

Tartu Ülikool

Loodus- ja täppisteaduste valdkond

Ökoloogia ja maateaduste instituut

Geograafia osakond

Bakalaureusetöö geograafias (12 EAP)

**Metaanivood Soontaga metsaökosüsteemi uurimisjaamas
aastatel 2013–2019**

Marie Johanna Univer

Juhendaja: PhD Kaido Soosaar

Tartu 2020

Annotatsioon

Metaanivood Soontaga metsaökosüsteemi uurimisjaamas aastatel 2013–2019

Metaan on atmosfääris üks kiiremini kasvava kontsentratsiooniga kasvuhoonegaase, mille globaalsete varude ja voogude kohta ei ole siiani täit selgust. Siiski on teada, et metsamullad on suured süsinikuvarud ja võivad olla metaani sidujad. Bakalaureusetöös uuriti pikaajalisi metaanivooge Soontaga metsaökosüsteemi uurimisjaamas. Töö aluseks on aastatel 2013–2019 Soontaga mõõtejaamas kogutud igakuiste gaasiproovide analüüsitulemused, milledest varasem kokkuvõttev analüüs puudus. Metaani (CH₄) kontsentratsiooni proovi analüüsiti gaaskromatograafia Tü maastikuökoloogia laboris. Püstitati hüpotees: Metsaökosüsteemi vanuse kasvades suureneb ka selle võime metaani siduda. Korrelatsioonimaatriksi abil leiti aastate vaheliste voogude sarnasused ning regressioonimudeli abil temperatuuri, mullaniiskuse ja CH₄ sidumise vahelised seosed. Sarnaseimate voogudega olid 2014. ja 2018 aasta ($r = 0,87$). Lisaks selgus, et metaanivood on sesoonse muustriga, olles temperatuurist tugevas negatiivses sõltuvuses ($p = -0,77$), mullaniiskus aga metaanivooge ei mõjutanud. Metsa vanuse kasvades suurenes veidi ka metaani sidumine.

Märksõnad: CH₄, kliimamuutus, metaan, metsaökosüsteem, mullahingamine, mullaniiskus, Soontaga uurimijaam, temperatuur,

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

Annotation

Methane Emissions from Soontaga Research Station from 2013–2019

Methane (CH₄) concentrations in the atmosphere are rising more rapidly than any other GHG. However, uncertainties still remain in the estimates of global methane stocks and fluxes, yet it is known that forest soils are acting as C sinks and sequester CH₄ fluxes. The aim of this Bachelor's thesis was to give an overview of long-term methane emissions from Soontaga research station. This paper is based on the monthly gas samples collected from Soontaga between 2013–2019. Samples, collected from those past seven years, had not been thoroughly analyzed before. The concentration of GHGs in collected samples was analyzed using gas-chromatograph in Tartu University's laboratory. A hypothesis was set, that as the forest ages, the more intensive methane sequestration by forest floor becomes. A correlation matrix was made to determine the years with similar sequestration ratios and multiple regression analyze was applied to find out the relationship between air temperature soil humidity and CH₄

sequestration. The results showed the seasonality in methane fluxes and a strong negative correlation with temperature ($p = -0,77$). Soil humidity didn't have a statistical significance over methane. Over time, methane sequestration by the soil slightly raised.

Keywords: Methane, CH₄, Soontaga, soil respiration, climate change

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

Sisukord

Sissejuhatus	5
Terminoloogia	7
1 Teoreetiline ülevaade	9
1.1 Metaani olulisus kliimamuutustes	9
1.2 Metaanivood mullast ning seda mõjutavad keskkonnaparameetrid	13
1.3 Metsaökosüsteemid metaani sidujatena.....	14
2 Andmed ja meetodika	17
2.1 Uurimisala kirjeldus	17
2.2 Andmete kogumine.....	19
2.3 Statistiline andmetöötlus.....	21
3 Tulemused.....	22
3.1 Metaanivoogude ja temperatuuri aastased käigud.....	22
3.2 Vaatlusaastate omavahelised korrelatsioonid	26
3.3 Metaanivoogude ja temperatuuri vaheline seos.....	27
3.4 Metaanivoogude ja mullaniiskuse vaheline seos.....	28
4 Arutelu	31
Kokkuvõte	34
Summary	35
Tänuavaldused.....	36
Kasutatud allikad.....	37
Lisa 1	43

Sissejuhatus

Kliimamuutusi ja kliimasoojenemist põhjustab aina suurenev süsiniku kogus atmosfääris sinna paisatud kasvuhoonegaaside (CO_2 , N_2O , CH_4 , CFC-ühendid, jt) tõttu (IPCC, 2007). 1997. aastal sõlmitud rahvusvaheline Kyoto protokoll oli esmaseks sammuks kasvuhoonegaaside heitekoguste vähendamisel ülemaailmsel tasandil (UNFCCC, 2008). 2015. aastal sõlmitud rahvusvaheline Pariisi kliimalepe võttis juba konkreetsema eesmärgi, hoida globaalne temperatuuri tõus alla 2°C , kuid tollal ei arvestatud, et süsihappegaasi kõrval on teinegi võimas kasvuhoonegaas, mille emissioone veel nii karmilt piiratud pole – metaan (Nisbet, 2019).

Metaan on atmosfääris üks kontsentratsioonidelt kiiremini kasvavaid kasvuhoonegaase (NOAA). Kuigi atmosfääris suhteliselt lühikese elueaga (10–12 aastat), on metaani globaalse soojenemise potentsiaal (*Global Warming Potential GWP*) 100 aasta jooksul 25 korda suurem kui süsihappegaasil (UNFCCC, 2008). Lisaks ootamatule kiirele kontsentratsiooni tõusule atmosfääris ning kõrgele globaalse soojenemise potentsiaalile ($\text{GWP} = 25$), valitseb suhteline teadmatus globaalsete metaanivoogude, metaanihoidlate ja emiteerijate tegeliku suuruse ja leviku kohta. (Ito, 2011). See teeb metaanist (veeauru kõrvale jättes) süsihappegaasi järel maailma tähtsuselt teise kasvuhoonegaasi (IPCC, 2007).

Metaani süsiniku isotoopide ($\delta^{13}\text{C}$, $\Delta^{14}\text{C}$) uuringud on näidanud, et atmosfäärse metaani kontsentratsiooni tõusus on suurem osa mängida hoopiski looduslikel emissioonidel ($\Delta^{14}\text{C}$), mitte antropogeensetel ($\delta^{13}\text{C}$), nagu varasemalt eeldatud (Saunio, 2016b). Globaalse soojenemise tagajärjel on hakanud sulama igikelts arktilistel märgaladel ning samamoodi on muutunud troopiliste märgalade veerežiim, mis vabastab varem süsiniku hoidlaks (ning metaani sidujaks) olnud muldadest tohututes kogustes süsihappegaasi ja metaani (Dluhokencky, 1994; Ito, 2011). Eesti metsamullad sisaldavad endas umbes 0,314 miljardit tonni süsinikku, mille varude muutust on oluline teada, et vähendada kasvuhoonegaaside heidet (Kriiska, 2019a). Muutuvad kliima- ja keskkonnatingimused, iseäranis tõusev temperatuur, suurendab mullahingamise (R_s) kaudu atmosfääri siseneva süsihappegaasi kogust. Normaalingimustel jõuab ainuüksi mullapealsest varisest tagasi atmosfääri umbes 20% süsinikust (Kriiska, 2019a). Metsadel on kliimamuutuste ohjeldamisel oluline roll ning seetõttu tehakse kasvuhoonegaaside mõõtmisi Soontaga 200-aastases, inimtegevusest vähemõjutatud, okasmetsas.

Bakalaureusetöö eesmärk on anda ülevaade Soontaga metsaökosüsteemis toimuvast gaasivahetusest sealsete metaanivoogude näitel. Töös analüüsitakse uurimisjaamast kogutud gaasiproove vahemikus 2013–2019 ning vaadeldakse nende varieeruvust aastate lõikes.

Lisaks aastate omavahelisele võrdlemisele otsitakse seoseid võetud proovide ning kuukeskmise õhutemperatuuriga ja mullaniiskusega. Püstitati hüpotees: Metsaökosüsteemi vanuse kasvades suureneb ka ökosüsteemi võime metaani siduda.

Töö teoreetilises osas antakse ülevaade metaani rollist ja olulisusest kliimasoojenemisel, metaani sidumist ja emiteerimist mõjutavatest keskkonnaparameetritest ning metaanivoogudest metsaökosüsteemides. Metoodika peatükk käsitleb Soontaga uurimisjaamast andmete kogumist ja analüüsi. Otsitakse seoseid mullaniiskuse, õhutemperatuuri ja metaani sidumise vahel. Samuti võrreldakse omavahel vaatlusaastaid nende metaanivoogude põhjal.

Eesti okasmetsade kasvuhoonegaaside aastasest käigust sõltub tuleviku kliima ning selle parem mõistmine aitab rakendada vajalikke meetmeid globaalse soojenemisega võitlemiseks.

Terminoloogia

Selles peatükis seletatakse lahti töös esinevad mõisted, mis hõlbustavad töö edaspidist lugemist ja arusaamist. Töö autor tundis, et selguse huvides tuleks mitmete inglise keelel põhinevate lühendite tähendus eesti keeles avada. Järgnevad definitsioonid pärinevad Kirschbaumilt (2001).

Autotroofne hingamine (Ra) (*Autotrophic respiration*)

Autotroofse hingamise all mõistetakse fotosünteesi käigus seotud, kuid taime elutegevuseks ja hingamiseks kulunud süsinikku. Ligikaudu pool kogu taimesse seotud süsinikust kulub autotroofseks hingamiseks. Mida kõrgem on õhutemperatuur, seda intensiivsem on autotroofne hingamine.

Heterotroofne hingamine (Rh) (*Heterotrophic respiration*)

Heterotroofne hingamine tähendab mullafloora ja -fauna elutegevuseks ja hingamiseks kuluvat süsinikku. See termin tähendab samal ajal ka laguprotsessis vabanevat süsinikku. Kriiska, (2019b) väidab, et enamik mullas sisalduvast orgaanilisest süsinikust kaob mikroorganismide elutegevuse ehk heterotroofse hingamise käigus.

Primaarproduktsoon ehk esmastootlus (NEE) (*net ecosystem exchange*)

NEE on primaarproduktsoon ehk esmastootlus ehk fotosünteesi ja süsihappegaasi abil orgaaniliste ühendite valmistamine, millel põhineb elu Maal. NEE on oma olemuselt voog – negatiivne, kui ökosüsteem seob CO₂-e ja positiivne kui CO₂-e emiteerib.

Süsiniku kogutoodang GPP (*gross primary production*)

Süsiniku kogutoodang on aasta jooksul fotosünteesi käigus ökosüsteemi seotud süsinik. Mõiste arvestab ka taimede elutegevuseks kulunud süsinikku.

Tegelik süsinikutoodang NPP (*net primary production*)

Tegelik süsinikutoodang väljendab aasta jooksul taimede toodetud süsiniku hulka, mida pole autotroofse hingamise käigus ära kasutatud. Valemina: $NPP = GPP - Ra$

Mullahingamine (Rs) (*soil respiration*)

Mullahingamise ehk ökosüsteemi maa-aluse respiratsiooni all mõistetakse kõiki mulda sisenevaid ja väljuvaid CO₂-e vooge. Mõningates teadustöodes tähendab mullahingamine aga

ainult heterotroofse hingamisega (ehk mullafauna hingamisega) vabanenud süsihappegaasi voogu. Taimejuurte autotroofset hingamist sel juhul sinna sisse ei arvestata.

1 Teoreetiline ülevaade

Järgnevalt antakse pikem ülevaade metaani mõjust ja rollist globaalses kliimasoojenemises, kirjeldatakse metaani produktsiooni ja sidumist mõjutavaid keskkonnaparameetreid ning kirjutatakse lahti metaani sidumine metsaökosüsteemide poolt.

1.1 Metaani olulisus kliimamuutustes

Kliimamuutusi põhjustab üha suurenev süsiniku kogus atmosfääris. Metaan (CH_4) on kliimamuutuste seisukohalt süsihappegaasi (CO_2) järel tähtsusest teine kasvuhoonegaas (kui mitte arvestada veeauru) (IPCC, 2007), mille heitekoguse vähendamist on mainitud 1997. aastal sõlmitud rahvusvahelises Kyoto protokollis (UNFCCC, 2008). Metaan, nagu teisedki kasvuhoonegaasid (CO_2 , N_2O , freoonid (CFC- ja HCFC-ühendid), jmt) mõjutab Maa kiirgusbilanssi, takistades soojuskiirguse hajumist kõrgematesse atmosfääri kihtidesse ja tekitades seega kasvuhooneefekti. (IPCC, 2007)

Metaani eluiga on atmosfääri paisatuna umbes kümme aastat, mis on globaalses mõttes suhteliselt lühike aeg, kuid mõjutab siiski oluliselt atmosfääri keemiat ja läbipaistvust. Lühike eluiga on tingitud metaani reageerimisest hüdroksüüli radikaaliga OH^- , mille tagajärjel laguneb metaan süsihappegaasiks ja veeauruks. (Hartmann, *et al.* 2013) Saastunud keskkondades (nt suurlinnade kohal) tekib atmosfääris metaani oksüdeerumise käigus peale süsihappegaasi ka troposfäärne osoon, mis halvendab aga hingatava õhu kvaliteeti. (NOAA).

Kuigi süsihappegaasi sisaldus atmosfääris on metaanist kõrgem (vastavalt 0,004% ja 0,00018%) on metaani globaalse soojenemise potentsiaal (*Global Warming Potential*) ehk toime kiirgusbilansile 100 aasta jooksul süsihappegaasi omast 25 kuni 28 korda suurem (arvud erinevad vastavalt allikale: IPCC järgi 25, NOAA järgi 28). USA riikliku atmosfääri ja ookeanivalitsuse NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) andmetel oli 2020. aasta jaanuari seisuga metaani globaalne kogus atmosfääris 1873,5 ppb ehk osakest miljardi kohta (*particles per billion*)(joonis 1.). Seda on umbes 0,9 korda ehk 228,85 ühikut rohkem mõõtmise algusest 1984. aastal, mil metaani koguseks mõõdeti 1644,65 ppb. Antarktise jää puurimisest saadud süsinikutaseme andmete järgi püsis metaani kogus atmosfääris sadu tuhandeid aastaid, kuni tööstusrevolutsiooni alguseni 1750datel, stabiilselt 700 ppb ümber. Inimkonna, jäätmete koguse kasvu ja fossiilkütuste käitlemise intensiivistumisega suurenes ka atmosfäärse metaani kogus hüppeliselt. (NASA, 2016)

Vastupidiselt CO₂-e kontsentratsioonile aeglustuvale kasvule atmosfääris on metaani kontsentratsioonid atmosfääris alates 2014. aastast on tõusnud kiiremini kui mistahes hetkel viimase kahekümne aasta jooksul (joonised 1 ja 2) (Saunois, 2016b; Dlugokencky, 2016). Ootamatu kasvu põhjus on kohati ebaselge, kuna globaalse metaanivaru suurus on täpselt teadmata, kuid metaani süsiniku isotoopanalüüsid on näidanud isotoobi $\Delta^{14}\text{C}$ kasvu, mis annab alust arvata atmosfäärse metaani peamiselt looduslikku päritolu (põllumajandus, märgalad). (Saunois, 2016b) Ka 2007. aastal täheldati metaani kontsentratsiooni kiiret tõusu atmosfääris, vastupidiselt 2000date alguses valitsenud stabiilsele olukorrale. Nimelt püsis metaani kontsentratsioon 1999-2006 aastal peaaegu, et konstantne (Hartmann, *et al.* 2013), olles sel perioodil umbes 1780 ppb (joonis 1). 2000. aastate suhteline stabiilsus võis olla mõjutatud Hodsoni (2011) arvates ookeani tsirkulatsiooni ja atmosfäärinähtusest El Niño, mille üheks tagajärjeks, paljude teiste seas, on suurenenud sademete hulk muidu kuivades piirkondades. Ootamatu tõus pärast 2006. aastat võis olla põhjustatud 2007. ja 2008. aastal Arktikas valitsenud temperatuurianomaaliatest ja troopikas keskmisest rohkemast sademete hulgast. (Dlugokencky *et al.*, 2009)

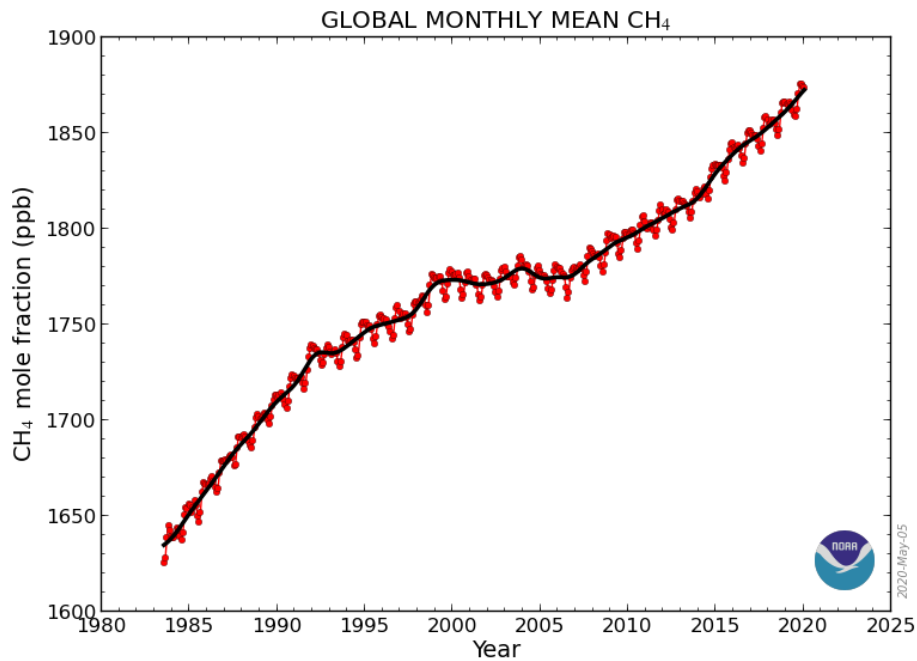
Metaaniga seotud protsesside keerukus ja heterogeensus jätab paratamatult tühimikke teadmistesse metaani globaalse varu ja voogude dünaamika osas (Ito, 2011). Atmosfäärse metaani kontsentratsiooni ajutisi ja/või lühiajalisi kõikumisi võivad mõjutada nii troopilised märgalad, atmosfääris toimuvad keemilised reaktsioonid, muutused antropogeensetes metaanivoogudes kui ka troposfääri ja stratosfääri vaheline gaasivahetus (Hodson, 2011).

Kiirenev metaani kontsentratsiooni kasv atmosfääris (joonis 2) seab ohtu 2015. aastal sõlmitud rahvusvahelise Pariisi kliimaleppe eesmärgi vähendada kasvuhooenergia heitekoguseid ja aeglustada seeläbi globaalset soojenemist (hoida globaalne temperatuuri tõus alla 2 °C võrreldes tööstusrevolutsioonieelse ajaga) (Nisbet, 2019). Erinevate allikate järgi pärineb 60% metaani emissioonist antropogeensetest allikatest – niisiis aitaks antropogeensete voogude vähendamine hoida ära metaani sisalduse järsu tõusu atmosfääris. (Nisbet, 2019; Saunois, 2016a)

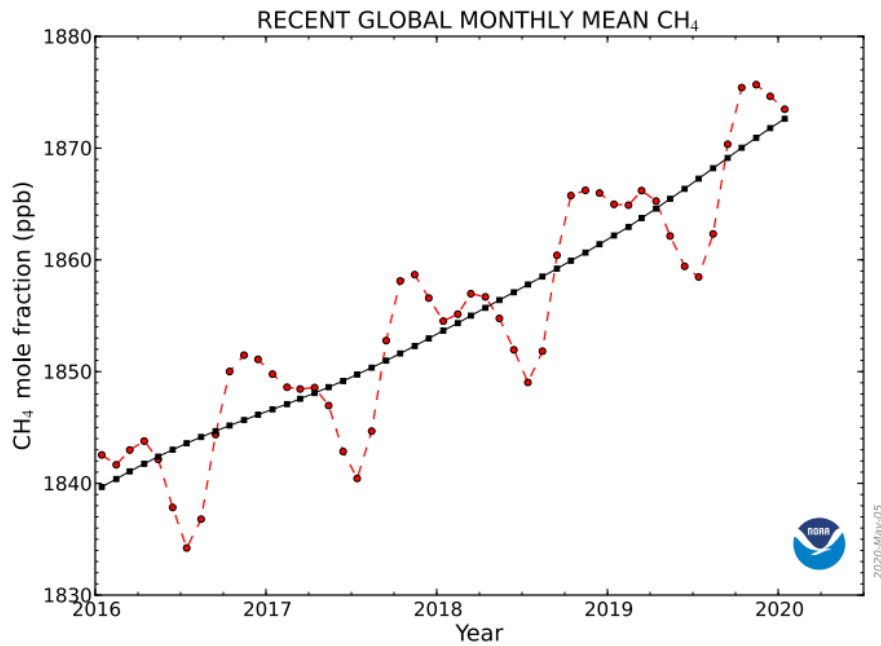
Seni on erilist rõhku pandud süsihappegaasi emissioonide vähendamisele, mis on rahvusvahelisel tasandil iseenesest juba keeruline ülesanne, kuid äsjaste arengute valguses metaani kontsentratsiooni tõusu osas tuleks metaani emissioonide vähendamisele pöörata samapalju tähelepanu (Saunois, 2016b).

Joonised 1 ja 2 kujutavad ülemaailmselt kasvavat metaani kogust atmosfääris vastavalt viimase neljakümne ja nelja aasta jooksul.

Metaan jõuab atmosfääri peamiselt järgmistest allikatest: märgaladel toimuvast anaeroobsest lagunemisest, riisipõllundusest, kariloomade kasvatamisest ja nende elutegevusest, biomassi põlemisest ja põletamisest (metsatulekahjud, söe põletamine, puidu põletamine ahikütteks), prügijäätmetes sisalduva orgaanilise aine lagunemise käigus ja fossiilsete kütuste põlemisel. (Heilig, 1994; Ito, 2011) Vahemikus 1996 kuni 2005 arvati maismaaökosüsteemid (sh märgalad ja loomakasvatus) olevat peamiseks metaani allikaks, emiteerides $308,3 \pm 20,7$ Tg metaani aastas (Ito, 2011).



Joonis 1. Metaani globaalsed kuukeskmised kogused (ppb, osakest triljoni kohta) atmosfääris mõõdetuna merepinnalt. (Allikas: NOAA)



Joonis 2. Metaani globaalsed vood aastatel 2016–2020. Kogused osakest miljardi kohta mõõdetuna merepinnalt. (Allikas: NOAA)

Atmosfääris oleva metaani kontsentratsiooni tõusu saaks kontrolli alla, vähendades antropogeensete voogude osakaalu, milleks on prügi ja jäätmete põletamine, kaevandamine ja loomakasvatus (Ito, 2011; Nisbet, 2019;). Kyoto protokoll järgi on üha suurenevas atmosfääris süsiniku osakaalus süüdi energiatööstus ehk fossiilsete kütuste põletamine, tööstus ja tootmine ning põllumajandus (kariloomad, riisikasvatus, põllumajanduslike jäätmete põletamine, jne) (UNFCCC, 2008). NOAA mudeli andmetel on enamik antropogeensid metaanivooge pärit Indiast ja Aasiast üldisemalt seoses riisikasvatuse ja jäätmekäitlusega. (NOAA)

Fossiilkütuste põletamisel vabanev süsinik moodustab siiski vaid osa globaalsest süsinikuringest (Kriiska, 2019). Mõningatel andmetel (Nisbet, 2019) on kliimasoojenemise tõttu looduslike metaanivoogude osakaal suurenenud. Isotoobimääramised on näidanud, et metaani isotoop 12, mida emiteerivad mikroorganismid, on atmosfääris tänapäeval ülekaalus – eelmisel kahel sajandil oli selleks metaan isotoobi arvuga 13, mis paisatud atmosfääri inimtegevuse käigus (Nisbet, 2019).

Märgalade ökosüsteemid on suurimad looduslikud metaani emiteerijad. Hinnanguliselt pärineb märgaladelt 100 kuni 230 Tg metaani aastas (IPCC, 2007). Samuti on hakanud kliimasoojenemise tagajärjel sulama igikelts Lääne-Siberi tundras, mille mullad oli varasemalt tohtuks süsinikuhoidlaks, kuid on nüüd, sulamise tagajärjel, muundunud metaani ja süsihappegaasi emiteerijaks. Sulamise tagajärjel eraldub neilt aladelt atmosfääri 4 kuni 17 Tg metaani aastas, mis moodustab kuni 7% globaalsest CH₄ emissioonist (Kirschke, 2013)

Metaani emiteerijaks on ka looduslikud põlengud, ookeanid ja termiidid oma elutegevusega. Metaani eritub ka geoloogilistest allikatest nagu hüdraadid ja geotermaalsüsteemid. (Dlühokencky, 1994) Metaanirikkad õhumassid võivad aja möödudes liikuda üle maailma.

Metaanivoogudel on täheldatud tugevat geograafilist, põhja-lõunasuunalist gradienti, kus aasta keskmine erinevus põhja- ja lõunapoolkera metaanivoogude vahel on 140 ppb. Suurtel lõunalaiustel on metaanivoogudel lihtne sesoonne tsükkel: miinimum on suvel või varasügisel, mis on seotud metaani fotokeemilisest lõhustumise tagajärjel tekkinud troposfääri (maapinnalähedasest) osoonist. Lõunalaiustel on tüüpiline metaani kontsentratsiooni amplituud 30 ppb. Põhjapoolkera metaanivoogude sesoonsed tsüklid on tulenevalt metaani emiteerijate ja sidujate suhete keerukusest ning transpordist atmosfääris komplekssemad. Arktika lähistel on metaani sesoonse tsükli amplituud kahekordne Lõunapoolkeral mõõdetust. (Dlugokencky, 1994)

Samas väitis teine samalaadne uuring (Ito, 2011), et aastaaegadest tingitud metaanivoogude erisused on mudelite järgi selgemini tuvastatavad just vahemikus 42° ja 68° põhjalaiust, kus märgalad emiteerivad suvisel vegetatsiooniperioodil aktiivselt metaani (Ito, 2011).

Globaalse temperatuuri keskmise ja maismaalt emiteeritud metaanivoogude vahel on leitud statistiliselt oluline, kuid nõrk lineaarne seos ($R^2 = 0,38$, $P < 0,01$). Maismaa metaani netoemissioon on kasvanud kiirusega 41,6 Tg aastas 1 °C temperatuuri tõusu kohta. Sõltuvalt metaani kõrgest globaalse soojenemise potentsiaalst (GWP = 25 100 aasta kohta; IPCC 2007), on see seotud üldise süsiniku kontsentratsiooni tõusuga süsinikuringes (284 Tg C aastas). (Ito, 2011)

1.2 Metaanivood mullast ning seda mõjutavad keskkonnaparametrid

Mullas on rohkem süsinikku kui atmosfääris ja taimedes kokku ning võib seal säilida tuhandeid aastaid, enne kui näiteks intensiivse maakasutuse tagajärjel sealt süsihappegaasi või metaani kujul väljub (UNFCCC, 2008; Kriiska, 2019a). Mullahingamise käigus eralduva süsiniku hulk sõltub mulla temperatuurist ja niiskusest – soojem ja niiskem muld emiteerib rohkem süsihappegaasi (Kriiska; 2019a). Süsiniku netoprimaarproduktioon (NPP) on väga tundlik temperatuuri suhtes, mistõttu viimase tõusmisel on ka süsiniku sidumine ökosüsteemi soodustatud (Järveoja, 2018).

Metaan tekib mullas looduslike protsesside (anaeroobse metanogeneesi) tagajärjel. Metaani netovoog, mis jõuab mulla ja atmosfääri kokkupuutealale, näiteks läbi taimede, on mulla sees toimunud metaani tootmise, tarbimise ja transpordiga seotud voogude ja protsesside tagajärg.

(Machacova, 2016) Üldjuhul on metaani parimaks sidujaks küllastumata hapnikurikas muld, milles elutsevad metanotroofsed bakterid tarbivad metaani energia saamiseks oma elutegevuse käigus (Saunois, 2016a; Noe, *et al.* 2011). Selliseid muldi leidub näiteks boreaalsetes metsades (Ribeiro-Kumara, *et al.* 2020), kus metanotroofide olemasolu on mulla võime metaani oksüdeerida ja siduda tähtsaks osaks (Noe, *et al.* 2011). Samamoodi sobib metanotroofidele kuivendatud turbamuldade ülemine õhutatud, põhjaveetasemest kõrgemal paiknev kiht. (Clément, *et al.* 2020)

Kirjanduse põhjal sõltub mullast väljuva metaani voog mullaniiskusest – kuivad mullad käituvad metaani oksüdeerijana, niisked aga emiteerijana (Noe, *et al.* 2011; Pärn, *et al.* 2014; Ribeiro-Kumara, 2020). Samas leiab Hansen, *et al.* (2011) oma uuringus, et ka suurema õhuniiskuse korral käituvad mullad metaani sidujana ning tavapärastes temperatuuri- ja niiskustingimustes on metaanivood enim sõltuvad hoopis mullatemperatuurist ja veepotentsiaalst. Ito (2011) on märkinud, et peale mulla enda veesisalduse mõjutab metaani sidumise määra oluliselt ka põhjavee tase. Looduslikud nähtused, nagu metsatulekahjud võivad oma mulda kuivendava mõjuga mõningal määral metaani sidumist mulda soodustada (Ribeiro-Kumara, 2020).

Samuti mõjutavad mulla füüsilised omadused (peamiselt tihedus) selle võimet metaani siduda ning nende omaduste põhjal saab teha esialgseid järeldusi kasvuhoonegaaside üldiste voogude kohta konkreetsest mullast (Ruser, 2008; Clément, *et al.* 2020). Näiteks langeb leht- ja okasmetsade mulla võime metaani siduda kui mulla tihedus tõuseb (Clément, *et al.* 2020).

2006. aastal kirjeldas Keppler oma uurimuses, kuidas taimede eksponeeritus UV-kiirgusele vallandas taimerakkudest teatud protsesside tagajärjel metaanivoo. Selle teooria lükkas osaliselt ümber Nisbet, *et al.* oma 2009 aasta publikatsioonis, kuna katsete põhjal sai selgeks, et taimedest UV-kiirguse mõjul eralduv metaan on taimedesse ammutatud mullavee kaudu juba varasemalt ning on taimes lahustunud kujul. Siiski on Keppleri (2006) sõnul endiselt võimalik metaani taimesisene moodustumine kas seal elavate mikroorganismide poolt või siis taime füsioloogiliste omaduste ja fotokeemiliste protsesside tõttu.

1.3 Metsaökosüsteemid metaani sidujatena

Metsaökosüsteemid võtavad enda alla suure osa biosfäärist ning kontrollivad maapinna ja atmosfääri vahelisi protsesse, nagu näiteks gaasivahetust (Noe, *et al.* 2011). (Hemi-)boreaalse metsa süsinikuringe dünaamika mõistmine on tähtis, et ennustada võimalikult täpselt kliimamuutuste mõju nii üksikule metsaökosüsteemile kui ka globaalsele süsinikuringele

üldisemalt (Arain, *et al.* 2002). Metsaökosüsteemide tähtsust globaalses süsinikuringes on märgitud ka ÜRO kliimamuutuste raamkonventsioonis (UNFCCC, 2008) ning nende võimekuse tõttu efektiivselt metaani siduda on metsi nimetatud isegi kliima jahendajateks (EMÜ, TÜ, 2016).

Hartmanni, *et al.* (2013) järgi on metsamullad ühed olulisemad orgaanilise süsiniku ladustajad. Siiski hinnatakse metsamuldade võimet metaani siduda erinevate autorite töödes väga laialdskaalal. Saunio, (2016a) leidis globaalse metaani sidumise muldade poolt olevat vahemikus 9–47 Tg y⁻¹.

Metsaökosüsteemi võime siduda metaani sõltub mullast, millel mets kasvab. Troopikametsade mullad on maailmas väga olulised süsiniku ja metaani sidujad, sidudes aastas umbes 2 kg CH₄-C hektari kohta (Zhao, 2019). Vähemolulised pole ka boreaalsed okasmetsad, mis seovad keskmiselt 1,94 kg metaani hektari kohta aastas. (Dalal, 2008) Soontagas varasemalt tehtud mõõtmiste põhjal on selgunud, et sealne mets on võimeline siduma lausa 2,3 tonni süsinikku hektari kohta aastas. Samuti märgiti ära süsiniku sidumise suurenemist mulda ökosüsteemi vanuse kasvades. (Soosaar, *et al.* 2016). Kliimasoojenemise tagajärjel muutuvad sademete ja aurumise mustrid ning vahekorrad, mis omakorda mõjutavad okasmetsade võimet metaani siduda (Machacova, 2016). Kuigi eelnevalt mainitu ning mõõtmiste põhjal arvatakse boreaalsete (männi)metsade aluspind (*forest floor*) olevat märkimisväärne metaani siduja, on küpsed männid (*Pinus sylvestris*) tüvedelt sooritatud mõõtmiste järgi hoopis metaani pidevad emiteerijad (−14,4 μg m⁻² h⁻¹). Mändide roll metaani emiteerijatena on seda suurem, mida kõrgem on mulla veesisaldus (Machacova, 2016).

Metsa omadus olla rohkem süsiniku siduja või emiteerija sõltub ka selle eest (Law, *et al.* 2003). Metsa NEP vähenes märgatavalt ökosüsteemi vanuse kasvades - üle saja-aastased puistud käitusid pigem süsiniku allikana (Kriiska, 2019). Metsaökosüsteemi võime kaituda süsiniku sidujana on tugevalt seotud taimede fenoloogia ja füsioloogiaga (nt vegetatsiooniperioodi alguse- ja lõpuaeg). Fenoloogilised protsessid on ka primaarproduktiooni (NEE), süsiniku kogutoodangu (GPP) ja süsiniku netotoodangu (NPP) suurimaks mõjutajaks. (Järveoja, 2018) Kui enamasti mõõdetakse metaanivooge kambermeetodiga maapinnalt, siis Shoemakeri, *et al.* (2014) uurimuses kasutati esmakordselt metaanivoogude mõõtmiseks turbulentsse õhuvoolu meetodit (*Eddy covariance*). Selgus, et metaani vood (täpsemalt selle sidumine) olid tugevalt seotud süsiniku kogutoodanguga (GPP) (Shoemaker, *et al.* 2014)

Kriiska (2019a) kirjutab, et kumulatiivne süsiniku sidumine vanemas puus on hoopiski suurem kui noores ning teise publikatsiooni (Kriiska 2019b) järgi ei toimu metsa vananedes mulla süsinikuemissioonis erilisi muutusi.

Kõdusoo puistud (männikud, kuusikud, kaasikud) on nõrgad metaani sidujad, kuid ka metaani emissioon nendest on suhteliselt madal (EMÜ, TÜ, 2016). Mändidest emiteerunud CH₄ moodustab umbes 0,8% metsapinna poolt seotud metaani kogusest. Suure mullaniiskuse korral võivad mändidest vahendatud metaanivood modustada kuni 35% metsapinna poolt seotud CH₄-st. (Machacova, 2016) Noe, *et al.* (2011) järgi on puude liigid oluliseks faktoriks, kas konkreetse metsa muld käitub pigem siduja või emiteerijana.

Metsadega seotud metaani sidumise uurimise olulisus langeb kokku Hartmanni *et al.* (2013) kirjutatuga, kus tuuakse välja, kuidas praegune kasvuhoonegaaside (ja metaani) seire toimib hästi ülemaailmse keskmise arvutamise tasandil, kuid on võmetu seirama ja ennustama väiksema tasandi vooge.

2 Andmed ja meetodika

Selles peatükis kirjeldatakse Soontaga uurimisjaama ala ning antakse ülevaade andmete kogumise meetodikast ja analüüsist.

2.1 Uurimisala kirjeldus

Soontaga metsaökosüsteemi uurimisjaam asub Valgamaal, Soontaga külas koordinaatidel N 58°1'24.667" E 26°4'14.638". Uurimisala asub Valga nõos Võrtsjärve madaliku piiril, mis on merepinnast keskmiselt 53 meetri kõrgusel. Samuti jääb uurimisjaama asukoht Soontaga looduskaitsealale. (Maa-amet) Uurimisjaama ala on tervenisti kaetud umbes kaheksa aastase okasmetsaga, kus peapuuliik on harilik mänd (*Pinus Sylvestris*). Teises rindes esineb harilik kuusk (*Picea abies*). Metsa kasvukohatüüp on jänesekapsa (Kuusik, 2016). Muld on suhteliselt suure liivasisaldusega näivleetunud muld (Kõlli *et al.* 2018). Alusrindes ning proovivõtuks ettenähtud kohtades kasvavad kuivale kasvukohale iseloomulikud puhmad ja samblad, nagu pohl (*Vaccinium vitis-idaea*), harilik palusammal (*Pleurozium schreberi*) ja harilik laanik (*Hylocomium splendens*).

Soontaga uurimisjaamas on 35 meetri kõrgune mast, kust mõõdetakse turbulentsse kovariatsiooni meetodil (ingl. *Eddy covariance*) CO₂ ja H₂O vooge vertikaalsetes õhuvooludes. Turbulentsse kovariatsiooni meetodiga määratakse gaaside liikumist biosfääri ja atmosfääri vahel. Lisaks süsihappegaasi voogudele mõõdetakse uurimisjaama masti paigaldatud seadmetega ka õhurõhku, õhutemperatuuri, õhuniiskust, sademeid ja kiirgust (Eesti Keskkonnaobservatoorium).

Uurimisjaamas toimub alates 2012. aastast kasvuhoonegaaside (CO₂, N₂O, CH₄) mõõtmine ka maapinnalt. Selleks on loodud spetsiaalselt kuus punkti pimekamermõõtmiste jaoks (joonis 3.).



Joonis 3. Kambrite paiknemine Soontaga uurimisjaamas. Number kambri peal tähistab gaasiproovi võtmise järjekorda. Maa-ameti aluskaart.

2.2 Andmete kogumine

Bakalaureusetöö põhineb gaasiproovidel, mis on kogutud välitööde käigus Soontaga metsaökosüsteemi uurimisjaamast. 2013. aasta maist 2019. aasta detsembrini.

Kasvuhoonegaaside proove kogutakse Soontagalt aasta läbi, umbes kahe nädalaste vahedega ehk kaks korda kuus. Mullahingamise uurimiseks vajalike gaasiproovide kogumiseks kasutati dünaamilise suletud kambri meetodit (ingl *dynamic chamber system*) (Krasnova *et al.* 2019). Meetodi ajaspetsiifilisuse tõttu püütakse ajastada mõõtmised päeva esimesse poole.

Süsteem on tervenisti manuaalne. Maapinnale on üksteisest vähemalt kahe meetri kaugusele 10 cm sügavusele mulda paigutatud kuus plastrõngast, gaasiproovide kogumiseks ette nähtud punkti, läbimõõduga 50 cm, mille peale asetatakse läbipaistmatu valge ja õhukindel PVC-materjalist kamber (joonis 4.). Kambrid on mahutavusega umbes 65 l ja valged, et õhk selle all oluliselt ei soojeneks. Proovivõtu ajaks täidetakse rõngas olev soon veega, et tagada kambri õhukindlus. Kamber jäetakse kogumispunkti tunniks ajaks, mille jooksul kogutakse neli korda kambri all vabanenud gaasid (s.o 20-minutiliste intervallidega). Kambri all olevate gaaside algkontsentratsioonide määramiseks võetakse ka nn nullproov kohe pärast õhutamist ja rõngasse asetamist. Gaasid kogutakse 100 ml klaaspudelitesse, mille sisu on eelnevalt laboris puhastatud ja vaakumisse viidud. Proovid analüüsitakse hiljem Tartu Ülikooli Ökoloogia- ja maateaduste instituudi aineringe laboris gaaskromatograafia Shimadzu 2014.

Laboriandmed, analüüsi tulemused, kanti Excel-programmi faili ja hinnati andmekvaliteeti eeldusel, et ajas muutub gaasikontsentratsioon lineaarselt.

Kuigi Soontaga uurimisjaamas on kasvuhoonegaasi voogude mõõtmiseks kasutusel ka turbulentsete õhuvoolude meetod (*Eddy Covariance*), kasutatakse selles töös kambrimeetodil kogutud andmeid. *Eddy* on laialt kasutatud ja suurepärase ökosüsteemiüleste voogude mõõtmiseks, kuid manuaalsete kambrite eeliseks *Eddy* ees on võime tuvastada metsapinna (*forest floor*) elustikuga (taimed, mikroorganismid) seotud heterotroofset hingamist (R_h), autotroofset hingamist (R_a) ja netoprimaarproduksiooni (NPP) (Järveoja, 2018). Turbulentsete õhuvoogude meetod pakub pidevaid ökosüsteemiülesteid andmeid, kuid manuaalsel pimekambrimeetodil kogutakse proove tavaliselt päevasel ajal ja automaatsüsteemidega võrreldes suhteliselt harva (selles töös iga kahe nädala tagant). See eest on kambrimeetodil saadud andmed väga aja- ja kohaspetsiifilised ning manuaalsuse tõttu elektrooniliste tõrgete tõttu tekkinud andmelünkade-vabad.



Joonis 4. Pimekamber klaaspudelitega gaasi kogumiseks. Maapinnal näha jänese kapsa kasvukohale tüüpilist floorat. Autori foto.

Kuna Soontaga uurimisjaamast mõõdetud mulla- ja õhutamperatuuri kohta pidev andmerida puudub, tuli hankida andmeid Soontagale lähimast ilmajaamast, Tõrvast. Tõrva ilmajaamast saadud ööpäevased õhutamperatuurid olid fikseeritud tunniajase sammuga ning nende põhjal arutati kuukeskmine temperatuur.

Mullaniiskust hakati Soontagal mõõtma pidevalt (automaatselt) alates 2015. a juulist ning seetõttu varasemaid andmeid analüüsi kaasata polnud võimalik. Töös kasutatud mullaniiskus (protsentides) on kahe 10 cm sügavusel asunud mõõtepunkti aritmeetiline keskmine, kus niiskuse protsent fikseeriti pooletunnise intervalliga.

2.3 Statistiline andmetöötlus

Statistiliseks andmetöötluseks kasutati programmi Statistica 7.0 (StatSoft, Inc. 2005), Microsoft Excelit (Microsoft Office 365) ja ruumiliste andmete statistilise analüüsi kalkulaatorit RASA (Remm, 2014). Olulisusnivooks seati kõikjal andmeanalüüsis $p < 0,05$.

Andmete normaaljaotusele vastavust kontrolliti Kolmogorov-Smirnoffi, Shapiro-Wilki ja Lillieforsi testidega – CH₄-vood vahemikus 2013–2019 vastasid normaaljaotusele (nt K-S statistik $d = 0,085$; tõenäosus pärineda normaaljaotusega üldkogumist $p = 0,572$). Aastate vaheliste sarnasuste leidmiseks loodi Pearsoni korrelatsioonikordajaid ühendav korrelatsioonimaatriks (joonis 8.), kust andmete võrreldavuse huvides 2013. aasta (vaatluskordade vähesuse tõttu) välja jäeti. Korrelatsioonimaatriks loodi algselt Statisticas ning visualiseeriti spetsiaalse Pythoni skripti abil. Maatriksis märgitud seos on nõrk, kui $r \leq 0,3$, keskmine, kui $0,3 < r < 0,7$ ja tugev, kui $r \geq 0,7$.

Metaanivoogude seost õhutemperatuuri ja mullaniiskusega uuriti mitmese regressioonianalüüsiga (*multiple regression analysis*), kus $\alpha = 0,05$ ning kujutati hajuvusgraafikuga.

3 Tulemused

Selles peatükis kirjutatakse lahti mõõtmistulemused, näidatakse metaanivoogude muutust aastate jooksul ning esitletakse metaanivoogude seost nii õhutemperatuuri kui mullaniiskuse vahel.

3.1 Metaanivoogude ja temperatuuri aastased käigud

Joonisel 6. on kujutatud seitsme aasta jooksul (2013–2019) kogutud gaasiproovide analüüsimisel saadud Soontaga metaanivood ja kuukeskmise õhutemperatuur Tõrva meteoroloogiajaama järgi. Metaanivoogusid iseloomustavad näitajad on joonisel telje negatiivses osas, kuna tähistavad metaani sidumist ajas, siinkohal ühes tunnis. Ühtegi positiivset tulemust kogu mõõtmisperioodi kestel ei esinenud.

Metaanivood olid märgatavalt sesoonse mustriga – suvised vastavalt madalamad ja talvised kõrgemad - teisisõnu, suvel toimus metsas intensiivsem metaani sidumine kui talvel. 95% mõõtmistest jäid CH₄ vood vahemikku –50 kuni –250 µg m⁻² h⁻¹. Lisaks selgelt sesoonsele mustrile, tõusid ja langesid metaanivood vastupidiselt õhutemperatuuri käigule, s.t temperatuuri langedes metaani sidumine vähenes ja vood suurenesid ning temperatuuri tõustes metaanivood vähenesid, sest sidumine suurenes.

Suurim metaanivoog ehk vähima sidumisega kuu mõõdeti 2018. aasta märtsis kui tulemuseks saadi –38,073 µg m⁻² h⁻¹. Tolle aasta märtsile eelnes seitsme aasta jahedaim veebruar, kuukeskmise temperatuuriga –8,1 °C . Samas suurusjärgus metaanivood olid veel 2018. aasta novembris (–52,567 µg m⁻² h⁻¹) ning 2019. aasta jaanuaris (–75,009 µg m⁻² h⁻¹) ja veebruaris (–73,379 µg m⁻² h⁻¹). Madalaima metaanivooga ehk suurima sidumisega kuu oli 2018. aasta juuli, kus CH₄ voog oli –304,144 µg m⁻² h⁻¹. Lähedased tulemused mõõdeti sama aasta kahel eelneval kuul, s.o mais (–245,609 µg m⁻² h⁻¹) ja juunis (–253,949 µg m⁻² h⁻¹) ning 2015. aasta augustis (–244,062 µg m⁻² h⁻¹).

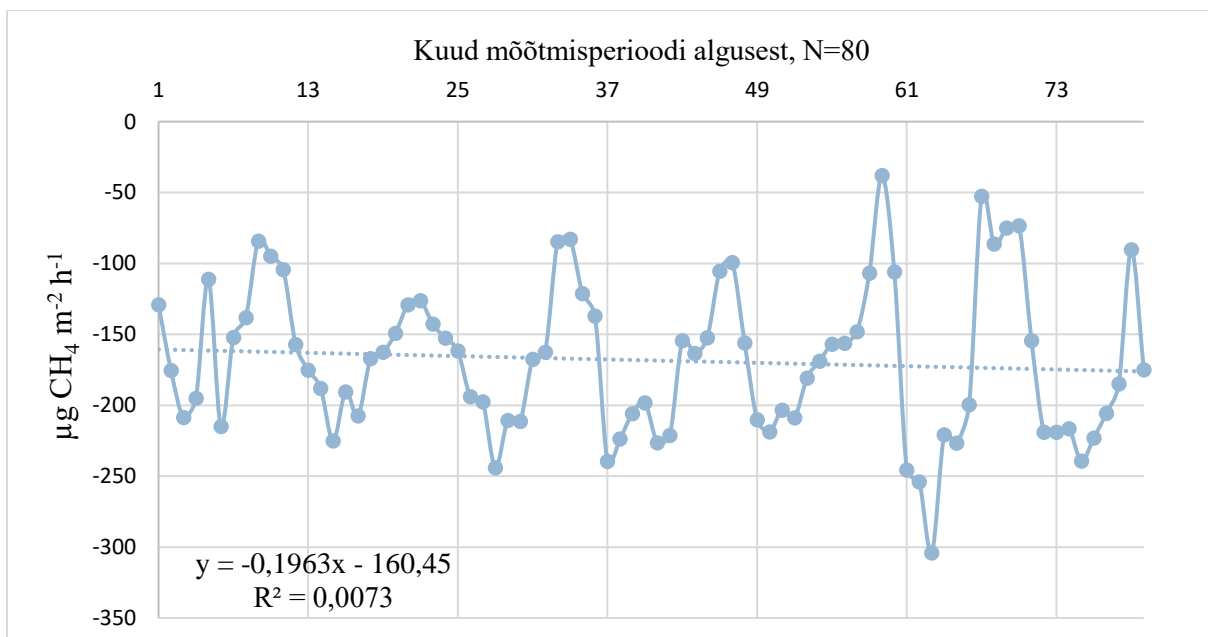
Metaani sidumine saavutas oma haripunkti enamasti juulikuus, kus vood jäid väiksemaks kui –200 µg m⁻² h⁻¹. Seitsme aasta juulikuu keskmine (–226,307 µg m⁻² h⁻¹) on isegi ilma 2018. a juulikuuta, mil sidumine oli aastate kõrgeim (–304,144 µg m⁻² h⁻¹), ülejäänud kuudest madalaima tulemusega ehk –213,334 µg m⁻² h⁻¹. Lisaks juulile eristuvad intensiivse sidumise poolest (ehk tulemustega, mis on neljal või viiel aastal seitsmest madalamad kui –200 µg m⁻² h⁻¹) selgelt mai, juuni, august ja september.

Metaani sidumine oli madalaim enamasti veebruaris (7 aasta keskmine $-98,264 \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$). Sellele järgnesid märts ($-110,027 \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$) ning jaanuar ($-112,242 \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$).

Temperatuuri ekstreemumid kattusid osaliselt ka metaanivoogude ekstreemumitega. Mõõtmisperioodi kuumimaks kuuks osutus 2018. aasta juuli, mil kuukeskmine temperatuur oli $20,6 \text{ }^\circ\text{C}$. Tol kuul oli ka metaani sidumine seitsme aasta suurim ($-304,144 \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$). Keskmisest soojemad kuud olid veel 2014. aasta juuli ($19,9 \text{ }^\circ\text{C}$) ja 2019. aasta juuni ($18,7 \text{ }^\circ\text{C}$). Neil kuudel olid CH_4 vood vastavalt $-225,066 \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ ja $-216,492 \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$.

2016. aasta jaanuari kuukeskmine temperatuur oli $-9,2 \text{ }^\circ\text{C}$ ja sellega mõõteperioodi minimaalne kuukeskmine temperatuur. Tol kuul ei erinenud mõõdetud metaani voog „tavapärasest“ talvisest voost kuigivõrd ($-84,780 \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$). Nii 2014. a jaanuari kui 2016. a veebruari kuukeskmine temperatuur oli $-8,1 \text{ }^\circ\text{C}$ ning vastavad CH_4 vood $-84,151 \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ ja $-106,734 \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$.

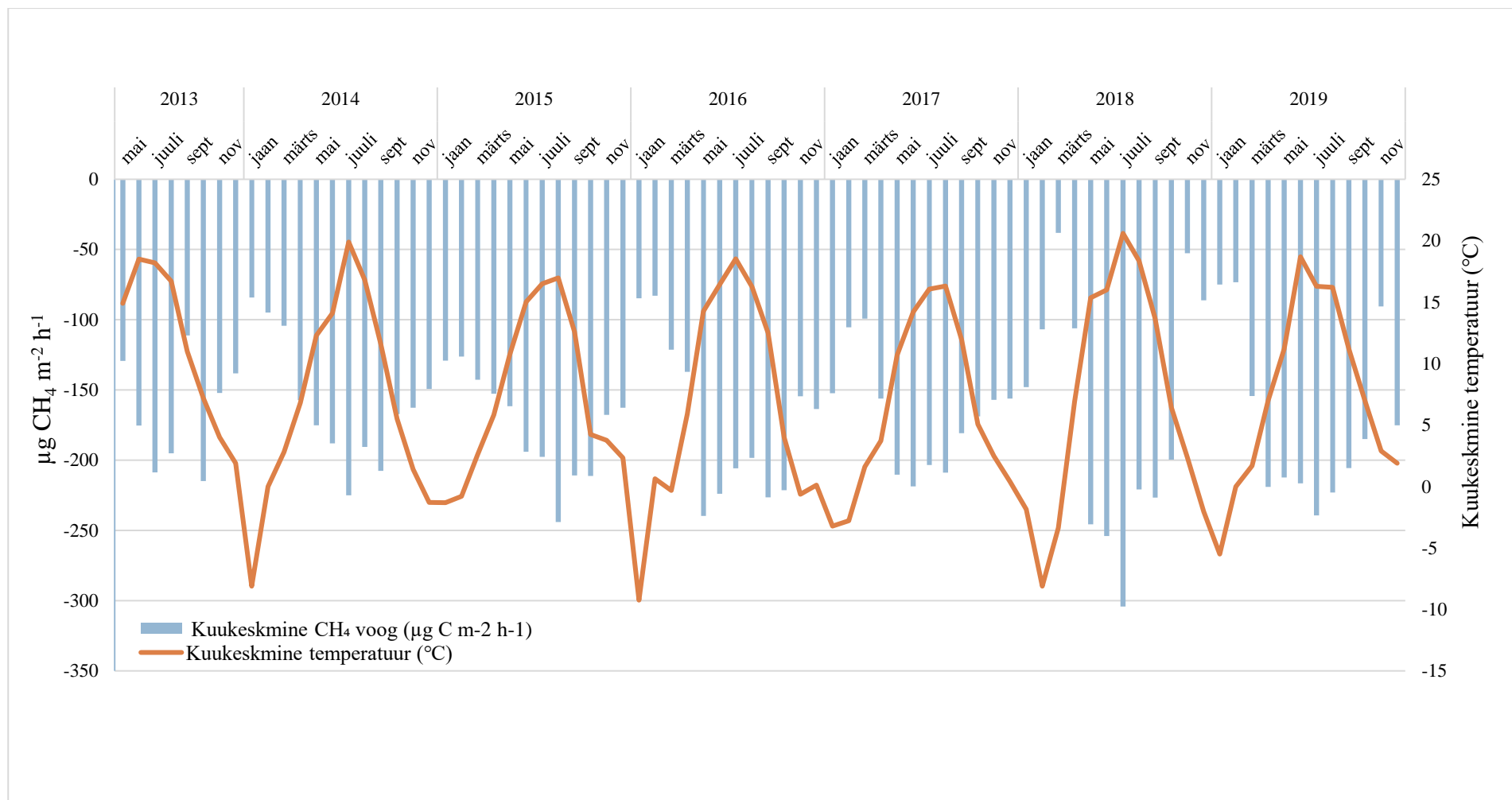
Allpool oleval graafikul (joonis 5) on kujutatud metaani sidumise (metaanivoogude) muutuseid mõõteperioodi jooksul, mille kestuseks oli seitse aastat.



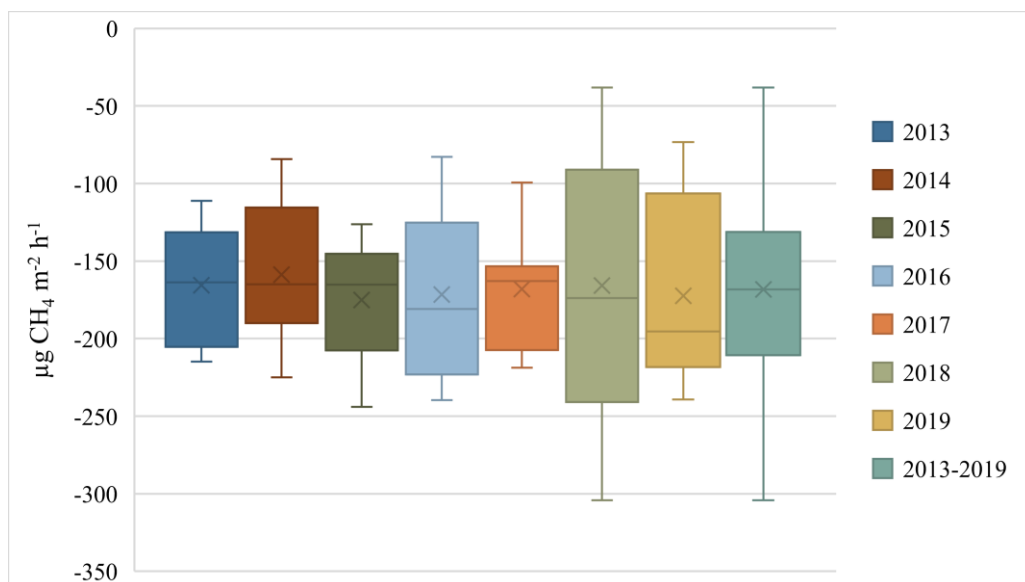
Joonis 5. Metaanivoogude sidumine seitsme aasta (80 kuu) jooksul.

Graafikule vertikaalteljele kantud metaanivood on pärit kambermõõtmiste algusest, 2013. aasta maist, ning lõppevad 2019. aasta detsembriga. Kuud on nummerdatud. Esimeseks on 2015. aasta mai ning mõõtmiste 80. kuu on 2019. aasta detsember (kuude järjekorranumbrid näha x-teljel). Horisontaalteljele on kantud kambermõõtmistel saadud metaanivood.

Graafikule kantud trendijoon ja lineaarset sõltuvust väljendav võrrand annavad teatud aluse eeldada et ökosüsteemi võime metaani siduda aastate jooksul kasvas.



Joonis 7. on nn „karp-vurrud-diagramm“, kus „karp“ esindab 50% ehk pooli mõõtmistulemusi ning karpist väljuvate joontega on märgitud 25% ja 75% kvantiilid, mis esindavad maksimaalseid ja minimaalseid valimi väärtusi. Kasti keskel olev rist näitab valimi, siinkohal mõõtmistulemuste, aritmeetilist keskmist ja horisontaal mediaani.



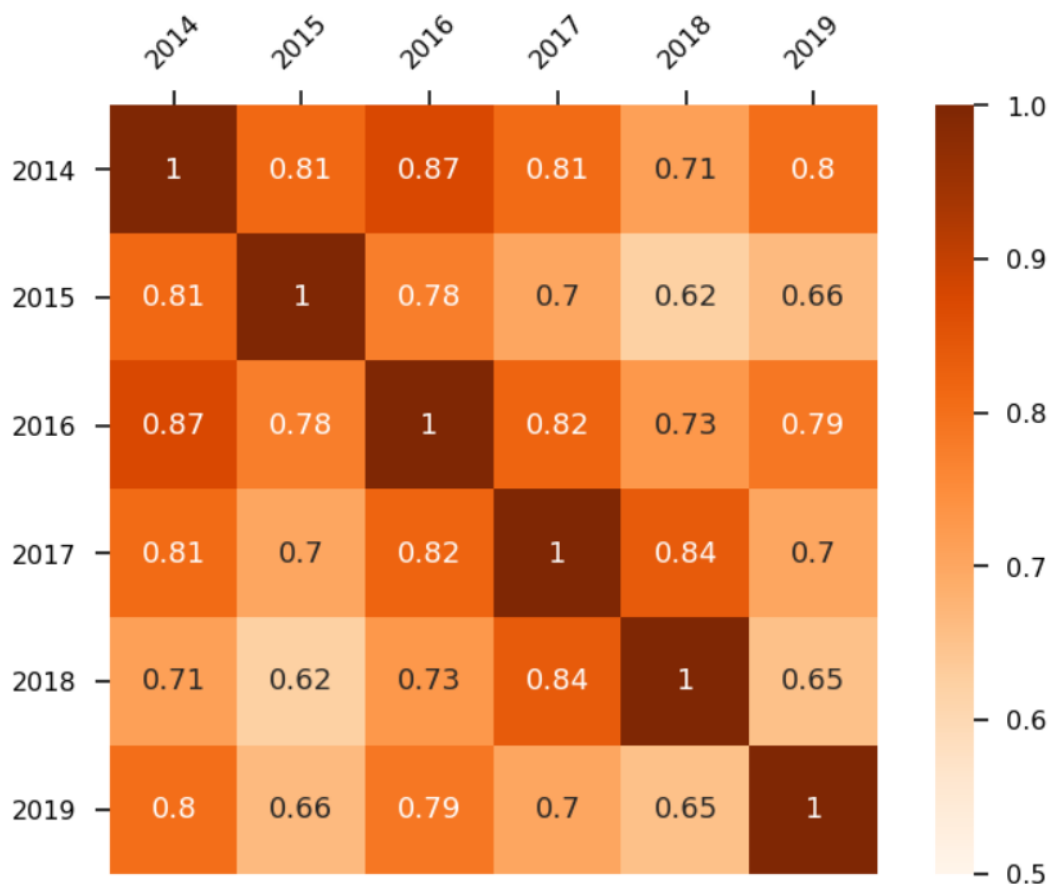
Joonis 7. CH₄ kokkuvõtlikud aastased vood Soontaga uurimisjaamas võrreldes seitsme aasta keskmisega (2013–2019).

Joonisel 7 on kujutatud iga vaatlusaasta metaanivooge ning kõikide aastate keskmiseid vooge (diagrammi element „2013–2019“). Samuti on näha 2018. aasta metaanivoogude suurt amplituudi ja ekstreemseid mõõtmistulemusi, mis mõjutavad ka kõikide aastate keskmist.

3.2 Vaatlusaastate omavahelised korrelatsioonid

Joonisel 8. on kujutatud vaatlusaastate omavahelisi sõltuvusi ühendav korrelatsioonimaatriks. Kuna 2013. aastal alustati gaasiproovide kogumisega alles maikuust, siis on statistilise tõepärasuse huvides see aasta maatriksist välja jäetud. Maatriksiruutudes olev arv on Pearsoni korrelatsioonikordaja, mis näitab seose tugevust. Seost loetakse nõrgaks, kui $r \leq 0,3$, keskmiseks, kui $0,3 < r < 0,7$ ja tugevaks, kui $r \geq 0,7$.

Maatriksi järgi on tugevaim seos aastate 2016 ja 2014 ($r = 0,87$) ning 2018 ja 2017 ($r = 0,84$) vahel.



Joonis 8. Metaanivoogude aastatevaheline korrelatsioonimaatriks. Aasta 2013 on täpsuse ja usaldusväärsuse huvides maatriksist välja jäetud mõõtmiste vähesuse tõttu.

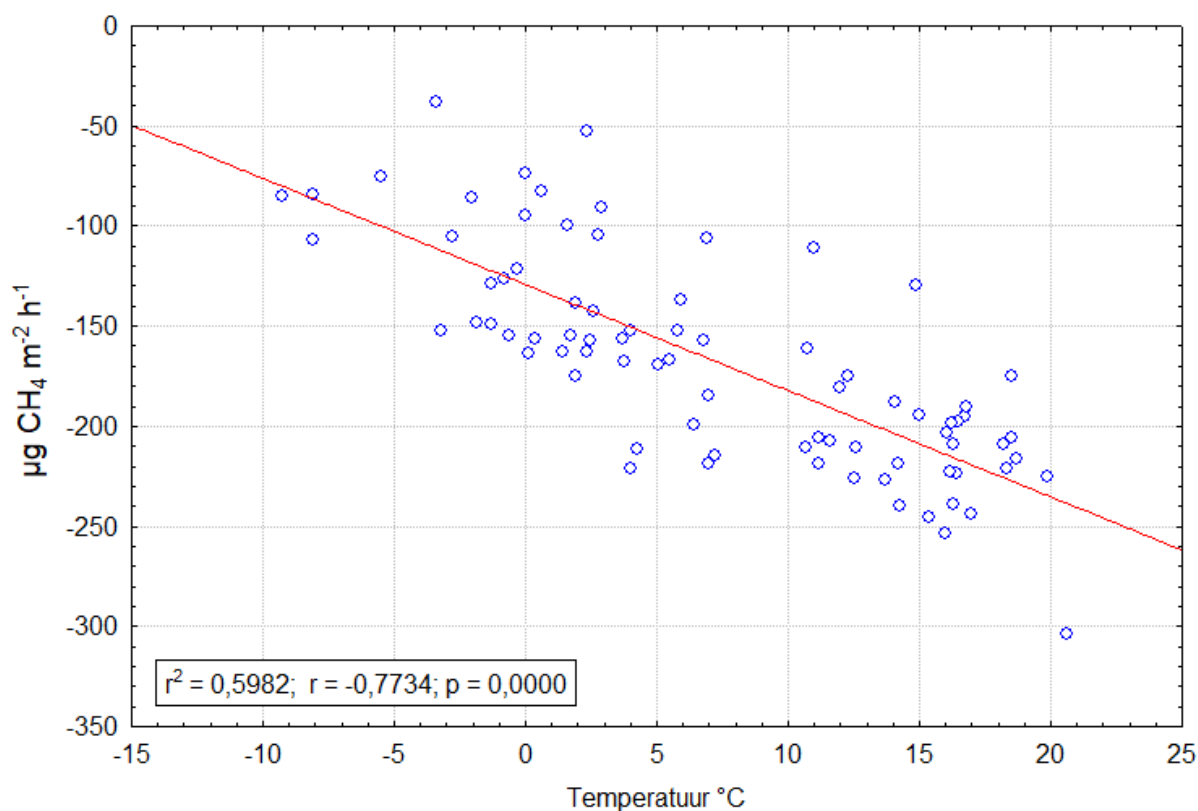
3.3 Metaanivoogude ja temperatuuri vaheline seos

Metaanivoogude ja temperatuuri vahelise sõltuvuse kujutamiseks loodi Statistica programmis hajuvusdiagramm (joonis 9.) ning tehti muutujatele mitmene regressioonianalüüs. Selgus, et temperatuuri ja CH₄ vahel esineb tugeb negatiivne sõltuvus $r = -0,7734$ – ühe muutuja suurenemisel teine väheneb. Antud kontekstis on sõltumatuks muutujaks temperatuur ja sõltuvaks muutujaks metaan.

Sõltuvus iseloomustab metaanivoogude sesoonsust: kõrged suvised temperatuurid on seotud väiksemate metaanivoogudega ja madalad talvised temperatuurid suuremate metaanivoogudega. Mida kõrgem on õhutemperatuur, seda intensiivsem on metaani sidumine

ja

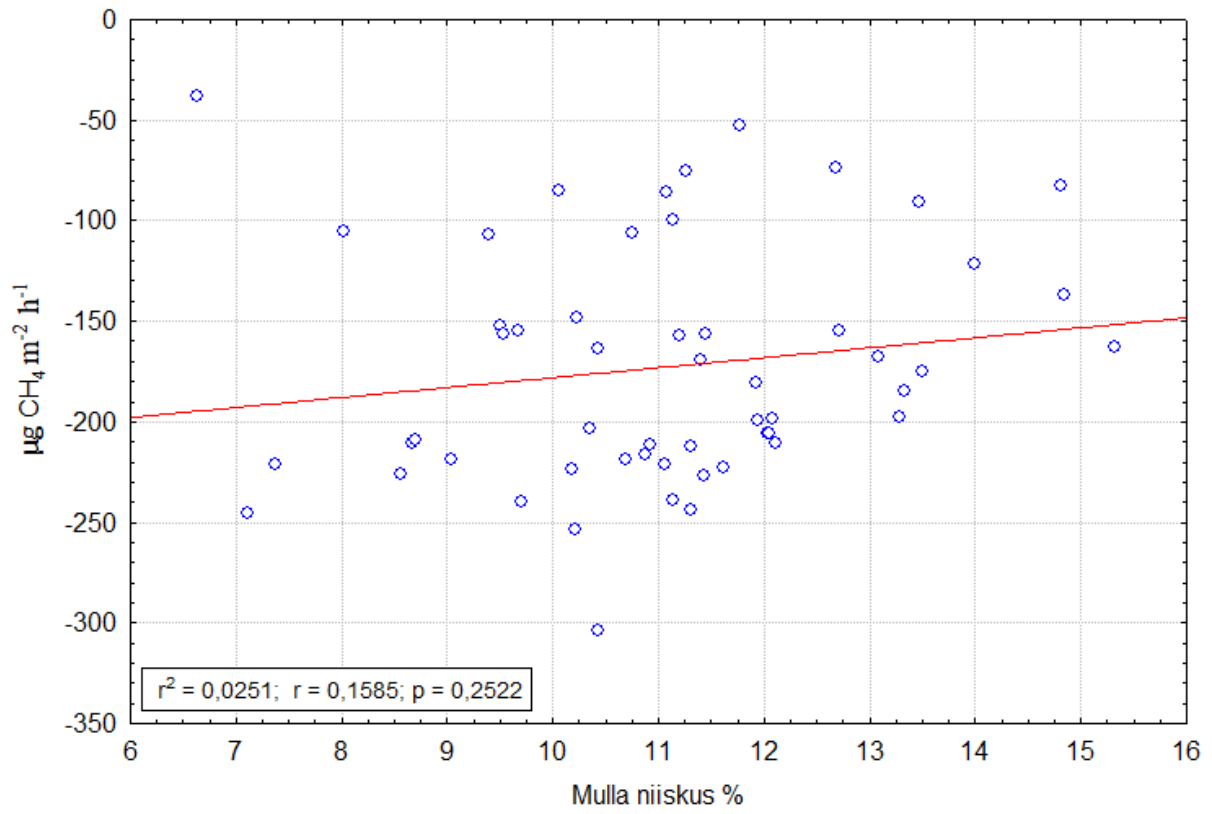
vastupidi.



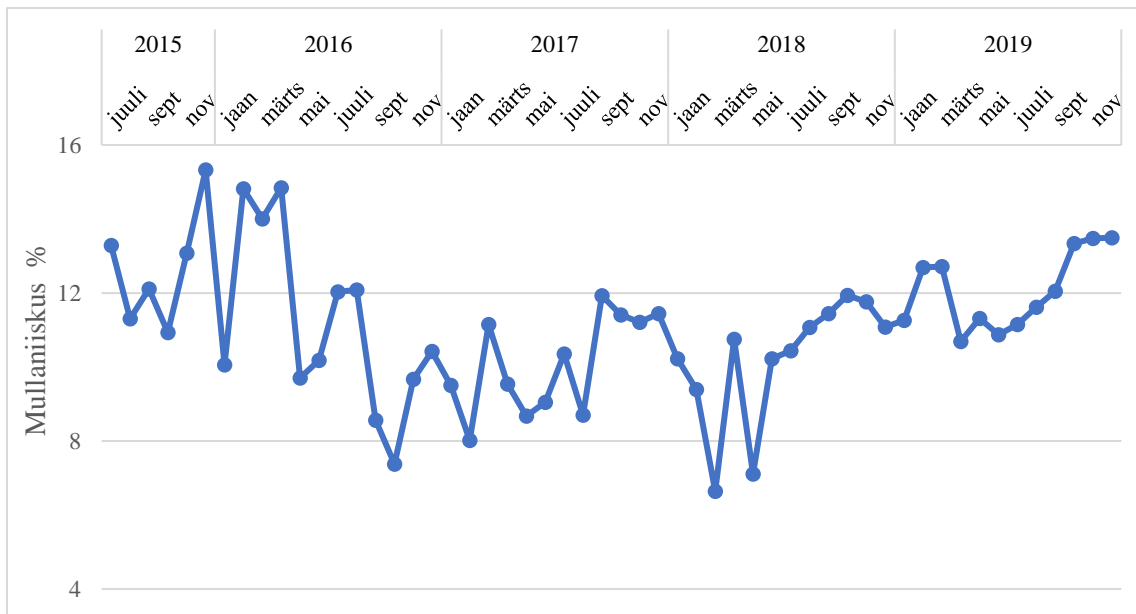
Joonis 9. Metaani ja temperatuuri vaheline sõltuvus

3.4 Metaanivoogude ja mullaniiskuse vaheline seos

Metaanivoogude ja mulla niiskusesisalduse (joonis 11.) vahelise seose leidmiseks rakendati Statistica programmis muutujatele mitmest regressioonianalüüsi ning loodi hajuvusdiagramm (joonis 10.). Metaanivoogude ja mulla niiskusesisalduse vahel valitses väga nõrk positiivne ($r = 0,16$) ja statistiliselt mitteoluline ($p = 0,25$) seos. Seega võib öelda, et mulla niiskusesisaldus (sõltumatu muutuja) metaani (sõltuv muutuja) sidumist uurimisalal kuidagimoodi ei mõjuta.



Joonis 10. Metaanivoogude (CH₄) ja kuukeskmise mullaniiskuse vaheline seos



Joonis 11. Mullaniiskus (%) alates selle mõõtmise algusest (2015. juuli – 2019. detsember)

Soonagal olev muld on aasta läbi suhteliselt stabiilselt madala niiskusesisaldusega ehk kuiv. Mullaniiskus püsis peaaegu pooltel vaadeldud kuudel (26/54) 10–12% protsendi vahel. Erandiks osutus 2018. aasta märts, mil mõõteseadmed tuvastasid vaatluste madalaima mullaniiskuse – 6,6%. Kõrgeim niiskusprotsent esines 2015. aasta detsembris, mis oli 15%.

4 Arutelu

Bakalaureusetöö eesmärk oli leida seoseid Soontaga männikust seitsme aasta jooksul (2013–2019) kogutud gaasiproovides sisaldunud metaani, keskmise õhutemperatuuri ja mullaniiskuse vahel. Selgus, et enim on metaanivood seotud õhutemperatuuriga, kuid seos mullaniiskusega puudub. Samuti valitses enamike aastate vahel tugev korrelatsioon, mis näitab sarnasust metaanivoogude suuruses. Töö alguses püstitatud hüpotees: aja jooksul metaani

Soontaga uurimisalal on metaanivood ja metaani sidumine seotud õhutemperatuuri käiguga. Temperatuuri ja metaani vahel leiti tugev negatiivne ning statistiliselt oluline sõltuvus $r = -0,7734$. Märtsist alates, kui ööpäevane keskmine õhutemperatuur tõuseb teatud hetkel püsivalt üle $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, vähenevad metaanivood ehk suureneb aeglaselt metaani sidumine (joonis 6., joonis 9.). Vegetatsiooniperioodi algus, ööpäevase temperatuuri püsiv tõus üle $5\text{ }^{\circ}\text{C}$, algab Soontaga ümbruses vahemikus 18. aprill kuni 20. aprill. (Kadaja, 2011). Seda on näha ka metaanivoogudest, mille sidumine tõusis, ning mille vood langesid 2014., 2015., 2017. ja 2019. a aprillis madalamale kui $-150\text{ }\mu\text{g m}^{-2}\text{ h}^{-1}$. 2019. aasta aprilli metaanivoog oli võrrelduna teiste aasta aprilli voogudega rekordmadal: $-218,960\text{ }\mu\text{g m}^{-2}\text{ h}^{-1}$. Maist oktoobrini on metaanivood enamasti -150 ja $-250\text{ }\mu\text{g m}^{-2}\text{ h}^{-1}$ vahel. 22. ja 24. oktoobri vahel lõpeb vegetatsiooniperiood ning alates selles hetkest metaani intensiivsem sidumine langeb ja CH_4 vood aegamisi tõusevad. Alates 28. novembri paiku peaks kirjanduse järgi (Kadaja, 2011) ööpäevane temperatuur langema püsivalt alla nulli. 2013–2019 aasta novembrite keskmised õhutemperatuurid on mõõtmiste põhjal aga kõrgemad kui märtsikuised temperatuurid.

Temperatuuri tõustes või langedes ei avaldu muutused metaani sidumises selles töös teostatud mõõtmiste põhjal kohe. Seda on tähele panna septembri, oktoobri ja novembri suhtes, kus õhutemperatuur suhteliselt järsult jaheneb, kuid metaani sidumine nii suurt langust läbi ei tee (joonis 6.). See võib olla seotud peatükis 1.3. mainitud fenoloogiliste protsessidega, kus fotosünteesivad taimed mõjutavad oluliselt metsa võimet olla kas süsiniku siduja või emiteerija (Järveoja, 2018). Oma osa võib ka mängida metanotroofsete bakterite aktiivne elutegevus, millest kirjutati peatükis 1.2. Keskmise õhutemperatuuri tõustes nihkub ka vegetatsiooniperioodi lõpp kaugemale sügisesse ja seetõttu võivad nii taimed kui mullas olevad mikroorganismid panustada endise intensiivsusega metaani sidumisse.

2018. aasta on erandlik nii temperatuuriamplituudi kui ka metaanivoogude amplituudi poolest, omades kogu mõõteperioodi (2013–2019) minimaalseid ja maksimaalseid väärtusi. 2018. aasta jaanuari kuukeskmise temperatuur oli vaatlusperioodi keskmisest ($-4,9\text{ }^{\circ}\text{C}$) kolm kraadi

soojem ($-1,9\text{ }^{\circ}\text{C}$) ning metaani sidumine vastavalt tavapärasest suurem ($-148,044\text{ }\mu\text{g m}^{-2}\text{ h}^{-1}$). Veebruari keskmine õhutemperatuur langes järsult $-8,1$ kraadile, kuid metaanivoog püsis endiselt suhteliselt madal ehk $-106,733\text{ }\mu\text{g m}^{-2}\text{ h}^{-1}$, mis on samas suurusjärgus ülejäänud aastate veebruarikuu voogudega, mil keskmine õhutemperatuur kõikus $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ümber (v.a veebruar 2017 $-2,8\text{ }^{\circ}\text{C}$). Samamoodi oli seitsme aasta külmim märts ($-3,4\text{ }^{\circ}\text{C}$), kuid seekord oli ka metaani voog aastate lõikes maksimaalne: $-38,073\text{ }\mu\text{g m}^{-2}\text{ h}^{-1}$.

Vaatlusaastate omavahelisel võrdlemisel korrelatsioonimaatriksis (joonis 8.) kujutatud Pearsoni korrelatsioonikordajate kaudu leiti sarnasusi erinevate aastate metaanivoogude vahel. Kõige sarnasemateks osutusid 2014. ja 2016. aasta: $r = 0,87$ (vt ka Lisa 1 joonised 2. ja 4.). Nende statistiline sarnasus võis tuleneda sarnasest voogude amplituudist. Näiteks olid mõlema aasta jaanuarikuised metaanivood olid täpselt sama kõrged ehk $-84\text{ }\mu\text{g m}^{-2}\text{ h}^{-1}$ ning ka veebruari ja augusti vood erinesid aastate vahel vähe. Lisaks võib välja tuua nende aastate metaani sidumise “mustri”: aasta esimeses pooles vood järjest vähenesid, kuid aasta teises pooles, augustis, vood korraks tõusid ning septembris langesid taas. Samasugust augustikuist voogude kasvamist oli märgata ka 2018. aastal. Omavahelise sarnasuse poolest olid järgmisel kohal 2017. ja 2018. aasta: $r = 0,84$ (Lisa 1 joonised 5. ja 6.).

Andmeanalüüsi käigus selgus, et metaanivood pole seotud mullaniiskusega. Soontagal mõõdetud mullaniiskuse ja metaani sidumise vahel oli väga nõrk positiivne ($r = 0,16$) statistiliselt mitteoluline seos ($p = 0,25$). Tõenäoliselt oleks metaanivood niiskema mulla korral kõrgemad ning metsapind siduja asemel pigem emiteerija, sest senise madala mullaniiskuse protsendi muutumine „madala“ piirides metaanivoogudele statistiliselt (ega füüsiliselt) mingit mõju ei avaldanud. Mulla niiskusesisaldus oli stabiilselt madal, kõikudes läbi aastate 10–12% vahel. Erandiks oli 2018. aasta märts, mil mõõdeti nii vaatlusperioodi kõrgeim metaanivoog ($-38,073\text{ }\mu\text{g m}^{-2}\text{ h}^{-1}$), madalaim märtsikuine keskmine temperatuur ($-3,4\text{ }^{\circ}\text{C}$), kui ka madalaim mullaniiskus (6,6%).

Töö alguses püstitatud hüpotees, nagu suureneks metaani sidumine võime metsaökosüsteemi vananedes, leidis kinnitust nii kirjanduse kui vaatlustulemuste põhjal. (Law, *et al.* 2003; Soosaar, *et al.* 2016; joonis 5.) Siiski võib öelda, et hüpotees osutus tõeseks mõningate mööndustega. Nimelt ei olnud metaani sidumise kasv seitsme aasta jooksul kuigi selgesti täheldatav (aluseks regressioonivõrrand joonisel 5.). Tõenäoliselt oleks näinud märkimisväärsemaid tulemusi nooremas puistus, mis veel aktiivselt süsinikku, ja seeläbi metaani, seob. Samuti kirjutas Kriiska (2019b), et metsa vananedes ei toimu mulla süsinikuemissioonis erilisi muutusi. Ka mõõteperioodi pikkus mängib rolli. Seitse aastat on

piisav usaldusväärsuse sesoonsete mustrite ning mulla ja keskkonnaparameetrite vaheliste seoste illustreerimiseks, kuid mitte pikemaajaliste trendide ennustamiseks. Võib julgelt väita, et seitsme aasta pikkune metaanivoogude aegrida on tõenäoliselt ainus omataoline, sest kirjandusest enamasti aegridu, mis oleks pikemad kui üks hooaeg (nt Machacova, 2016) või paar aastat (nt Shoemaker, 2014; Järveoja, 2018) ei leia.

Selgema seose mullaparametrite ja metaanivoogude vahel oleks andnud mullatemperatuuri mõõtmine, kuid need andmed Soontaga kohta puuduvad. Mullatemperatuur mõjutab lagundajate aktiivsust mullas ehk heterotroofset hingamist (Rh). Kambermeetod on väga aja- ja kohaspetsiifiline ja väga hea mullahingamise (Rs) ja heterotroofse hingamise (Rh) tuvastamisel. Seega oleks kambermõõtmiste võrdlemisel tulemusel mullatemperatuuriga olnud tõenäoliselt sama tugev või isegi tugevam seos kui hetkel uurimuses näidatud seos õhutemperatuuriga.

Sellise andmekogumise laiem eesmärk on teaduses valitsenud tühimiku, just parasvöötme okasmetsade osas, täitmine ja seeläbi sügavam arusaamine neis toimuvast gaasivahetusest, mille alusel saab näiteks hinnata metsa kui globaalses võtmes elutähtsa koosluse võimet kohaneda kliimamuutustest tingitud temperatuuritõusuga. Mida paremini on teada metsaökosüsteemide „käitumine“ muutuvates kliimatingimustes, seda paremini osatakse ennustada tulevikukliima trende ja astuda selle põhjal edasisi samme.

Kokkuvõte

Inimtegevuse ja muutuvate kliimaolude tagajärjel on metaani kontsentratsioonid viimastel aastatel atmosfääris järsult suurenenud. Kuna metaani globaalse soojenemise potentsiaal 100 aasta kohta on umbes 25 korda suurem kui tuntuimal kasvuhoonegaasil, süsihappegaasil, siis on ka metaani mõju, nt kasvuhooneefektile ja atmosfääri läbipaistvusele, palju pikaajalisem ja tuntavam. Metsaökosüsteeme peetakse oma metaani sidumise võime poolest kliima jahendajateks. Eriti efektiivsed sidujad on troopilised ja boreaalsed metsad ning nende mullad.

Bakalaureusetöö eesmärk oli leida seoseid aastatel 2013–2019 Soontaga uurimisjaamast kogutud gaasiproovides sisaldunud metaani, õhutemperatuuri ja mullaniiskuse vahel. Lisaks analüüsiti vaatlusaastate vahelisi metaanivoogude sarnasusi. Püstitati ka hüpotees, mille kohaselt metsa kui ökosüsteemi vanuse kasvades suureneb selle võimekus siduda metaani vooge.

Andmeanalüüsi käigus selgus, et kuukeskmise õhutemperatuuri ja metaanivoo vahel valitseb statistiliselt oluline tugev negatiivne sõltuvus ($p = -0,77$). See kinnitas metaanivoogude sesoonset mustrit, mil temperatuuri tõustes metaani sidumine suureneb ja langedes väheneb. Vastupidiselt teooriapeatükis viidatud uurimustele, ei esinenud Soontaga metaanivoogude ja mullaniiskuse vahel statistiliselt olulist seost ja tugevat korrelatsiooni ($p = 0,25$, $r = 0,16$).

Korrelatsioonimaatriksi järgi olid sarnaseimad 2014. ja 2016. aasta metaanivood, mille vahel oli statistiliselt tugev seos – Pearsoni korrelatsioonikordaja $r = 0,87$. Sarnasuste põhjused võivad peituda metaanivoogude ja temperatuuriamplituudide kattumises samade kuude lõikes.

Töö alguses püstitatud hüpotees leidis kinnitust: vaatlusperioodi edenedes suurenes osaliselt ka metaani sidumine mulla poolt.

Bakalaureusetöö panustab töös esitletud pika aegreaga hemiboreaalsete metsade süsiniku ja metaani sidumise ning mullahingamise paremasse mõistmisesse.

Methane Emissions from Soontaga Research Station from 2013–2019

Marie Johanna Univer

Summary

Climate change is caused by the rising concentrations of atmospheric carbon (C) Methane (CH₄) is the second most important greenhouse gas after CO₂ (excluding water vapor) and in the past few years has become the main contributor to global warming (IPCC, 2007). While anthropogenic sources like agriculture and fossil fuel combustion are the main sources of the accelerating rise of atmospheric CH₄, tropical wetlands and melting permafrost in Siberian wetlands as natural CH₄ emitters are not far behind, contributing up to 7% of yearly global methane emissions (Dluhokencky, 1994; Kirschke, 2013)

Temperate forest soils are commonly known to act as methane (an commonly C) sinks – they can consume up to 45 Tg of CH₄ a year (Dušek, *et al.* 2018). Alas, studies done in temperate climate, precisely in hemiboreal forests, remain scarce. This paper tries to fill the lacuna and give an overview of the extent of methane sequestration and long-term fluxes in a 200-year old hemiboreal pine (*Pinus Sylvestris*) forest over the course of seven years (2013–2019).

This paper is based on the gas samples collected from Soontaga research station every fortnight between 2013–2019. The samples were collected, using manual closed chamber method and the concentration of methane (CH₄) in collected samples was analyzed using gas-chromatograph in Tartu University's laboratory.

A hypothesis was set, that the older the forest ecosystem the more intensive methane sequestration by forest floor becomes. A correlation matrix was made to find out the years with similar sequestration ratios and multiple regression analyze was applied to find out the relationship between air temperature, soil moisture content and CH₄ sequestration. The results showed seasonal pattern of CH₄ fluxes (them being lower in summer and higher during winter) and a strong negative correlation between methane sequestration and temperature ($p = -0,77$) and no correlation between soil moisture and methane. Hypothesis set earlier in the paper was approved: CH₄ sequestration did rise slightly over time.

Tänuavaldused

Täna töö juhendajat Kaido Soosaart teema väljapakkumise, kannatlikkuse ja kasulike nõuannete eest töö valmimise jooksul. Samuti tänan Mart Muhelit, Thomas Schindlerit ja Margarita Oja meeleolukate autosõitude eest igakuistele välitöödele Soontaga uurimisjaama.

Kasutatud allikad

- Arain, M. A., Black, T. A., Barr, A. G., Jarvis, P. G., Massheder, J. M., Verseghy, D. L., Nestic, Z. (2002) *Effects of seasonal and interannual climate variability on net ecosystem productivity of boreal deciduous and conifer forests*. Canadian Journal of Forest Research, 32(5): 878-891 <https://doi.org/10.1139/x01-228>
- 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. Volume 173, February 2020, 103944 <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2020.103944>
- Dalal, R. C., Allen, D. E. (2008) *Greenhouse gas fluxes from natural ecosystems*. Australian Journal of Botany 56(5) 369-407 <https://doi.org/10.1071/BT07128>
- Dlugokencky, E. J., L. P. Steele, P. M., Lang, K. A., Masarie (1994) *The growth rate and distribution of atmospheric methane*, Journal of Geophysical Research, 99, D8, 17, doi:10.1029/94JD01245
- Dlugokencky, E., Bruhwiler, L., White, J. C. W., Emmons, L. K., Novelli, P. C., Montzka, S. A., Masarie, K. A., Lang, P. M., Crotwell, A. M., Miller, J. B., Gatti, L. V. (2009) *Observational constraints on recent increases in the atmospheric CH₄ burden*. Geophysical Research Letters 36. 10.1029/2009GL039780.
- Dušek, J., Acosta M., Stellner S., Šigut L., Pavelka, M. (2018): *Consumption of atmospheric methane by soil in a lowland broadleaf mixed forest*. Plant Soil Environment., 64: 400–406. <https://doi.org/10.17221/183/2018-PSE>
- Eesti Keskkonnaobservatoorium. Võrgustik. <http://kkobs.ut.ee/network#soontaga> (viimati külastatud 02.12.2019)
- Eesti Maaülikool, Tartu Ülikool. (2016) Ühisprojekt. *Süsiniku- ja lämmastikuringe muudetud niiskusrežiimiga metsades* https://media.rmk.ee/files/Rakendusuringu%20lopparuanne_Kodusoometsad.pdf (viimati külastatud 25.05.2020)
- Hansen, R., Mander, Ü., Soosaar, K., Maddison, M., Lõhmus, K., Kupper, P., Kanal, A., Söber, J. (2011) *Greenhouse gas fluxes in an open air humidity manipulation experiment*. Landscape Ecology (28) 4 DOI 10.1007/s10980-012-9775-7.

Hartmann, D.L., Klein Tank, A. M. G., Rusticucci, M., Alexander, L. V., Brönnimann, S., Charabi, Y., Dentener, F. J., Dlugokencky, E. J., Easterling, D. R., Kaplan, A., Soden, B. J., Thorne, P. W., Wild M., Zhai, P. M. (2013) *Observations: Atmosphere and Surface*. 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. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA

Heilig, G.K. (1994) *The greenhouse gas methane (CH₄): Sources and sinks, the impact of population growth, possible interventions*. *Popul Environ* 16, 109–137 (1994). <https://doi.org/10.1007/BF02208779>

Hodson, E. L., Poulter, B., Zimmermann, N. E., Prigent, C., Kaplan, J. O. (2011) *The El Niño-Southern Oscillation and wetland methane interannual variability*. *Geophys. Res. Lett.*, 38, L08810, doi:10.1029/2011GL046861

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2007) *Climate Change: The Physical Science Basis*, edited by: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Marquis, M., Averyt, K., Tignor, M. M. B., Miller, H. L. J., and Chen, Z., Cambridge University Press, Cambridge, 996 pp.

Ito, A., Inatomi, M. (2011) *Use of a process-based model for assessing the methane budgets of global terrestrial ecosystems and evaluation of uncertainty*. *Biogeosciences*, 9, 759–773, 2012. doi:10.5194/bg-9-759-2012

Järveoja, J., Nilsson M. B., Gažovič, M., Crill, P. M., Peichl, M. (2018) *Partitioning of the net CO₂ exchange using an automated chamber system reveals plant phenology as key control of production and respiration fluxes in a boreal peatland*. *Global Change Biology*. 2018;24:3436–3451. <https://doi.org/10.1111/gcb.14292>

Kadaja, J., Keppart, L. (2017) Keskkonnaministeeriumi aruanne. https://www.envir.ee/sites/default/files/vaetiste_laotamise_optimaalse_sugisese_ajalise_piirangu_eksperthinnang.pdf (viimati külastatud 25.05.2020)

Keppart, L., Raudsepp, H-M.; Tamm, S.; Loodla, K. (2011). *Eesti kliimaolud söodakultuuride valiku ja kasvu mõjutajatena*. Kohalikud söödad (10–14). Saku: Eesti Rohumaade Ühing. Toim. Tamm, U.; Meripõld, H.; Tamm, S. <https://www.etis.ee/Portal/Publications/Display/aeb5fc59-48e7-40ad-b84a-109200c0a8b1>

Keppler, F., Hamilton, J., Braß, M., Röckmann, T. (2006) *Methane emissions from terrestrial plants under aerobic conditions*. *Nature* 439, 187–191 <https://doi.org/10.1038/nature04420>

- Kirschbaum, M. U. F., Eamus, D., Gifford, R. M., Roxburgh, S. H., Sands, P. J. (2001) *Definitions Of Some Ecological Terms Commonly Used In Carbon Accounting*. NEE Workshop Proceedings: 18-20 April 2001
- Kirschke, S., Bousquet, P., Ciais, P., Saunoy, M., Canadell, J. G., Dlugokencky, E. J., Bergamaschi, P., Bergmann, D., Blake, D. R., Bruhwiler, L., Cameron-Smith, P., Castaldi, S., Chevallier, F., Feng, L., Fraser, A., Heimann, M., Hodson, E. L., Houweling, S., Josse, B., Fraser, P. J., Krummel, P. B., Lamarque, J.-F., Langenfelds, R.-L., Le Quéré, C., Naik, V., O'Doherty, S., Palmer, P. I., Pison, I., Plummer, D., Poulter, B., Prinn, R. G., Rigby, M., Ringeval, B., Santini, M., Schmidt, M., Shindell, D. T., Simpson, I. J., Spahni, R., Steele, L. P., Strode, S. A., Sudo, K., Szopa, S., van der Werf, G. R., Voulgarakis, A., van Weele, M., Weiss, R. F., Williams, J. E., Zeng, G. (2013) *Three decades of global methane sources and sinks*. *Nature Geosci* 6, 813–823. <https://doi.org/10.1038/ngeo1955>
- Krasnova, A., Kukumägi, M., Mander, Ü., Torga, R., Krasnov, D., Noe, S. M., Ostonen, I., Püttsepp, Ü., Killian, H., Uri, V., Lõhmus, K., Sõber, J., Soosaar, K. (2019) *Carbon exchange in a hemiboreal mixed forest in relation to tree species composition*. *Agricultural & Forest Meteorology*. Sep2019, Vol. 275, 11-23. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.05.007>
- Kriiska, K. (2019a) *Variation in annual carbon fluxes affecting the soil organic carbon pool and the dynamics of decomposition in hemiboreal coniferous forests*. Tartu Ülikool, Loodus- ja täppisteaduste valdkond, Ökoloogia ja maateaduste instituut. [Doktoritöö] <http://hdl.handle.net/10062/64800>
- Kriiska, K., Frey, J., Asi, E., Kabral, N., Uri, V., Aosaar, J., Varik, M., Napa, Ü., Apuhtin, V., Timmusk, T., Ostonen, I. (2019b) *Variation in annual carbon fluxes affecting the SOC pool in hemiboreal coniferous forests in Estonia*. *Forest Ecology & Management*, 433, 419–430. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.11.026>
- Kuusik, K., Hirse, T. (2016) *Keskkonnamõju analüüs. Soontaga mets*. Riigimetsa Majandamise Keskus. https://media.rmk.ee/files/Soontaga_Mets_kma_kokkuvõtte.pdf (viimati külastatud 24.05.2020)
- Kõlli, R., Tõnutare, T., Kõlli, T. (2018) *Ülevaade: kahkjad ehk näivleetunud mullad eestimaa muldkattes*. *Journal of Agricultural Science*, 2, XXIX, 2018, 95–105. doi: 10.15159/jas.18.12
- Law, B. E., Sun, O. J., Campbell, J., Van Tuyl, S., Thornton, P. E., (2003). *Changes in carbon storage and fluxes in a chronosequence of ponderosa pine*. *Global Change Biology*, 9: 510–524. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2003.00624.x>

- 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*. Sci. Rep. 6, 23410; doi: 10.1038/srep23410
- NASA (2016) The Earth Observatory. A Global View on Methane. <https://earthobservatory.nasa.gov/images/87681/a-global-view-of-methane> (viimati külastatud 16.05.2020)
- Nisbet, E. G., Manning, M. R., Dlugokencky, E. J., Fisher, R. E., Lowry, D., Michel, S. E., Lund Myhre, C., Platt, S. M., Allen, G., Bousquet, P., Brownlow, R., Cain, M., France, J. L., Hermansen, O., Hossaini, R., Jones, A. E., Levin, I., Manning, A. C., Myhre, G., Pyle, J. A., Vaughn, B. H., Warwick, N. J., White, J. W. C. (2019). *Very strong atmospheric methane growth in the 4 years 2014–2017: Implications for the Paris Agreement*. Global Biogeochemical Cycles, 33, 318–342. <https://doi.org/10.1029/2018GB006009>
- NOAA Earth System Research Laboratories Global Monitoring Laboratory. CarbonTracker-CH₄ <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/carbontracker-ch4/> (viimati vaadatud 16.05.2020)
- Noe, M. S., Kimmel, V., Hüve, K., Copolovici, L., Portillo-Estrada, M., Püttsepp, Ü., Jõgiste, K., Niinemets, Ü., Hörtnagl, L., Wohlfahrt, G. (2011) *Ecosystem-scale biosphere–atmosphere interactions of a hemiboreal mixed forest stand at Järvelja, Estonia*. Volume 262, Issue 2, 15 July 2011, Pages 71-81. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.09.013>
- Pärn, J., Maddison, M., Soosaar, K., Teemusk, Truu, J., Mander, Ü. (2014) *Maaailma turbamuldade naerugaasi- ja metaanivoogude seosed keskkonnatingimustega*. Publicationes Instituti Geographici Universitatis Tartuensis 111 (2014) 283-295.
- Remm, K. (2014) Ruumiliste andmete statistilise analüüsi kalkulaator RASA digiarhiiv.ut.ee/kalkulaator/ (viimati vaadatud 20.05.2020)
- Ribeiro-Kumara, C., Köster, E., Aaltonen, H., Köster, K. (2020) *How do forest fires affect soil greenhouse gas emissions in upland boreal forests? A review*. Environmental Research Volume 184, May 2020, 109328 <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109328>
- Ruser, R., Sehy, U., Weber, A., Gutser, R., Munch, J. C. (2008) *Main Driving Variables and Effect of Soil Management on Climate or Ecosystem-Relevant Trace Gas Fluxes from Fields of the FAM*. In: Perspective for Agroecosystem Management. Balancing Environmental and Socio-Economic Demands. pp 79-100
- Saunois, M., Bousquet, P., Poulter, B., Peregon, A., Ciais, P., Canadell, J. G., Dlugokencky, E. J., Etiope, G., Bastviken, D., Houweling, S., Janssens-Maenhout, G., Tubiello, F. N., Castaldi,

S., Jackson, R. B., Alexe, M., Arora, V. K., Beerling, D. J., Bergamaschi, P., Blake, D. R., Brailsford, G., Brovkin, V., Bruhwiler, L., Crevoisier, C., Crill, P., Covey, K., Curry, C., Frankenberg, C., Gedney, N., Höglund-Isaksson, L., Ishizawa, M., Ito, A., Joos, F., Kim, H.-S., Kleinen, T., Krummel, P., Lamarque, J.-F., Langenfelds, R., Locatelli, R., Machida, T., Maksyutov, S., McDonald, K. C., Marshall, J., Melton, J. R., Morino, I., Naik, V., O'Doherty, S., Parmentier, F.-J. W., Patra, P. K., Peng, C., Peng, S., Peters, G. P., Pison, I., Prigent, C., Prinn, R., Ramonet, M., Riley, W. J., Saito, M., Santini, M., Schroeder, R., Simpson, I. J., Spahni, R., Steele, P., Takizawa, A., Thornton, B. F., Tian, H., Tohjima, Y., Viovy, N., Voulgarakis, A., van Weele, M., van der Werf, G. R., Weiss, R., Wiedinmyer, C., Wilton, D. J., Wiltshire, A., Worthy, D., Wunch, D., Xu, X., Yoshida, Y., Zhang, B., Zhang, Z., Zhu, Q (2016a) *The global methane budget 2000–2012*. Earth System Science Data. 8(2), 697–751 <https://doi.org/10.5194/essd-8-697-2016>

Saunio, M., Jackson, R. B., P., Bousquet, B Poulter and J G Canadell (2016b) *The growing role of methane in anthropogenic climate change*. IOP Publishing Ltd Environmental Research Letters, Volume 11, Number 12. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/11/12/120207>

Shoemaker, J. K., Keenan, T. F., Hollinger, D. Y., Richardson, A. D. (2014) *Forest Ecosystem Changes from Annual Methane Source to Sink Depending on Late Summer Water Balance*. Geophysical Research Letters 41, no. 2: 673–679. doi:10.1002/2013GL058691

Soosaar, K., Repp, K., Lõhmus, K., Ostonen, I., Kukumägi, M., Maddison, M., Mander, Ü. (2016) *Carbon balance of an old hemi-boreal pine forest in Southern Estonia determined by different methods*. EGU General Assembly 2016, held 17-22 April, 2016 in Vienna Austria, id. EPSC2016-18229 <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2016EGUGA..1818229S/abstract>

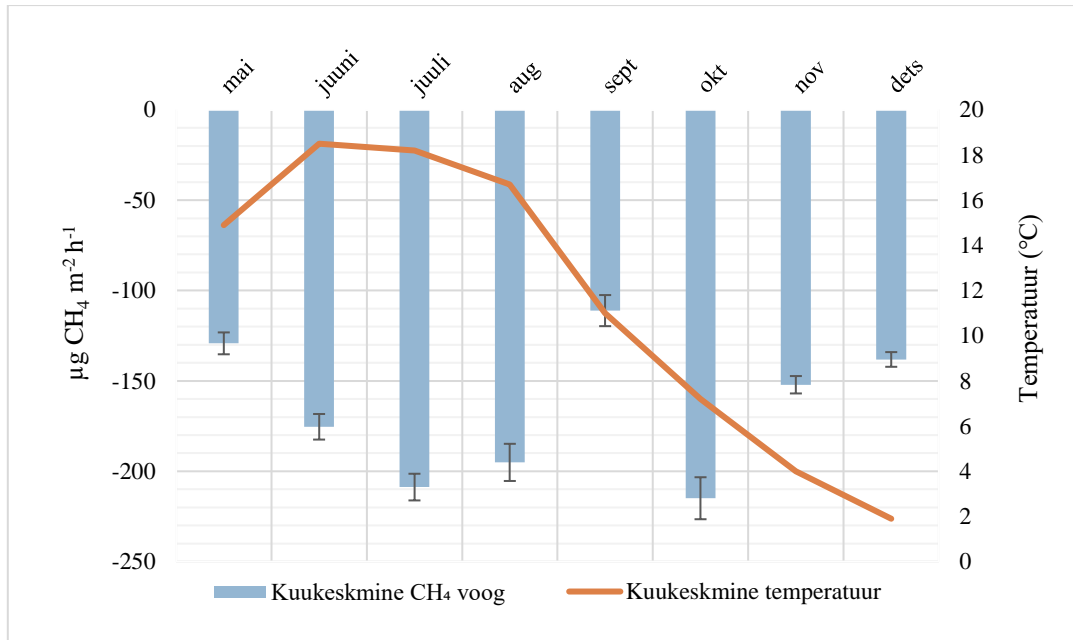
Soosaar, K., Schindler, T., Macháčová, K. Krasnov, D., Burdun, I., Suija, A., Uri, V., Niinemets, Ü., Morozov, G., Mander, Ü. (2018) *Flooding-induced CO₂ and CH₄ fluxes from an experimental grey alder forest: from ground to tree level*. Geophysical Research Abstracts. Vol. 20, EGU2018-13998, 2018. EGU General Assembly 2018

Zhao, J., Peng, S., Chen, M., Wang, G., Cui, Yi., Liao, Li., Feng, Ji., Zhu, B., Liu, W., Yang, L., Tan, Z. (2019) *Tropical forest soils serve as substantial and persistent methane sinks*. Scientific Reports 9, 16799 <https://doi.org/10.1038/s41598-019-51515-z>

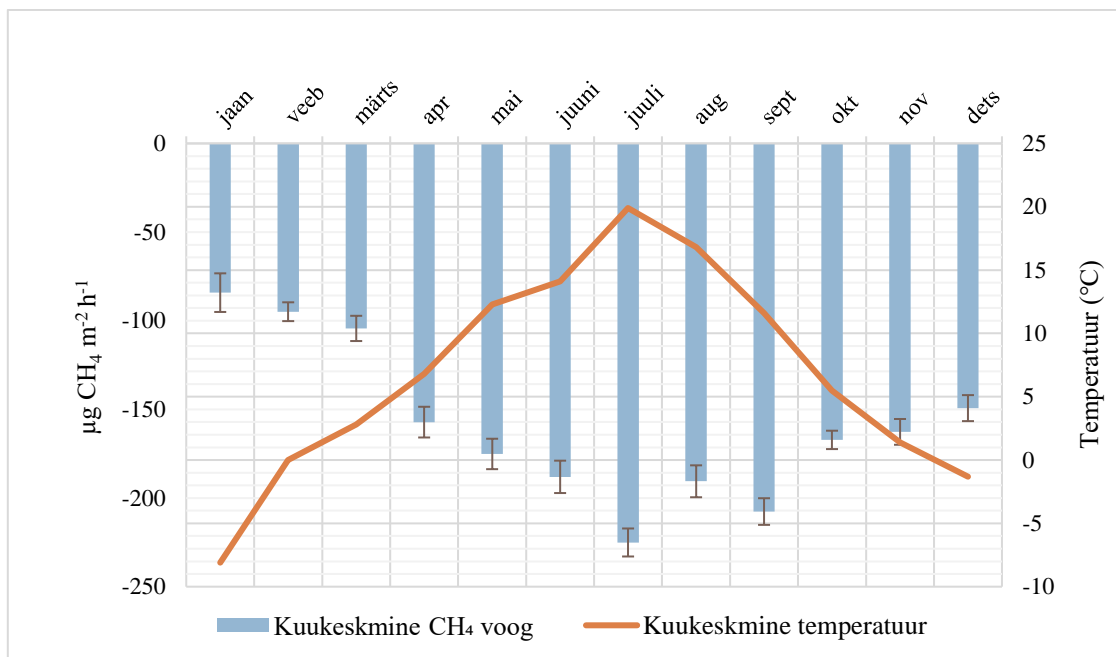
United Nations Framework Convention on Climate Change UNFCCC (2008) Kyoto Protocol
Reference Manual https://unfccc.int/resource/docs/publications/08_unfccc_kp_ref_manual.pdf
(viimati külastatud 24.05.2020)

Lisa 1

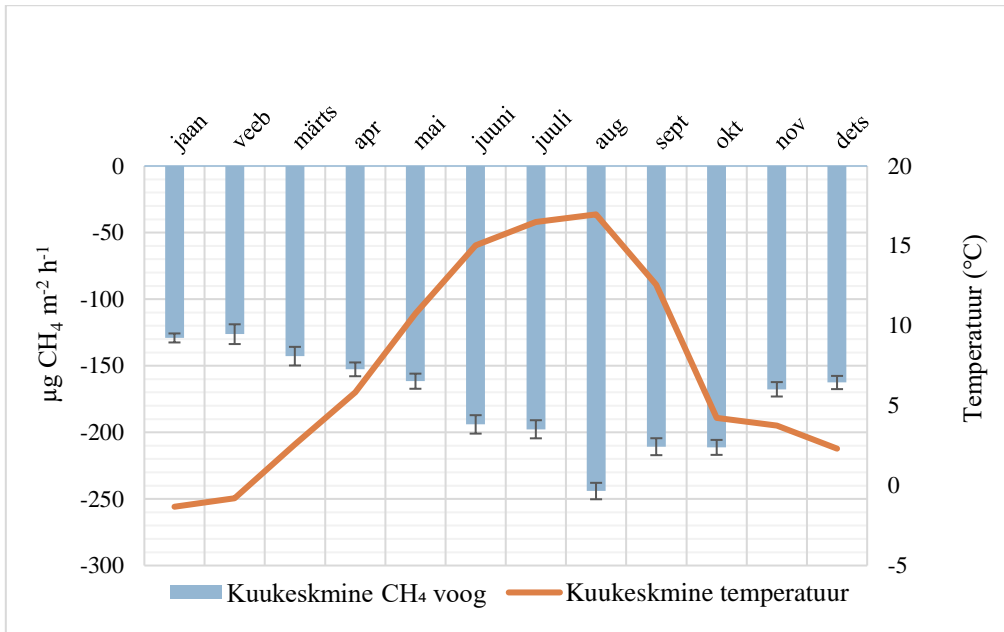
Kuukeskmised metaanivood ja temperatuurid iga vaatlusaasta kohta (2013-2019)



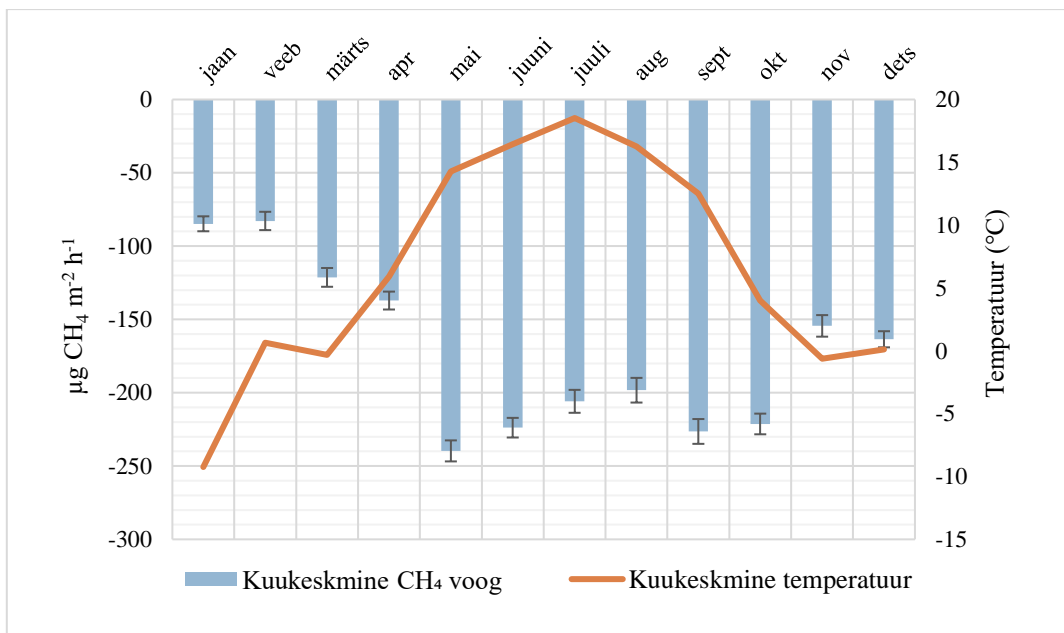
Joonis 1. Kuukeskmised metaanivood ja temperatuurid aastal 2013.



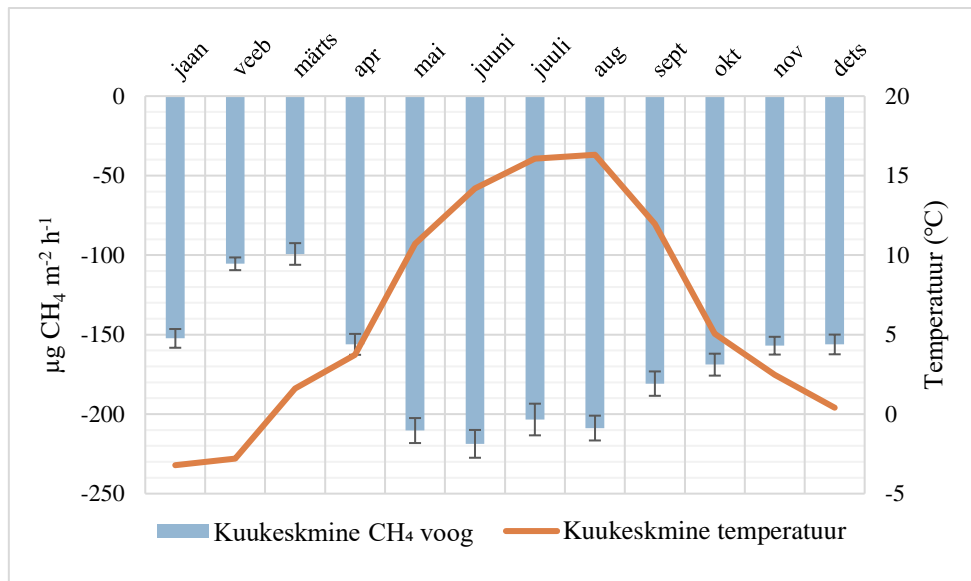
Joonis 2. Kuukeskmised metaanivood ja temperatuurid aastal 2014.



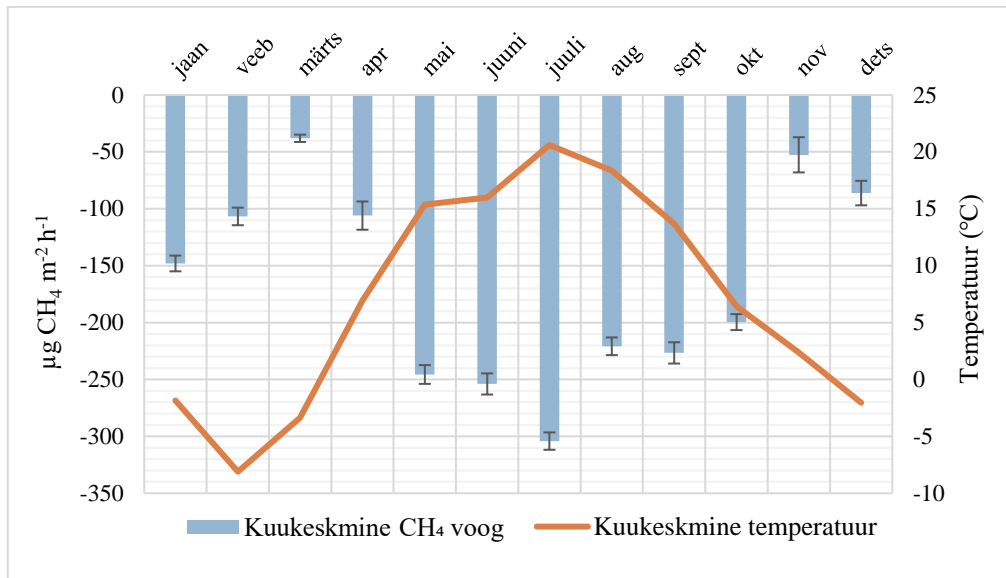
Joonis 3. Kuukeskmsed metaanivood ja temperatuurid aastal 2015.



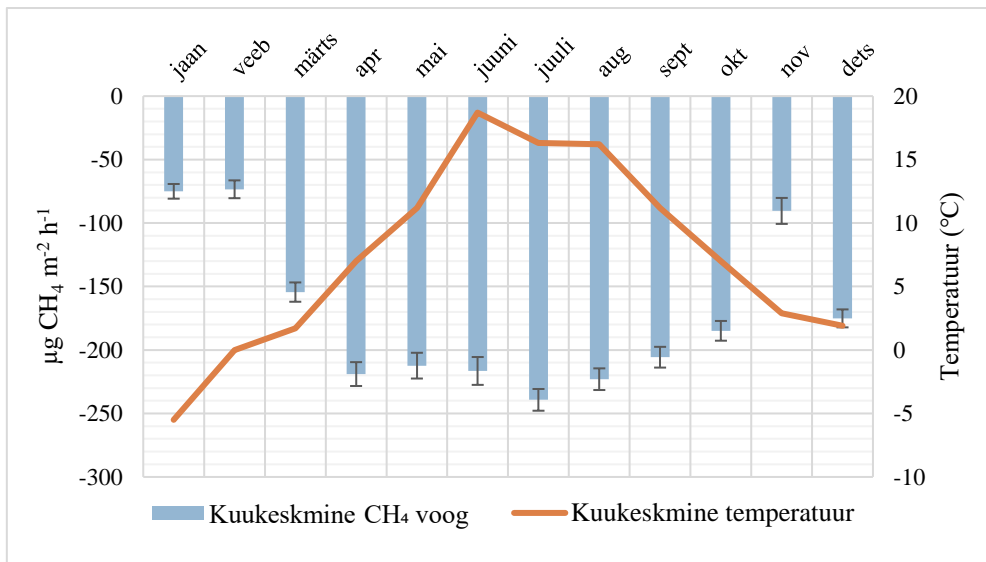
Joonis 4. Kuukeskmsed metaanivood ja temperatuurid aastal 2016.



Joonis 5. Kuukeskised metaanivood ja temperatuurid aastal 2017.



Joonis 6. Kuukeskised metaanivood ja temperatuurid aastal 2018.



Joonis 7. Kuukeskmised metaanivood ja temperatuurid aastal 2019.

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Marie Johanna Univer,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose „Metaanivood Soontaga metsaökosüsteemi uurimisjaamas aastatel 2013 – 2019“ mille juhendaja on Kaido Soosaar, 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.

Marie Johanna Univer

25.05.2020