

Tartu Ülikool

Loodus- ja täppisteaduste valdkond

Ökoloogia ja maateaduste instituut

Geograafia osakond

Peruu soode kasvuhoonegaaside vood

Autor: Uno A. Tavast

Juhendaja: Jaan Pärn

Tartu 2022

Peruu soode kasvuhoonegaaside vood

Kasvatav inimpopulatsioon võimendab kasvuhoonegaaside tootmise kasvu. Globaalsel skaalal mõistetakse gaaside (süsinikdioksiid, naerugaas ja metaan) vooge hästi, kuid väiksemate regionaalsete ökosüsteemide rollid on ebamääraseks. Spetsiifiliselt on vähe uuritud vooge Amasoonia soodes, mille muldades on suur osa Amasoonia ja kogu maakera süsinikust ja lämmastikust ning vajavad seega põhjalikumaid uurimisi (Quesada *et al.*, 2011).

Selle uurimistöö eesmärk oli analüüsida kolme eelmainitud kasvuhoonegaasi voogusid troopilise vihmametsa nõlvasoos, alepõllul ja lodumetsas. Mõõtmise toimus perioodil 16.09.2019 kuni 24.09.2019 v.a. 18. september. Edasine eesmärk oli tuvastada keskkonatingimuste ja gaaside voogude vahel aset leidnud seoseid.

Süsihappegaas (CO_2) ja metaan (CH_4) olid enim tundlikud põhjaveetaseme suhtes. Süsihappegaasi tootmise puhul oli tähtis niiskuse mõõdukus ja põhjavee sügavus. Viimase optimum jäi 200 ja 10 sentimeetri sügavuse vahele. Liigne kuivus ja niiskus pärssisid emissiooni intensiivsust. Metaani toodeti veega küllastunud tingimustes ja seoti aeroobsetes ehk hapnikurohketes tingimustes. Naerugaasi ja kaltsiumi vahel avaldus positiivne korrelatsioon. Arvatavasti tuleneb see kõrgemast mullabakterite arvukusest neutraalsema pH taseme juures.

Võtmesõnad: troopiline soo, kasvuhoonegaaside vood

CERCS: P420 Petroloogia, mineroloogia, geokeemia

Peruvian swamp greenhouse gas fluxes

Growing human population amplifies the production of greenhouse gases. Fluxes of carbondioxide, nitrous oxide and methane are well understood on a global scale, but roles of smaller regional ecosystems are undefined. Specifically, greenhouse gases from Amazon peatlands are poorly studied. Peatlands are the main ecosystem type in the Amazon and therefore need more thoughral research.

The aim of this research was to measure the fluxes of three previously mentioned greenhouse gases in tropical rainforest peatlands, in three different sites: a slope swamp, peat swamp forest and a slash-and-burn field. Measuring was carried out duirng from 16.09.2019 until 24.09.2019, not including the 18.09.2019. Furthermore, the goal was to identify connections between environmental conditions and gas fluxes.

Carbon dioxide and methane were most susceptible to changes in water levels. In the case of carbon dioxide production, moisture moderation and water level depth are crucial. High and low precentages of moisture inhibit the rate of said process. Its' optimum lays between depths 200 and 10 centimeters. Methane was produced in waterlogged conditions and bound in aerobic conditions. Laughing gas and calcium were positively correlated, supposedly deriving from higher concentrations of soil bacteria at closer-to-neutral pH levels.

Keywords: tropical peatland, greenhouse gas flux

CERCS: P420 Petrology, minerology, geochemistry

Sisukord

Lühendid	5
1. Sissejuhatus	6
1.1 Süsihappegaasi vood	7
1.2 Lämmastiku vood	7
1.3 Metaani vood.....	8
1.4 Eesmärk	9
2. Kasutatud andmed ja metoodika	10
2.1 Uurimisalade kirjeldus.....	10
2.2 Väli- ja laboratoorsete tööde metoodika	11
2.3 Statistiline andmetöötlus	12
3. Tulemused.....	13
3.1 Süsihappegaasi vood.....	13
3.2 Naerugaasi vood.....	13
3.3 Metaani vood.....	14
4. Arutelu.....	16
4.1 Süsihappegaasi vood.....	16
4.2 Naerugaasi vood.....	16
4.3 Metaani vood.....	16
5. Kokkuvõte	18
Summary	19
Tänuavaldused	20
Kasutatud kirjandus	21
Lisad	24
Lisa 1. CO ₂ ja K sisalduse seos 10cm.....	24
Lisa 2. N ₂ O ja N% seos 10cm.....	24
Lisa 3. N ₂ O ja Mg sisalduse seos 40cm.....	25
Lisa 4. N ₂ O ja org. aine% seos 40cm.....	25
Lisa 5. N ₂ O ja C% seos 40cm.	25
Lisa 6. CH ₄ ja mulla hapnikusisalduse seos 10cm.....	25
Lisa 7. CH ₄ ja põhjaveetaseme seos 10cm.....	27
Lihtlitsents	27

Lühendid

C - süsinik

Ca - kaltsium

CH₄ - metaan

cm - sentimeeter

CO₂ - süsihappegaas

K - kaalium

K% - kaaliumi kontsentratsioon

KHG - kasvuhoonegaasid

Mg – magneesium

mg - milligramm

N - lämmastik

N₂O - lämmastikdioksiid/naerugaas

NO - lämmastikoksiid

NO₂ - nitrit

NH₄ - ammoonium

NO₃ - nitraat

O₂ - hapnik

p - tõenäosus

Pg - petagramm

pH - vesinikeksponent

r² - determinatsioonikordaja

1. Sissejuhatus

On teada, et süsihappegaas (CO_2), naerugaas (N_2O) ja metaan (CH_4) on peamised kasvuhoonegaasid (KHGd). Peamiselt tänu nendele kolmele gaasile leiab aset Maad soojendav kasvuhooneefekt, mis laseb Päikeselt tuleva soojuskiirguse atmosfääri sisse ning takistab selle väljapääsu. Gaasidel on kasulik planeeti soojendav mõju. Kasvuhooneefekt muutub aga kahjulikuks kui kasvuhoonegaaside hulk atmosfääris kasvab järsult. See on toimunud inimtegevuse tagajärjel alates industriaalrevolutsioonist, enne mida oli gaaside ringlus tasakaalus. Peamised protsessid, mille kaudu inimesed kasvuhoonegaase atmosfääri lisavad, on fossiilkütuste põletamine ja metsa langetamine. Tulemusena leiavad tihemini aset intensiivsemad ilmanähtused nagu kuumalained, orkaanid, põuad ja üleujutused, muutuvad kuivad alad kuivemaks ja märjad alad märjemaks, tõuseb meretase.

Kõiki kolme kasvuhoonegaasi toodetakse ka troopilises vihmametsas. Amasoonia valgla mängib globaalses KHG eelarves kriitilist rolli. Inglisekeelses kirjanduses öeldakse selle kohta „*carbon sink*“, mille sihtpärane tõlge oleks süsiniku reservuaar, kuna sealsetesse metsadesse talletub oluline hulk süsinikku. Hiljutised valgla-ülesed uuringud viitavad, et Amasoonias tervikuna moodustub 7% globaalsest CH_4 emissioonist ja N_2O emissioonid on sarnase suurusega (Teh *et al.*, 2017). Kuigi on hästi teada kui suurt osa mängib Amasoonia piirkond globaalses KHG ringes, ei mõisteta, kuidas panustavad sellesse väiksemad ökosüsteemid Amasoonia siseselt.

Troopilistel laiuskraadidel paiknevaid soid peetakse ühtedeks suurimateks süsiniku hoiustajateks. Need katavad hinnanguliselt 441000 ruutkilomeetrit ja hoiustavad 130 Pg süsinikku (Page *et al.*, 2011; Dargie *et al.*, 2017). Lõuna-Ameerika omab hinnanguliselt suurimat troopilist sooala, mis asub Amasoonase valglas (Bhomia *et al.*, 2018). Amasoonia suurim sooala paikneb Kirde-Peruus, mis hinnanguliselt katab 35600 ruutkilomeetrit ja hoiustab 3,14 Pg süsinikku (Draper *et al.*, 2014). Peruu märgalad hõlmavad hinnanguliselt 67000 ruutkilomeetrit, millest enamus (61000 ruutkilomeetrit) kuuluvad ökosüsteemi tüübilt troopilise lodumetsa alla. Troopilisi lodumetsi iseloomustab rohke süsinikuvaru peamiselt turba aga ka kõrgete tüvedega palmide kujul. Sealne maksimaalne turba sügavus ulatub 7,5 meetrini ja ala katab peamiselt puuliik *Mauritia flexuosa*, mis domineerib üle teiste liikide, vaatamata vähepakuvatele mullatingimustele (Bhomia *et al.*, 2018). Amasoonia lääneosa on

globaalne biodiversiteedi epitsenter ja seda ohustab inimtegevus (Jenkins *et al.*, 2013). Tegurid Amasoonia metsa kahanemise ja seeläbi biodiversiteedi languse puhul on metsaraie, istanduste rajamine ja peamiselt väikeomanike seas levinud põlluharimisviis: alepõllundus (IPCC, 2019).

1.1 Süsihappegaasi vood

Atmosfääris ringlev CO₂ kasutatakse fotosünteesi käigus taimede poolt. Süsinik satub mulda läbi maapinnale langenud varise ja loomakõdu, mis peaksid moodustama ajapikku huumuskihi. Vesised tingimused pärsivad lagunemist, mistõttu jääb varis lõpuni lagunemata ja akumulereub (Bhomia *et al.*, 2018). Süsinik väheneb mullast läbi CO₂ emissiooni, mis toimub tänu mullamikroobide või juurte hingamisele. Mullahingamist piiravad liigselt madal ja liigselt kõrge mullaniiskus, mille optimum jääb 50-80% veega täidetud pooriruumi juurde (Pärn *et al.*, 2018). Ühes uurimuses leiab maksimaalne CO₂ tootmine aset 60-70% mullaniiskuse juures (Lent *et al.*, 2018). Madala niiskuse puhul piirab mulla hingamist juurte ja mikroobide metaboolse aktiivsuse pärsitus. Kõrge niiskuse puhul on piiravaid tegureid kaks: hapnikupuudus ja CO₂ kuhjumine. Viimane on tingitud vaba pooriruumi täitumisest veega. Veega küllastunud tingimuste puhul piirab hapniku aeglane difusioon läbi veekeskkonna juurte- ja mullahingamist. Sellisel juhul on mulla enda hapnikusisaldus seotud hingamisprotsessidega. Hapnikusaadavus tõstab mullahingamise intensiivsust lineaarselt kuni saavutab maksimumi, peale mida aeglustub. (Yavitt *et al.*, 1987; Fang *et al.*, 1999; Zhu *et al.*, 2008). Peruu tavatingimustes on emiteeruvaid gaase (CO₂, CH₄) vähem kui varisest juurde tekkivat turbamulda (Bhomia *et al.*, 2018).

1.2 Lämmastiku vood

Suurem osa maakera atmosfäärist koosneb lämmastikust (N), mis liigub eluta ja eluslooduse elementide vahel tsükliliselt. Lämmastik on kaasatud nitrifikatsioonis, denitrifikatsioonis ja nitrifitseerija-denitrifikatsioonis. Et mõista ja ennustada lämmastikgaaside voogude suurusjärke, ajastust ja inimmõju, tuleb enne mõista, mis kontrollib lämmastikgaaside tootmisprotsesse. Turbamullad, mille niiskus on optimaalne, käituvad soojades oludes N₂O emissiooni tulipunktidenä (Pärn *et al.*, 2018).

Ammooniumi oksüdeerimise määr nitrifitseerivate bakterite poolt on mitmete faktorite poolt mõjutatud. Enamikes muldades on tähtsaim faktor kontrollimaks nitrifikatsiooni tempot ammooniumi (NH_4) saadavus, millele järgneb hapniku saadavus, siis põhjaveetase ja seejärel temperatuur. Põhjaveetase piirab NH_4 ja hapniku (O_2) levikut ja seetõttu veeküllastunud tingimustes nitrifikatsioon peatub. Temperatuurile reageerivad mikroobsed protsessid erinevates muldades vahelduva eduga. Lämmastikoksiid on reduktiivse protsessi üks saadustest, mille osakaal suureneb hapniku vähenedes ja happelisuse tõustes. Samad faktorid kahandavad aga NH_4 oksüdatsioonimäära, mistõttu on N_2O netokoguse leidmine raskendatud. Kõrged N_2O tootmise määrad on sagedamini seotud denitrifikatsiooniga. Ühtlasi on denitrifikatsioon ainus bioloogiline N_2O tarbiv protsess (Firestone *et al.*, 1989).

Denitrifikatsioon on astmeline protsess, mille kulgedes nitraat (NO_3) või nitrit (NO_2) on redutseeritud gaasilisele lämmastiku kujule lämmastikoksiid (NO), N_2O või lämmastik (N_2). Rangelt anaeroobne protsess denitrifikatsioon läheb lõpuni ainult siis, kui lämmastikuaatom püsib kogu protsessi vältel hapnikuvaeguses. Vaid sellisel juhul on protsessi lõppsaadus N_2 . Kui juhtub aga, et hapnik pääseb N aatomile ligi, tekib denitrifikatsiooni vahesaadus: huvialune N_2O . Üldised nõudmised denitrifikatsioonile on metabolismivalmis bakterite olemasolek, redutseerijate olemasolek, O_2 piiratud kättesaadavus, lämmastikoksiidide (NO_3 , NO , N_2O) saadavus. Denitrifikatsiooni aktiivsus on anoksilistes ehk hapnikuta muldades kõrge. Märgalade mullad suudavad pakkuda tingimusi, kus esineb N_2O netotarbimine. Seal pruugib denitrifikatsioonimäära kontrollida NO_3 saadavus (Firestone *et al.*, 1989; Zhang *et al.*, 2011).

Nitrifitseerija-denitrifikatsioon on nitriti ehk NO_2 redutseerimine ammooniumi oksüdeerivate bakterite kaudu. Teatud tingimuste puhul on see olulisem kui klassikaline denitrifikatsioon. Selle protsessi puhul tõuseb N_2O ja NO tootmine O_2 vähenedes. Madala hapnikusisaldusega keskkonnad, eriti just kõikuvaid aeroobseid-anaeroobseid tingimusi omavad keskkonnad, soodustavad N_2O tootmist nitrifitseerija-denitrifikatsiooni kaudu. Sellistes tingimustes püsib nitrifitseerija-denitrifikatsioon peamise N_2O allikana (Wrage-Mönnig *et al.*, 2018).

1.3 Metaani vood

Metaani toodetakse lagundamise viimase etapi, metanogeneesi, käigus. CH_4 toodavad mikroobid stabiilselt anoksilistes tingimustes. Need tingimused pakuvad kaitset tugevate oksüdeerijate eest nagu hapnik. Seetõttu on metaani tekkeprotsess enim tundlik

põhjaveetaseme suhtes. Metaani oksüdatsioon ehk ühinemine hapnikuga toimub kontrastina troopilistes muldades peamiselt aeroobsetes tingimustes. Seega põhjaveetaseme tõustes metaani toodetakse ja langedes seotakse. Peruu sood on tugevad regionaalsed metaaniallikad keskmise emissiooniga 36.05 mg m⁻² päevas (Teh *et al.*, 2017).

1.4 Eesmärk

Selle uurimistöö eesmärk oli leida seoseid Amasoonia keskkonnatingimuste ja KHG voogude vahel kolmel uurimisalal ning ise kogutud mõõtmisandmeid võrrelda teiste autorite tulemustega. Informatsioon KHG vooge mõjutavate faktorite kohta on esmane uurimaks pikaajalisi mulla ja atmosfääri vahel toimuvaid KHG vahetusi (Lent *et al.*, 2018). Faktorid, mis võivad KHG vooge mõjutada, on mulla substraadi kvaliteet, toitainete saadavus, mulla õhustatus ja teised. Kolm uurimisala olid alepõld, lodumets ja nõlvasoo (Joonis 1).



Joonis 1. Noor Peruu vihmamets.

2. Kasutatud andmed ja metoodika

2.1 Uurimisalade kirjeldus



Joonis 2. Quistococha lodumets.

Amasoonia vihmamets (Joonis 2) kuulub Köppeni klassifikatsiooni järgi troopilise vihmametsa vööndisse (Af), mis on iseloomulikult niiske ja palav (Arnfield 2009). Vööndis puudub kuiv hooaeg. Peruu Amasoonias sajab aastas hinnanguliselt 3087 millimeetrit sademeid ja valitsev keskmine õhutemperatuur on 27 kraadi Celsiust (Bhomia *et al.*, 2018).

Kasvuhoonegaaside (CO_2 , CH_4 , N_2O) mõõtmised viidi läbi Peruu Iquitose linnast edelas, kolmel erineval alal. Kõik alad olid vähemalt hektari suurusel. Mõõdistuspunktid paigutati alasiseselt maksimaalselt eristuvate tingimustega punktidesse, et tabada ala keskmine voog. Esimene uurimisala oli alepõllu servas nõlval paiknev nõlvasoo koordinaatidega -3.835650, -73.362597, mida illustreerib vasakpoolseim foto Joonisel 3. Seal kasvas noor vihmamets. Nõlvapealne osa oli kuiv. 2 meetri sügavusse kaeveauku ei tekkinud ka ootamise järel vett. Sinna paigutati ülemine mõõtmispunkt. Nõlva jalamil asetses soot ja alumine uurimispunkt paigutati selle kõrvale. Ülejäänud punktid jäid nende kahe kõrguse vahemikku. Teine

uurimisala oli kuiv alepõld koordinaatidega -3.852744, -73.385840, mida illustreerib keskmine foto Joonisel 3. Sealset metsa oli põletatud võrdlemisi värselt: maa oli söe ja tuhaga kaetud, määris kergesti, noored maniokitaimed olid põlvkõrgused. Umbes hektari suurune ala piirnes ühest küljest jõega, kolmest küljest noore metsaga, mille tundemärgid viitasid samuti alepõllundusele. Kolmas uurimisala oli lodumets koordinaatidega -3.834476, -73.318301, mida illustreerib parempoolne foto Joonisel 3. Sel alal oli tegemist laiaulatusliku ja rikkumatu lodumetsaga või otsetõlkes palmisooga, mille peamine puuliik oli *Mauritia flexuosa*. Ühest küljest piirnes ala järvega, muudes suundades kestis lodumets.



Joonis 3. Nõlvasoosse, alepõllule ja lodumetsa paigaldatud plastikrõngad.

2.2 Väli- ja laboratoorsete tööde metoodika

KHG emissioonide mõõtmisi teostati staatilise pimekambri meetodil alates 16.09.2019 kuni 24.09.2019 v.a. 18. september. Mõõtmisel kasutati valgeid 65-liitriseid PVC kambreid diameetriga 50 sentimeetrit (cm) ja kõrgusega 40 cm. Need asetati õhukindlalt 15 cm sügavusele maapinda vajutatud veetihendiga plastikrõngale. Paigaldamisega samal päeval proove ei võetud, et vältida paigaldamisprotsessi häirivat mõju gaaside voogudele. Gaas koguti kambri ülaosast 50 milliliitrisesse eel-evakueeritud klaasanumasse. Esimene proov võeti vahetult pärast kambri paigutamist rõngale, edaspidi võeti proovid tunni aja jooksul iga 20 minuti möödudes, mil kamber asetses segamatult rõngal. Alepõllul ja nõlvasoos koguti andmeid üheksast uurimisala iseloomustavast punktist. Lodumetsas koguti proove puuliikide *Mauritia flexuosa* ja *Symphonia globulifera* juurte kohalt kümnest uurimisala iseloomustavast punktist. Aladel teostati mõõtmisi kahel päeval. Igal päeval tehti 2 mõõtmisessiooni, mis olid kambrite defitsiidi tõttu jaotatud kaheks osaks. Iga mõõtmisessiooni puhul koguti andmeid ka muude keskkonnanäitajate kohta. Põhjaveetaset mõõdeti vaatluskaevuga vähemalt 3 tundi peale kaevu paigaldamist. Turvasmuldade temperatuuri mõõdeti 10, 20, 30 ja 40 cm sügavusel nagu ka mullaniiskust seadme Decagon Pro Check abil. Turvasmuldade proovid 0-

10 cm ja 30-40 cm sügavuselt koguti õhukindlatesse anumatesse, hoiustati temperatuuril 5°C ja transporditi samades tingimustes Eesti Maaülikooli laborisse, et välja selgitada mulla fosfori, kaaliumi, magneesiumi, kaltsiumi, nitraadi, ammooniumi, lämmastiku, süsiniku, orgaanilise aine osakaal ja vesinikeksponendi (pH) määr turvasmullas (täpsema metoodika kirjelduse jaoks tutvu Pärn *et al.*, 2021 artikliga). Gaasi- ja turvaseproovid analüüsi kolme nädala jooksul Shimadzu GC-2014 gaasikromatograafi abil (Mander *et al.*, 2014).

Osalesin välitöödel vahemikus 18.09.2019-24.09.2019. Assisteerisin Jaan Pärna: valmistasin ette välitöö varustust, kogusin gaasipoove ja transportisin proove Tartu Ülikooli.

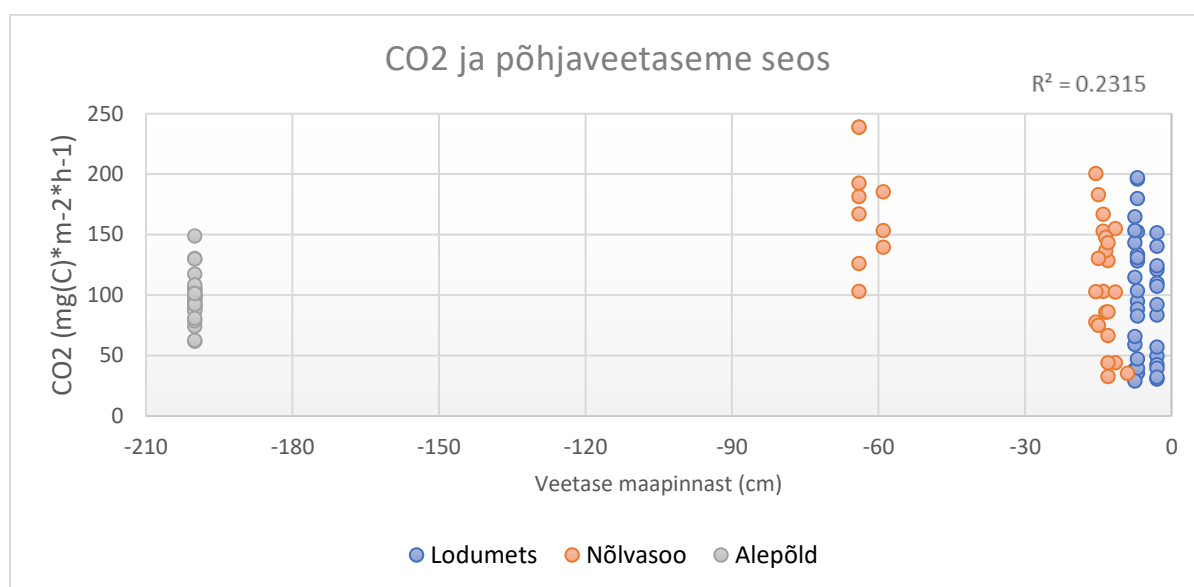
2.3 Statistiline andmetöötlus

KHG vood määratleti kolmel kuni neljal järjestikusel proovil põhineva lineaarse regressiooniga, mille olulisustõenäosus (p) oli väiksem kui 0.05. Vood, mille tähtsusnivood olid olulisustõenäosusest madalamal, olid ebasobilikud ja arvati edaspidisest arvutustest välja. Et mõista seoseid KHG ja keskkonnanäitajate vahel, leiti nendevahelise lineaarse korrelatsiooni väärtus Pearsoni koefitsendi abil.

3. Tulemused

3.1 Süsihappegaasi vood

Voog CO₂ puhul jäi vahemikku 30.589 kuni 239.137, keskmine oli 108.157 milligrammi ruutmeetril tunnis (mg m⁻² h⁻¹). Lodumetsas toodeti CO₂ kaudu süsinikku keskmiselt 98.992, nõlvasoos 129.064 ja alepõllul 97.560 mg m⁻² h⁻¹. CO₂ tugevamad sõltumatud tunnused olid põhjaveetasemega (joonis 4), mille determinatsioonikordaja (r^2) väärtus 30-40cm sügavusel turbas oli 0.2315 ja kaaliumiga (K%) (lisa 1), mille r^2 väärtus 0-10cm sügavusel turbas oli 0.110.



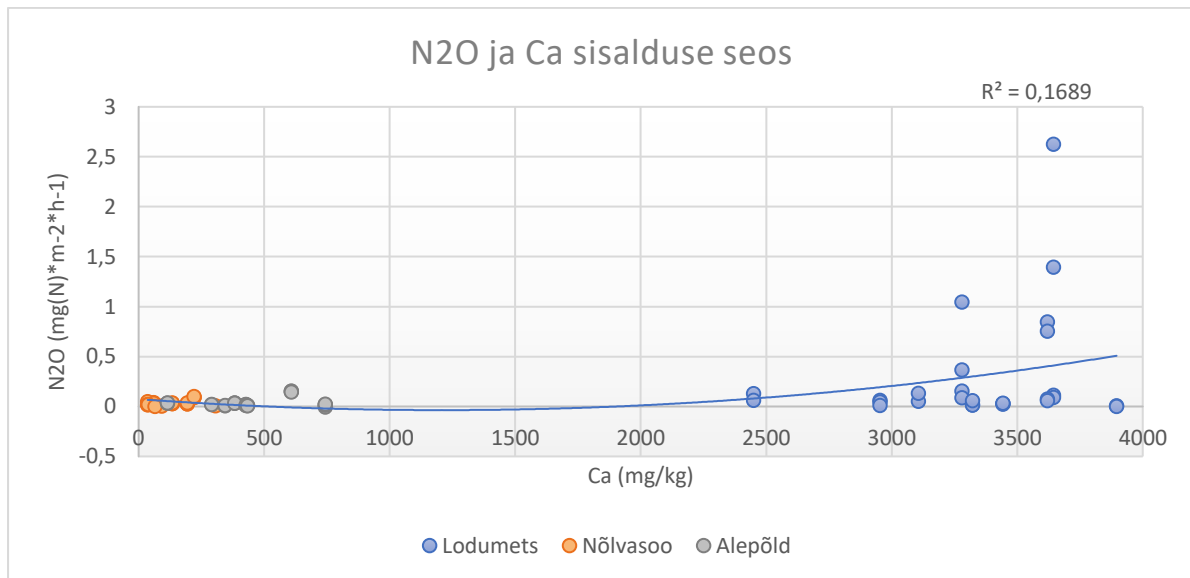
Joonis 4. CO₂ ja veetaseme seos.

Joonisel 4 on uurimisalade tulemused eristatud värviga. Alepõllu punktid on hallid, nõlvasoo punktid on oranžid ja lodumetsa punktid on sinised. Sügavaima veetaseme puhul jäävad CO₂ väärtused 50 ja 150 vahele, pinnapealseima veetaseme puhul 30 ja 200 vahele, keskmise veetaseme puhul 30 ja 250 vahele. On näha, et keskmisel veetaseme sügavusel nõlvasoos on CO₂ tootmine intensiivsem kui madalamal alepõllul ja kõrgemal lodumetsas.

3.2 Naerugaasi vood

N₂O tugevaimad sõltumatud tunnused olid kaltsium (Ca), mille r^2 väärtus 0-10cm sügavusel oli 0.169 (Joonis 5), N mille r^2 väärtus 0-10cm sügavusel oli 0.111 (lisa 2), magneesium (Mg), mille r^2 väärtus 30-40cm sügavusel oli 0.119 (lisa 3), orgaaniline aine, mille r^2 väärtus 30-40cm sügavusel oli 0.116 (lisa 4) ja süsinik (C%), mille r^2 väärtus 30-40cm sügavusel oli 0.102 (lisa 5).

Voog N_2O puhul jäi vahemikku -0.004 kuni 2.627 , keskmine oli $0.138 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. Lodumetsas toodeti N_2O kaudu lämmastikku keskmiselt 0.308 , nõlvasoos 0.036 ja alepõllul $0.035 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. Nitraadi kogus oli alepõllul kõrgeim keskmiselt 14639 milligrammi ühe kilogrammi kuiva mulla kohta. Teiste alade keskmised nitraadi kogused kilogrammi kuiva mulla kohta jäid alla 500 milligrammi.



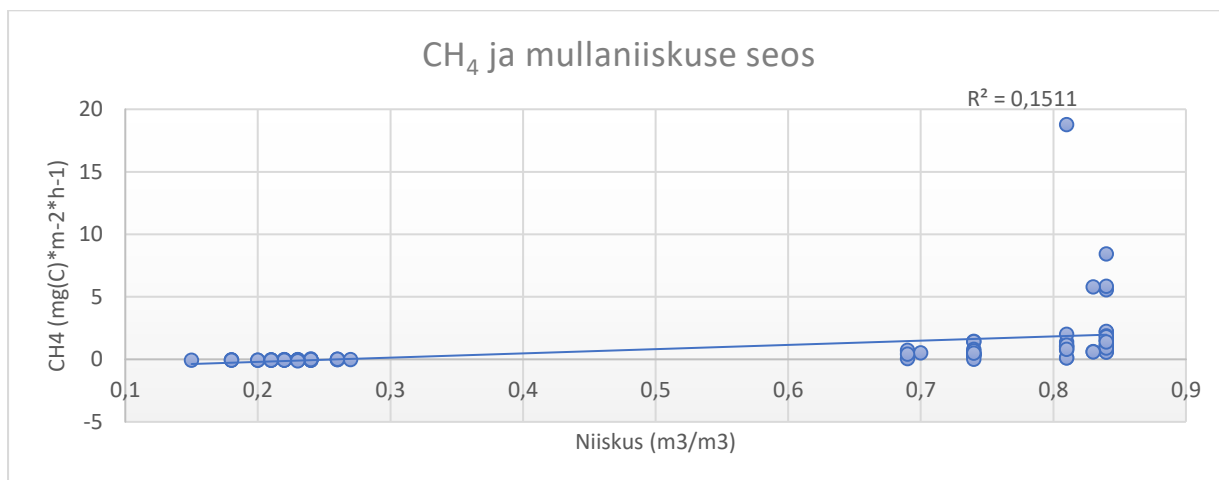
Joonis 5. N_2O ja Ca sisalduse seos.

Joonisel 5 on välja kujunenud kaks eraldiseisvat punktiparve. Vasakpoolse parve Ca kontsentratsioonid jäävad rõhtteljel vahemikku 0 kuni 800 milligrammi kilogrammi kuiva mulla kohta ja püstteljel vahemikku -0.5 kuni $0.5 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. Parempoolne punktiparv on märksa hajusam. Selle väärtused jäävad rõhtteljel vahemikku 2000 kuni 4000 milligrammi kilogrammi kohta ja püstteljel vahemikku 0 kuni $3 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. Joonis annab mõista, et suurem Ca kontsentratsioon loob eeldused suuremaks N_2O tootmiseks, aga ei garanteeri seda. N_2O voog sõltub ka teistest tingimustest, kuna võib jääda sama suureks ka suurema Ca kontsentratsiooni puhul.

3.3 Metaani vood

CH_4 tugevamad sõltumatud tunnused olid mulla hapnikusisaldus, mille r^2 väärtus $0-10\text{cm}$ sügavusel oli 0.151 (lisa 6) ja põhjaveetase, mille r^2 väärtus $0-10\text{cm}$ sügavusel oli 0.106 (lisa 7). Voog CH_4 puhul jäi vahemikku -0.076 kuni 8.423 , keskmine oli $1.010 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$.

Lodumetsas toodeti CH₄ kaudu süsinikku keskmiselt 1.586, nõlvasoos 1.461 ja alepõllul -0.052 (ehk tarbiti) mg m⁻² h⁻¹.



Joonis 6. CH₄ ja mullaniiskuse seos.

Joonisel 6 on selge lõhe kahe punktiparve vahel. Enamik voogusid vasakus punktiparves on püstteljel negatiivsed, mis tähendab, et kuivemates oludes kasutatakse õhust saadavalolevat metaani. Kõik vood paremas punktiparves on positiivsed, mis tähendab, et märjemates oludes paiskab muld metaani õhku.

4. Arutelu

4.1 Süsihappegaasi vood

Süsiniku sidumine on KHG puhul naturaalsel turbaaladel domineeriv protsess, häiringud tõstavad emissioone (Pärn *et al.*, 2021). Tulemustes avaldus süsihappegaasi seos põhjaveetasemega: mõõtmisandmete põhjal CO₂ tootmist soosivaim vee sügavus on 60 sentimeetrit. Joonis 4. illustreerib turba süsihappegaasi emissiooni vastavalt põhjaveetaseme sügavusele. Maapinnast 60 sentimeetri sügavuseni laskudes CO₂ emissioon suureneb ja 2 meetri sügavusel on see väiksem kui 60 sentimeetri sügavusel. Pole piisavalt andmeid, et kinnitada 60 sentimeetri sügavust põhjaveetaset kui CO₂ emissiooni optimumi, aga see jääb 200 ja 10 sentimeetri vahemikku. Veel avaldus seos kaaliumi osakaaluga mullas: mida rohkem kaaliumi, seda intensiivsem gaasi tootmine (Lisa 1). Saadud andmed on väga lühikese perioodi jooksul kogutud ning ei pruugi anda terviklikku ülevaadet. Meie CO₂ voogude keskmine 108,157 mg m² h⁻¹ jäi eelnevate troopiliste turbaalade uurimustega võrreldes sarnasesse suurusjärku. Van Lent enda 2018. aastal avaldatud töös leiab mudelijärgse turba CO₂ voo olevat tagasihoidlikud 81 mg m² h, Hergoualc'hi 2011. aasta piirkonnas tehtud uurimuste refereeringu tulemus oli 149 mg m² h, Pärn leiab 2020. aastal erinevate uurimisalade voo jäävat 49 ja 210 mg m² h vahemikku. Meie keskmine voog oli nii kõrge peamiselt tänu nõlvasoole, kus olid parimad niiskustingimused CO₂ tootmiseks. Tõenäoliselt oli CO₂ tootmist pärssivaks teguriks alepõllul liigne kuivus ja lodumetsas hapniku puudus kõrge põhjaveetaseme tõttu (Fang *et al.*, 1999; Zhu *et al.*, 2008). Kõrge põhjavesi ja tihe mets loovad keskkonna, kus ohtralt langev varis laguneb väga aeglaselt ning seetõttu kuhjub. Süsinik talletub seal mitte ainult varise, vaid ka kõrgete tüvedega palmide kujul. Lodumetsa peetakse selles ja ka teistes uurimustes parimaks CO₂ sidujaks. Kahtlemata on piirkond ka CO₂ allikas, aga nagu teada eelnevatest uurimustest, toimub seal rohkem süsiniku sidumist kui emissiooni, mistõttu saab seda pidada süsiniku reservuaariks (IPCC, 2019).

4.2 Naerugaasi vood

N₂O puhul avaldusid seosed orgaanilise aine osakaalu (Lisa 4), kaltsiumi (Joonis 5), lämmastiku (Lisa 2), süsiniku (Lisa 5) ja magneesiumiga (Lisa 3). Mida rohkem kaltsiumi või teisi toitaineid (lämmastikku, süsinikku, magneesiumu), seda intensiivsem gaasi tootmine. Mullabaktereid

on neutraalse pH puhul rohkem, nad kasvavad kiiremini ja paljunevad rohkem ehk on üleüldiselt aktiivsemad. N_2O voogude keskmine oli $0.138 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. Suurima tootlusega oli inimtegevusest puutumata lodumets, tootes keskmiselt $0.308 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. Puutumata uurimisala roll suurima N_2O tootjana leiab kinnitust ka teistes teadustöodes (Hergoualc'h *et al.*, 2020; Pärn *et al.*, 2021). Küll aga on nende keskmine N_2O voog väiksem. Seda põhjendab meie andmete lühiajaline mõõtmisperiood, mis jäi kuiva ja suurvee-aja vahelisele üleminekuperioodile. See periood on N_2O tootmise jaoks soodne, sest häiringud suurendavad emiteeritavat KHG hulka. Teadaolevalt on peamine N_2O tootev protsess denitrifikatsioon (Butterbach-Bahl *et al.*, 2013), aga kuna uuritav muld oli nitraadivaene, mida peab nitrifikatsiooni ja denitrifikatsiooni puhul mullas leiduma, võib üheks N_2O allikprotsessiks lugeda nitrifitseerija-denitrifikatsiooni, sest see ei vaja ega tooda nitraati (Wrage-Mönnig *et al.*, 2018). Nitrifitseerija-denitrifikatsioon vajab kindlaid pH tingimusi ja on seeläbi seotud kaltsiumiga (Pärn *et al.*, 2021). N_2O võib tekkida ka muudel juhtudel: läbi kaas-denitrifikatsiooni, palmijuurte hingamise tõttu vallanduva mittelõpliku denitrifikatsiooni puhul (Pärn *et al.*, 2021). Erinevust kahe punktisarve voogude vahel (Joonis 5) võib põhjendada hapnikusisalduse erinevusega. Nõlvasoos ja alepõllul oli hapnikusisaldus kõrgem ja lodumetsas madalam. Madalam O_2 kontsentratsioon tähendab rohkemat N_2O tootmist. Alepõllul tekkis N_2O peamiselt nitrifikatsiooniprotsessi kõrvalproduktina. N_2O emissioonid olid tugevad, kinnitades Peruu turbaalade rolli N_2O emissiooni tulipunktidenäna.

4.3 Metaani vood

Metaani puhul avaldus seos põhjaveetasemega (lisa 7). See kinnitab varasemates uurimustes sõnastatud: metaani toodetakse anoksilistes ja seotakse aeroobsetes tingimustes (Teh *et al.*, 2017). Negatiivne korrelatsioon leidis aset hapnikusisaldusega (lisa 6). Mida suurem hapnikusisaldus, seda väiksem oli metaani produktsioon. CH_4 voogude keskmine oli $1.010 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. Suurima tootlusega oli lodumets, tootes keskmiselt $1.586 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. See on põhjendatav pideva hapnikupuudusega veealustel aladel. Suurima metaani allika rolli on andnud puutumata uurimisalale ka Pärn *et al.* (2021) ja Hergoualc'h *et al.* (2020). Nende tulemused (vastavalt $0.53\text{--}9.1 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}$; $2.573 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}$) on samas suurusjärgus meie omadega ja samuti juhitud põhjaveetasemest. Alepõllul oli täheldada metaani oksüdeerumist just hapniku suure sisalduse tõttu. Seda sama kinnitavad ka Pärn *et al.* (2021) ja Van Lent *et al.* (2018). Sealne mõõdetud voog oli negatiivne keskmiselt $-0.052 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$.

5. Kokkuvõte



Joonis 7. Quistococha looduskaitseala mõõtetornist avanev vaade.

Uurimise käigus avaldusid seosed keskkonnanäitajate ja KHG vahel kolmel uurimisalal. Kõigil aladel toimus süsihappegaasi emissioon, mis oli intensiivseim juhul, kui põhjaveetase oli 60 sentimeetri sügavusel. Tugevaim CO_2 emissioon leidis aset nõlvasoos. Kuna osa varise C talletub turbasse ja osa õhkupaiskuvast CO_2 seotakse puude poolt, saab piirkonda pidada süsiniku reservuaariks. Lodumets (Joonis 7) oli tugev, nõlvasoo ja alepõld olid nõrgad N_2O allikad. Lodumetsas ja nõlvasoos olid madalad nitraadikonsentratsioonid ja esimeses ka madal hapnikukonsentratsioon. Nendel tingimustel põhinedes võib oletada, et peamine N_2O tootev protsess oli nitrifitseerija-denitrifikatsioon, aga ei saa välistada ka denitrifikatsiooni. Alepõllul võis enamik N_2O tekkida nitrifikatsiooni kõrvalsaadusena. Mõlemad lodumets ja nõlvasoo olid metaani allikad ja alepõld siduja, kuna anoksilistes tingimustes CH_4 toodetakse ja aeroobsetes seotakse. Võrreldes teiste autoritega oli meie CO_2 voog sarnane, N_2O voog suurem, CH_4 voog aga tagasihoidlikum. Erinevused on tõenäoliselt tingitud lühikesest mõõteperioodist. Uurimusest võib järeldada, et Peruu turbaalad on tugevad N_2O ja CH_4 allikad.

Peruvian swamp greenhouse gas fluxes

Uno A. Tavast

Summary

Greenhouse gas emissions are rising and humans amplify the process mainly by burning fossil fuels and taking down forests. This destructive behaviour is continued even if the effects are known to all. Hopes are on our planets' ecosystem to surmount the greenhouse gas problem. Tropical forests play a crucial part in the process.

Vast tropical peat swamp forests discussed in this research store large quantities of carbon in the form of palm trees and peatlands. At the same time peatlands produce a considerable amount of methane (up to 7% of the global emission, N₂O emissions are of similar magnitude), though in net balance, more carbon is sequestered than emitted.

The research was carried out on three different sites: a slope swamp, a slash-and-burn-field, a peat swamp forest.

Carbon dioxide was related to water level depth. Too high or too low and the process slows down. Optimal depth was between 200 and 10 centimeters. Laughing gas was positively correlated with calcium, nitrogen and carbon, magnesium and organic matter concentrations in soil, mainly produced by nitrifier-denitrification. Methane was linked to soil moisture: production took place under anoxic conditions and binding took place in aerobic conditions. Methane was also negatively related to soil oxygen concentration. Peruvian peatlands are strong sources of N₂O and CH₄.

Tänuavaldused

Autor avaldab suurt tänu töö juhendajale Jaan Pärnale oskusliku juhendamise eest välitöödel, andmetöötlusel ja tüviteksti koostamisel. Tänamisele kuuluvad ka Alar Teemusk, Ülo Mander, Kaido Soosaar, Thomas Schindler, Katerina Machacova, Keit Kill ja kõik välitööde abilised (Joonis 8).



Joonis 8. Välitööde meeskond.

Kasutatud kirjandus

- Arnfield, A. J. (2020). *Köppen climate classification*. Viimati külastatud 29.05.2022, <https://www.britannica.com/science/Koppen-climate-classification>.
- Butterbach-Bahl, K., Baggs, E. M., Dannenmann, M., Kiese, R., Zechmeister-Boltenstern, S. (2013). Nitrous oxide emissions from soils: how well do we understand the processes and their controls?, *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 1-13.
- Bhomia, R. K., Lent, J., Grandez Rios, J. M., Hergoualc'h, K., Honorio Coronado, E., Murdiyarso, D. (2018). Impacts of *Mauritia flexuosa* degradation on the carbon stocks of freshwater peatlands in the Pastaza-Marañón river basin of the Peruvian Amazon, *Nature*, 645-668.
- Dargie, G. C., Lewis S. L., Lawson, I. T., Mitchard, E. T. A., Page, S. E., Bocko, Y. E., Ifo, S. A. (2017). Age, extent and carbon storage of the central Congo Basin peatland complex, *Nature*, 86-90.
- Draper, F. C. H., Roucoux, K. H., Lawson I. T., Mitchard, E. T. A., Honorio Coronado, E. N., Lähteenoja, O., Montenegro, L. T., Valderrama Sandoval, E., Zaráte R., Baker, T. R. (2014). The distribution and amount of carbon in the largest peatland complex in Amazonia, *Environ. Res. Lett.*, 1-12.
- Fang, C., Moncrieff, J. B. (1999). A model for soil CO₂ production and transport 1:: Model development, *Agricultural and Forest Meteorology*, 225-236.
- Firestone, M. K., Davidson, E. A. (1989). Microbiological Basis of NO and N₂O Production and Consumption in Soil, *Exchange of Trace Gases between Terrestrial Ecosystems and the Atmosphere*, 1- 21.
- Hergoualc'h, K., Dezzeo, N., Verchot, L. V., Martius, C., Lent, J., Aguila-Pasquel, J., Gonzales, M. L. (2020). Spatial and temporal variability of soil N₂O and CH₄ fluxes along a degradation gradient in a palm swamp peat forest in the Peruvian Amazon, *Global Change Biology*, 7198-7216.
- Hergoualc'h, K., Verchot, L. (2011). Stocks and fluxes of carbon associated with land use change in Southeast Asian tropical peatlands: A review, *Global Biochemical Cycles*, 1-13.

IPCC: Shukla, P. R., Skea, J., Calvo Buendia, E., Masson-Delmotte, V., Pörtner, H.-O., Roberts, D. C., Zhai, P., Slade, R., Connors, S., Diemen, R., Ferrat, M., Haughey, E., Luz, S., Neogi, S., Pathak, M., Petzold, J., Pereira, J., Vyas, P., Huntley, E., Kissick, K., Belkacemi, M., Malley, J. (2019). Climate change and land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems, *IPCC*.

Jenkins, C. N., Pimm, S. L., Joppa, L. N. (2013). Global patterns of terrestrial vertebrate diversity and conservation, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1-9.

Lent, J., Hergoualc'h, K., Verchot, L., Oenema, O., Groenigen, J. W. (2018). Greenhouse gas emissions along a peat swamp forest degradation gradient in the Peruvian Amazon: soil moisture and palm roots effects, *Mitig Adapt Strateg Glob Change*, 625-643.

Mander, Ü., Well, R., Weymann, D., Soosaar, K., Maddison, M., Kanal, A., Lõhmus, K., Truu, J., Augustin, J., Tournebise, J. (2014). Isotopologue Ratios of N₂O and N₂ Measurements Underpin the Importance of Denitrification in Differently N-Loaded Riparian Alder Forests, *Environmental Science & Technology*, 11910-11918.

Page, S. E., Rieley, J. O., Banks, C. J. (2011). Global and regional importance of the tropical peatland carbon pool, *Global Change Biology*, 798-818.

Pärn, J., Soosaar, K., Schindler, T., Machacova, K., Muñoz, W. A., Fachin, L., Aspajo, J. L. J., Negron-Juarez, R. I., Maddison, M., Rengifo, J., Dinis, D. J. G., Oversluijs, A. G. A., Fucos, M. C. A., Vasquez, R. C., Wapuch, R. H., Garcia, E. P., Sohar, K., Horna, S. C., Gomez, T. P., Muñoz, J. D. U., Espinoza, R. T., Mander, Ü. (2021). High greenhouse gas fluxes from peatlands under various disturbances in the Peruvian Amazon, *Biogeosciences Discuss* (käsikiri).

Pärn, J., Verhoeven, J. T. A., Mander, Ü. (2018). Nitrogen-rich organic soils under warm well-drained conditions are global nitrous oxide emission hotspots, *Nature Communications*, 1-8.

Quesada, C. A., Lloyd, J., Anderson, L. O., Fyllas, N. M., Schwarz, M., Czimezik, C. I. (2011). Soils of Amazonia with particular reference to the RAINFOR sites, *Biogeosciences*, 1415–1440.

Teh, Y. A., Murphy, W. A., Berrio, J.-C., Boom, A., Page, S. E. (2017). Seasonal variability in methane and nitrous oxide fluxes from tropical peatlands in the western Amazon basin, *Biogeosciences*, 3669 - 3683.

Wrage-Mönnig, N., Horn, M. A., Well, R., Müller, C., Oenema, O. (2018). The role of nitrifier denitrification in the production of nitrous oxide revisited, *Soil Biology and Biochemistry*, A3-A16.

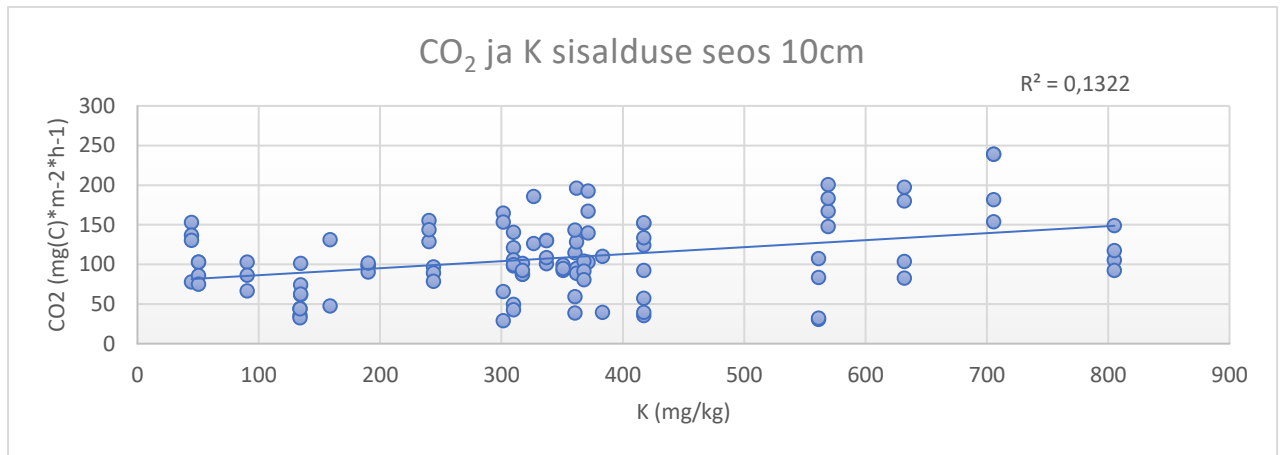
Yavitt, J. B., Lang, G. E., Wieder, E. K. (1987). Control of carbon mineralization to CH₄ and CO₂ in anaerobic, Sphagnum-derived peat from Big Run Bog, West Virginia, *Biogeochemistry*, 141-157.

Zhang, J., Cai, Z., Zhu, T. (2011). N₂O production pathways in the subtropical acid forest soils in China, *Environmental Research*, 643-649.

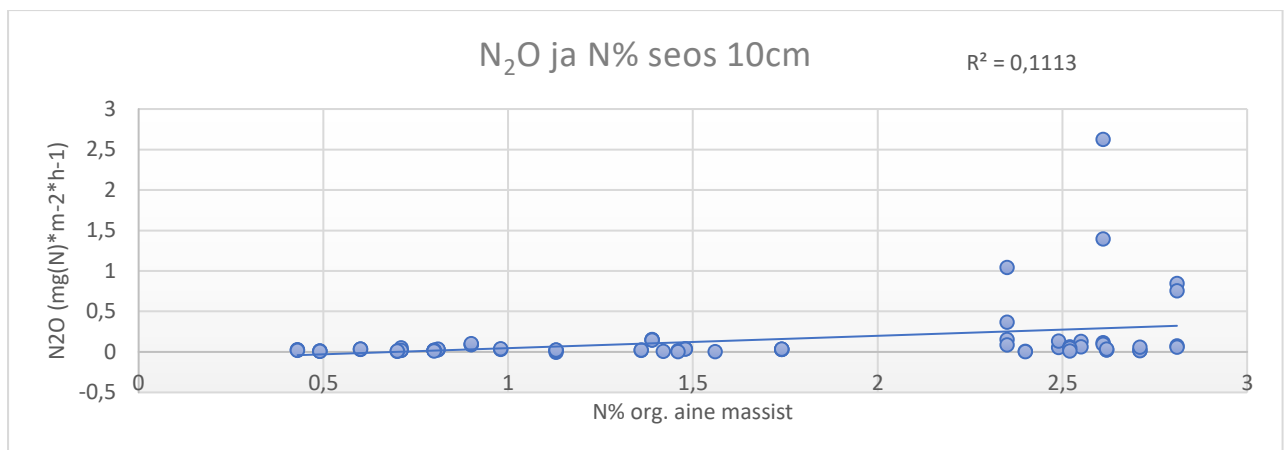
Zhu, X.-G., Long, S. P., Ort, D. R. (2008). What is the maximum efficiency with which photosynthesis can convert solar energy into biomass?, *Current Opinion in Biotechnology*, 153-159.

Lisad

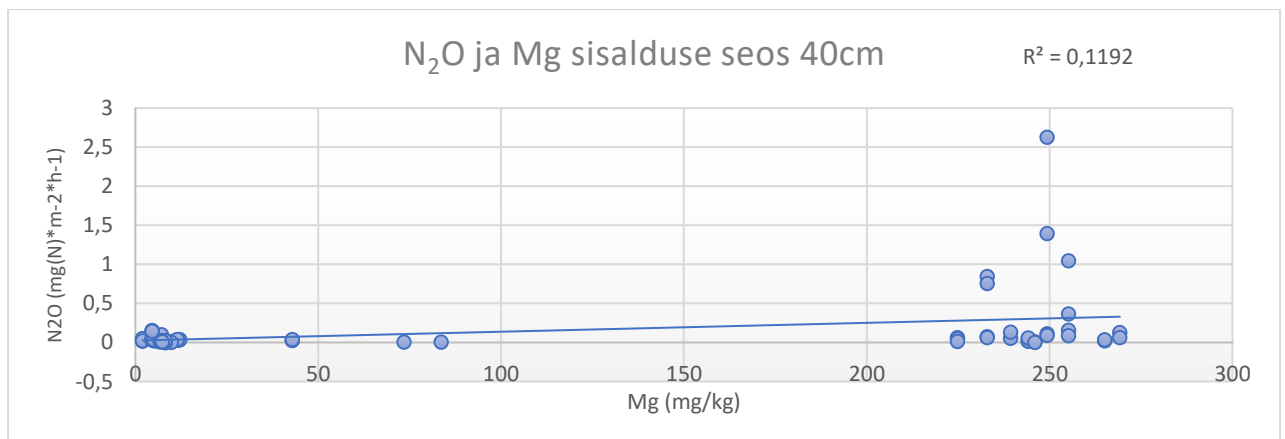
Lisa 1. CO₂ ja K sisalduse seos 10cm.



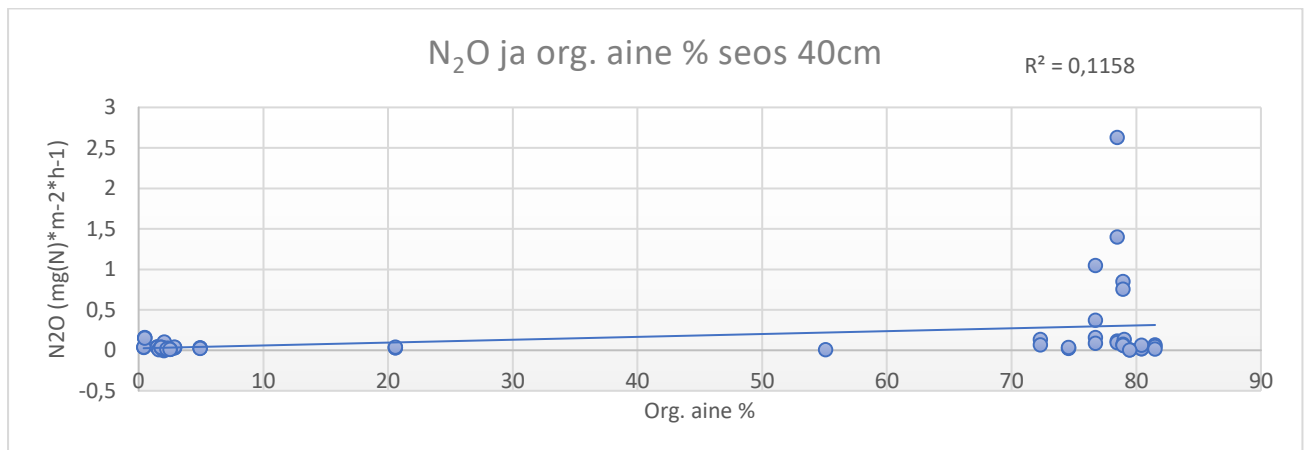
Lisa 2. N₂O ja N% seos 10cm.



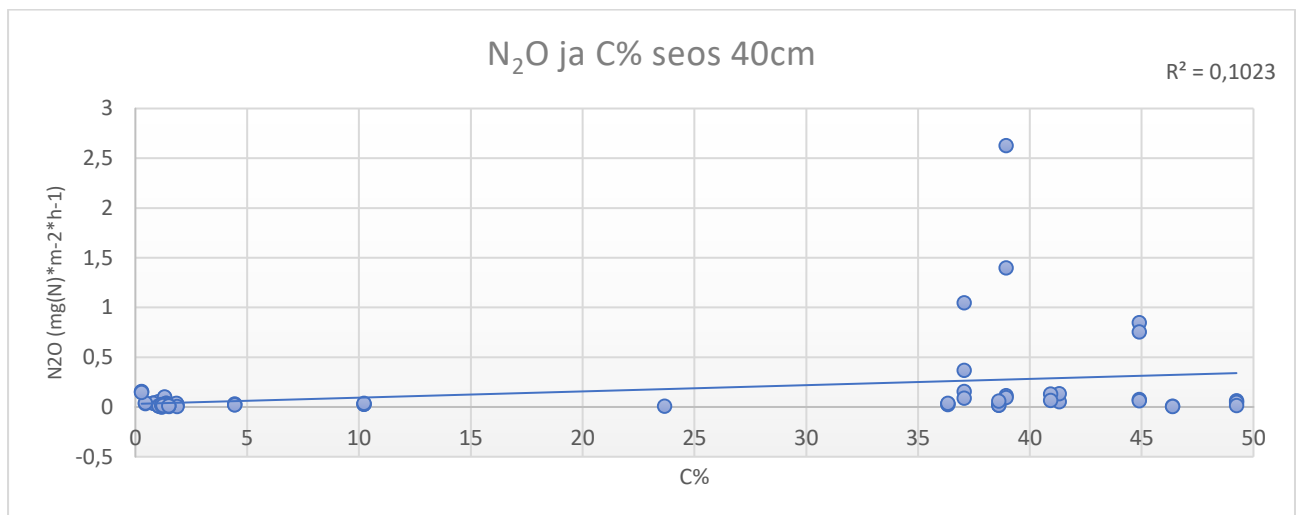
Lisa 3. N₂O ja Mg sisalduse seos 40cm.



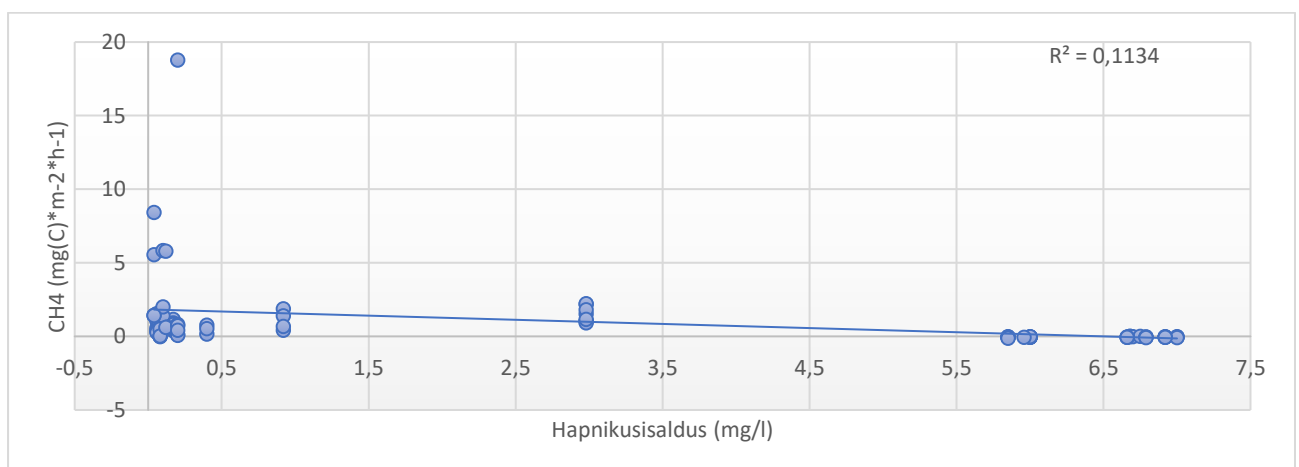
Lisa 4. N₂O ja org. aine% seos 40cm.



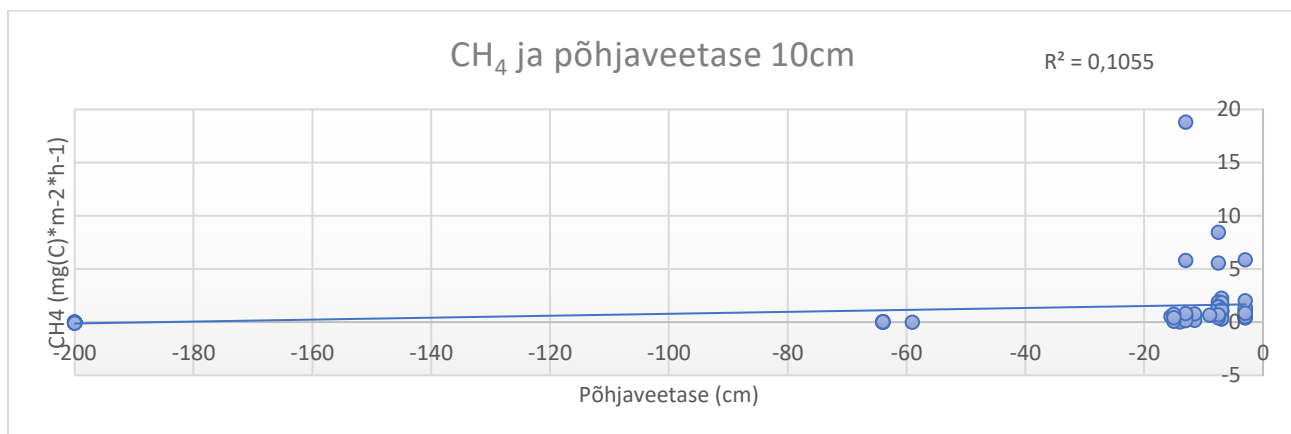
Lisa 5. N₂O ja C% seos 40cm.



Lisa 6. CH₄ ja mulla hapnikusisalduse seos 10cm.



Lisa 7. CH₄ ja põhjaveetaseme seos 10cm.



Lihtlitsents

Mina, Uno A. Tavast

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose “Peruu soode kasvuhoonegaaside vood”, mille juhendaja on Jaan Pärn, 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.

Uno A. Tavast

30.05.2022