



EESTI MAAÜLIKOOL
Metsandus- ja maaehitusinstituut

Sille Rebane

**METSAÖKOSÜSTEEMI SÜSINIKU DÜNAAMIKA JA H₂O VOOG –
TURBLENTSE KOVARIATSIOONI MEETOD**

**CARBON DYNAMICS AND H₂O FLUX IN FOREST ECOSYSTEM – EDDY
COVARIANCE METHOD**

Magistritöö
Loodusvarade kasutamise ja kaitse õppekava

Juhendaja: Kalev Jõgiste, *PhD*

Tartu 2016



Eesti Maaülikool		Magistritöö lühikokkuvõte	
Kreutzwaldi 1, Tartu 51014			
Autor: Sille Rebane		Õppekava: Loodusvarade kasutamine ja kaitse	
Pealkiri: Metsaökosüsteemi süsiniku dünaamika ja H ₂ O voog – turbulentse kovariatsiooni meetod			
Lehekülgi: 54	Jooniseid: 22	Tabeleid: 3	Lisasid: 5
Osakond:	Metsabioloogia		
Uurimisvaldkond:	Metsabioloogia		
Juhendaja(d):	Professor Kalev Jõgiste		
Kaitsmiskoht ja aasta:	Tartu, 2016		
<p>Eestis ja paljudes teistes riikides on väga aktuaalseks teemaks kliima soojenemine ja välisõhu muutused, seepärast on vajalik uurida süsinikdioksiidi kontsentratsiooni tõusuga seonduvaid mõjutusi ning hetkelist olukorda CO₂ ja H₂O trendides. Töö eesmärgiks on võrrelda raieala süsiniku ja H₂O voogusid ööpäevaringselt. Raieala keskele on paigaldati mõõtepunkt, kus oli installeeritud mõõteseadmed. Mõõtepunktist saadud 2014 ja 2015 aasta andmeid on kasutatud CO₂ voogude võrdlemiseks ja seose leidmiseks H₂O vooga. Peamiseks võrdlusperioodiks on mai lõpp ja juuni algus 2014 ja 2015 aastatel.</p> <p>Analüüsiti erinevate aastate vooge. Selgus, et suurt rolli on mänginud tulemuste erinevuses temperatuur ja pilvisus. 2014. aastal oli temperatuurid soojemad ja ilmad päikesepaistelisemad, millest tulenevalt ka toimus fotosüntees intensiivsemalt. Töös arvestati ka hingamise mõjusid.</p> <p>Oluline oleks mõõtmisi jätkata, et anda terviklikum ülevaade raieala atmosfäärigaaside voogudest. Pikema perioodi andmetega analüüs võimaldaks teha täpsemaid CO₂ neelamise ja eraldumise kohta.</p>			
Märksõnad: Süsinikdioksiid, voog, kontsentratsioon, veeaur, turbulentne kovariatsioon			

Estonian University of Life Sciences		Abstract of Master´s Thesis	
Kreutzwaldi 1, Tartu 51014			
Author: Sille Rebane		Speciality: Natural Resources Management	
Title: Carbon dynamics and h ₂ O flux in forest ecosystem – eddy covariance method			
Pages: 54	Figures: 22	Tables: 3	Appendixes: 5
Department:	Forest biology		
Field of research:	Forest biology		
Supervisor(s):	Professor Kalev Jõgiste		
Place and date:	Tartu 2016		
<p>In Estonia and many other countries it is very important topic to monitor global warming and changes in the ambient air. Particularly it is necessary to examine the carbon dioxide concentration increases and its effect on the current situation. The work is about to compare cutting area carbon and H₂O flows during 24 hours (detecting time trends). Equipment is installed on the middle of the cutting area. Data obtained in 2014 and 2015, has been used to compare CO₂ and H₂O flows. The main reference period is the end of May and beginning of the June on both years.</p> <p>It was concluded that the difference has been in flux in different years. Major role in the differences can be the temperature difference and the cloudy weather. Year 2014 temperatures were higher and weather was more sunny, which is reflected by photosynthesis intensity. We also have to consider influence of respiration.</p> <p>It would be important to continue the measurements in order to provide more comprehensive overview of the cutting area flows and to make better conclusions. Release of CO₂ and absorption of CO₂ will give us main components to build the model of carbon budget.</p>			
Keywords: Carbon dioxid, flux, concentration, water vapour, eddy covariance			

SISUKORD

SISSEJUHATUS	5
1. SÜSINIKURINGE JA -VARUD.....	7
2. ÖKOSÜSTEEMI PROTSESSID.....	10
3. SÜSINIKU JA VEEAURU SEOSSED	13
4. MATERJAL JA METOODIKA	15
4.1. Katseala.....	15
4.2. Turbulentse kovariatsiooni meetod	16
4.2.1. Õhu liikumine	17
4.2.2. Seadmed	19
4.3. Andmestiku töötlemine.....	19
4.3.1. Voogude arvutused.....	20
5. TULEMUSED JA ARUTELU	22
5.1. 2014 aasta perioodi CO ₂ ja H ₂ O	22
5.2. 2015 aasta perioodi CO ₂ ja H ₂ O.....	28
5.3. CO ₂ võrdlus 2014 ja 2015 aastate vegetatsiooniperioodil	34
5.4. H ₂ O võrdlus 2014 ja 2015 aastate vegetatsiooniperioodil.....	36
KOKKUVÕTE	39
KASUTATUD KIRJANDUS	41
CARBON DYNAMICS AND H ₂ O FLUX IN FOREST ECOSYSTEM – EDDY COVARIANCE METHOD.....	46
LISAD	48
Lisa 1.	49
Lisa 2.	50
Lisa 3.	51
Lisa 4.	52
Lisa 5.	53

SISSEJUHATUS

Maailmas on tehtud palju mõõtmisi atmosfääris suurenenud süsinikdioksiidi jälgimiseks, et mõista ökosüsteemide reageerimist keskkonna muutustele. Need keskkonna muutused avalduvad kliima soojenemise, maakasutuse dünaamika ning õhu saastatuse tõusuna (Bakwin *et al.* 2004).

Kliimamuutusi seostatakse süsihappegaasi taseme muutusega atmosfääris (Tang *et al.* 2003). Kliimamuutuste leevendamiseks on vajalik teada ja aru saada süsinikuringe toimimisest ning dünaamikast. Seepärast on väga tähtsal kohal just ökosüsteemide detailsed uuringud. On leitud, et erilist tähelepanu tuleb pöörata süsinikvarudele, -bilansile ja -sidumisele (Grace 2004).

Ökoloogia üheks oluliseks ülesandeks on uurida süsiniku tasakaalu ja muutusi ökosüsteemis. Süsiniku uurimiseks peab analüüsima tunni, päeva, aastaaja ja isegi aastaseid tulemusi ning arvestama kõikvõimalikke mõjutavaid tegureid (Baldocchi 2003).

Süsinik on tänasel päeval looduses üks paljudest elementidest, olles elusas looduses üks tähtsamaid ja peamiseid koostisosi. See moodustab rohkem ühendeid kui ükski teine element (Grace 2004). Süsinikku leidub kõigis elusorganismides ning on atmosfääris pidevalt ringluses. Süsiniku ringlusesse on kaasatud kõik Maa sfäärid: biosfäär, geosfäär, hüdrofäär, atmosfäär ning noosfäär (Lovett *et al.* 2006).

Tähtsat rolli globaalses süsinikuringes mängib ka pinnas. Maakasutus määrab ära ökosüsteemis süsiniku varude suurenemise või vähenemise nende mõjutajate poolt (Lal 2005). Üldiselt talletavad metsad süsinikku 20-100 korda rohkem pindalaühiku kohta kui põllumaa. Metsades, peamiselt puutüvedes, lehtedes ning okstes sisaldub 80% maismaal ja 40% maa-alusest orgaanilisest seotud süsinikust (Karoles 2010).

Süsinikku omastatakse taimede poolt fotosünteesi protsessi käigus. Protsess kujutab endast süsinikdioksiidi neeldumist ja hapniku vabanemist päikesevalguse kaasabil. Vabanenud hapnik eraldub õhulõhede kaudu (Taiz ja Zeiger 2002).

Üheks levinud meetodiks süsinikuringe mõõtmisel on nn turbulentse kovariatsiooni ehk eddy covariance meetod (Novick 2004). Eddy covariance meetodi abil saab lisaks süsiniku voogudele mõõta ka veeauru voogusid ja temperatuuri (Wang, Davis 2008).

Esimesed eddy covariance mõõtmised süsihappegaasi voogude uurimiseks tehti juba 1970. aastatel. Suurte mõõtmisvigade tõttu ei võetud saadud tulemusi usutavana (Baldocchi 2003).

Käesolevas töös on püstitatud järgmised eesmärgid:

- Tuvastada metsaökosüsteemi süsiniku dünaamika praegune seis ja võrrelda muutusi;
- võrrelda süsiniku vooge eri aastate vegetatsiooniperioodil;
- vaadelda süsiniku ja veeauru korrelatsiooni;
- võrrelda süsiniku näitajaid teiste meteoroloogiliste teguritega;
- leida süsiniku voo võimalikud mõjutajad.

Käesoleva töö eesmärkidest tulenevalt on antud töö hüpoteesideks:

- kõrge temperatuuri puhul on fotosüntees intensiivsem ja süsihappegaasi (CO_2) kontsentratsioon madalam;
- kõrge temperatuuri korral on veeauru (H_2O) tase õhus suurem;
- süsihappegaasi (CO_2) kontsentratsiooni tõus õhus sõltub veeauru (H_2O) tasemest.

Soovin tänada abi ja mõistva suhtumise ning sisutiheda magistriöö juhendamise eest prof. Kalev Jõgistet. Täna Alisa Krasnovat, kes aitas mõista ja selgitada täpsemalt programmi EddyPro kasutamist. Lisaks täna veel Andres Kivistet, kes oli abiks seletamaks programmi R kasutamise võimalusi.

1. SÜSINIKURINGE JA -VARUD

Süsinikdioksiid (CO₂) on kõige tähtsam kasvuhoonegaas ja suurim mõjutaja kliimamuutustes. Kliimamuutused mõjutavad C varusid keskkonnas (tabel 1) (Lovett *et al.* 2006). Süsiniku varude tase sõltub komplekselt kliima, mullastiku, puuliikide ja keemiliste protsesside omavahelisest koosmõjust (Lal 2005:242-244). Selleks, et mõista süsinikuringet ja süsinikdioksiidi kontsentratsioone erinevates geograafilistes asupaikades peab teostama mõõtmisi (Liu *et al.* 2015).

Tabel 1. Süsiniku optimaalsed varud Maal (Climatica kodulehekülg)

Süsiniku varud	Kogus (gigatonnides)
Atmosfäär	720
Ookean (pealmine kiht)	670
Ookean (sügavam kiht)	36 730
Litosfäär (settelised kivimid)	> 60 000 000
Litosfäär (kerogeenid)	15 000 000
Biosfäär (elusad)	600-1000
Biosfäär (surnud)	1 200
Fossiilsed kütused (kivisüsi)	3510
Fossiilsed kütused (nafta)	230
Fossiilsed kütused (gaas)	140
Fossiilsed kütused (muu)	250

Atmosfääris olevat süsinikdioksiidi kontsentratsioone on süstemaatiliselt seiratud ülemaailmselt juba mitu sajandit. Süsinikdioksiidi kõrge kontsentratsiooni põhjuseks atmosfääris on peamiselt inimtegevus (Grace 2004). Hiljutised uuringud on kinnitanud inimtegevuse olulist rolli metsade mõjutamises ning kliimamuutustes. Tõenäoliselt on aegade jooksul suurtes kogustes mulla orgaanilist süsinikku naasnud atmosfääri (Rannik *et al.* 2002, Lovett *et al.* 2006).

Tabel 2. Vastavalt vöötmele paiknevad süsinikuvarud (Lal 2005:242-244)

Bioom	Pindala (Mha)	Süsiniku tihedus (Mg/ha)		Süsiniku varu (Pg)	
		Taimestik	Mullastik	Taimestik	Mullastik
Tundra	927	9	105	8	97
Boreaalne/ Taiga	1372	64	343	88	471
Parasvööde	1038	57	96	59	100
Troopika	1755	121	123	212	216
Märgalad	280	20	723	6	202
Kokku	5672	keskmine 54	keskmine 189	373	1086

Eesti metsad on üldplaanis süsiniku salvestajad, sest taimestik ja mullad seovad süsinikku (tabel 2). Orgaanilise süsiniku varud mullas on tulemus kõdu ja lagunemisprotsessi erinevusest mulla süsinikus pika perioodi vältel. Suuremad ja vanemad puud suudavad toota rohkem varist ja kõdu ning mulla süsiniku varud suurenevad (Liski *et al.* 2002).

Süsiniku varusid metsade mullastikus on väga raske hinnata. Proportsionaalselt muutusi eristada on keeruline, eriti veel arvestades ruumilist variatsiooni suurest võimalikust valikust kuni kindla väärtuseni (Liski *et al.* 2002).

Kasvukohtades, kus mulla viljakus on madalam ja orgaanilise aine lagunemine aeglasem, talletub suur osa süsinikust metsakõdus, mis aja jooksul oluliselt suurendab mulla süsinikuvarud. Viljakamates kasvukohtades on aineringe intensiivsem ja suur osa orgaanilisest materjalist laguneb kiiresti. Lagunemise tulemusena mulla süsinikuvarud ei suurene, sest mullahingamise käigus eralduv süsihappegaas suuremalt jaolt läheb tagasi atmosfääri (Strandberg 2013).

Samuti suurendab süsiniku sidumist ja varusid puidu juurdekasv (Liski *et al.* 2002). Nooremate ja keskealiste puistute juurdekasv on intensiivsem kui vanades metsades olevate puistute puhul. Vanad metsad toimivad pigem süsiniku hoidjana kui sidujana (Strandberg 2013).

Looduslikes metsade ökosüsteemides on üldjoontes kõrge süsiniku tase. Laiuskraadide suurenedes on süsiniku taseme puhul täheldatav kasvav kontsentratsioon (Lal 2005).

Vaadeldes metsade varusid siis moodustab süsinik puude biomassist 50%. Soome mullad sisaldavad potentsiaalselt 30-70% süsinikku. Kanadas on süsiniku varud veelgi suuremad. Seevastu on Šveitsis tulemus 27% võrra suurem võrreldes mulla süsiniku sisaldust puude süsinikusisaldusega (Liski *et al.* 2002).

Lisaks mullale toimivad looduslike süsiniku reservuaaride ja hoidlatena ka Maad katvad veekogud, mis moodustavad kogu pindalast 87% (Yang *et al.* 2015). Kuigi magevesi katab sellest vaid väikese osa, mõjutavad järved, jõed ja reservuaarid regionaalselt süsiniku balansi oksüdeerides, kogudes ja transportides maapealset süsinikku selle varamusse veekogudes (Lovett *et al.* 2006).

2. ÖKOSÜSTEEMI PROTSESSID

Ökosüsteemi toimimiseks on vajalik fotosünteesi ja hingamise protsesside toimimine (Stoy *et al.* 2006). Teadmised mulla fotosünteesi ja hingamise mõõtmiste kohta on veel vähesed, kuigi olemasolevate andmete põhjal saame mingil määral prognoosida kliimamuutuseid ja mõista selle protsesse (Tang *et al.* 2005).

Elu Maal sõltub päikeseenergiast. Fotosüntees on ainuke protsess, mis haldab päikeselt tulenevat energiat (Stoy *et al.* 2006). Fotosüntees tähendab seda, et orgaanilise aine sünteesis kasutatakse valgust. Sisulisemalt lähenedes fotosüntees on protsess, mille käigus taimed muundavad päikesest tuleneva energia süsivesikuteks, kus vabaneb hapnik (Taiz ja Zeiger 2002). Fotosünteesi käigus süsinik neeldub ja hapnik eraldub (Lovett *et al.* 2006). Enamik ökosüsteemi süsinikdioksiidist pärineb atmosfäärist. Iga aastal muundavad taimed läbi fotosünteesi umbes 110 petagrammi süsinikku (tabel 3) (Taiz ja Zeiger 2002).

Tabel 3. Ühikute teisendamine

1 (Pg)	10 ¹⁵ (g)
	10 ¹² (kg)
	10 ⁹ (miljard tonni)
110 Pg	110 (miljard tonni)

Fotosüntees saab toimida bakterite, klorofüllil ja anorgaaniliste ainete olemasolul. Fotosünteesi käigus moodustub peamiselt glükoos, lisaks tekib veel fruktoos ja tärklis. Kõrvalsaaduseks on hingamise protsessiks vajalik hapnik (Taiz ja Zeiger 2002).

Fotosünteesi kiirus sõltub süsinikdioksiidi ja hapniku kättesaadavusest, valguse intensiivsusest ja temperatuurist. Väga tähtis on mulla niiskuse tase, sest vee puudumisel fotosüntees seiskub. Sama juhtub valguse puudumisel. Fotosünteesi toimimiseks vajalik optimaalne temperatuur jääb vahemikku 0 – 35 °C (Thongbai *et al.* 2010).

Mulla hingamine on sama oluline protsess nagu seda on fotosüntees. Hingamise kaudu imporditakse ökosüsteemi orgaanilist süsinikku. Kogu ökosüsteemi mulla hingamise moodustab autotroofne ja heterotroofne hingamine (Lovett *et al.* 2006). Viimastel aastatel on mullast süsiniku väljavoolule pööratud järjest rohkem tähelepanu, kuna see mängib tähtsat rolli kliima soojenemisel (Tang *et al.* 2003, Grace 2004).

Globaalne soojenemine ja mulla kvaliteet on mõjutatud mitmetest teguritest (Tullus *et al.* 2012). Näiteks atmosfääri tuleb vahetult süsinikdioksiidi voog põllumaade kasutamise tagajärjena. Globaalsel skaalal annab mulla hingamine atmosfääri 79.3-81,8 petagrammi süsiniku aastas (Ouyang *et al.* 2015).

Hingamise protsessi käigus vabastatakse süsinikdioksiid. Hingamine hõlmab nii taimi kui ka loomi. Hingamise käigus vabaneb atmosfääri peaaegu et pool (50 petagrammi) süsinikdioksiidist, mis neeldub fotosünteesi käigus (Ouyang *et al.* 2015).

Globaalses süsinikuringes on tähtsal kohal mulla orgaaniline süsinik. Mullas olevate organismide hingamisprotsessi tulemusena vahetub mulla süsinikdioksiid, mis on ühtlasi ka kasvuhoonegaasi esmaseks allikaks. Seega on mulla orgaanilise süsiniku dünaamikas oluline protsess just hingamine (Ouyang *et al.* 2015).

Mulla hingamises vabanenud süsinik mõjutab mulla temperatuuri, niiskust, toitainete kogust ja mulla orgaanilise süsiniku sisaldust. Mulla hingamise dünaamikas on võtmerollis mulla temperatuur, mis kontrollib mulla bioloogilise osa aktiivsust, taime kasvu ja mulla hüdroloogilisi protsesse. Suurenenud mulla hingamise ja tõusva temperatuuri vaheline seos tõestab globaalse soojenemise olemasolu (Ouyang *et al.* 2015).

Mullast süsinikdioksiidi väljavool on kahe protsessi tulemus: CO₂ produktsioon mullas ja selle transportimine mullast atmosfääri. Mulla hingamisaktiivsus vabastab suurtes kogustes CO₂-te mullas olevasse poorsesse alasse. Sellest tuleneb CO₂ kõrge kontsentratsioon mullasõhus, kus kogu varamu võib olla võrdne atmosfääri CO₂-ga metsas. Transport mullast atmosfääri kulgeb üldjoontes läbi kahe mehhanismi: difusioon ja massi voog. Voogu mõjutab mulla ja atmosfääri vaheline kontsentratsiooni erinevus. Massi voog on õhu liikumise tulemus (Janssens *et al.* 2001).

Ökosüsteemi päevase hingamise tulemusi kasutatakse võrastiku fotosünteesi arvutamiseks. Süsiniku voog sõltub suvel (öisel ajal), kui pole süsiniku sidumist taimestikust, mulla hingamisest torni alla jäävast alast (Tang *et al.* 2005).

3. SÜSINIKU JA VEEAURU SEOSED

Pikaajalised uuringud süsinikdioksiidi ja veeauru muutuste kohta annavad uut informatsiooni atmosfääri ja biosfääri reageeringute kohta (Tullus *et al.* 2012). Muutused ümbritsevas keskkonnas mõjutavad süsiniku akumulatsiooni, hingamist ja aurumist. Üldiselt 21% süsinikdioksiidi vahetusest sfääride vahel on seotud aastase ringlusega, 43% on seotud päevase ringlusega ja 9% pooleaastase aja jooksul toimuva ringlusega (Baldocchi *et al.* 2001).

Ökosüsteemi süsinikdioksiidi ja veeauru vahetus sõltub keskkonna muutuste tõttu ökosüsteemi komponentidest (Chi *et al.* 2016). Ökosüsteemi süsinikdioksiidi vahetus hõlmab assimilatsiooni ühest osast (lehtedest) ja hingamisest neljast komponendist (lehed, tüved, juured ja orgaaniline materjal). Lehestikult aurustub veeaur, mis on atmosfääri lendunud läbi taime, mulla aurumise ja vaba vee aurumise. Vaba vesi tekib siis kui on vihma sadanud (Baldocchi *et al.* 2001).

Muutused lehestikus läbi süsinikdioksiidi vahetuse toimuvad kiiresti (Chi *et al.* 2016). Peamiselt toimub vahetus läbi fotosünteesi, õhulõhede juhitevuse ja hingamise kaudu. Üldjoontes fotosüntees ja õhulõhede juhitevuse reageerivad väga kiiresti ja erinevalt päikesele. Päikesevalguse kiirguse erinevus mõjutab ka lehe temperatuuri ja aurumise taset. Lehe aurumise kiirus ei muutu nii kiiresti kui fotosüntees (Baldocchi *et al.* 2015).

Ööpäevases ajaskaalal on süsinikdioksiidi ja veeauru näitajate muutused mõjutatud päikesekiirguse, õhu ja mulla temperatuur ja niiskuse päevasest rütmist. Päikesetõusu ja –loojangu ajal tekivad biosfääris süsinikdioksiidi ja veeauru mitmed muutused. Päeval ajal haarab biosfäär süsinikdioksiidi ja kaotab veeauru, kuid vastupidiselt päevale kaotab see öösel süsinikdioksiidi (Baldocchi *et al.* 2001).

Tugevaks mõjutajaks on pilvisus. Sellest tulenevalt muutuvad õhu temperatuur, niiskustase ja õhurõhk. Fotosüntees on tõhusam lehtedes pilvisel ajal (Baldocchi *et al.* 2001, Stoy *et al.* 2006).

Peapuuliigiks on harilik kuusk (*Picea abies*) (lisa 4), veel on esindatud puuliikidest harilik haab (*Populus tremula*), arukask (*Betula pendula*) ja harilik mänd (*Pinus sylvestris*) (lisa 5). Hariliku kuuse keskmine kõrgus on 1,3 meetrit, hariliku männi keskmine kõrgus on 0,9 meetrit.

4.2. Turbulentse kovariatsiooni meetod

Turbulentse kovariatsiooni meetod on üks kõige täpsemaid meetodeid globaalsete muutuste tuvastamiseks (Rebmann *et al.* 2005). Meetod on väga kasulik ökosüsteemide tundmaõppimisel ja ökofüsioloogiliste seoste mõistmisel. Eriti süsinikdioksiidi näitaja vähenemisel või suurenemisel saab fikseerida keskkonna muutust (Baldocchi 2003:479-482).

Aastast 1996 on Euroopas kasutatud turbulentse kovariatsiooni meetodit (Rannik *et al.* 2002). Algselt oli turbulentne kovariatsiooni meetod arendatud atmosfääris massi, energia ja voogude muutuste mõõtmiseks (Baldocchi 2000).

Tänapäeval kujutab Eddy Covariance ehk turbulentne kovariatsiooni meetod endast mikrometeoroloogiliste voogude mõõtmisi (Burba 2013). Turbulentse kovariatsiooni meetodi abil mõõdetakse metsades ökosüsteemi ja atmosfääri vahelisi seoseid (Rannik *et al.* 2004). Tänu seadmetele tuvastatakse süsihappegaasi ja teiste erinevate gaaside kontsentratsiooni ja vood 0,1-1 km² raadiuses mõõtepunktist (Grace 2004).

Turbulentne kovariatsiooni meetod töötab mõõtes gaasi vertikaalset turbulentset transporti liikudes maapinnale ja -pinnalt eemaldudes (Burba 2013). Meetod annab võimaluse tuvastada CO₂ paiknemist ja varude suurust (Grace 2004).

Üldjootes saab selle laialt levinud meetodi abil tuvastada looduses oleva süsinikdioksiidi emissiooni ning teisi ökosüsteemis muutuvaid näitajaid (Burba *et al.* 2013:329-330). Tüüpilisemad mõõdetavad näitajad on temperatuur, veeaur ja süsinikdioksiidi kontsentratsioon ning voog (Rannik *et al.* 2004:141-142, Stoy *et al.* 2006).

Kvaliteetsete tulemuste saamiseks põhineb voogude analüüs kõrge mõõtesagedusega algandmestiku töötlemisel. Tavaliselt arvutatakse tulemused 10 Hz või 20 Hz sagedusel (Rebmann *et al.* 2005, Tang *et al.* 2003, Novick 2004).

Süsihappegaasi kontsentratsiooni ja voo andmestiku töötlemise tulemust nimetatakse ka neto ökosüsteemi vahetuseks (Net Ecosystem Exchange – NEE) või neto ökosüsteemi tootlikkuseks (Net Ecosystem Productivity - NEP) (Lovett *et al.* 2006). Üldine voog (NEP) tähendab seda, et fotosünteesi tasemest (P) tuleb lahutada taimede hingamise näitaja (R_p) ja heterotroofide hingamise näit (R_h). Primaarne puhasproduktiooni (NPP) leiab kui fotosünteesi tasemest (P) lahutada taimede hingamise näitaja (R_p). Koguproduktioon ehk brutoproduktioon (GPP) võrdub fotosünteesi tasemega (P) (Garce 2004).

$$NEP = P - R_p - R_h$$

$$NPP = P - R_p$$

$$GPP = P$$

Viimase 5 aasta jooksul on turbulentse kovariatsiooni meetodi kasutamine jõudnud sellesse punkti, kus tänu tarkvara ja tehnoloogia arengule saab meetodikat väga efektiivselt kasutada välitingimustes (Burba *et al.* 2013).

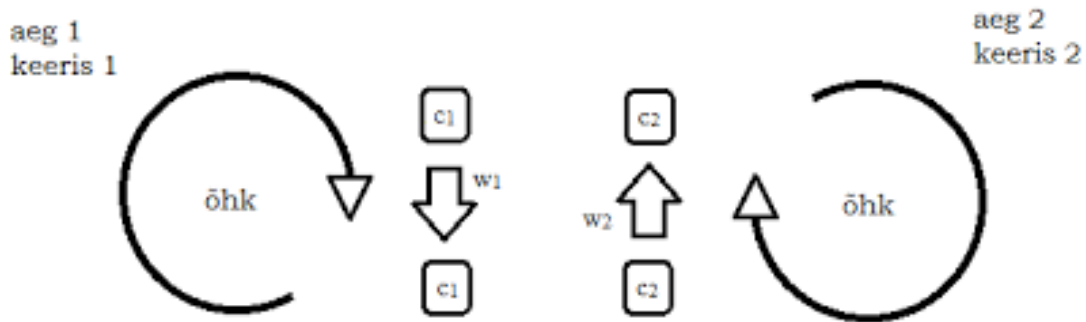
Turbulentse kovariatsiooni meetodit arendatakse eesmärgiga püüda parandada tulemusi mõõtes ökosüsteemi produktiivsust, fotosünteesi ja hingamise aktiivsust (Tang *et al.* 2003).

4.2.1. Õhu liikumine

Emisiooni või neeldumist nimetatakse ökosüsteemi voogudeks. Voogu võib üldiselt tuvastada hulga või kogusena, mis pääseb läbi pinna selle pinna ühiku kohta. Turbulentse kovariatsiooni meetodi puhul on voog arvutatud kindla *in situ* mõõtmiste kohta, kus gaasid liiguvad turbulentse õhuga maapinna kohalt atmosfääri (Rebmann *et al.* 2005). Õhu liikumist võib ette kujutada paljude horisontaalsete keeristena. Igal mõõtmeseadmep on 3-

dimensioonilised ruumikomponendid. Arvestama peab ka vertikaalset liikumist õhus (Burba *et al.* 2013).

Üldine printsiip turbulentsse kovariatsiooni mõõtmiste kohta: kovariatsioon toimub kontsentratsiooni ja vertikaalse tuule kiiruse vahel (Rebmann *et al.* 2005).



Joonis 2. Õhu liikumine keeriste näitel (Burba *et al.* 2013)

Õhu liikumist kirjeldab keeris torni ühes punktis (joonis 2). Ühel hetkel liigub õhk alla, järgmisel hetkel liigub samas punktis õhk üles. Mõlemad õhuvood omavad karakteristikuid, nagu näiteks gaasi kontsentratsioon, temperatuur, niiskus jne (Burba *et al.* 2013).

Maapinnale lähedamal on suurem võimalus, et väiksemad keerised võtavad vastutuse voogude transpordis. Väiksemad keerised pöörlevad kiiremini ja transport on tehtud veelgi suurema sagedusega õhus (Burba *et al.* 2013).

Maapinnast kaugemal on tõenäolisem, et suuremad keerised võtavad vastutuse suuremas jaos voogude transpordi eest. Suuremad keerised pöörlevad aeglasemalt ja transpordi liigutused õhus on tehtud veelgi väiksema sagedusega (Burba *et al.* 2013).

Üldiselt ongi vaheldumisi ja erinevalt sagedusega toimumas keerised kattes kogu sageduse vahemiku (Burba *et al.* 2013).

Maapinna ligidal on voogude transport nihutatud suuremale sagedusele, maapinnast eemal on aga väiksemal sagedusel (Burba *et al.* 2013).

4.2.2. Seadmed

Turbulentse kovariatsiooni seadmeid hakati kasutama andmete registreerimiseks ja keskkonnaseireks. Algselt jaamad on ehitatud põhimõttega, et mõõta ilmastiku näitajaid (keskmise õhu temperatuur, niiskus, tuule kiirus, suund, sademete hulk jne) (Burba *et al.* 2013).

Süsinikdioksiid, veeaur ja soojusvooge saab mõõta turbulentse kovariatsiooni meetodi abil. Eddy voogude süsteem on paigaldatud maapinnale arvestades reljeefi ning kõiki teisi tegureid õigete tulemuste saamiseks (Baldocchi 2000).

Katsealale oli paigaldatud anemomeeter (C-SAT 3, Campell Scientific, Ameerika Ühendriigid) (lisa 1) ning infrapuna gaasianalüsaator (Li-Cor, Li-7200, Ameerika Ühendriigid) (lisa 2) (Novick 2004). Seadmed asuvad maapinnast umbes 6 meetri kõrgusel tornis (lisa 3). Õhk imetakse sisse analüsaatorisse läbi 1 meetrise toru. Toru diameeter oli 6mm. Andmed salvestuvad automaatselt mälupulgale sagedusega 10 Hz.

Seadmete abil jälgitakse kolme dimensioonilist tuulekiirust (u,v,w), temperatuuri (Ts), gaasi kontsentratsiooni (näiteks CO₂ või CH₄) ja veeauru (Masseroni *et al.* 2013).

4.3. Andmestiku töötlemine

Turbulentse kovariatsiooni meetodil mõõdetud andmed töödeldakse tarkvaraga, mis sobiks vastava andmeformaadiga. Kasutatakse lisapakette, mis laiendavad võimalusi andmete töötlemiseks. Antud magistritöös on kasutatud andmete töötlemiseks programmi EddyPro (Bruba *et al.* 2013).

Andestiku töötlemiseks koguti andmeid 10 Hz sagedusega. Eemaldati ebasobivad andmed, mis tulenesid sensori konfiguratsioonist või atmosfääri stabiilsusest (Masseroni *et al.* 2013). Saadud tulemused keskmistati (nt päev kokku) (Burba *et al.* 2013).

4.3.1. Voogude arvutused

Süsiniku ja veeauru voogude arvutamisel kasutasin EddyPro 5.2.0 versiooni. Algsed failid enne EddyPro töötlust olid txt. formaadis, mis põhineb ASCII täheregistril. Iga fail sisaldas mõõtmistulemusi 30 minuti kohta. Hiljem said tulemused keskmistatud.

Pärast EddyPro 5.2.0 kasutamist toimus edasine töö Excelis. Graafikute tegemiseks kasutasin vabavaralist programmi R. Üldiste voogude arvutamisel kasutati valemit (CO₂, CH₄, N₂O, H₂O) (Burba 2013).

$$F \approx \overline{P_d w' s'}$$

kus F on turbulentsse kovariatsiooni gaaside voog ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$);

P_d - õhutihedus (air density)

w' - vertikaalne tuule kiirus (vertical wind speed)

s' - kuiva mooli osakaal (dry mole fraction)

Keskmine vertikaalne voog eeldab, et maastiku horisontaalsuunas on ühtlane ja sellest ei tulene voo kõrvalekallet või muutust. Voog sõltub õhu keskmisest tihedusest ja keskmisest kovariantsest vertikaalsest tuule kiirusest ning gaaside segu koostisest (mixing ratio) (Burba 2013).

Paremate mõõtmistulemuste saamiseks:

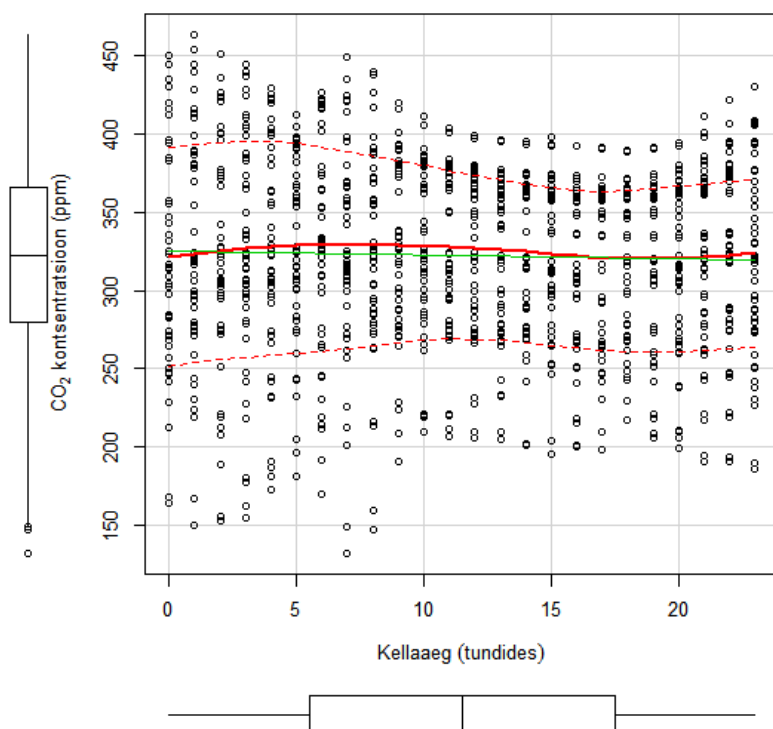
- Mõõtmised teatud punktis peavad olema ülestuult suunas;
- Mõõtmised peavad olema teostatud uurimistöö eesmärgiga määratletud objekti piirkonnas, voo piirkohis;

- Voog peab olema mõõdetud selliselt, et mõõtejälj oleks piisav;
- Voog peab olema täielikult turbulentne;
- Maastik peab olema horisontaalne ja ühtlane;
- Õhu tiheduse kõikumised on ebaolulised;
- Voolu erinevused ja ühtlustused on ebaolulised;
- Seadmed suudavad tuvastada väga väiksed muutused väga kõrgel sagedusel;
- Seadmete paigaldamisel ei tohi olla mõjutatud ökosüsteemi struktuuri (peab olema võimalikult loomulikul kujul seadme suhtes)

5. TULEMUSED JA ARUTELU

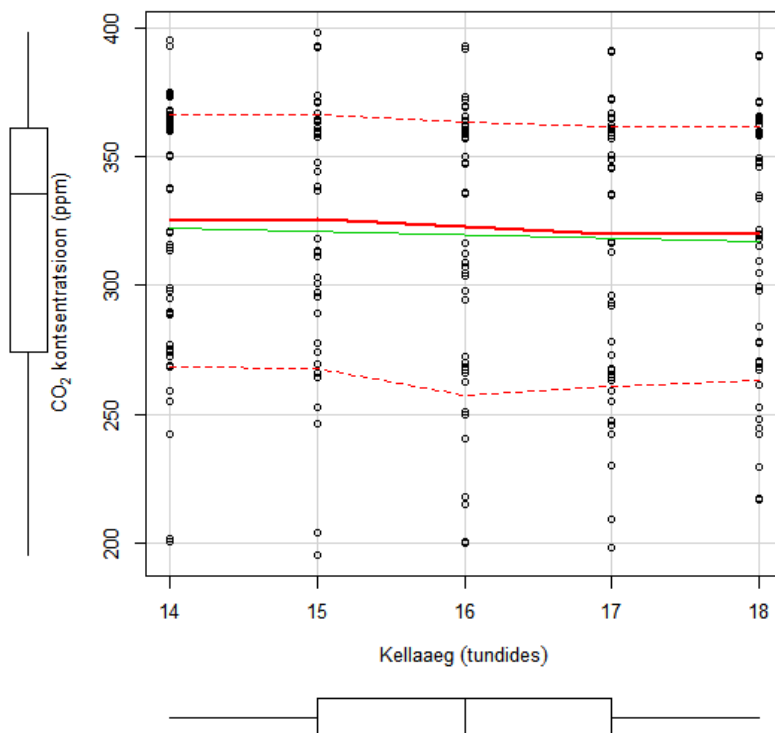
5.1. 2014 aasta perioodi CO₂ ja H₂O

Põhiliseks mõõdetavaks suuruseks oli CO₂ voog, kuid tähelepanu pöörati ka H₂O voogudele. Voogude mõõtmised toimusid antud töö raames kuu aja vältel 2014 ja 2015 aastal (mai keskpaigast kuni juuni keskpaigani). Periood valiti mõõtmiste teostamiseks, kuna selles ajavahemikus toimuvad suured taimeistiku ja ilmastiku muutused. Voo intensiivsus sõltub paljudest faktoritest. Tähtsamad voogudest on fotosünteesi ja hingamisega reguleeritud CO₂ liikumine ning kindlasti veeauru dünaamika. Voogude tulemusi mõjutavad ka teised meteoroloogilised ilmastikunäitajad. Samuti Liu *et al.* (2015) arvates võivad olla CO₂ mõjutajaks antud töös välja toodud põhjused, kuid kindlasti peab arvestama geograafilise asupaigaga.



Joonis 3. 2014. aasta perioodi CO₂ kontsentratsiooni muutus vastavalt kellaajale

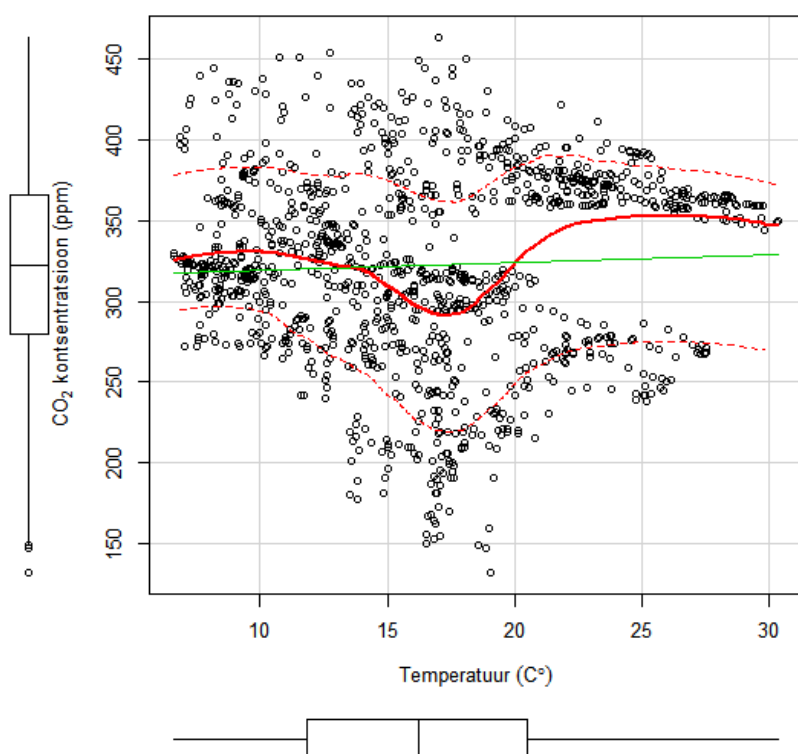
Vaadeldes 2014 aasta kevadel CO₂ kontsentratsioonis toimuvaid muutusi vastavalt kellaajale (joonis 3) on näha, et päeval ajal on süsihappegaasi sisaldus õhus madalam kui öösel. Keskmiseks süsihappegaasi sisalduseks on 322,1 ppm. Selline süsihappegaasi jaotus tuleneb tõenäoliselt taimede fotosünteesi intensiivsuse tõusust ja langusest. Aastal 2015 antud töös keskmine süsihappegaasi kontsentratsioon on 421,2 ppm, seega on märgata kontsentratsiooni tõusu. Globaalses mastaabis võib leida kirjandusviiteid, kus Oidermaa (2015) sõnul CO₂ kontsentratsioon ületas juba mitu aastat tagasi 400 ppmi piiri, olles viimase 35 aasta jooksul tõusnud kokku 60 ppm võrra. Selle 400 ppm piiri ületati ülemaailmselt 40 mõõtejaamas. Liu *et al.* (2015) andmetel CO₂ kontsentratsioon tõusis Phoenix USA-s 111-185 ppm. Sellise suure tõusu põhjustajaks on tõenäoliselt tööstuste areng ja intensiivsed inimtegevuse valdkonnad. Võrreldes antud töö tulemustega, ei ole 99,1 ppm oluliselt madalam võrreldes USA tulemustega.



Joonis 4. 2014. aasta perioodi CO₂ kontsentratsioon õhus päeval ajal kell 14.00-18.00

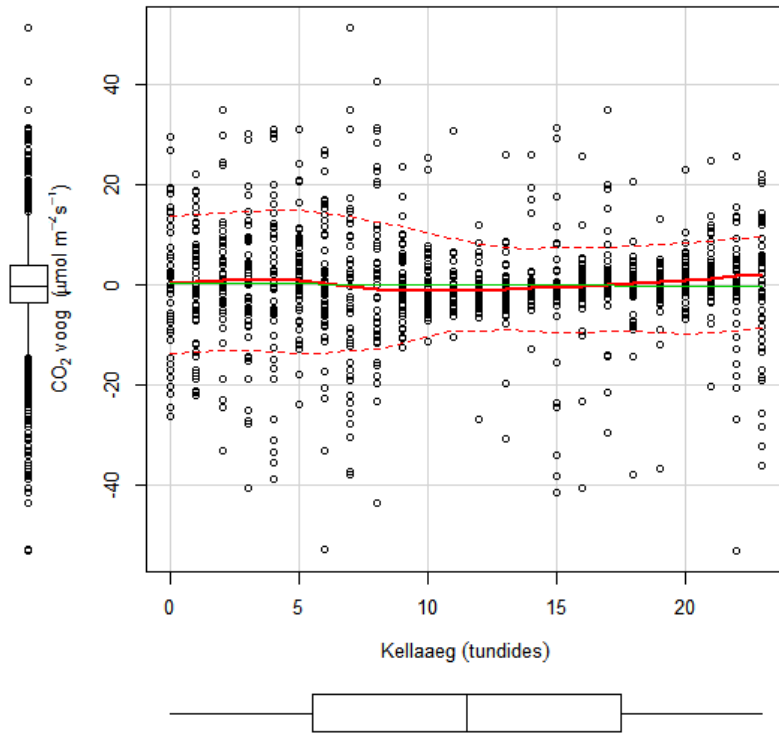
Süsihappegaasi madalaim tase päeval ajal (kell 14.00 kuni 18.00). Maksimaalseim süsihappegaasi sisaldus õhus on 463,5 ppm, mis jääb öisesse aega. Madalaim CO₂ tase on 132,3 ppm. Selline madal tase tähendab väga aktiivset fotosünteesi toimumist (joonis 4).

Süsihappegaasi kontsentratsiooni aktiivsust mõjutab temperatuur (joonis 5). R^2 on 0,274, mida ei saa pidada tugevaks seoseks süsihappegaasi ja temperatuuri vahel. Sel ajavahemikul mai keskpaik kuni juuni keskpaik jäävad temperatuurid vahemikku 6,6-30,4 °C. Keskmiselt on sooja sel ajal 16,5 °C.

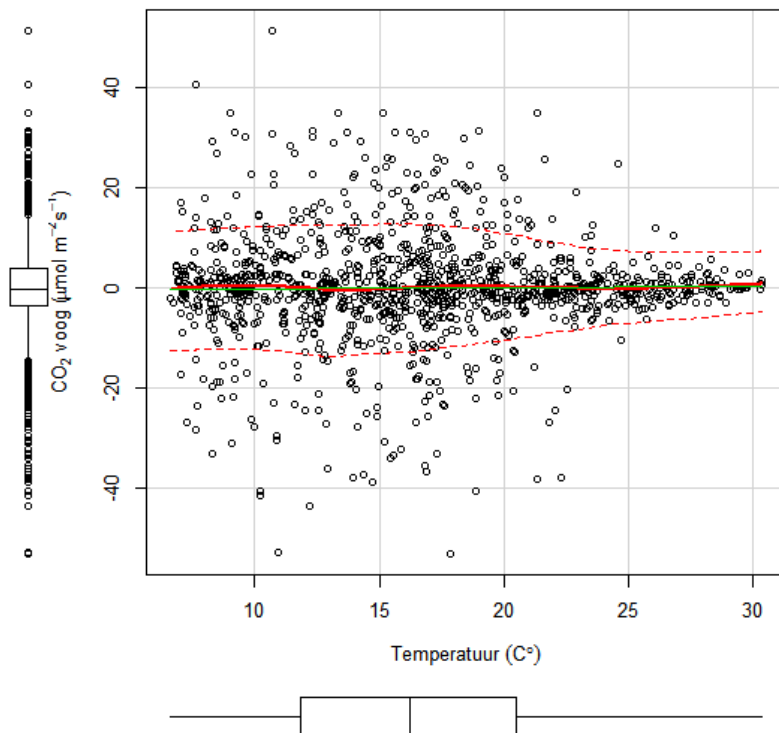


Joonis 5. 2014. aasta perioodi CO₂ kontsentratsioon ja temperatuur kraadides

Vaadeldes süsihappegaasi voogu ööpäeva jooksul näeme, et voog jääb vahemikku -52.900 kuni 51,440 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (joonis 6). Üldjoontes on voo varieeruvus üsna stabiilne, hommikul 7.00 ajal muutub voog negatiivseks ning kella 12.00 ja 13.00 vahepeal võib näha kõige madalamat süsihappegaasi voogu. Õhtupoolisel ajal umbes kella 17.00 paiku võib täheldada positiivset voogu. CO₂ voog on ööpäeva jooksul on keskmiselt 0,072 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.



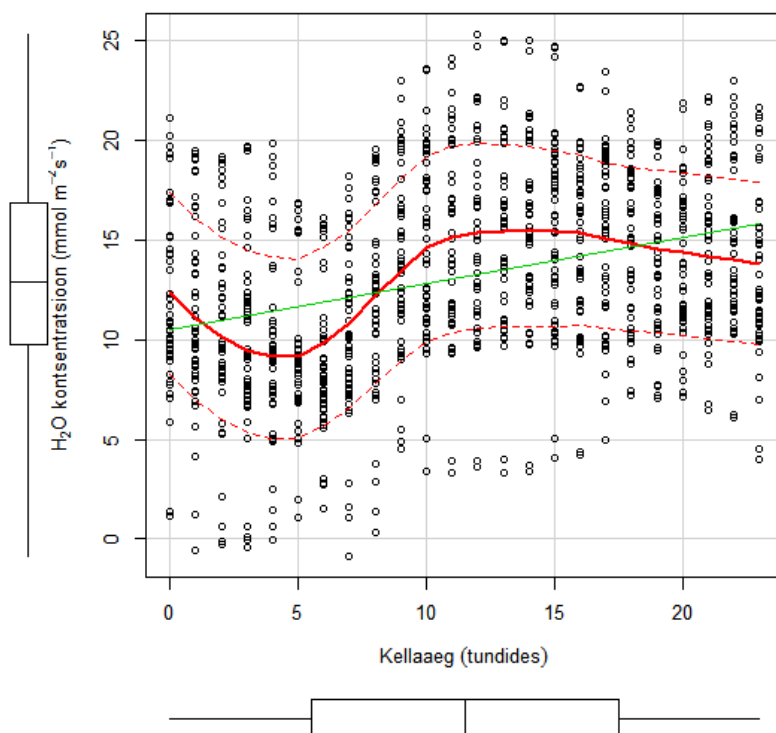
Joonis 6. 2014. aasta perioodi CO₂ voo muutus vastavalt kellajale



Joonis 7. 2014. aasta perioodi CO₂ voog ja temperatuur kraadides

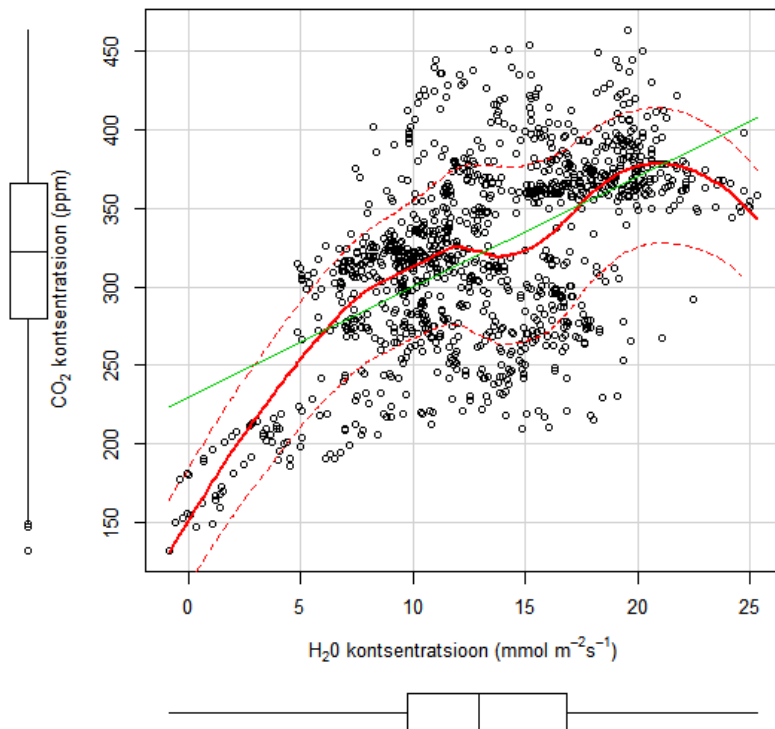
Süsihappegaasi ja temperatuuri seos on väga tugevasti kallutatud varieeruvuses (joonis 7). Madalaim temperatuur, mille juures hakkab voog intensiivistuma on 6,6 °C. Kõige intensiivsem vahemik jääb 11,9 °C kuni 20,5 °C juurde. Keskmise temperatuur on 16,5 °C.

Vaadeldes H₂O kõikumisi vastavalt kellajale kevadisel perioodil (joonis 8) on märgata, et kella 5.00 ajal hakkab tase tõusma kuni 12.00. Tõenäoliselt veeaur pole suutnud veel aurustuda ja peale südapäeva hakkab tase langema temperatuuri tõustes. Üldine vee aurustumise trend on tõusev.

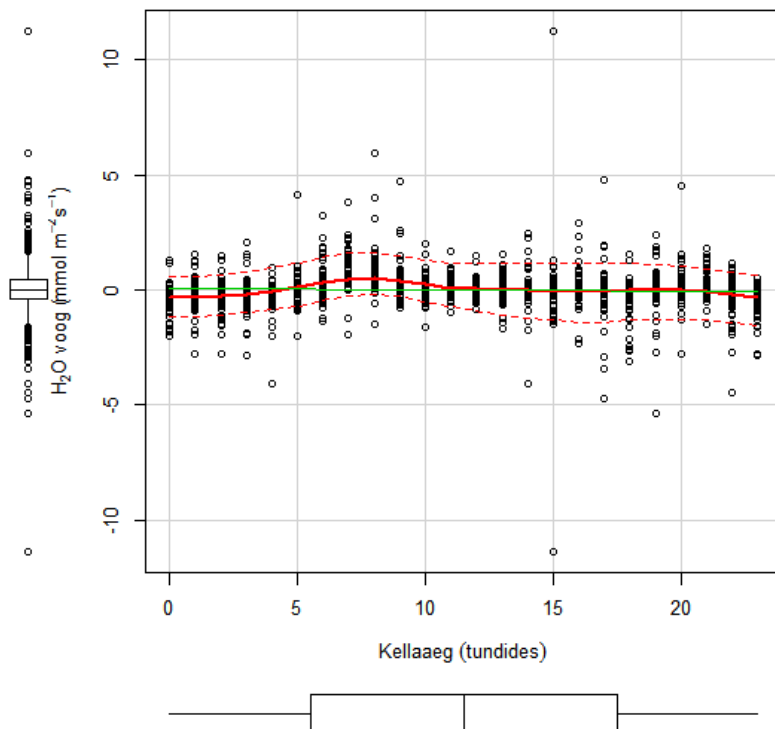


Joonis 8. 2014. aasta perioodi H₂O sisaldus õhus vastavalt kellajale

CO₂ kontsentratsiooni ja H₂O kontsentratsiooni vaheline seos on vastav üldtuntud seaduspärale (joonis 9). H₂O sisalduse tõus õhus tõstab ka CO₂ kontsentratsiooni õhus. See tõus toimib vaid optimaalse piirini, seda piiri ületades H₂O ei tõsta enam CO₂ kontsentratsiooni õhus vaid vähendab. Fratini *et al.* (2012) arvates CO₂ ja H₂O sõltuvad üksteisest ja käituvad üldjoontes samasuguse strateegia järgi, kus ühe teguri langus tähendab ka teise näitaja langust. Selline olukord on tingitud taime õhulõhede avatusest ja vee aurustumisest (Fratini *et al.* 2012).



Joonis 9. 2014. aasta perioodi CO₂ kontsentratsiooni ja veeauru seos

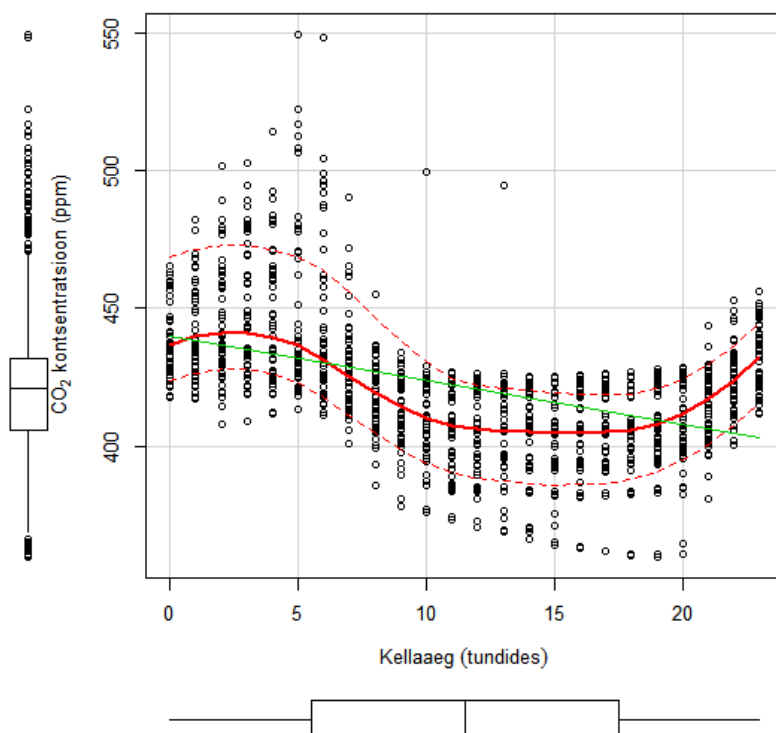


Joonis 10. 2014. aasta perioodi veeauru voog vastavalt kellaajale ööpäeva jooksul

Veeaur on oluline tegur mõjutades CO₂ voogu. Jooniselt võib näha kuidas veeauru muutus toimub mai keskpaigast juuni keskpaigani (joonis 10). Trend on üsna stabiilne. Veeauru voog võib jääda ka nulli või selle ümbrusesse päevasel ajal. Chi *et al.* (2016) arvates võib voog olla madal ning püsida null piiri ümbruses, kõikudes pisut. Öisel ajal muutub voog negatiivseks, päevasel ajal positiivseks. Märkimisväärset voo suurenemist ei toimu.

5.2. 2015 aasta perioodi CO₂ ja H₂O

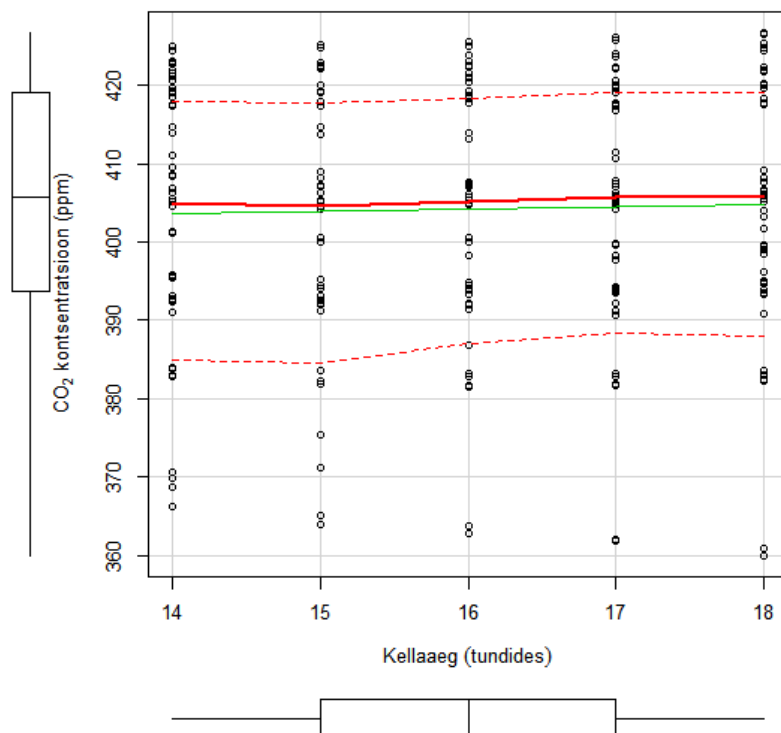
Vaadeldes 2015. aasta graafikut, kus CO₂ kontsentratsioon muutub vastavalt kellaajale, on märgata langevat trendi (joonis 11). Öisel ajal on näha kõrgemat CO₂ taset õhus. Kõige suurem väärtus on 549,4 ppm, madalaim 359,9 ppm. Süsihappegaasi kontsentratsioon hakkab langema alates kell 04.00 kuni kella 12.00. Öhtul alates kell 18.00 hakkab kontsentratsioon taas tõusma. Öösel on varieerumine mõnevõrra suurem kui päevasel ajal, selle põhjuseks võib olla suurema turbulentsiga õhu liikumine.



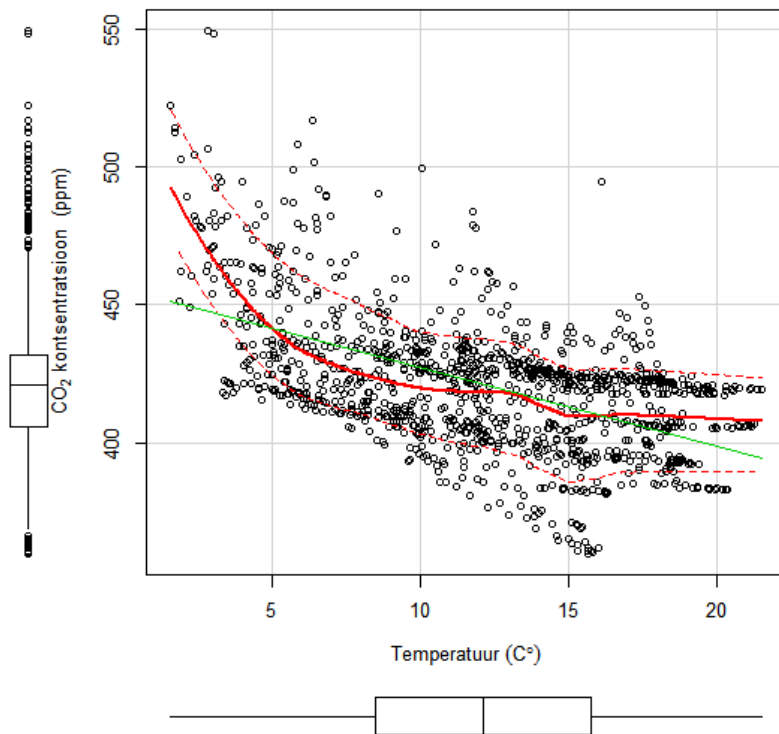
Joonis 11. 2015. aasta perioodil CO₂ kontsentratsiooni muutus vastavalt kellaajale

Keskmiseks süsihappegaasi kontsentratsiooni väärtuseks 2015. aastal mai keskpaigast kuni juuni keskpaigani on 421,2 ppm, mis on võrreldes 2014 aastaga kõrgem näit. Teatava võrdlusena võib tuua Font *et al.* (2015) Londoni keskpaigas 2011. aasta oktoobri teostatud mõõtmised, kus süsihappegaasi kontsentratsioon jäi vahemikku 407,5 ppm kuni 409,5 ppm. Antud töö tulemused on sarnased Londonis saadud tulemustega 2011. aastal. Vaadeldava näite puhul on kevadine ja sügisene periood võrreldavad sarnaselt soojade ja vihmaste ilmastikuolude tõttu. Sarnaseid näituseid on saadud ka Massachusettses, USA-s Wehr *et al.* (2013), kus CO₂ kontsentratsioon vahemikku 320 ppm – 450 ppm. Käesolevas töös mõõdetud keskmise süsihappegaasi näidud on võrreldavad Wehr *et al.* (2013) saaduga.

Jälgides päevasel ajal toimuvat muutust CO₂ kontsentratsioonis on näha stabiilset tendentsi (joonis 12). Päevasel ajal puudub suur varieeruvus, mis viitab suuremale õhu turbulentssele liikumisele.

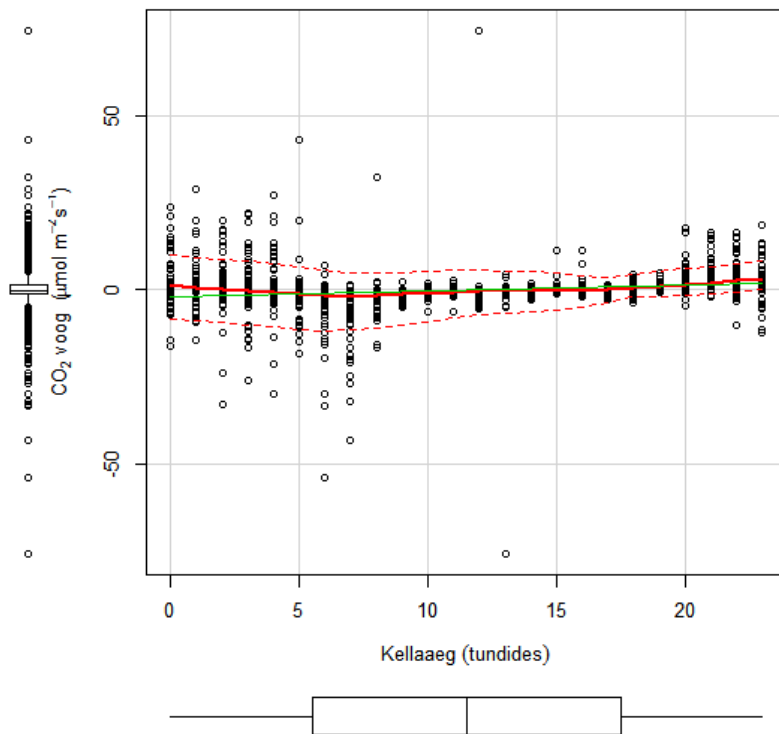


Joonis 12. 2015. aasta perioodil CO₂ kontsentratsioon õhus päevasel ajal kell 14.00-18.00



Joonis 13. 2015. aasta perioodil CO₂ kontsentratsioon ja temperatuur kraadides

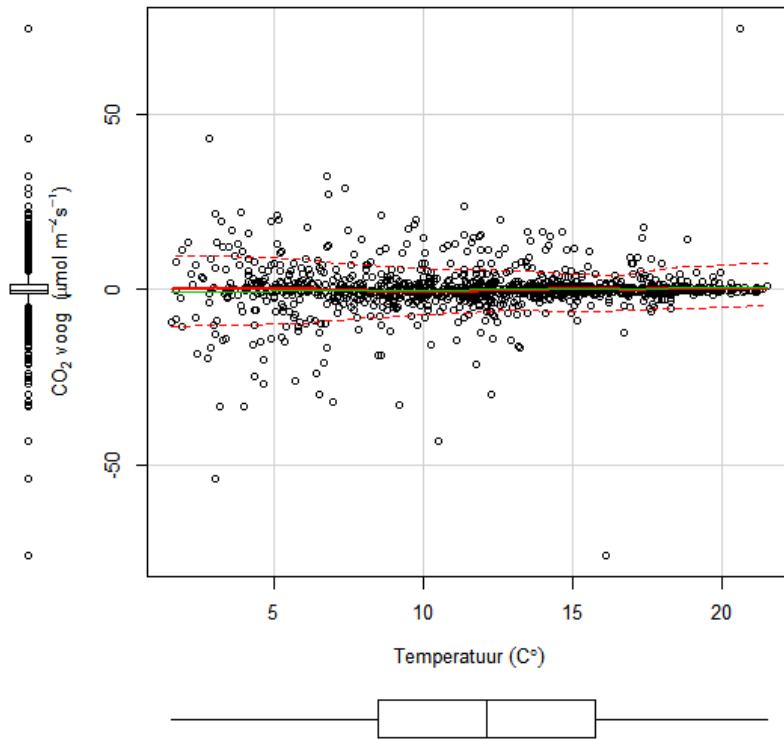
Süsihappegaasi ja temperatuuri vahelist seost kirjeldab $R^2 = 0,5722$ (joonis 13). Seose tugevus näitab, et temperatuur mõjutab süsihappegaasi sisaldust õhus. Kotthaus ja Grimmond (2012) arvates on temperatuur ja CO₂ sisaldus õhus omavahelises seoses. Võrreldes 2014. aastaga on näha, et järgneval 2015 aasta kevadel on temperatuur mõjutanud CO₂ sisaldust õhus kahekordne võrreldes eelneva aastaga. Aktiivne temperatuuri mõjuvahemik jäi 8,5 °C ja 15,8 °C vahele. Keskmiselt oli sooja sel perioodil 12,0 °C, mis jääb alla mõne kraadi võrra 2014. aastale.



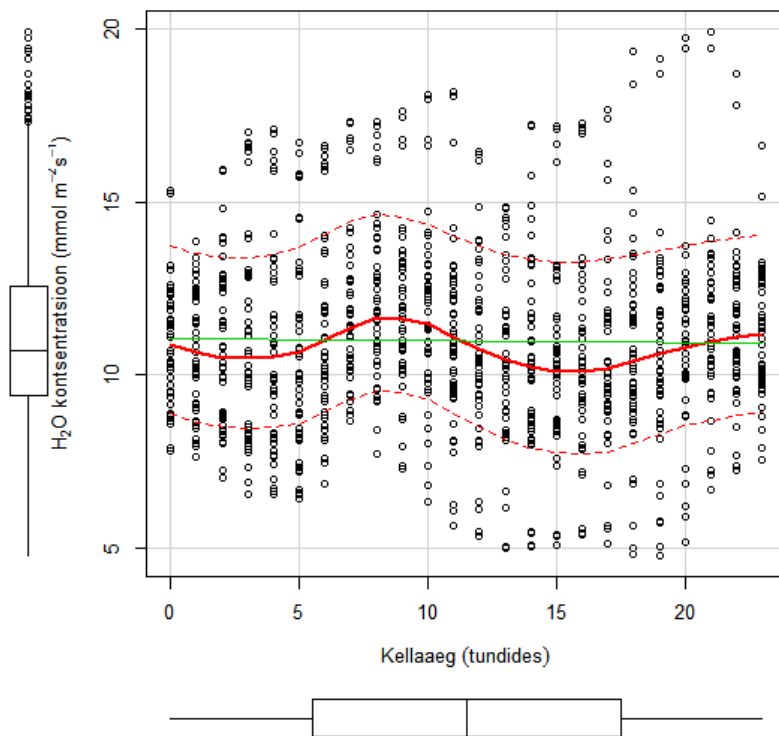
Joonis 14. 2015. aasta perioodil CO₂ voo muutus vastavalt kellaajale

CO₂ voog on ööpäeva suhtes vähe muutuv (joonis 14). Öisel ajal on märgata rohkem varieeruvust kui päeval ajal. Põhiline CO₂ voost jääb vahemikku $-1,179 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ kuni $1,388 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Voog muutub öösel positiivseks, samas on see negatiivne näidates päeval CO₂ neeldumist. Päeval ajal enamus voost on negatiivne ja muutlikkus oli väiksem. Keskmise ööpäevane CO₂ voog on $0,073 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Öist suuremat muutust võib põhjustada õhu liikumine. Võrdluseks Kotthaus ja Grimmond (2012) andmetel Londonis 2011. aastal veebruaris oli CO₂ voog keskmiselt $3,0 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, mis erineb täielikult antud töö 2014. ja 2015. aasta mõõtmistulemustest. Selle põhjuseks on Eestist erinev geograafiline asupaik kui ka kliimatilised tingimused.

CO₂ voog ja temperatuuri omavaheline seos on varieeruv (joonis 15). Samamoodi oli suurem varieeruvus madalatel temperatuuridel ka 2014. aasta samal ajaperioodil. Sellisest tulemusest võib oletada, et madalate temperatuuride puhul on tegemist ka öötundidega (pole joonisel näidatud), kus teised mõjurid (eeskätt veeaur) mõjutavad tulemusi. Samas on ka päevaste näitude puhul madalad temperatuurid esindatud ja lisafaktorid nagu näiteks päikesekiirus (mida antud joonisel pole näidatud) suurendavad varieerumist.



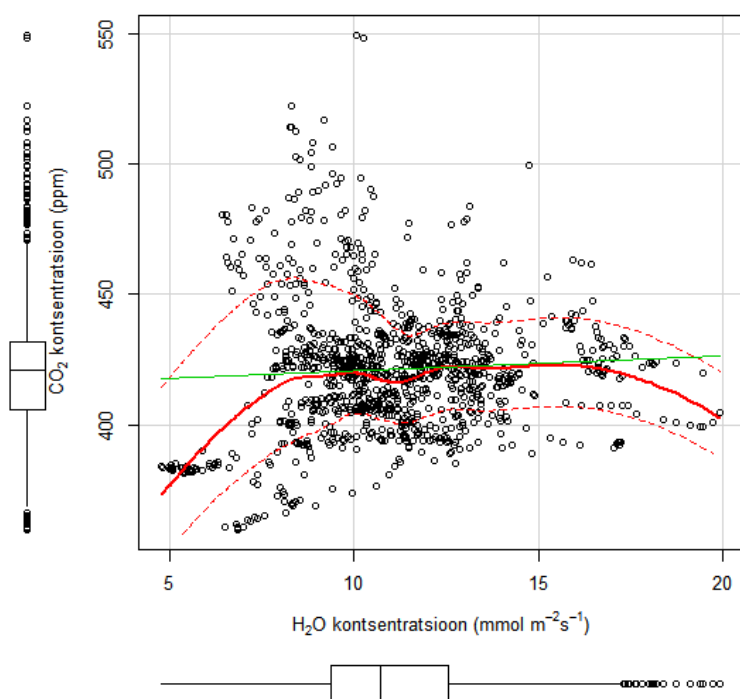
Joonis 15. 2015. aasta perioodil CO₂ voog ja temperatuur kraadides



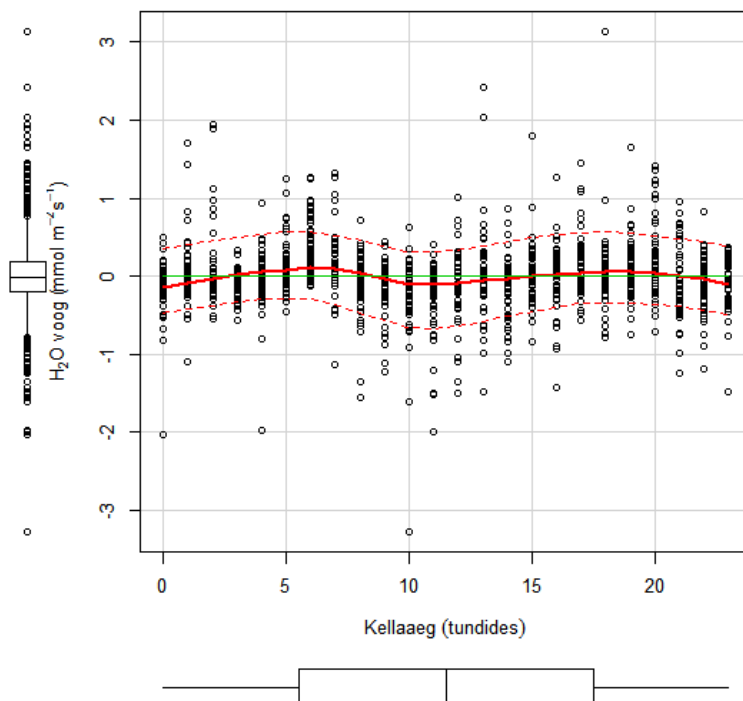
Joonis 16. 2015. aasta perioodil H₂O sisaldus õhus vastavalt kellaajale

Võrreldes 2015. aasta veeauru muutuse trendi 2014. aasta vastavaga 2015. aastal trend näitab suurenevat tendentsi. Aastal 2014 jääb tulemuse stabiilseks (joonis 16). Põhilisem veeauru kontsentratsiooni vahemik kõigub +/- 10 mmol m⁻² s⁻¹. Alumine usalduspiir on 10,720 mmol m⁻² s⁻¹ ja ülemine 19,920 mmol m⁻² s⁻¹. Keskmise veeauru sisaldus õhus on 10,990 mmol m⁻² s⁻¹. Erinevatel aastatel tulemus sarnaneb. Selgelt on märgata hommikul kell 9.00 alates hakkab H₂O kontsentratsioon langema kuni kella 15.00 välja. Sellest hetkest alates taas veeauru sisaldus õhus tõuseb kuni südaööni. Peale südaööd toimub jälle väike langus ja tõus.

Süsihappegaasi kontsentratsiooni tõus võib olla mõjutatud veeauru sisaldusest õhus (joonis 17). Optimaalse H₂O sisalduse juures õhus tõuseb CO₂ kontsentratsiooni sisaldus õhus. Sellel joonisel välja toodud 2015. aasta sõltuvus on küll väiksem kui 2014. aastal, mille põhjuseks on tõenäoliselt temperatuuride suur erinevus (Chi *et al.* 2016).



Joonis 17. 2015. aasta perioodil CO₂ kontsentratsiooni ja veeauru seos



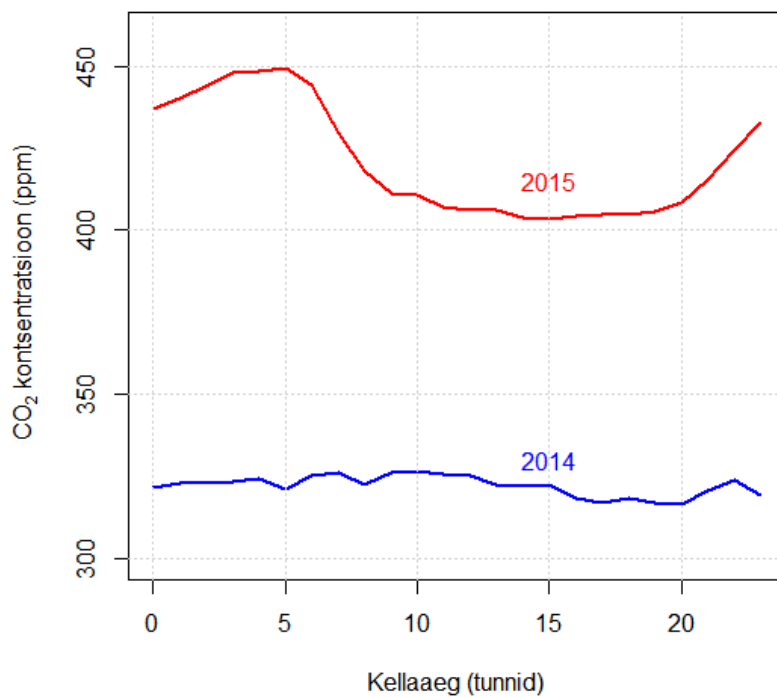
Joonis 18. 2015. aasta perioodil H₂O voog vastavalt kellaajale ööpäeva jooksul

Veeauru voog kõigub ööpäevas suhteliselt vähe (joonis 18). Usalduspiiridesse jääv näit on $-0,203 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ja maksimaalne H₂O aktiivne voog on $3,138 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Kell 7.00 ajal hommikul hakkab voog langema (õhk muutub kuivemaks, soojenev õhk kannab niiskust kõrgemale). Kell 10.00 toimub väike tõus (temperatuuritõusu tõttu aurub ka maapinnal olev vesi). Stabiilne langus algab kell 20.00 ajal kuni südaööni. Südaöö ja hommiku vahel voog on tõusvas tendentsis (õhk on niiskem).

5.3. CO₂ võrdlus 2014 ja 2015 aastate vegetatsiooniperioodil

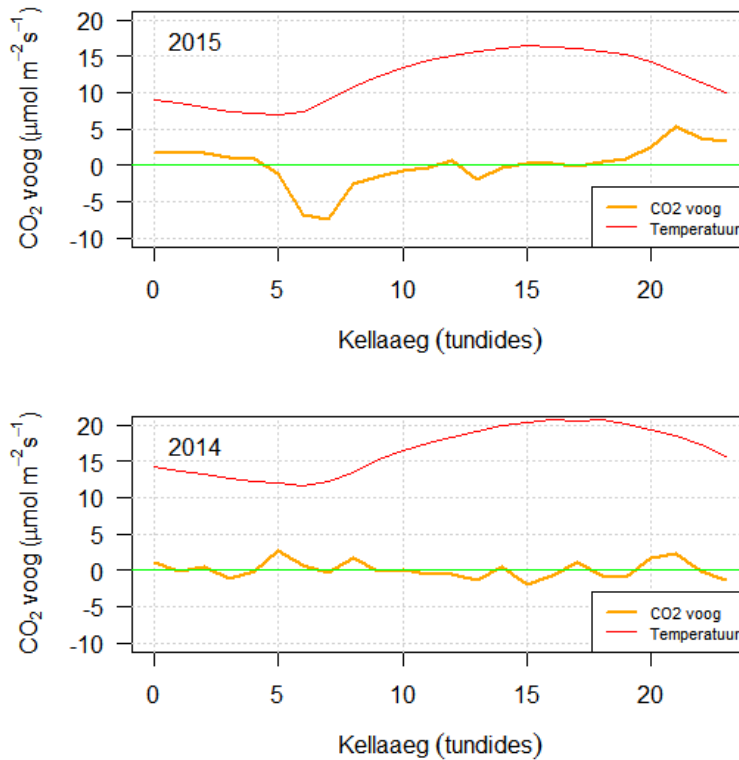
Võrreldes süsihappegaasi sisaldust õhus 2014. ja 2015. aasta on märgata väga suurt erinevust (joonis 19). Kõige suuremad erinevused on just öisel ajal, päeval ajal on trend sarnane, langedes öisest tasemest madalamale. Keskmiseks CO₂ kontsentratsiooniks 2014.aastal oli 322,1 ppm, mis võrreldes 2015. aastaga oli 99,1 ppm võrra väiksem. Liu *et al.* (2015) aasta andmetel ületas juba 2013. aasta mai kuus CO₂ kontsentratsiooni näitaja 400 ppm piiri, samas antud töös suur erinevus aastate lõikes on eeskätt ilmastikust tingitud. Globaalne CO₂ kontsentratsioon sama autori sõnul tõuseb keskmiselt iga aastaga 2 ppm

jagu. Seega võib järeldada, et iga aastane süsihappegaasi sisaldus õhus siiski suureneb. Näiteks Hiinas 2009 kuni 2011 aastatel ökonoomselt arenenud piirkonnas tõusis kontsentratsioon 3,3 ppm, mis on globaalse tõusuga võrreldes väga erinev (Liu *et al.* 2015).



Joonis 19. Vegetatsiooniperioodi 2014. ja 2015. aasta keskmine CO₂ kontsentratsioonid vastavalt kellaajale

Vaadeldes erinevate aastate kevadist CO₂ voogusid ja temperatuuri on selgelt märgatav erinevusi (joonis 20). Aastal 2015 on märgata suuremat CO₂ voo kõikumisi ja madalamat temperatuuri. Varasemal aastal samu näitajaid jälgides on näha väiksemat CO₂ voo muutusi ja ühtlasi kõrgemat temperatuuri, millest võiks järeldada, et kõrgema temperatuuri korral on süsihappegaasi neeldumine suurem (arvatavasti on 2014. aastal takistavaks teguriks vee puudumine hommikutundidel). Fotosünteesi intensiivsus mõjutab voo suurust. Ka Liu *et al.* (2015) on leidnud, et sellised muutused tulenevad ilmastikust, silmas pidades sademeid, pilvisust ja päikesepaistet.

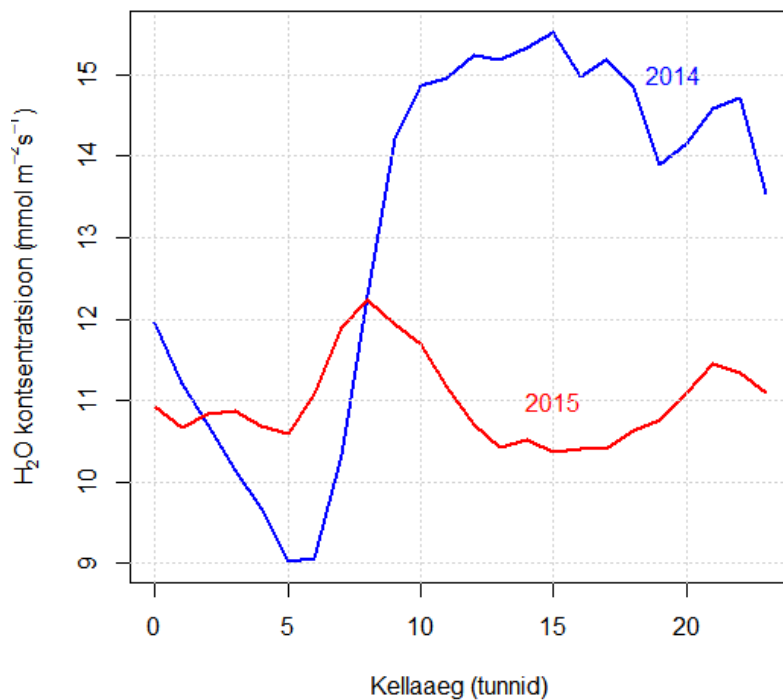


Joonis 20. Vegetatsiooniperioodi 2014. ja 2015. aasta keskmine CO₂ voog ja temperatuur vastavalt kellaaajale

Päevasel ajal muutub CO₂ voog negatiivseks, mis 2015. aastal hommiku poolel kellajal langeb kuni $-7.436 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Kõrgeim näit on $5.309 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Sellele eelneval aastal on kõikumine väiksem, mis jääb vahemikku $-1.938 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ja $2.689 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Tulemustest on märgata, et öisel ajal muutub voog positiivseks, mis on iseloomulik fotosünteesi ja hingamise omavahelisele suhetele ööpäevases tsüklis.

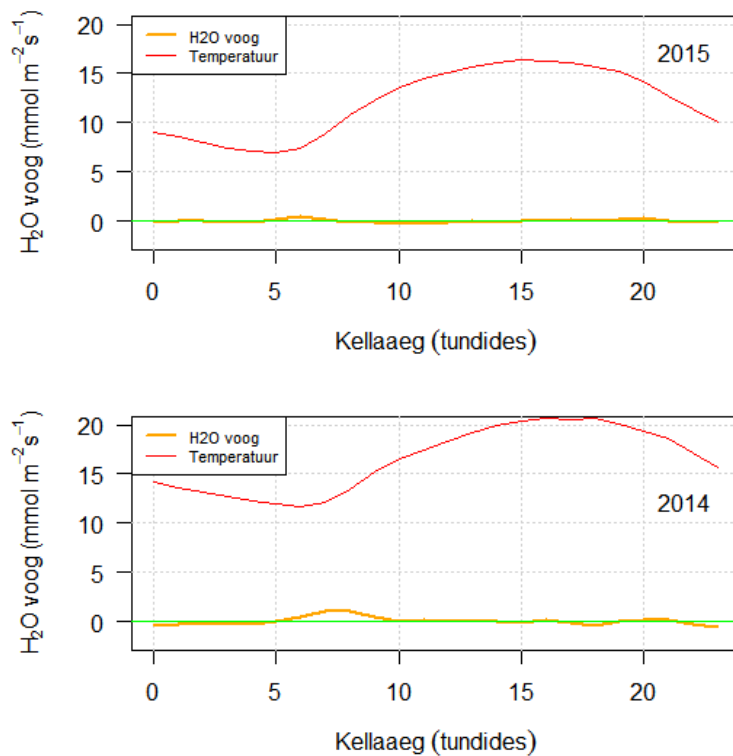
5.4. H₂O võrdlus 2014 ja 2015 aastate vegetatsiooniperioodil

Veeauru tulemustes on märgata väga suuri ööpäevaseid muutuseid (joonis 21). H₂O kontsentratsioon muutub eri aastatel sarnase trendi järgi. Öisel ajal on H₂O kontsentratsioon langev. Päevasel ajal 2014. aastal tõuseb veeauru sisaldus suurel määral. Veeauru sisaldus õhus on päevasel ajal langevas tendentsis 2015. aastal.



Joonis 21. Vegetatsiooniperioodi 2014. ja 2015. aasta keskmine H₂O kontsentratsioonid vastavalt kellaajale

H₂O voo võrdlemiseks on välja toodud eri aastate vegetatsiooniperioodi tulemused ja temperatuur (joonis 22). Päevasel ajal on mõlemal aastatel H₂O voog stabiilne. Hommikul kell 07:00 ajal muutub aastatel 2014 ja 2015 H₂O voog positiivseks, mida võib mõjutada temperatuur. Fratini *et al.* (2012) arvates mängib temperatuur võtmerolli veeauru ja õhuniiskuse taseme mõjutamises. Temperatuuri languse korral H₂O voog suureneb. Samuti võib järeldada, et kõrgema temperatuuri ja madalama süsihappegaasi sisalduse juures on veeauru kontsentratsioon kõrgem.



Joonis 22. Vegetatsiooniperioodi 2014. ja 2015. aasta H₂O keskmine voog ja temperatuur vastavalt kellaajale

2014. aastal madalaim voog oli $-0.662 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ja kõrgeim oli $1.073 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Järgneval 2015. aastal jäid H₂O voog vahemikku $-0.165 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ kuni $0.425 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Aastal 2015 oli H₂O voog oluliselt madalam kui 2014. aastal. Madalama temperatuuri puhul on varieeruvus väiksem ööpäevases skaalas.

KOKKUVÕTE

Turbulentse kovariatsiooni meetodi abil on võimalik mõõta CO₂ ja H₂O vooge ja teisi meteoroloogilisi näitajaid. Meetod on sobilik mõõtmaks järjestikel aastatel vastavaid suurusid järjepidevalt, et saaks jälgida metsaökosüsteemis toimuvaid muutusi. Meetodi kasutamisel peab olema veendunud kõikide võimalike tegurite õigetes mõõtmistes ja kõrvalmõjude elimineerimises, et need ei moonutaks andmestikku. Antud töö tulemustest on näha, et turbulentse kovariatsiooni meetodil mõõdetud andmestik on usaldusväärne ja piisav järelduste tegemiseks.

Käesoleva töö peamiseks eesmärgiks oli metsaökosüsteemi süsiniku ja veeauru voogude hindamine, võrdlemine ning analüüsimine. Lisaks pöörati tähelepanu peale voogude ka teistele meteoroloogilistele näitajate omavahelisele seosele.

Antud töö tulemusena jõudsin järgmiste järeldusteni, et CO₂ kontsentratsioon õhus võib olla väga muutlik ning on peamiselt sõltuv ilmastikust. Päeval ajal on fotosüntees intensiivne ja toimub süsihappegaasi neeldumine ning CO₂ voog muutub negatiivseks. Öisel ajal toimub peamiselt aktiivne hingamine ehk CO₂ eraldumine ja CO₂ voog muutub positiivseks.

CO₂ voog sõltub väiksemal määral H₂O voost, mis omakorda on tugevas seoses temperatuuriga. Temperatuuri tõusu korral on veeauru sisaldus õhus suurem. Päeval ajal oli H₂O voog negatiivne ja öisel ajal positiivne.

Aasta 2014 oli erakordne kevadise kõrge temperatuuri poolest, samas õhuniiskus, eriti hommikutundidel jäi madalale tasemele mistõttu ka fotosüntees nimetatud aastal oli madal.

Analüüsi tulemusest on näha, et meetod on sobilik CO₂ ja H₂O voogude tuvastamiseks. Paremate üldistuse ja täpsemate järelduste tegemiseks on vajalik koguda lisa mõõteandmeid, kus enam tuleks tähelepanu pöörata öiste ja päevastele voogude

erinevustele. Lisaks tuleks enam koguda ilmastikuandmeid, et tuvastada nende võimalikke omavahelisi seoseid voogude mõjutajana.

KASUTATUD KIRJANDUS

Bakwin, P.S., Davis, K.J., Yi, C., Wofsy, S.C., Munger, J.W., Haszpra, L., Barcza, Z. (2004). Regional carbon dioxide fluxes from mixing ratio data. Nr 56B, lk.301-311.

Baldocchi, Dennis D. (2000). On measuring and modeling energy fluxes above the floor of a homogeneous and heterogeneous conifer forest - Agricultural and Forest Meteorology. Nr 102, lk 187-206.

Baldocchi, Dennis D. (2003). Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future. Nr.9, lk.479-492.

Baldocchi D., Falge, E., Wilson, K. (2001). A spectral analysis of biosphere-atmosphere trace gas flux densities and meteorological variables across hour to multi-year time scales. - Agricultural and Forest Meteorology. Nr 107, lk 1-27.

Baldocchi, D., Sturtevant, C., Fluxnet Contributors. (2015). Does day and night sampling reduce spurious correlation between canopy photosynthesis and ecosystem respiration? - Agricultural and Forest Meteorology. Nr. 207, lk. 117-126.

Burba, G. (2013). Eddy Covariance Method for Scientific, Industrial, Agricultural and Regulatory Applications - A Field Book on Measuring Ecosystem Gas Exchange and Areal Emission Rates. Lk 9-29.

Burba, G., Madsen, R., Feese, K. (2013). Eddy Covariance method for CO₂ Emission Measurements in CCUS Applications: Principles, Instrumentation and Software. Energy Procedia nr 40, lk 329-336.

Chi, J., Waldo, S., Pressley, S., O'Keeffe, P., Huggins, D., Stöckle, C., Pan, W. L., Brooks, E., Lamb, B. (2016). Assessing carbon and water Dynamics of no-till and conventional tillage cropping system in the inland Pacific Northwest US using the eddy covariance method – Agricultural and Forest Meteorology. Nr. 218-219, lk. 37-49.

- Climatica kodulehekülg.** (2016). Martin Black. <http://climatica.org.uk/climate-science-information/carbon-cycle> (25.03.2016).
- Fratini, G., Ibrom, A., Arriga, N., Burba, G., Papale, D.** (2012). Relative humidity effects on water vapour fluxes measured with closed-path eddy-covariance systems with short sampling lines – Agricultural and Forest Meteorology. Nr. 165, lk. 53-63.
- Font, A., Grimmond C.S.B., Kotthaus, S., Morgui, J.-A., Stockdale, C., O'Connor, E., Priestman, M., Barratt, B.** (2015). Daytime CO₂ urban surface fluxes from airborne measurements, eddy-covariance observation and emissions inventory in Greater London – Environmental Pollution. Nr. 196, lk. 98-106.
- Grace, J.** (2004). Understanding and managing the global carbon cycle. Nr 92, lk.189-202.
- Janssens, I.A., Kowalski, A.S., Ceulemans, R.** (2001). Forest floor CO₂ fluxes estimated by eddy covariance and chamber-based model - Agricultural and Forest Meteorology. Nr.106, lk.61-69.
- Kotthaus, S., Grimmond, C.S.B.** 2012. Identification of Micro-scale Anthropogenic CO₂, heat and moisture sources – Processing eddy covariance fluxes for a dense urban environment – Atmospheric Environment. Nr.57, lk. 301-316.
- Lal, R.** (2005). Forest soils and carbon sequestration. Nr. 220, lk.242-258.
- Liu, M., Wu, J., Zhu, X., He, H., Jia, W., Xiang, W.** (2015). Evolution and variation of atmospheric carbon dioxide concentration over terrestrial ecosystems as derived from eddy covariance measurements - Atmospheric Environment nr 114, lk 75-82.
- Liski, J., Perruchoud, D., Karjalainen, T.**(2002). Increasing carbon stock in the forest soils of western Europe. Nr.169, lk.159-175.
- Lovett, G.M., Cole, J.J., Pace, M.L.** (2006). Is Net Ecosystem Production Equal to Ecosystem Carbon Accumulation? Nr.9, lk.1-4.
- Luyssaert, S., Schulze, D.E., Börner, A., Knohl, A., Hessenmöller, D., Law, B.E., Ciais, P., Grace, J.** (2008). Old-growth forests as global carbon sinks. Nr.455, lk. 213-215.

- Lõhmus, E.** (2006). Eesti metsakasvukohatüübid. Kõite nr. III kordustrukk. Väljaandmiskoht: EMÜ Metsandus- ja maaehitusinstituut. Maht: 80 lk.
- Maa-ameti geoportaal.** (2006). <http://geoportaal.maaamet.ee/> (15.02.2016)
- Masseroni, D., Corbari, C., Ceppi, A., Gandolfi, C., Mancini, M.** (2013). Operative use of eddy covariance measurements: are high frequency data indispensable? - *Procedia Environmental Sciences*. Nr. 19, lk.293-302.
- Metsaregister** <http://register.metsad.ee/avalik/?kataster=47302:001:0553> (15.02.2016)
- Novick, K. A., Stoy, P. C., Katul, G. G., Ellsworth, D. S., Siqueira, M. B. S., Juang, J., Oren, R.** (2004). Carbon dioxide and water vapor exchange in a warm temperate grassland – *Oecologia*. Nr. 138, lk. 259-274.
- Oidermaa, J.J.** (2015). Atmosfääri keskmine CO₂ sisaldus kerkis rekordilisele tasemele - ERR kodulehekülg. (13.05.2016).
- Ouyang, W., Lai, X., Li, X., Liu, H., Lin, C., Hao, F.** (2015). Soil respiration and carbon loss relationship with temperature and land use conversion in freeze-thaw agricultura area - *Science of Total Environment*. Nr. 533, lk. 215-222.
- Rannik, Ü., Altimir, N., Raittila, J., Suni, T., Gaman, A., Hussein, T., Hölttä, T., Lassila, H., Latokartano, M., Lauri, A., Natsheh, A., Petäjä, T., Sorjamaa, R., Ylä-Mella, H., Keronen, P., Berninger, F., Vesala, T., Hari, P., Kulmala, M.** (2002). Fluxes of karbon dioxide and water vapour over Scots pine forest and clearing - *Agricultural and Forest Meterology*. Nr. 111, lk. 187-202.
- Rannik, Ü., Keronen, P., Hari, P., Vesala, T.** (2004). Estimation of forest-atmosphere CO₂ exchange by eddy covariance and profile techniques - *Agricultural and Forest Meteorology*. Nr.126, lk.141-155.
- Rebmann, C., Göckede, M., Foken, T., Aubinet, M., Aurela, M., Berbigier, P., Bernhofer, C., Buchmann, C., Carrara, A., Cescatti, A., Ceulemans, R., Clement, R., Elbers, J.A., Granier, A., Grünwald, T., Guyon, D., Havrankova, K., Heinesch, B., Knohl, A., Laurila, T., Longdoz, B., Marcolla, B., Markkanen, T.,**

- Miglietta, F., Moncrieff, J., Montagnani, L., Moors, E., Nardino, M., Ourcival, J.-M., Rambal, S., Rannik, Ü., Rotenberg, E., Sedlak, P., Unterhuber, G., Vesala, T., Yakir, D.** (2005). Quality analysis applied on eddy covariance measurements at complex forest sites using footprint modelling .Nr.80, lk.121-141.
- Stoy, P. C., Katul, G. G. Siqueira, M. B. S., Juang, J., Novick, K. A., Uebelherr, J. M., Oren, R.** (2006). An evaluation of models for partitioning eddy covariance-measured net ecosystem Exchange into photosynthesis and respiration – Agricultural and Forest Meteorology. Nr.141, lk. 2-18.
- Strandberg, M.** (2013). Metsas tuleb näha nii puid kui ka mulda – Eesti kultuurileht Sirp. Nr 13.
- Taiz, L., Zeiger, E.** (2002). Plant Physiology. - Sinauer Associates; III edition.
- Tang, J., Baldocchi, D.D., Xu, L.** (2005). Tree photosynthesis modulates soil respiration on a diurnal time scale - Global Change Biology. Nr. 11, lk.1298-1304.
- Tang, J., Baldocchi, D.D., Xu, Y.Q.L.** (2003). Assessing soil CO₂ efflux using continuous measurements of CO₂ profiles in soils with small solid-state sensors. -Agricultural and Forest Meteorology. Nr.118, lk.207-220.
- Thongbai, P., Kozai, T., Ohyama, K.** (2010). CO₂ and air circulation effects on photosynthesis and transpiration of tomato seedlings - Scientia Horticulturae. Nr. 126, lk. 338-344.
- Tullus, A., Kupper, P., Sellin, A., Parts, L., Sõber, J., Tullus, T., Lõhmus, K., Sõber, A., Tullus, H.** (2012). Climate Change at Northern Latitudes: Rising Atmospheric Humidity Decreases Transpiration, N-uptake and Growth Rate of Hybrid Aspen. Nr. 7(8).
- Wang, W., Davis, Kenneth J.**(2008). A numerical study of the influence of a clearcut on eddy-covariance fluxes of CO₂ measured above a forest. Nr.148, lk.1488-1500.
- Wehr, R., Munger, J. W., Nelson, D. D., McManus, J. B.; Zahniser, M. S., Wofsy, S. C., Saleska, S. R..** (2013). Long-term eddy covariance measurements of isotopic

composition of the ecosystem-atmosphere Exchange of CO₂ in temperate forest –
Agricultural and Forest Meteorology. Nr.181, lk. 69-84.

Yang, R., Chen, B., Liu, H., Liu, Z., Yan, H. (2015). Carbon sequestration and decreased CO₂ emission caused by terrestrial aquatic photosynthesis: Insights from diel hydrochemical variations in a nepikarst sprint and two sprint-fed ponds in different seasons - Applied Geochemistry. Nr. 63, lk. 248-260.

CARBON DYNAMICS AND H₂O FLUX IN FOREST ECOSYSTEM – EDDY COVARIANCE METHOD

Summary

Turbulent covariance method makes it possible to measure the CO₂ and H₂O flows and other meteorological parameters. The method is suitable for measurement during successive years more consistently in order to monitor variables of forest ecosystems. Method must be used so that all the potential factors for the correct measurements are involved and elimination of the side effects must be sure (so that they do not distort the data). The results of this work show that the turbulent covariance method is applicable, and the measured data is reliable enough to make conclusions.

The main aim in this work is the estimation of forest ecosystem carbon and water vapor flow, comparison, and analysis of those characteristics. In addition, attention was paid to other meteorological parameters and their mutual relationship.

This work results found that the concentration of CO₂ in the air can be very variable, mainly depending on the weather. During the day, photosynthesis was intense and dioxide CO₂ absorption occurred and flow turned negative. At night time, respiration was more active (CO₂ releasing and CO₂ flow change positive).

CO₂ flux depended to a lesser extent on H₂O, but the flux of water vapor is strongly related to temperature. With the higher temperature rise in the water vapor content of the air is higher. During the day, the H₂O flow is negative and during the night it is positive.

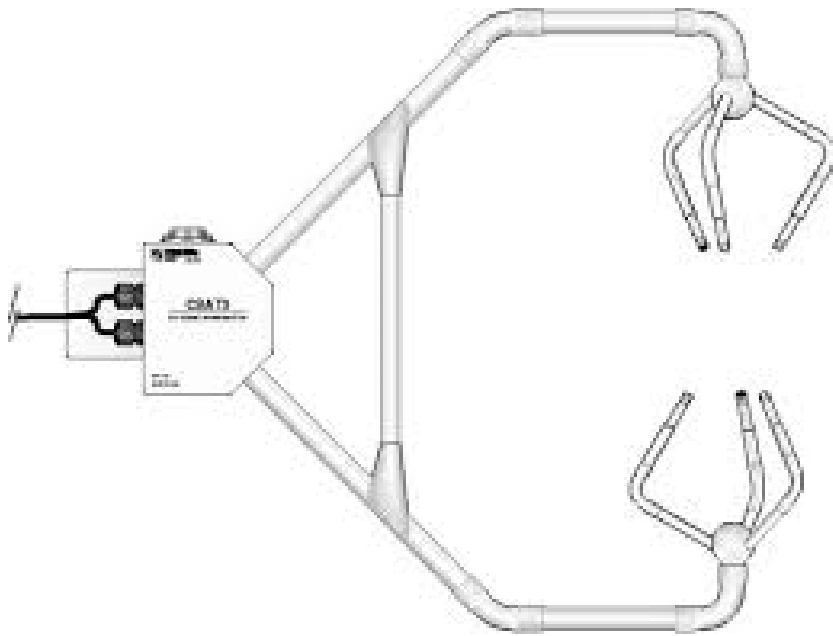
Year 2014 was exceptional in terms of high temperatures in spring, while the relative humidity, especially in the morning hours remained at a low level so that the photosynthesis of that year was at a lower level.

Analysis and the result of the comparison show that the method is suitable for the detection of flows. For better generalization further collection of measurement data is needed, and more attention should be paid to the night and day flux differences. Surely it would also be

useful to collect more weather data in order to identify the possible flows of main effective chemical components.

LISAD

Lisa 1.



Anemomeeter C-SAT 3

Lisa 2.



Gaasianalüsaator Li-Cor Li-7200

Lisa 3.



Tubulentse kovariatsiooni meetodil põhinev torn

Lisa 4.



Mõõtmispunkti ümbritsev katseala

Lisa 5.



Mõõtmispunkti ümbritsev katseala

Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Mina, _____,

(autori nimi)

sünniaeg _____,

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud lõputöö

_____,

(lõputöö pealkiri)

mille juhendaja(d) on _____,

(juhendaja(te) nimi)

1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,

1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja

1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;

3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor _____

(allkiri)

Tartu, _____

(kuupäev)

Juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Luban lõputöö kaitsmisele.

(juhendaja nimi ja allkiri) (kuupäev)

(juhendaja nimi ja allkiri) (kuupäev)