteemide naerugaasi vahetuses mängivad olulist rolli puud, pakkudes erinevaid teid pinnases toodetud naerugaasile. Puudest tulenevad naerugaasi emissioonid aitavad kaasa boreaalsete metsade N<sub>2</sub>O emissioonidele. (Haikarainen *et al.*, 2017)

Metsanduse eesmärgil on nii parasvöötme kui ka boreaalsetes metsa piirkondades kuivendatud umbes 15 miljonit hektarit turbaalasid. Turvasmuldade kuivendamisel on mõju toitainete

mineraliseerumisele (Nieminen *et al.*, 2017). Mida suurem on toitainete mineraliseerumine, seda suurem on ka mikroobide aktiivne tegevus (Becker *et al.*, 2018). Mineraliseeritud kujul toitained, mis mullas paiknevad, aitavad kaasa taimestiku järk-järgulisele kasvamisele metsale omaseks taimekoosluseks. Lahustunud lämmastiku kontsentratsioon kuivendatud maa-aladel võib tõusta mitmel põhjusel, näiteks kliima soojenemise tagajärjel suureneb turbakiht ja orgaanilise lämmastiku mineraliseerumine, sest tulenevalt suurest aurumisest on veetase madal (Nieminen *et al.*, 2017).

Turbametsades suurendab lageraie keskkonna koormust ehk toitained, metaan ja naerugaas viiakse leostumise protsessiga pinnasest välja (Korkiakoski *et al.*, 2020). Turbaalad säilitavad umbes kolmandikku kogu mulla süsiniku kogusest, mis muudab need maa-alad globaalse süsiniku ja lämmastiku tsüklite olulisteks osadeks. Metsanduse tegevus turbaaladel mõjutab naerugaasi ja metaanivoogusid. Turbaalade kuivendamine vähendab veetaset, mis tähendab, et hapniku kättesaadavus turbamullast suureneb, aga samas vähenevad metaanivood, mis tulevad pinnasest. Metaanivood vähenevad, sest metaanivood lõppevad hapnikuvaeses turbamullas ja paksemas turbakihis on rohkem metaani oksüdeerumist (Vainio, 2019). Metaanivood on suuremad siis, kui veetase on kõrgem kui 30 cm. Drenaaž suurendab naerugaasi voogusid toitainerikkamatest kohtadest ja turbaaladel on suuremad naerugaasi vood seal, kus süsiniku ja lämmastiku suhe on väiksem kui 25 (Korkiakoski *et al.*, 2020).

Metsamajanduse jaoks on turbaalad kuivendatud kraavidega, mistõttu langeb veetase aastas kuni 30 cm. See tähendab, et tugevasti lagunenu turbapinnas on peale sademete teket kiiresti küllastunud, mida seejärel uuesti kuivendatakse (Minkkinen *et al.*, 2020). Kuivendamise ja niisutamise protsessid suurendavad naerugaasi emissioone (Nieminen *et al.*, 2017). Selleks, et vähendada kasvuhoonegaaside emissioone kuivendatud turbaaladel, tuleb rakendada taaskasutamist. Selleks tuleb luua looduslikud ja sobivad veetingimused, kus esineb vähene aeroobne lagunemine ja nitrifikatsioon, mistõttu vähenevad ka metaani ja naerugaasi emissioonid (Minkkinen *et al.*, 2020).

### 1.2.1 Kasvuhoonegaaside mullavood

Boreaalsed metsamullad on enamasti happelised, õhukesed ja põllumajanduslikuks kasutamiseks sobimatud (Ruckstuhl *et al.*, 2008). 2020. aastal oli kogu Eestist 53,3% metsamaad (Padari *et al.*, 2020) ning umbes viiendik metsadest kasvab turbaaladel, millest omakorda 14% on kuivendatud (Becker *et al.*, 2018). Kuivendatud turbaaladel hakkab orgaaniline aine kiiresti lagunema, süsinik paiskub õhku (peamiselt CO<sub>2</sub> kujul) ja sellest võivad olla tingitud ka kasvuhoonegaaside emissioonid (Truus *et al.*, 2018). Kase ja kuuse puistud

domineerivad viljakatel kuivendatud turbamuldadel, kus on kõrge lämmastiku ja süsiniku sisaldus. Lämmastiku mineraliseerumise voog sõltub suurel määral süsiniku ja lämmastiku suhtest (Becker *et al.*, 2018). Borealseid metsamuldi iseloomustab mineraalse lämmastiku vähene kättesaadavus ja ladestumine, mille tulemusena on naerugaasi voog väike (Machacova *et al.*, 2016). Üheks metaani emissiooni alguskohaks on muld ning on tehtud kindlaks tehtud, et märgalade ökosüsteemides on kõige suurem metaanivoog mullas, mida vahendavad taimed (Barba *et al.*, 2019).

Peamised metaani ja paljude lämmastiku ühendite allikad ning varud paiknevad borealsetes turbamuldades (Helbig *et al.*, 2017). Mullas toimuvad mitmed mikroobiprotsessid, mis põhjustavad metaani ja lämmastikühendite tootmist ning tarbimist (Machacova *et al.*, 2016). Metaani ja naerugaasi tootmise, tarbimise ning emissioonide peamised kontrollijad on veesisaldus ja toitainete kättesaadavus (Mosier *et al.*, 2004) ning temperatuur (Schindler *et al.*, 2020). Mitmed põllumajandussüsteemid on olulised metaani ja naerugaasi allikad, mis tähendab, et maakasutuse muutused ei mõjuta nende kasvuhoonegaaside emissioone. Kui taimekasvatus intensiivistub, siis kasutatakse rohkem lämmastikväetisi, mis omakorda suurendab lämmastikoksiidide emissioone. Seetõttu on vaatluse alla võetud väetiste haldamine, et vähendada kasvuhoonegaaside emissioone, samal ajal väetiseid efektiivsemalt kasutades (Mosier *et al.*, 2004).

Erinevates uurimustes on kindlaks tehtud, et mullaniiskuse ja metaanivoogude vahel on positiivne korrelatsioon (Schindler *et al.*, 2020). See tähendab, et mullaniiskus mõjutab metaani sidumist, reguleerides samal ajal hapniku ja metaani difusiooni mullas (Singh *et al.*, 1997). Clément *et al.* (2020) uurimuses tõestati, et metaani sidumine ja emiteerimine on seotud mulla füüsikaliste omadustega, mistõttu võib öelda, et nende põhjal saab oletada kasvuhoonegaaside emissioonide potentsiaali. Erinevused metaanivoogudes võivad olla tingitud pinnase veesisaldusest ja mulla temperatuurist (Machacova *et al.*, 2016).

### 1.2.2 Puutüvede vood

Lisaks mullavoogudele on olulised ka puutüvede vood. Neid mõõdetakse erinevate meetoditega, näiteks manuaalse, staatilise või dünaamilise gaasikambri meetodiga (Machacova *et al.*, 2016; Vargas & Barba, 2019; Schindler *et al.*, 2020). Mitmeid uurimusi puutüvede ja mullavoogude kohta on tehtud borealsetes piirkondades, nagu Soomes (Lohila *et al.*, 2010; Machacova *et al.*, 2016; Minkkinen *et al.*, 2020), Rootsis (Sundqvist *et al.*, 2015) ja Eestis (Schindler *et al.*, 2020; Viru *et al.*, 2020). Lisaks on uuritud piirkondi ka mujal maailmas, näiteks Jaapanis (Terazawa *et al.*, 2015), Kanadas (Helbig *et al.*, 2017) ja Hiinas (Tian *et al.*,

2017; Wang *et al.*, 2021). Uurimuste tulemustes on selgunud, et erinevad puuliigid emiteerivad või seovad kasvuhoonegaase, nagu metaani ja naerugaasi (Machacova *et al.*, 2013; Vargas & Barba, 2019; Schindler *et al.*, 2020).

Puutüve hingamine on tuntud kui süsinikdioksiidi allikas, kuid uuritud on ka puutüvede vooge teiste kasvuhoonegaaside näol. Parasvöötmes on see seotud temperatuurist sõltuvalt metaani tootmisprotsessidega (Pitz *et al.*, 2018). Puutüvede vood sõltuvad puuliigist ja ökosüsteemi tüübist (Barba *et al.*, 2019). Märjalade, lammialade ja kõrgustike metsades kasvavad puud toodavad ja eraldavad metaani tüve kaudu (Bodelier & Laanbroek, 2004). Puutüvede metaani emissioonidel varieerub nii ajaline kui ka ruumiline muutlikkus (Barba *et al.*, 2019). Ruumilise muutlikkusega arvestamine on oluline emissiooni rolli kirjeldamisel ja kvantifitseerimisel globaalse metaanitsükli puhul (Terazawa *et al.*, 2015). Erinevad uuringud on näidanud, et sõltumata asukohast on puutüvedest atmosfääri lendunud suurel hulgal metaani, siiski pole kindlaks tehtud selle emissiooni täpset kogust (Barba *et al.*, 2019).

Metaani ja naerugaasi emiteerimise kohta puutüvedelt on vähe andmeid, mistõttu on tehtud mitmeid uuringuid, et nende kohta rohkem teada saada. Enamik uurimusi on tehtud metsaga kaetud märjaladel, kus pinnas toodab metaani. Alates 1970. aastatest on teada, et puud suudavad tüves hoida kõrge kontsentratsiooniga metaani. On leitud tõendeid, et metaani toodetakse mullas ja sealt transporditakse puutüvesse ning metaani toodetakse puutüves ja sealt eraldub see radiaalselt (Vargas & Barba, 2019). Machacova *et al.*, (2013) tehtud uuringus võrreldi kõrgmäestiku euroopa pöõgi ja kaldaäärse musta lepa N<sub>2</sub>O ning CH<sub>4</sub> emissioone. Tulemustest selgus, et mõlemad puuliigid eraldavad mõlemat kasvuhoonegaasi (Machacova *et al.*, 2013). Samuti on tehtud kindlaks teistes uuringutes, et kõrgmäestikes kasvavad puud emiteerivad metaani (Pitz *et al.*, 2018).

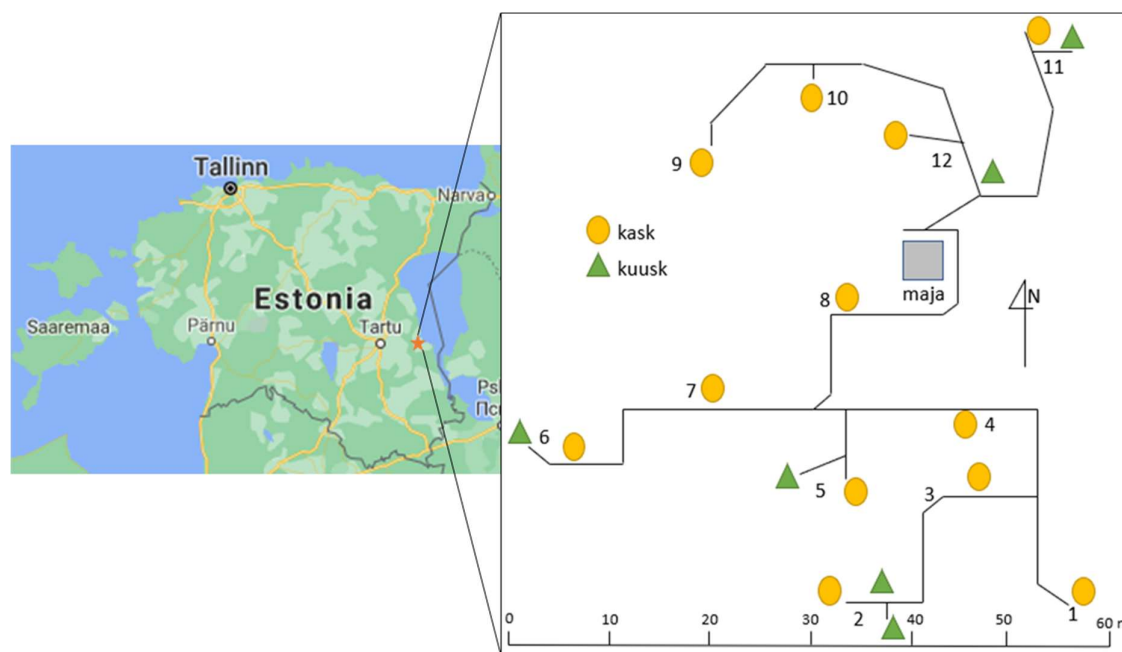
Puutüvedest tulevad naerugaasi vood näitavad aastaegade dünaamikat. Peamine N<sub>2</sub>O voog tuleb suvekuudel, kui temperatuur on kõrgem. Tugeva seose puudumine puutüvedest tuleva naerugaasi voo ja metsa pinnase vahel näitab sidumatust puutüve ja pinnasest tuleva N<sub>2</sub>O voo vahel (Machacova *et al.*, 2019). Väiksed naerugaasi vood on tingitud vähesest mineraalse lämmastiku kättesaadavusest ja ladestumisest (Machacova *et al.*, 2016).

## 2 ANDMED JA METOODIKA

Selles peatükis kirjeldatakse uurimisala ja antakse täpsem ülevaade tüvevoogude mõõtmise kohta. Lisaks on välja toodud andmete kontroll, voogude arvutamine, meteoroloogiliste parameetrite mõõtmised ja andmeanalüüs.

### 2.1 Uurimisala kirjeldus

Uurimisjaam Agali II asub Eesti idaosas Järvelja metsas ja on koordinaatidega 58° 17' 24" N ja 27° 19' 05" E (Joonis 1). See ala kuulub üleminekuvööndisse, kus parasvööteline kliima läheb üle boreaalseks kliimaks. Uuritavat ala on kuivendatud kraavidega 40–50 aastat, mille tagajärjel põhjavee tase on kasvuperioodil alla 40 cm pinnasest. Uurimisalaks valiti maa-ala, mille mõõtmed olid 20 x 25 m, kus on määratud ka puistu parameetrid (Becker *et al.*, 2018).



Joonis 1. Agali II uurimisjaama asukoht ja puude asukoha skeem uurimisalal

Eesti turbametsades on peamiselt kaks metsakasvukohatüüpi: jänesekapsa kasvukohatüüp ja mustika kasvukohatüüp, mis on täielikult kuivendatud. Järvelja metsast moodustab 14% jänesekapsa kasvukohatüüp ja 6% mustika kasvukohatüüp. Sealse ala peamised puuliigid on sookask (*Betula pubescens* E.), harilik kuusk (*Picea abies* L. Karst.) ja harilik mänd (*Pinus sylvestris*), mis on seal looduslikult kasvanud. Uurimisalal olev pinnas klassifitseeriti vastavalt mulla ressursidele. Mulla tüübiks oli seal kuivendatud madalsoomuld. Mulla tüübi ja puistu tiheduse hindamiseks kaevati uurimisalale ka mullasüvendeid. Kuna kase ja kuuse puistute

mullad olid samasugused, siis määrati see ühtselt jänesekapsa kasvukohatüübiks (Becker *et al.*, 2018).

## 2.2 Tüvevoogude mõõtmine

Naerugaasi ja metaanivoogude mõõtmiseks kasutati suletud gaasikambri meetodit. Mõõtmisteks valiti juhuslikkuse alusel 18 puud, millest 12 olid kased ja 6 olid kuused (Joonis 1). Tüvekambrid kinnitati traadiga kaskedele ja kuuskedele ning ümbritseti silikooni ning vaseliiniga, et tagada kambrite lekkekindlus. Kambreid oli kokku 42.

Tüvekambrite kõrgused olid vastavad: esimene kõrgus maapinnast oli 10–20 cm kõrgusel (A), teine kõrgus maapinnast oli 70–80 cm kõrgusel (B) ja kolmas kõrgus maapinnast oli 170–180 cm kõrgusel (C). Tüvekambrid on välja toodud joonisel 2. Kambrite puhul moodustab ühe profiilitaseme kaks tüvekambrit. Igal kasel ja kuusel oli üks või kolm kambri kõrgust. Kuuel kasel oli üks ja kuuel ülejäänud puul oli kolm tüvekambri kõrgust maapinnast. Kõikidel kuuskedel oli kolm tüvekambri kõrgust maapinnast.



Joonis 2. Tüvekambrite kõrgused (Autori joonis)

Mõõtmised toimusid ajavahemikus 22. oktoober 2020 – 29. märts 2021 iga nädal samal ajal kell 9:00–13:00. Proove võeti korra nädalas nelja tunni jooksul. Mõõtmised teostati tunniajase intervalliga. Igast kambrit võeti proove neljal korral järgmistel minutitel: 0/60/120/180. Proovide võtmiseks kasutati eelevakueeritud pudeleid. Iga võetud proov, mis võeti kahest

tüvekambri kokku, sisaldas 25 ml gaasi kontsentratsioone. Alustati alati madalamatest tüvekambritest. Enne esimese proovi võtmist suleti tüvekambrite kaaned ning peale viimase proovi võtmist avati need uuesti. Kambrid jäid mõõtmispäevade vahel avatuks. Kokku käidi mõõtnas 24. korral. Peale mõõtmisi viidi saadud proovid Vanemuise 46 õppehoone laborisse, et analüüsida proovides oleva gaasi kontsentratsioone.

### 2.3 Andmete kvaliteedi kontroll ja voogude arvutamine

Analüüsimiseks kasutati Shimadzu GC-2014 gaasikromatograafiat, mis on varustatud kahe detektoriga: ECD detektor (elektronhaarde detektor), mis aitab tuvastada naerugaasi, ja FID detektor (leekionisatsioonidetektor), millega analüüsitakse metaani kontsentratsiooni. Peale analüüsimist kasutati voogude arvutamisel järgmist valemit:

$$F = \frac{M \times P \times V \times \delta v}{R \times T \times t \times A}$$

Voog  $F$  ( $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ ) arvutati molaarmassi  $M$ , normaalrõhu  $P$  (101300 Pa), kambri ruumala  $V$  ( $0,00119 \text{ m}^3$ ), lineaarse tõusu  $\delta v$  [ppm(v)], gaasikonstandi  $R$  ( $8,314 \text{ m}^3 \text{ Pa K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$ ), labori temperatuuri  $T$  (293,15 K), mõõteperioodi aja  $t$  (3 h) ja kambri alloleva ala pindala  $A$  ( $0,0108 \text{ m}^2$ ) järgi. Valemi järgi arvutati naerugaasi ja metaanivood mikrogrammides. Leiti nii kuuskede kui ka kaskede puhul mõlema kasvuhooonegaasi kõikide kambrite aritmeetiline keskmine ja mediaan.

Andmeanalüüsi jaoks teostati eelnevalt andmete kontroll, kus leiti kõige parem voogude trendi lineaarsus. Lineaarsuse sobivust kontrolliti R-ruudu väärtuse põhjal. Ühe trendi muutmiseks vaadati neljal korral võetud proove nii metaani kui ka naerugaasi puhul. Vajadusel eemaldati nendest üks, mis erines teistest kõige rohkem, nii et trend muutuks paremaks. Enamasti muutus R-ruut suuremaks ja oli üle 0,9 ehk võimalikult number ühe lähedal. See tähendab, et parameetrite vahel oli tugev seos. Andmete kontroll teostati mõlema uuritava gaasi ja puuliigi kohta.

## 2.4 Meteoroloogiliste parameetrite mõõtmised

Vaatlusterudesse paigaldati automaatsed mulla veetaseme mõõtesensorid (Hobo U20L-04, Onset Computer Corporation, USA), mis mõõdavad iga tunni aja tagant. Mulla temperatuuri (107, CAMPBELL SCIENTIFIC. INC, USA) ja mulla niiskuse andurid (ML3 ThetaProbe, Delta-T Devices, Suurbritannia) paigaldati 0–10 cm mulla sügavusele uuritavate puude lähedale. Selles töös kasutati mulla temperatuuri ja mulla niiskuse andmeid, mis jäid ajavahemikku 22. oktoober 2020 – 29. märts 2021.

## 2.5 Andmeanalüüs

Statistilise andmeanalüüsi jaoks kasutati erinevaid programme, nagu Excel ja STATISTICA 7.0. Analüüsimisel kontrolliti tunnuste vastavust normaaljaotusele. Selleks kasutati erinevaid teste, nagu Kolmogorovi-Smirnovi, Lillieforsi ja Shapiro-Wilksi testid. Shapiro-Wilksi test on kõige usaldusväärsemate näitajatega normaaljaotuse suhtes. Kuna testidest selgus, et mitte ükski tunnus ei vastanud normaaljaotusele, siis sellest tulenevalt kasutati analüüsimisel mitteparameetrilisi teste. Kõrguste vaheliste erinevuse testimiseks kasutati Wilcoxon signed-rank testi.

Lisaks analüüsiti seoseid mullatemperatuuri ja mullaniiskuse ning tüvevoogude vahel. Selleks kasutati Spearmani korrelatsioonikordajat. Korrelatsioonikordajat kasutati mõlema puuliigi, kasvuhoonegaasi ja mullaparametri puhul.

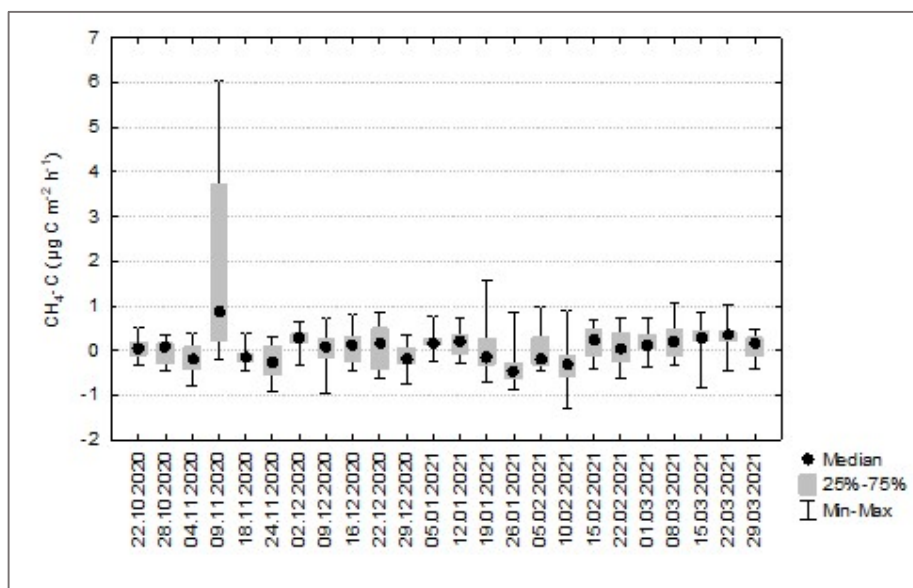
### 3 TULEMUSED

Järgnevas peatükis antakse ülevaade töös saadud tulemustest ning tuuakse välja naerugaasi ja metaanivoogude sesoonsus. Lisaks kirjeldatakse tüve vertikaalset profiili ja tuuakse välja meteoroloogilised parameetrid nagu mulla temperatuur ja mulla niiskus.

#### 3.1 Sesoonne varieeruvus

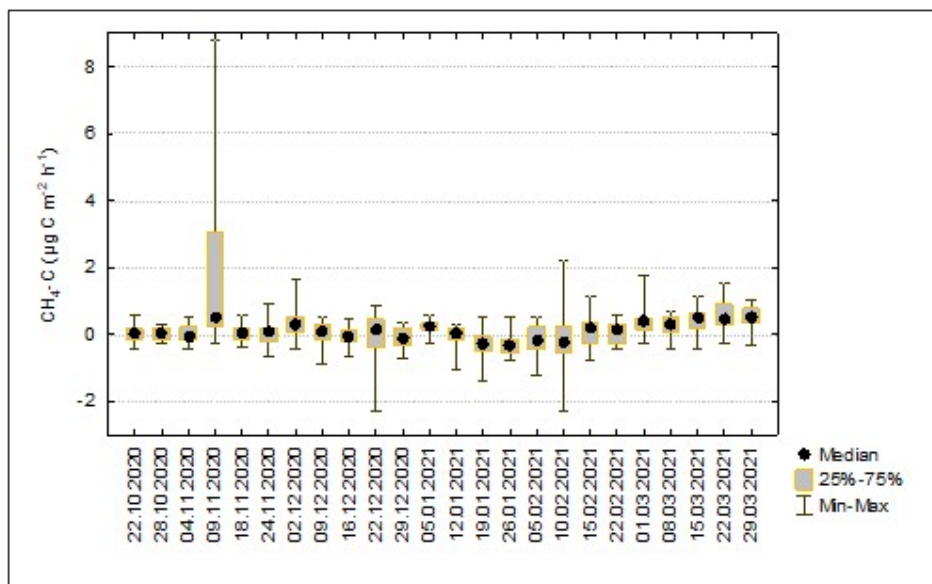
##### 3.1.1 Metaanivood

Kuuse CH<sub>4</sub>-vood varieerusid vahemikus  $-0,363$  kuni  $1,957 \mu\text{g C m}^{-2} \text{h}^{-1}$  (Joonis 3). Suurim mõõdetud voog oli  $1,957 \mu\text{g C m}^{-2} \text{h}^{-1}$ , mis mõõdeti 9. novembril 2020 ja väikseim mõõdetud voog oli  $-0,363 \mu\text{g C m}^{-2} \text{h}^{-1}$ , mis mõõdeti 26. jaanuaril 2021.



Joonis 3. Kuuse metaanivoog puutüvedest (oktoober 2020 – märts 2021). Joonis näitab kuuse puutüve CH<sub>4</sub>-vooge igal mõõtmispäeval, mediaani ja keskmist, 25% ja 75% kvartiile, miinimum ja maksimum väärtuseid.

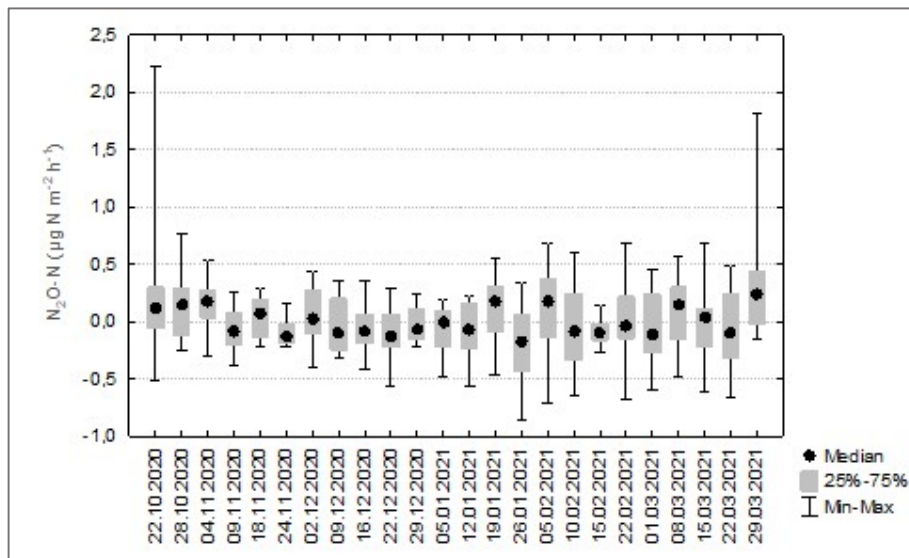
Kase CH<sub>4</sub>-vood varieerusid vahemikus  $-0,318$  kuni  $1,775 \mu\text{g C m}^{-2} \text{h}^{-1}$  (Joonis 4). Mõõdetud voogudest oli kõige suurem  $1,775 \mu\text{g C m}^{-2} \text{h}^{-1}$ , mis mõõdeti 9. novembril 2020 ja kõige väiksem voog oli  $-0,318 \mu\text{g C m}^{-2} \text{h}^{-1}$ , mis mõõdeti 26. jaanuaril 2021.



Joonis 4. Kase metaanivood puutüvedest (oktoober 2020 – märts 2021). Joonis näitab kase puutüve CH<sub>4</sub>-vooge igal mõõtmispäeval, mediaani ja keskmist, 25% ja 75% kvartiile, miinimum ja maksimum väärtuseid.

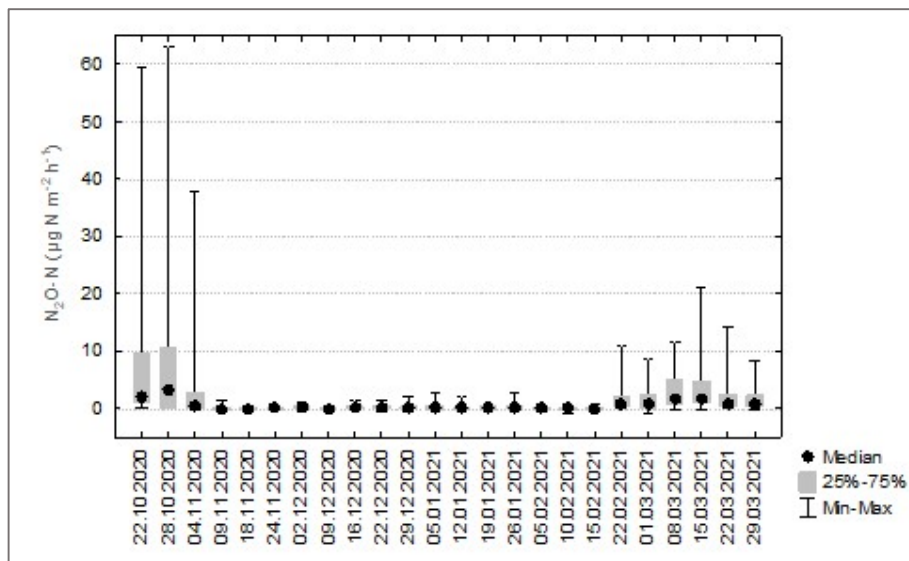
### 3.1.2 Naerugaasi vood

Kuuse N<sub>2</sub>O vood varieerusid vahemikus  $-0,209$  kuni  $0,285 \mu\text{g N m}^{-2} \text{h}^{-1}$  (Joonis 5). Suurim mõõdetud voog oli  $0,285 \mu\text{g N m}^{-2} \text{h}^{-1}$ , mis mõõdeti viimasel mõõtmispäeval, 29. märtsil 2021 ja väikseim mõõdetud voog oli  $-0,209 \mu\text{g N m}^{-2} \text{h}^{-1}$ , mis mõõdeti 26. jaanuaril 2021.



Joonis 5. Kuuse naerugaasi voog puutüvedest (oktoober 2020 – märts 2021). Joonis näitab kuuse puutüve N<sub>2</sub>O vooge igal mõõtmispäeval, mediaani ja keskmist, 25% ja 75% kvartiile, miinimum ja maksimum väärtuseid.

Kase N<sub>2</sub>O vood varieerusid suuremas vahemikus kui kuusel ehk vahemikus –0,038 kuni 11,432 µg N m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> (Joonis 6). Mõõdetud voogudest oli kõige suurem 11,432 µg N m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>, mis mõõdeti 28. oktoobril 2020 ja kõige väiksem voog oli –0,038 µg N m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>, mis mõõdeti 9. detsembril 2020.



Joonis 6. Kase naerugaasi voog puutüvedest (oktoober 2020 – märts 2021). Joonis näitab kase puutüve N<sub>2</sub>O vooge igal mõõtmispäeval, mediaani ja keskmist, 25% ja 75% kvartiile, miinimum ja maksimum väärtuseid.

### 3.2 Puutüve vertikaalsed vood

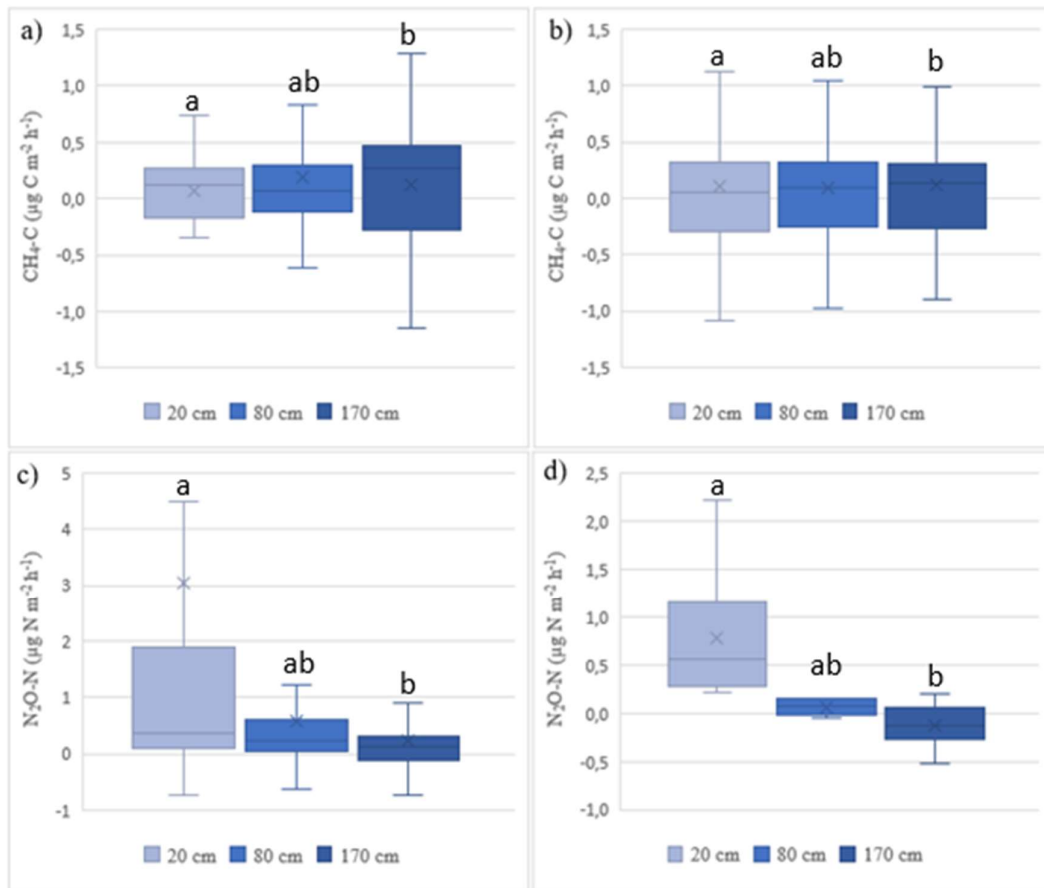
Naerugaasi ja metaanivooge mõõdeti kolmel kõrgusel maapinnast (10–20 cm, 70–80 cm, 170–180 cm) kahelt erinevalt puuliigilt.

Kase puutüvelt esimeselt kõrguselt mõõdetud metaanivood varieerusid vahemikus –0,365 kuni 2,284 µg C m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> (Joonis 7a; Lisa joonis 2). 10–20 cm kõrguselt mõõdeti kõige suurem metaanivoog 9. novembril 2020. Kõige väiksem metaanivoog mõõdeti 26. jaanuaril 2021. Teiselt kõrguselt mõõdetud vood varieerusid vahemikus –0,331 kuni 1,015 µg C m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>. Sellelt kõrguselt mõõdetud suurim voog oli 9. novembril 2020. Väikseim metaanivoog mõõdeti 5. veebruaril 2021. 170–180 cm kõrguselt kase puutüvelt mõõdetud metaanivood varieerusid vahemikus –0,250 kuni 1,517 µg C m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>. Kolmandalt kõrguselt mõõdetud suurim metaanivoog oli 9. novembril 2020. Sellelt kõrguselt väikseim mõõdetud voog oli 19. jaanuaril 2021. Kolmelt kõrguselt mõõdetud metaanivoogudest selgub, et kõrguse kasvades kuuse CH<sub>4</sub>-vood suurenevad.

Kuuse puutüvelt esimeselt kõrguselt mõõdetud metaanivood varieerusid vahemikus  $-0,374$  kuni  $2,484 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$  (Joonis 7b; Lisa joonis 1). 10–20 cm kõrguselt mõõdeti kõige suurem voog 9. novembril 2020. Väikseim metaanivoog esimeselt kõrguselt mõõdeti 26. jaanuaril 2021. Teiselt kõrguselt mõõdetud kuuse metaanivood varieerusid vahemikus  $-0,521$  kuni  $1,731 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ . Kõige suurem oli metaanivoog 9. novembril 2020 ja kõige väiksem oli see 10. veebruaril 2021. Viimaselt mõõtmise kõrguselt mõõdetud kuuse metaanivood varieerusid vahemikus  $-0,432$  kuni  $1,655 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ . 170–180 cm kõrguselt mõõdetud suurim metaanivood oli 9. novembril 2020. Väikseim voog mõõdeti 24. novembril 2020. Kolmelt kõrguselt mõõdetud metaanivoogudest selgub, et kõrguse kasvades metaanivood suurenesid.

Esimeselt kõrguselt mõõdetud naerugaasi vood kase puutüvelt varieerusid vahemikus  $-0,033$  kuni  $20,466 \mu\text{g N m}^{-2} \text{ h}^{-1}$  (Joonis 7c; Lisa joonis 4). Suurim naerugaasi voog esimeselt kõrguselt mõõdeti 28. oktoobril 2020. Väikseim  $\text{N}_2\text{O}$  voog mõõdeti 9. detsembril 2020. 70–80 cm kõrguselt kase puutüvelt mõõdetud naerugaasi vood varieerusid vahemikus  $-0,106$  kuni  $2,920 \mu\text{g N m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ . Suurim naerugaasi voog mõõdeti teiselt kõrguselt 28. oktoobril 2020. Kõige väiksem naerugaasi voog kase puutüvelt mõõdeti 9. detsembril 2020. Viimaselt kõrguselt (170–180 cm) kase puutüvelt mõõdetud naerugaasi vood varieerusid vahemikus  $-0,189$  kuni  $1,876 \mu\text{g N m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ . Kõige suurem naerugaasi voog viimaselt kõrguselt mõõdeti 28. oktoobril 2020. Väikseim  $\text{N}_2\text{O}$  voog mõõdeti 22. detsembril 2020. Kolmelt kõrguselt mõõdetud naerugaasi voogudest selgub, et kõrguse kasvades vood vähenevad.

Kuuse puutüvelt mõõdetud naerugaasi vood esimeselt kõrguselt varieerusid vahemikus  $-0,240$  kuni  $0,777 \mu\text{g N m}^{-2} \text{ h}^{-1}$  (Joonis 7d; Lisa joonis 3). Kuuse  $\text{N}_2\text{O}$  vood olid esimeselt kõrguselt mõõdetuna kõige suuremad 22. oktoobril 2020, kui mõõdeti naerugaasi vooks  $0,777 \mu\text{g N m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ . Kõige väiksemad vood esimeselt kõrguselt mõõdeti 1. märtsil, kui  $\text{N}_2\text{O}$  voog oli  $-0,240 \mu\text{g N m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ . 70–80 cm kõrguselt mõõdetud naerugaasi vood varieerusid vahemikus  $-0,332$  kuni  $0,249 \mu\text{g N m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ . Teiselt kõrguselt mõõdeti suurim naerugaasi voog 5. veebruaril 2021 ja kõige väiksem voog eelneval mõõtmispäeval (26. jaanuaril 2021). Kolmandalt kõrguselt mõõdetud kuuse  $\text{N}_2\text{O}$  vood varieerusid vahemikus  $-0,190$  kuni  $0,148 \mu\text{g N m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ . Sellelt kõrguselt suurim mõõdetud  $\text{N}_2\text{O}$  voog mõõdeti viimasel mõõtmispäeval, 29. märtsil 2021 ning väikseim naerugaasi voog mõõdeti 15. märtsil 2021. Kolmelt kõrguselt mõõdetud voogudest selgub, et kuuse puutüvelt mõõdetud naerugaasi vood vähenevad kõrguse kasvades.

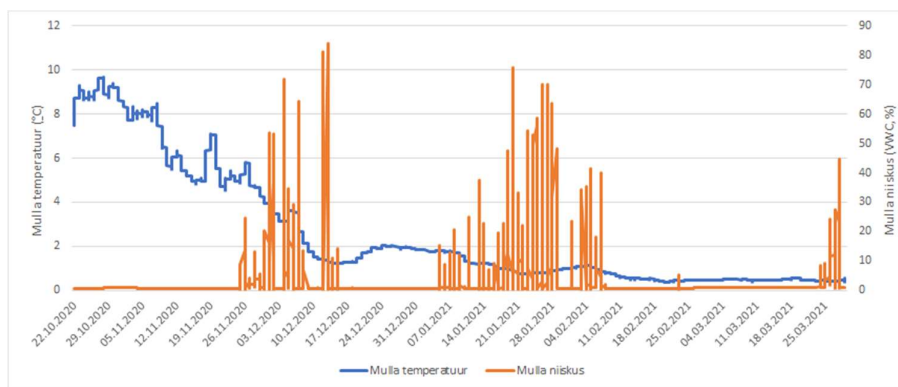


Joonis 7. Tüvevoogude vertikaalsed profiilid: kase CH<sub>4</sub>-vood (a), kuuse CH<sub>4</sub>-vood (b), kase N<sub>2</sub>O vood (c), kuuse N<sub>2</sub>O vood (d). Joonis näitab kuuse ja kase puutüve N<sub>2</sub>O ja CH<sub>4</sub>-vooge kolmelt erinevalt kõrguselt (20 cm, 80 cm, 170 cm), mediaani ja aritmeetilist keskmist, 25% ja 75% kvartiile, miinimum ja maksimum väärtuseid.

Kõrguste vaheliste erinevuse testimiseks kasutati Wilcoxon signed-rank testi. Testist selgus, et esimese ja teise kõrguse ning teise ja kolmanda kõrguse vahel ei olnud statistiliselt olulist erinevust ehk olulisuse nivoo (p) oli suurem kui 0,05. Oluline erinevus leiti esimese ja kolmanda kõrgusel tehtud mõõtmiste vahel, sest olulisuse nivoo oli väiksem kui 0,5.

### 3.3 Tüvevoogude seos meteoroloogiliste parameetritega

Mõõtmisperiodil varieerus mulla temperatuur vahemikus 0,4 kuni 9,3 °C (Joonis 8). Detsembri ja märtsi mulla temperatuurid olid kõige sarnasemad. Kõige kõrgem oli mulla temperatuur 28. oktoobril 2020, kui temperatuur küündis 9,3 °C-ni. Jooniselt 8 selgub, et märkimisväärsed temperatuuri tõusud olid veel 8. novembril 2020 (8,3 °C) ja 20. novembril 2020 (7,0 °C). Üldiselt aga mulla temperatuur langeb sujuvalt 27. novembrist 2020, jäädes enamasti vahemikku 0 kuni 2 °C. Kõige madalam oli mulla temperatuur 10. veebruar 2021 – 29. märts 2021, kui see oli stabiilselt 0,5 kuni 0,6 °C.



Joonis 8. Mulla temperatuur ja mulla niiskus uurimisperiodil 22.10.2020–29.03.2021

Mõõtmisperiodil oli mulla niiskusel kolm suuremat tõusu (Joonis 8), mis mõjutasid metaanivooge. Esimene suurim niiskuse tõus oli 26.11.2020–15.12.2020, kui see varieerus vahemikus 8,1 kuni 84,1%. Kõige suurem oli mulla niiskus selles ajavahemikus 13. detsembril 2020 (84,1%), aga ka 4. detsembril 2020 (71,7%) ja 12. detsembril 2020 (81,0%). Teine kõrgem mulla niiskuse periood oli 5.01.2021–7.02.2021, kui niiskus varieerus vahemikus 15,4 kuni 40,1%. Suurim oli mulla niiskus 20. jaanuaril 2021 (75,6%). Märkimisväärsed olid need ka 26. jaanuar 2021 (70,2%), 27. jaanuar 2021 (70,1%) ja 28. jaanuar 2021 (63,5%). Mulla niiskus tõusis ka mõõtmisperiodi lõpus (25.03.2021–28.03.2021), kuid niiskus varieerus väiksemas vahemikus kui kahe esimese mulla niiskuse tõusul (8,7 kuni 33,8%). Samuti jooniselt 8 selgub, et 23. veebruar 2021 oli üksik niiskuse tõus, kuid ülejäänud mõõtmisperiodi ajal oli mulla niiskus nulli lähedal.

#### 4 ARUTELU

Selle töö eesmärk oli teada saada, millised on puutüvede naerugaasi ja metaanivood kuuselt ja kaselt. Saadud tulemusi võrreldi varasemalt tehtud uuringutega, kus uuriti erinevate kasvuhoonegaaside emissioone erinevatel aastaegadel. Töö alguses püstitati uurimisküsimus, kuidas erinevad naerugaasi ja metaanivood kuuselt ja kaselt. Selleks võrreldi mõlema kasvuhoonegaaside voogusid mõõtmisperioodi jooksul. Püstitati hüpotees, et naerugaasi vood on kaselt suuremad kui kuuselt. Tulemustest selgus, et hüpotees leidis kinnitust.

Lisaks taheti teada saada, kui suured on puutüvede naerugaasi ja metaanivood uurimisperioodi jooksul ja milline on voogude sesoonsus. Lähtuvalt uurimisküsimusest püstitati hüpotees, et naerugaasi talvised puutüvede vood on sulamis-külmumisprotsessi ajal suuremad. Töö tulemusena selgus, et hüpotees ei leidnud kinnitust, sest talveperioodil mõõdetud vood olid väiksemad kui oktoobris ja märtsis mõõdetud N<sub>2</sub>O vood. Märtsis olid naerugaasi vood suuremad, sest lumikate sulas. Varem ei ole selliseid uurimusi tehtud, kuid on teada, et naerugaasi vood on suuremad sulamis-külmumisperioodil perioodil, kui muld on niiskem (Luo *et al.*, 2013).

Joonistelt 4 ja 5 selgub, et kuuse ja kase suurimad metaanivood olid 9. novembril, mil vood on tunduvalt suuremad kui teistel mõõtmispäevadel. Sügisperioodil on saadud tulemused tunduvalt suuremad kui talveperioodil, kui vood jäid kuusel vahemikku  $-0,109$  kuni  $0,062 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$  ja kasel vahemikku  $0,049$  kuni  $0,066 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ . See võib olla seotud mulla niiskusega. Schindler *et al.* (2020) uurimuses leiti, et mulla niiskuse ja metaanivoogude vahel oli positiivne korrelatsioon. See tähendab, et mulla niiskus mõjutab metaani sidumist, reguleerides hapniku ja metaani difusiooni mullas (Singh *et al.*, 1997). Mitmed uuringud on näidanud, et metaani sidumine ja emiteerimine on seotud mulla füüsikaliste omadustega, nagu mulla tekstuur, kuiva pinnase tihedus ja mulla mahuline veesisaldus (Clément *et al.*, 2020). Üldiselt aga jäävad mõlema puuliigi CH<sub>4</sub>-vood  $-0,363$  ja  $0,547 \mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$  vahele, olles tihti nulli lähedal. Erinevused metaanivoogudes võivad olla tingitud pinnase veesisaldusest ja mulla temperatuurist (Machacova *et al.*, 2016). Metaanivood on suuremad, kui on kõrgemad temperatuurid ja suurem veesisaldus mullas (Luo *et al.*, 2013).

Naerugaasi vood on nii kuusel kui ka kasel positiivsed ja negatiivsed (Joonis 6, Joonis 7). See näitab, et puutüved nii emiteerivad kui ka seovad naerugaasi. Tulemustest selgus, et kase N<sub>2</sub>O vood olid suuremad kui kuusel. N<sub>2</sub>O vood olid suuremad oktoobris ja märtsis, kuid talvised vood jäid nulli lähedale. Kuuse naerugaasi vood jäid samuti enamasti nulli lähedale, olles tihti

ka negatiivsed. Machacova *et al.* (2019) uurimuses leiti, et puutüvede naerugaasi vood näitavad selget aastaegade dünaamikat ning peamine voog tuleb suvekuudel, kui õhutemperatuur on kõrgem (Machacova *et al.*, 2019).

Kuuse N<sub>2</sub>O voo suured kõikumised võivad olla tingitud nõrgast seosest kuuse puutüve ja metsa pinnasest tuleva naerugaasi voo vahel. Tugeva korrelatsiooni puudumine näitab sidumatust puutüve ja pinnasest tuleva N<sub>2</sub>O voo vahel, mistõttu on vood niivõrd erinevad (Machacova *et al.*, 2019). Kuuselt saadud väikseim naerugaasi voog ( $-0,209 \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ ) võib olla tingitud vähesest mineraalse lämmastiku kättesaadavusest ja ladestumisest (Machacova *et al.*, 2016).

Kaselt kahel esimesel mõõtmispäeval (22. ja 28. oktoobril 2020) mõõdetud N<sub>2</sub>O vood olid suuremad kui ülejäänud uurimisperioodil mõõdetud vood. See võib olla tingitud mulla temperatuurist. Becker *et al.* (2018) uurimuses tõestati, et mulla temperatuuri ja mulla lämmastiku mineralisatsiooni intensiivsuse vahel on positiivne seos. See tähendab, et kõrgema mulla temperatuuri korral on ka mulla lämmastiku mineralisatsioon suurem, eeldusel, et vood tulevad mullast. See näitab, et kuivendatud turbapinnased võivad olla sama viljakad kui mineraalsed mullad. Metsas oleva lämmastiku kogus mõjutab otseselt mulla naerugaasi kontsentratsiooni. Enamasti jäävad kase naerugaasi vood siiski  $-0,038$  ja  $4,125 \mu\text{g N m}^{-2} \text{h}^{-1}$  vahele. Väiksemad naerugaasi vood võivad olla tingitud vähesest mineraalse lämmastiku kättesaadavusest ja ladestumisest (Machacova *et al.*, 2016).

Töö kolmas uurimisküsimus oli järgmine: millised on naerugaasi ja metaanivood erinevatelt kõrgustelt (10–20 cm, 70–80 cm, 170–180 cm) maapinnast. Kolme erineva kõrguse vaheliste erinevuste testimiseks kasutati Wilcoxon signed-rank testi. Selgus, et esimese ja teise kõrguse ning teise ja kolmanda kõrguse vahel ei olnud statistiliselt olulist erinevust, kuid oluline erinevus leiti esimese ja kolmanda kõrgusel tehtud mõõtmiste vahel.

Kuuse ja kase puutüvedelt mõõdetud naerugaasi voog vähenes kõrguse kasvades. See võib olla tingitud nõrgast seosest puutüve ja metsa pinnasest tuleva naerugaasi voo vahel. See näitab puutüve ja pinnasest tuleva N<sub>2</sub>O voo vahel sidumatust (Machacova *et al.*, 2019). Schindler *et al.* (2020) uurimuses saadi sama tulemus, nagu selles uurimistöös ehk 10 cm kõrguselt maapinnast emiteerus rohkem naerugaasi kui 170 cm kõrguselt maapinnast.

Kolmanda uurimisküsimuse põhjal püstitati hüpotees, et metaani emiteerub kõige rohkem maapinna lähedalt ja kõrguse kasvades vood vähenevad. Hüpotees ei pidanud paika, sest mõlema puuliigi metaanivood suurenesid kõrguse kasvades. See võib olla tingitud metaanivoo ja mulla niiskuse vahelisest seosest (Schindler *et al.*, 2020). Kõrguse kasvades metaanivoogude

vähennemist on täheldatud varasemates uuringutes (Terazawa *et al.*, 2007; Barba *et al.*, 2019; Sjögersten *et al.*, 2020), mis tehti väljaspool boreaalset metsavööndit. Metaanivoo vähennemist kõrguse kasvades on tõestatud ka boreaalsetes metsades (Machacova *et al.*, 2018).

Kui võrrelda erinevatelt kõrgustelt kase ja kuuse puutüvedelt saadud naerugaasi ja metaanivooge, siis selgub, et üldiselt olid mõlemal puuliigil naerugaasi vood mõõtmisperioodi jooksul suuremad kui metaanivood. Suuremad N<sub>2</sub>O vood saadi ka Machacova *et al.*, (2013) uurimuse tulemusena. Puutüvedest tulevad vood varieeruvad sesoonselt ja olenevad puuliigist (Sjögersten *et al.*, 2020).

Lisaks kase ja kuuse puutüvedelt saadud naerugaasi ja metaanivoogudele uuriti ka mõõtmisperioodil mõõdetud mulla temperatuuride ja mulla niiskuste andmeid. Analüüsimiseks kasutati Spearmani korrelatsioonikordajat mõlema puuliigi, kasvuhuonegaasi ja mullaparameetri puhul. Selgus, et kase ja kuuse puutüvelt tulevate naerugaasi ja metaanivoogude ning mulla parameetrite vahel ei ole statistiliselt olulist seost, sest olulisuse nivoo ( $p$ ) oli suurem kui 0,05.

Kõige kõrgem oli mulla temperatuur 28. oktoobril 2020, kui temperatuur küündis 9,3 °C-ni (Joonis 8). See võib olla tingitud soojast õhutemperatuurist. Kõige madalam oli mulla temperatuur 10. veebruar 2021 – 29. märts 2021, kui see oli 0,5 kuni 0,6 °C. See võib olla põhjustatud madalast õhutemperatuurist. Mulla temperatuuri sujuvat langust saab seletada talveperioodi tulekuga, kui õhutemperatuur langes alla nulli, põhjustades ka mulla temperatuuri langust. Mulla külmumine algab novembri teisel poolel või detsembri alguses. See tähendab, et mullas on teatud hulgal soojust ja mullalahuses olevate soolade tõttu külmub muld madalama temperatuuri juures, mis on alla null kraadi. Metsamulla külmumise tõenäosus on aga väiksem, sest seal ei soodusta miski püsivat lumikatet (Astover *et al.*, 2012).

Kõige suuremad mõõdetud mulla niiskused olid 81,0% ja 84,1% (Joonis 8). See võib olla tingitud rohketest sademetest ja lume sulamisest, mis põhjustavad suuremat mulla veesisaldust. Kui mulla veesisaldus on väga kõrge, siis taimed ei suuda enam vett ja toitaineid omastada. Mida rohkem on mullas vett, seda vähem on õhku. Hapniku puudusel hakkavad toimuma anaeroobsed protsessid ning mulda tekivad mürgised ühendid, mis takistavad taime kasvu. Üldiselt madal mulla niiskus võib olla põhjustatud jahedast ja pilvisest ilmast, kui mulla veesisaldus võib olla väiksem (Astover *et al.*, 2012).

Mida kõrgem temperatuur, seda suurem on mulla veevajadus, et tagada taimede transpiratsioon ja fotosüntees (Astover *et al.*, 2012). N<sub>2</sub>O vood on kõige suuremad siis, kui muld on soojem ja

niiskem. N<sub>2</sub>O ajalist dünaamikat mõjutavad ka süsiniku ja lämmastiku kättesaadavus ning mikroobide kooslus. Suured naerugaasi vood on ka siis, kui muld puutub külmumis-sulamis perioodil kokku piisavalt kõrge mulla niiskusega (Luo *et al.*, 2013). Mulla metaanivood sõltuvad süsiniku kättesaadavusest, mulla temperatuurist ja veesisaldusest (Schindler *et al.*, 2020). Suurimad metaanivood on seotud kõrge veetasemega, mida põhjustavad sademed ja sulamine. Mida kõrgem on temperatuur, seda rohkem toodetakse metaani. Metaani voogude vähenemine võib olla põhjustatud mulla niiskuse vähenemisest. (Sundqvist *et al.*, 2015) Kõrgema veetaseme puhul kuivendatud turbaaladel emiteerub suurel hulgal metaani, kuid vähe naerugaasi (Ojanen *et al.*, 2010). Schindler *et al.* (2020) uurimuses tehti kindlaks, et mulla niiskuse ja naerugaasi voo vahel on negatiivne seos, kuid metaanivooga positiivne seos.

Tulemustest selgub, et 26. jaanuaril mõõdeti kase ja kuuse puutüvelt kõige väiksem metaanivoog ning kuuse puutüvelt kõige väiksem naerugaasi voog. Sel päeval oli madal mulla temperatuur, kuid kõrge mulla niiskus. See tähendab, et kõrge mulla niiskuse korral vood peaksid olema kõrged, kuid madal temperatuur hoiab nad väikesed.

## KOKKUVÕTE

Tänapäeval on üheks olulisemaks keskkonnaprobleemiks kliimamuutus. Mitmed uuringud on tõestanud, et atmosfääri lendub üha suuremas koguses kasvuhoonegaase, aga nende emissioonide täpset kogust ei ole kindlaks määratud. Peamiselt lendub metaani ja naerugaasi maapealsetest ökosüsteemidest, eriti boreaalsetest metsadest ja märgaladelt. Nende kasvuhoonegaaside emiteerimist mõjutab suurel hulgal inimtegevus, aga seejuures on olulised ka looduslikud vood. Mitmed uuringud on kindlaks teinud, et muld ja puutüved nii emiteerivad kui ka seovad metaani ja naerugaasi.

Selle bakalaureusetöö eesmärk oli teada saada, millised on metaani ja naerugaasi vood kuuse ja kase puutüvelt. Katse teostati Agali II uurimisjaamas viie kuu jooksul (22.10.2020–29.03.2021), kus proovid võeti iga nädal kord nädalas tunniajalise intervalliga. Katse tegemiseks kasutati suletud gaasikambrite meetodit ja proove võeti kolmelt erinevalt kõrguselt maapinnast (10–20 cm, 70–80 cm, 170–180 cm). Mõõtmisteks valiti 18 puud, millest 12 olid kased ja 6 olid kuused.

Tulemustest selgus, et esimene hüpotees leidis kinnitust, sest naerugaasi vood olid kaselt suuremad kui kuuselt ning naerugaasi emissioonidel oli sesoonne trend. Kuuse  $N_2O$  ja  $CH_4$ -vood olid aga väga madalad ja seal ei olnud selget trendi. Teine hüpotees selles töös kinnitust ei leidnud, sest selgus, et naerugaasi talvised puutüvede vood on sulamis-külmumisprotsessi ajal väiksemad.  $N_2O$  vood on suuremad siis, kui mulla temperatuur on kõrgem. Samuti ei leidnud kinnitust kolmas hüpotees, sest metaanivood olid mõlemal puuliigil maapinna lähedal kõige väiksemad ja kõrguse kasvades vood suurenesid. See võib olla tingitud mulla niiskuse ja metaanivoo vahelisest seosest. Mulla niiskus võib mõjutada metaani sidumist, reguleerides hapniku ja metaani difusiooni mullas. Kolme erineva kõrguse võrdlusest järeldus, et kuuse ja kase puutüvedelt mõõdetud  $N_2O$  vood vähenevad kõrguse kasvades, mis näitab puutüve ja pinnasest tuleva naerugaasi voo vahel sidumatust.

Pikaajaliste naerugaasi ja metaanivoogude sesoonsuse hindamiseks tuleb mõõtmisi teostada aastaringiselt. Selleks, et saaks teha täpsemaid järeldusi tüvevoogude kohta, tuleb uuringuid teostada erinevates metsatüüpides, uurides erinevate kasvuhoonegaaside emissioone erinevatelt puuliikidelt.

## **N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> fluxes from tree stems in deciduous mixed forest**

**Eliisa Lehtme**

### **SUMMARY**

Global climate change is caused by emissions of several greenhouse gases which are mostly caused by anthropogenic activity. In addition to anthropogenic emissions, natural fluxes are also important. Boreal forests and wetlands are important sources of two greenhouse gases – methane (CH<sub>4</sub>) and nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) – to the atmosphere. In addition to fluxes from forest and wetland soils, tree stems also exchange greenhouse gases with the atmosphere. As tree stems are potential sources of greenhouse gases, it is crucial to examine their fluxes and other associated processes. Studying these greenhouse gases is important because little is known about their dynamics between the soil, tree stems and the atmosphere.

The aim of this bachelor's thesis is to find out how the stems of different tree species exchange N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> with the atmosphere. Therefore, the following research questions were posed:

1. How do N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> fluxes differ between the stems of birch and spruce trees in a hemiboreal drained peatland?
2. How do N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> flows change during the winter? What is the seasonality of the fluxes?
3. What are the fluxes of N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> from the stems of both tree species at different heights from the ground?

The following hypotheses were raised:

1. N<sub>2</sub>O fluxes are higher from birch stems than from spruce stems.
2. The winter fluxes of N<sub>2</sub>O from tree stems are higher during freeze-thaw events.
3. Methane emissions are higher close to the ground and fluxes decrease with increasing tree height.

The experiment was conducted at the Agali II Research Station in eastern Estonia for five months, where samples were taken weekly at hourly intervals. The closed gas chamber method was used for sampling and samples were taken from tree stems at three different heights above the ground.

Aforementioned research questions were answered, but two hypotheses were not confirmed. The results showed that N<sub>2</sub>O fluxes were higher from birch than spruce, and N<sub>2</sub>O emissions had

a seasonal trend of higher fluxes during autumn and spring. However, spruce N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> fluxes were very low and there was no clear seasonality trend. The second hypothesis was not confirmed in this work, because it was found that the winter fluxes of N<sub>2</sub>O from the tree stems are relatively small during freeze-thaw events, compared to autumn and spring fluxes. The third hypothesis was not confirmed, because methane fluxes were the lowest near the ground for both tree species, and the fluxes increased with growing height. A comparison of fluxes from three different heights concluded that the N<sub>2</sub>O measured from spruce and birch tree stems decrease with increasing height. A possible reason for this is that there is a weak correlation between tree stems and the forest floor. It indicates a partial decoupling of stem and forest floor N<sub>2</sub>O fluxes.

## **TÄNUAVALDUSED**

Täna oma juhendajat Kaido Soosaart töö teema välja pakkumise, kannatlikkuse ja pühendatud aja eest. Samuti soovin tänada kaasjuhendajat Reti Ranniku soovituslike nõuannete ja meeldejäivate iganädalaste uurimisalal käimiste eest.

## KASUTATUD KIRJANDUS

- Alexe, M., Bergamaschi, P., Segers, A., Detmers, R., Butz, A., Hasekamp, O., Guerlet, S., Parker, R., Boesch, H., Frankenberg, C., & others. (2015). Inverse modelling of CH<sub>4</sub> emissions for 2010–2011 using different satellite retrieval products from GOSAT and SCIAMACHY. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *15*(1), 113–133.
- Baran, S., Sikolya, K., & Stehlík, M. (2015). Optimal designs for the methane flux in troposphere. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, *146*, 407–417.
- Battye, W., Aneja, V. P., & Schlesinger, W. H. (2017). Is nitrogen the next carbon? *Earth's Future*, *5*(9), 894–904.
- Becker, H., Aosaar, J., Varik, M., Morozov, G., Aun, K., Mander, Ü., Soosaar, K., Uri, V., & others. (2018). Annual net nitrogen mineralization and litter flux in well-drained downy birch, Norway spruce and Scots pine forest ecosystems. *Silva Fenn*, *52*(4), 1–18.
- Bodelier, P. L., & Laanbroek, H. J. (2004). Nitrogen as a regulatory factor of methane oxidation in soils and sediments. *FEMS Microbiology Ecology*, *47*(3), 265–277.
- Bridgman, S. D., Cadillo-Quiroz, H., Keller, J. K., & Zhuang, Q. (2013). Methane emissions from wetlands: Biogeochemical, microbial, and modeling perspectives from local to global scales. *Global Change Biology*, *19*(5), 1325–1346.
- Cicerone, R. J., & Oremland, R. S. (1988). Biogeochemical aspects of atmospheric methane. *Global Biogeochemical Cycles*, *2*(4), 299–327.
- Clément, R., Pärn, J., Maddison, M., Henine, H., Chaumont, C., Tournebize, J., Uri, V., Espenberg, M., Günther, T., & Mander, Ü. (2020). Frequency-domain electromagnetic induction for upscaling greenhouse gas fluxes in two hemiboreal drained peatland forests. *Journal of Applied Geophysics*, *173*, 103944.

- Helbig, M., Chasmer, L. E., Kljun, N., Quinton, W. L., Treat, C. C., & Sonnentag, O. (2017). The positive net radiative greenhouse gas forcing of increasing methane emissions from a thawing boreal forest-wetland landscape. *Global Change Biology*, 23(6), 2413–2427.
- Hou, M., Venäläinen, A. K., Wang, L., Pirinen, P., Gao, Y., Jin, S., Zhu, Y., Qin, F., Hu, Y., & others. (2020). Spatio-temporal divergence in the responses of Finland's boreal forests to climate variables. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 92, 102186.
- Khalil, M., & Shearer, M. J. (2006). Decreasing emissions of methane from rice agriculture. *International Congress Series*, 1293, 33–41.
- Kholod, N., Evans, M., Pilcher, R. C., Roshchanka, V., Ruiz, F., Côté, M., & Collings, R. (2020). Global methane emissions from coal mining to continue growing even with declining coal production. *Journal of Cleaner Production*, 256, 120489.
- Kijewska, A., & Bluszcz, A. (2016). Analysis of greenhouse gas emissions in the European Union member states with the use of an agglomeration algorithm. *Journal of Sustainable Mining*, 15(4), 133–142.
- Lemke, R., & Farrell, R. (2008). Nitrous oxide emissions and prairie agriculture. *Prairie Soils and Crops*, 1, 11–15.
- Lohila, A., Aurela, M., Hatakka, J., Pihlatie, M., Minkkinen, K., Penttilä, T., & Laurila, T. (2010). Responses of N<sub>2</sub>O fluxes to temperature, water table and N deposition in a northern boreal fen. *European Journal of Soil Science*, 61(5), 651–661.
- Lorenz, K., & Lal, R. (2009). *Carbon sequestration in forest ecosystems*. Springer.
- Luo, G., Kiese, R., Wolf, B., & Butterbach-Bahl, K. (2013). Effects of soil temperature and moisture on methane uptake and nitrous oxide emissions across three different ecosystem types. *Biogeosciences*, 10(5), 3205–3219.

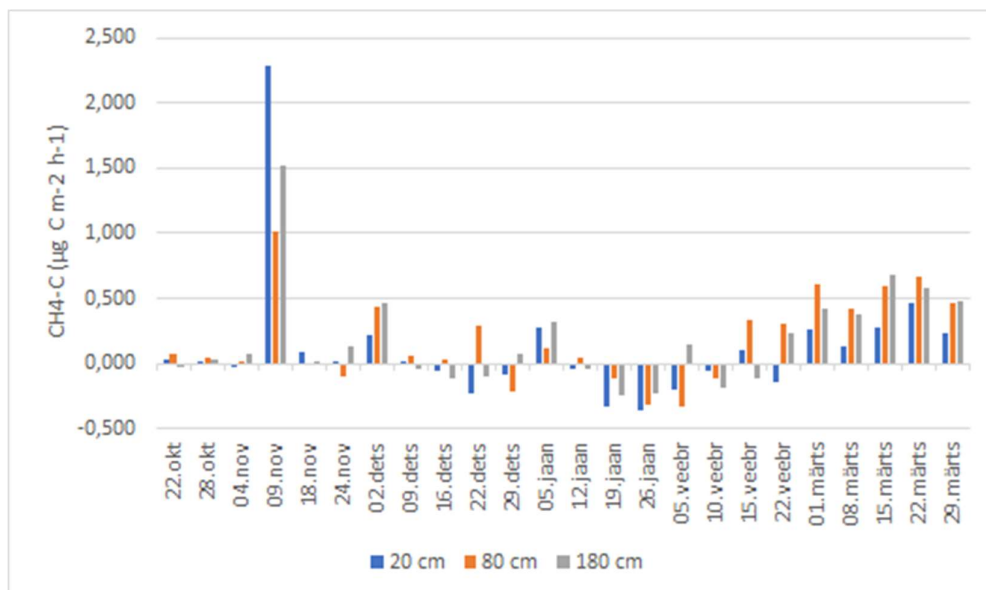
- Machacova, K., Bäck, J., Vanhatalo, A., Halmeenmäki, E., Kolari, P., Mammarella, I., Pumpanen, J., Acosta, M., Urban, O., & Pihlatie, M. (2016). Pinus sylvestris as a missing source of nitrous oxide and methane in boreal forest. *Scientific Reports*, 6(1), 1–8.
- Machacova, K., Halmeenmäki, E., Pihlatie, M., Haikarainen, I., Maier, M., Lang, F., Svobodova, K., Janebova, K., Stellner, S., Dusek, J., & others. (2018). Methane (CH<sub>4</sub>) fluxes in trees of temperate and boreal zones. What have we learned? *EGU General Assembly Conference Abstracts*, 7299.
- Machacova, K., Papen, H., Kreuzwieser, J., & Rennenberg, H. (2013b). Inundation strongly stimulates nitrous oxide emissions from stems of the upland tree *Fagus sylvatica* and the riparian tree *Alnus glutinosa*. *Plant and Soil*, 364(1), 287–301.
- Machacova, K., Vainio, E., Urban, O., & Pihlatie, M. (2019). Seasonal dynamics of stem N<sub>2</sub>O exchange follow the physiological activity of boreal trees. *Nature Communications*, 10(1), 1–13.
- Maranon, E., Salter, A. M., Castrillon, L., Heaven, S., & Fernández-Nava, Y. (2011). Reducing the environmental impact of methane emissions from dairy farms by anaerobic digestion of cattle waste. *Waste Management*, 31(8), 1745–1751.
- Millar, N., Robertson, G. P., Grace, P. R., Gehl, R. J., & Hoben, J. P. (2010). Erratum to: Nitrogen fertilizer management for nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) mitigation in intensive corn (Maize) production: An emissions reduction protocol for US Midwest agriculture. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 15(4), 411–411.
- Moomaw, W. R. (2002). Energy, industry and nitrogen: Strategies for decreasing reactive nitrogen emissions. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 31(2), 184–189.

- Mosier, A., Wassmann, R., Verchot, L., King, J., & Palm, C. (2004). Methane and nitrogen oxide fluxes in tropical agricultural soils: Sources, sinks and mechanisms. *Environment, Development and Sustainability*, 6(1–2), 11–49.
- Nicolini, G., Castaldi, S., Fratini, G., & Valentini, R. (2013). A literature overview of micrometeorological CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O flux measurements in terrestrial ecosystems. *Atmospheric Environment*, 81, 311–319.
- Nisbet, E. G., Dlugokencky, E. J., & Bousquet, P. (2014). Methane on the rise—Again. *Science*, 343(6170), 493–495.
- Ravishankara, A., Daniel, J. S., & Portmann, R. W. (2009). Nitrous oxide (N<sub>2</sub>O): The dominant ozone-depleting substance emitted in the 21st century. *Science*, 326(5949), 123–125.
- Ruckstuhl, K., Johnson, E., & Miyanishi, K. (2008). *Introduction. The boreal forest and global change*. The Royal Society London.
- Scheer, C., Pelster, D. E., & Butterbach-Bahl, K. (2020). Editorial Overview: Climate change, reactive nitrogen, food security and sustainable agriculture—the case of N<sub>2</sub>O. Elsevier.
- Schindler, T., Mander, Ü., Machacova, K., Espenberg, M., Krasnov, D., Escuer-Gatius, J., Veber, G., Pärn, J., & Soosaar, K. (2020). Short-term flooding increases CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions from trees in a riparian forest soil-stem continuum. *Scientific Reports*, 10(1), 1–10.
- Singh, C. K., Kumar, A., & Roy, S. S. (2017). Estimating potential methane emission from municipal solid waste and a site suitability analysis of existing landfills in Delhi, India. *Technologies*, 5(4), 62.
- Singh, J., Singh, S., Raghubanshi, A., Singh, S., Kashyap, A., & Reddy, V. (1997). Effect of soil nitrogen, carbon and moisture on methane uptake by dry tropical forest soils. *Plant and Soil*, 196(1), 115–121.

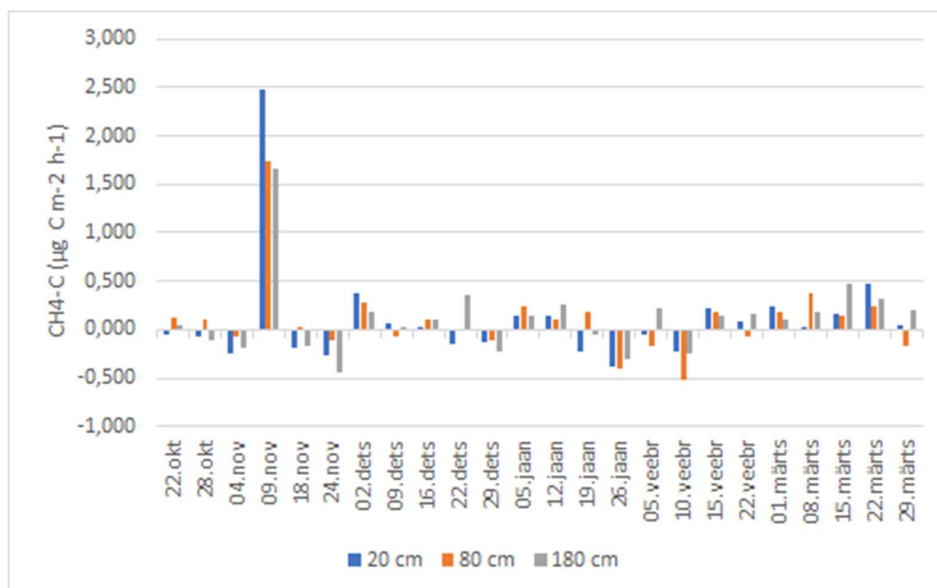
- Sundqvist, E., Mölder, M., Crill, P., Kljun, N., & Lindroth, A. (2015). Methane exchange in a boreal forest estimated by gradient method. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, *67*(1), 26688.
- Taggart, R. E., & Cross, A. T. (2009). Global greenhouse to icehouse and back again: The origin and future of the Boreal Forest biome. *Global and Planetary Change*, *65*(3–4), 115–121.
- Terazawa, K., Ishizuka, S., Sakata, T., Yamada, K., & Takahashi, M. (2007). Methane emissions from stems of *Fraxinus mandshurica* var. *Japonica* trees in a floodplain forest. *Soil Biology and Biochemistry*, *39*(10), 2689–2692.
- Terazawa, K., Yamada, K., Ohno, Y., Sakata, T., & Ishizuka, S. (2015). Spatial and temporal variability in methane emissions from tree stems of *Fraxinus mandshurica* in a cool-temperate floodplain forest. *Biogeochemistry*, *123*(3), 349–362.
- Tian, H., Lu, C., Ciais, P., Michalak, A. M., Canadell, J. G., Saikawa, E., Huntzinger, D. N., Gurney, K. R., Sitch, S., Zhang, B., & others. (2016). The terrestrial biosphere as a net source of greenhouse gases to the atmosphere. *Nature*, *531*(7593), 225–228.
- Tian, L., Zhu, B., & Akiyama, H. (2017). Seasonal variations in indirect N<sub>2</sub>O emissions from an agricultural headwater ditch. *Biology and Fertility of Soils*, *53*(6), 651–662.
- Vainio, E. (2019). The contributions of soil, ground vegetation and trees to the methane exchange of boreal forest.
- Vargas, R., & Barba, J. (2019). Greenhouse gas fluxes from tree stems. *Trends in Plant Science*, *24*(4), 296–299.
- Viru, B., Veber, G., Jaagus, J., Kull, A., Maddison, M., Muhel, M., Espenberg, M., Teemusk, A., & Mander, Ü. (2020). Wintertime Greenhouse Gas Fluxes in Hemiboreal Drained Peatlands. *Atmosphere*, *11*(7), 731.

- Wang, W., Hou, Y., Pan, W., Vinay, N., Mo, F., Liao, Y., & Wen, X. (2021). Continuous application of conservation tillage affects in situ N<sub>2</sub>O emissions and nitrogen cycling gene abundances following nitrogen fertilization. *Soil Biology and Biochemistry*, *157*, 108239.
- Wuebbles, D. J., & Hayhoe, K. (2002). Atmospheric methane and global change. *Earth-Science Reviews*, *57*(3–4), 177–210.
- Xi-Liu, Y., & Qing-Xian, G. (2018). Contributions of natural systems and human activity to greenhouse gas emissions. *Advances in Climate Change Research*, *9*(4), 243–252.

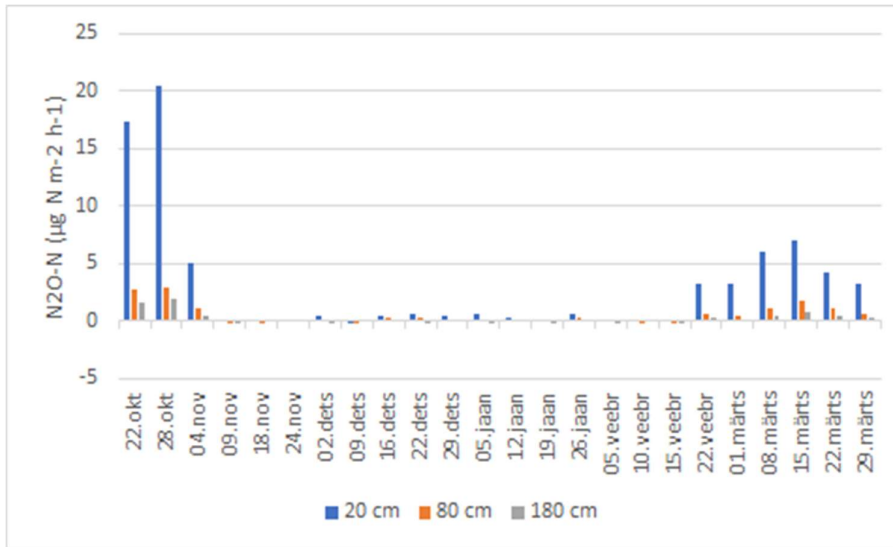
## LISAD



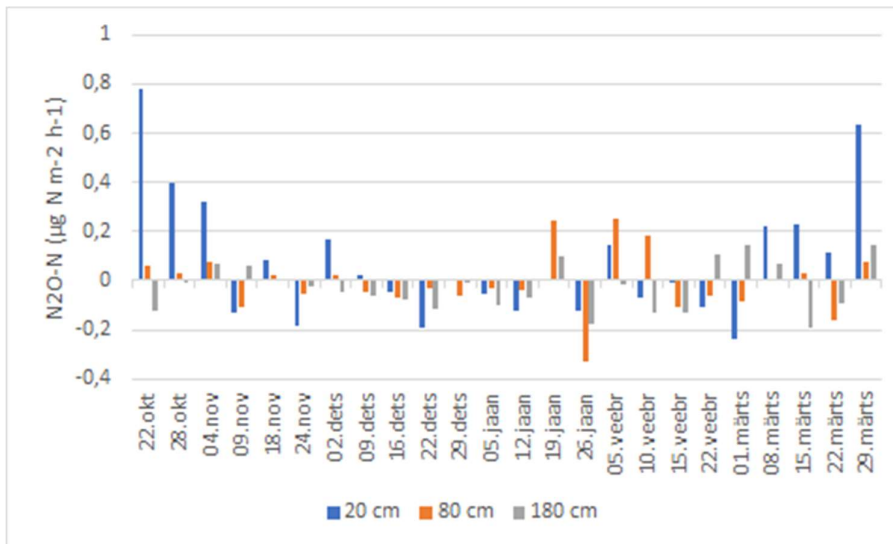
Joonis 1. Kase metaanivood kolme kõrguse võrdluses



Joonis 2. Kuuse metaanivood kolme kõrguse võrdluses



Joonis 3. Kase naerugaasi vood kolme kõrguse võrdluses



Joonis 4. Kuuse naerugaasi vood kolme kõrguse võrdluses

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

Mina, Eliisa Lehtme,

1. Annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose „Puutüvede N<sub>2</sub>O ja CH<sub>4</sub>-vood kuivendatud kõdusoo segametsast“, mille juhendajad on Kaido Soosaar ja Reti Ranniku reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada, sealhulgas lisada digitaalarhiivi DSpace kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.

2. Annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace kaudu Creative Commons'i litsentsiga CC BY NC ND 3.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.

3. Olen teadlik, et punktides 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

4. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei riku ma teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse õigusaktidest tulenevaid õigusi.

Eliisa Lehtme

24.05.2020