

Tartu Ülikool
Loodus- ja tehnoloogiateaduskond
Ökoloogia ja maateaduste instituut
Geograafia osakond

Bakalaureusetöö keskkonnatehnoloogias

**Korreksioonide olulisus turbulentsete kovariatsioonide meetodi
kasutamisel**

Erki Ani

Juhendaja: PhD Kaido Soosaar

Kaitsmisele lubatud:

Juhendaja:

Osakonna juhataja:

Tartu 2014

Sisukord

1. Sissejuhatus	3
2. Turbulentsete kovariatsioonide meetod.....	6
2.1. Ajalugu	6
2.1. Turbulentsete kovariatsioonide meetod	7
3. Korrektsioonid	8
3.1. Turbulentsete kovariatsioonide meetodi eelduste mittetäitmisest tingitud vead ..	10
3.2. Instrumentidest tingitud süstemaatilised vead	10
3.2.1. Gaasianalüsaatorite erinevad mudelid ja nende opereerimisest tingitud vead	10
3.2.2. Helianemomeetrist tingitud vead	13
3.2.3. Kalibreerimisest tulenev määramatus	15
3.2.4. Instrumentide pinna soojenemisest tingitud viga	15
3.3. Andmete töötlemisega seotud süstemaatilised vead.....	16
3.3.1. Lühiimpulsid	16
3.3.2. Tihedusfluktuatsioonid	18
3.3.3. Spektraalkorrektsioonid	19
3.3.4. Lüngatäite protseduur	21
3.4. Õiste voogude korrektsioon.....	22
4. Arutelu ja järeldused	24
5. Kokkuvõte.....	26
6. Summary	28
7. Tänuavaldused	29
8. Kasutatud kirjandus	30
LISAD	36
Lisa 1. <i>Open-path</i> infrapuna gaasianalüsaator	37
Lisa 2. <i>Closed-path</i> infrapuna gaasianalüsaator.....	38
Lisa 3. <i>Enclosed</i> gaasianalüsaator	39
Lisa 4. IRGASON (integreeritud infrapuna gaasianalüsaator ja helianemomeeter)..	40
Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks	
tegemiseks	41

1. Sissejuhatus

Kliima muutusi mõjutavad tänapäeval lisaks looduslikele teguritele ka antropogeensed tegurid, mis on suurendanud kasvuhoonegaaside uurimise vajadust. Et aga kliimamuutusi usaldusväärselt ennustada, on tarvis ka kõrgetasemelist tehnoloogiat, mis võimaldaks teostada pidevat keskkonna-analüüsi. (Collins 2013)

Riigikogu keskkonnakomisjoni poolt koostatud teatmik kliimamuutustest nimetab, et lisaks looduslikele kasvuhoonegaaside allikatele (vulkaaniline tegevus, organismide kõdunemine, kivimite murenemine, taimestiku arengustaadiumid, metsatulekahjud) mõjutavad tänapäeval üha enam aktiivsete kasvuhoonegaaside ja aerosoolide taseme suurenemist atmosfääris antropogeensed tegurid (fossiilkütuste põletamine, põllumajanduse areng, prügi tootmine, sünteetiliste kemikaalide produktsioon, biomassi põletamine ja maakasutuse muutused). Kuigi iseenesest toimib kasvuhooneefekt loodusliku fenomenina ja hoiab, tänu kasvuhoonegaaside omadusele neelata Maa infrapuna kiirgust, Maa keskmist temperatuuri üle 30^oC kõrgemana kui ilma selleta. (Pomerants 2010) Küll aga on alates tööstusrevolutsioonist hakanud antropogeensete tegurite mõjul suurenema kasvuhooneefekti mõju, mille peamiseks teguriteks on CO₂, CH₄, N₂O ja troposfäärne O₃ (ka fluoritud kasvuhoonegaasid). Süsinikdioksiid on neist inimtegevusest produtseeritavatest gaasidest tähtsaim kasvuhoonegaas, samuti ei ole süsinikdioksiidil kindlat eluiga - see on pidevas ringluses maa, ookeani ja atmosfääri vahel (Jain 2009).

Süsinikdioksiidi kontsentratsioon jääst võetud proovide järgi eelindustriaalses ühiskonnas oli ligi 280 ppmv (Petit et al. 1990). Viimastel aastakümnetel on see number olnud pidevas tõusvas trendis ning alates 1958. aastast on selle kogust mõõdetud pidevalt, mille tulemusena on praeguseks registreeritud CO₂ koguse märkimisväärne suurenemine atmosfääris, ulatudes alates 316 ppmv-st 1959. aastal 385 ppmv-ni 2008. aastal (Keeling et al. 2009). 2014. aastal registreeriti CO₂ märkimisväärne suurenemine atmosfääris, ületades 400 ppmv piiri (Earth System Research Laboratory 2014). Seoses kasvuhoonegaaside pideva muutumisega on suurenenud vajadus pidevate CO₂ monitooringute järele, mis võimaldaks kasvuhoonegaasidega seotud andmeid koguda ülemaailmselt (Jain 2009).

Tänu tehnoloogia kiirele arengule on tänapäeval ühe meetodina kasvuhoonegaaside, enim aga süsinikdioksiidi bilansi mõõtmiseks kasutusel turbulentsete kovariatsioonide meetod, mis võimaldab määrata huvipakkuva gaasi kontsentratsiooni ja tasakaalu atmosfääri ja biosfääri vahel. Meetod võimaldab kirjeldada ökosüsteemi füsioloogiat ning salvestada mõõtmistulemusi tundidest aastateni ja seda väga suurel alal (Baldocchi et al. 2001). Samas tuleb korrektsete ja usaldusväärsete andmete saamiseks turbulentsete kovariatsioonide meetodit kasutades arvestada teatud piirangutega ning olla teadlik mõõtmistel tekkivate vigade võimalusega (Baldocchi 2003).

Kuigi turbulentsete kovariatsioonide meetodil kasvuhoonegaaside pidev pikaajaline mõõtmine on maailmas laiemalt kasutusele võetud juba 1990-ndate algusest (Wofsy et al. 1993), on antud valdkond Eestis veel uudne, aktuaalne, kuid samas vähe uuritud. Teostatud on küll lühemaajalisi CO₂ ja H₂O mõõtmisi Eesti Maaülikooli poolt Liispõllu mastis 2011 ja 2012. aastal, alates 2012. aasta kevadest ka Tartu Ülikooli geograafia osakonna Soontaga mõõtejaamas ning 2014. aasta alguses alustatud ka mõõtmisi Järvselja SMEAR mõõtejaamas, ei ole pikemaajalised mõõtmisi tehtud.

Käesoleva töö eesmärgiks on anda ülevaade turbulentsete kovariatsioonide meetodist ning tuua välja mõõtmisteks vajalike tingimustega ja -instrumentidega arvestamise olulisus. Lähtudes mõõtmiste täpsuse olulisusest, käsitleb autor mõõtmistel tekkivaid süstemaatilisi vigu ning samuti andmete kvaliteedi tõstmiseks vajalikku järeltöötlust ja andmekorrektsioone. Mõõtmistest tekkivate vigade määra on autor lihtsuse mõttes kirjeldanud süsinikdioksiidi, mitte kõigi kasvuhoonegaaside näitel.

Esmalt oleks tarvilik heita pilk turbulentsete kovariatsioonide meetodile enesele. Seega annab autor töö esimeses osas ülevaate meetodi ajaloost ja üldisest tööprintsibist ning toob välja peamised meetodi eelised gaaside kontsentratsioonide mõõtmisel biosfääri-atmosfääri vahel. Töö teises osas on välja toodud peamised mõõtmistest ja instrumentidest tingitud vead: turbulentsete kovariatsioonide meetodile rakendatavate eelduste mittetäitmisest tekkivad vead, helianemomeetrite ja gaasianalüsaatorite disaini iseärasused ning nendest tulenevad vead, andmete töötlemisega seotud süstemaatilised vead ning öisel ajal tehtavate mõõtmistega kaasnevad vead.

Turbulentsete kovariatsioonide meetodil atmosfääri-biosfääri vahelise gaasivahetuse uurimine võib olla aluseks tulevastele uurimistöodele nii Eesti-siseselt, kui ka maailma mastaabis, mis võimaldaks ühineda regionaalsete ja ka ülemaailmsete mõõtmisvõrgustikega. Seetõttu on oluline lisaks kergesti kättesaadavale mõõtmistehnikale olla teadlik mõõtmistel tekkivatest vigadest ning osata neid ennetamise teel vältida või, kasutades järeltötlust, parandada tekkivaid vigasid, et tagada andmestiku kvaliteet edasiseks töötamiseks ja kasutamiseks.

2. Turbulentsete kovariatsioonide meetod

2.1. Ajalugu

Turbulentsete kovariatsioonide meetod (ingl. k. *eddy covariance*) on tänaseks üheks peamiseks atmosfääris esinevate vertikaalsete turbulentsete voogude uurimiseks kasutatav meetod. Selle põhilisteks kasutusvaldkondadeks on ökosüsteemide, põllumaade, aga ka tööstuslike alade ja veekogude energia- ja gaasivoogude mõõtmine ja arvutamine. Esimesed mikrometeoroloogilised uurimused süsinikdioksiidi vahetuse kohta atmosfääri-biosfääri vahel leidsid aset tasase pinnase, lühikese taimkatte ja tuulise päikeselise kliimaga aladel, kus ilmastikutingimused olid stabiilsed – antud keskkonnatingimused ongi turbulentsete kovariatsioonide metoodika kasutamise jaoks ideaalsed. (Desjardins 1974) Vaatamata eelmainitud kindlatele uurimistingimustele, pandi sellega alus komplekssete ökosüsteemide soojusvahetuse, vee ning süsihappegaasi, metaani ja teiste gaasiliste ainete voogude uurimisele (Burba 2013). Tänu tehnoloogia arengule ja tehnika kättesaadavuse suurenemisele sai võimalikuks esimese turbulentsete kovariatsioonide meetodil põhineva süsinikdioksiidi bilansi uurimistöö avaldamine 1974. aastal, mille puhul kasutati mõõtmistehnikana propeller anemomeetrit ja mahtuvustajuril põhinevat infrapuna gaasianalüsaatorit (Desjardins 1974). Antud uuringu puhul oli leitud vigade määr ligi 40%, mis tulenes peamiselt instrumentide suutmatusest reageerida kõrgsageduslikule gaasivoole (Garratt 1975). Järgmise põlvkonna helianemomeetrite ja infrapuna-gaasianalüsaatorite kasutuseletulekuga sai alguse senisest keerukamate ökosüsteemide süsinikdioksiidi bilansi mõõtmine: 1990. aastate alguses teostati esimene aastapikkune süsinikdioksiidi bilansi mõõtmine parasvöötme heitlehises metsas (Wofsy et al. 1993). Sellele lisandus juba esimesel aastakümnel mitmeid pikaajalisi uurimusi nii Põhja-Ameerikas, Euroopas kui ka Jaapanis. Rohkete uute mõõtmispaikade tekkimisega ülemaailmselt tekkis võimalus saadud andmeid omavahel võrrelda. Seetõttu koostati 1996. aastal Euroopas ja 1997. aastal Põhja-Ameerikas regionaalsed programmid (vastavalt Euroflux ja AmeriFlux), mis liidaksid mõõtmispunktid uurimisvõrgustikeks. (Balocchi 2003) 2014. aastaks on mõõtmispaikasad ülemaailmselt üle 680, mis koonduvad regionaalsesse võrgustikesse, nagu näiteks AmeriFlux, AsiaFlux, CarboEurope, Swiss Fluxnet,

ICOS, mis omakorda kuuluvad suurema, FLUXNETi-nimelise programmi alla (Fluxnet 2014).

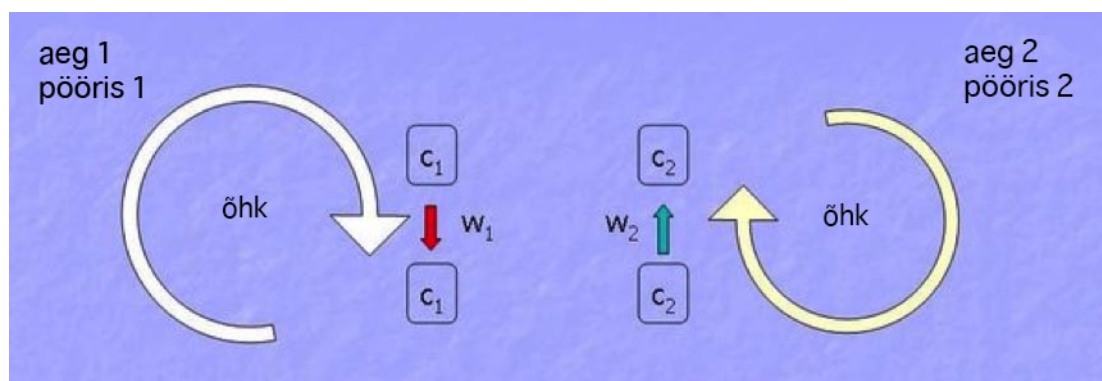
2.1. Turbulentsete kovariatsioonide meetod

Turbulentsete kovariatsioonide meetodil mõõdetakse gaasi kontsentratsiooni infrapuna gaasianalüsaatorite ja helianemomeetrite abil, lähtudes atmosfääri maalähedastes kihtides toimuva turbulentsiga. Õhu horisontaalne liikumine ökosüsteemis koosneb erinevate suurustega kõrgsageduslikest ja madalsageduslikest pööristest (ingl. k. *eddy*) (Joonis 1), mis kannavad endaga kaasas aineosakesi, millede kontsentratsiooni ja tasakaalu on võimalik uuritavas keskkonnas määrata. Mida maapinnale lähemal, seda suurem on tõenäosus, et aineosakeste transpordi eest on vastutavad väiksemad, kõrgsageduslikud pöörised. Ning vastupidi: mida kõrgemal maapinnast, seda madalama sagedusega ja suuremad on pöörised. (Burba 2013)



Joonis 1. Õhu liikumisega ökosüsteemis tekkivad eri suurustega pöörised. (Burba, Anderson 2007) (modifitseeritud autori poolt)

Turbulentsete kovariatsioonide üldpõhimõtet kirjeldab joonis 2:



Joonis 2. Pöörise kovariatsiooni mõõtmine. Ühel ajahetkel liigub pöörisega number 1 õhuosake

c_1 allapoole kiirusega w_1 ; järgmisel hetkel samas kohas liigutab pööris number 2 õhuosakese c_2 ülespoole kiirusega w_2 . (Burba, Anderson 2007) (modifitseeritud autori poolt)

Teades iga osakese omadusi (kontsentratsioon, temperatuur, niiskus) ja vertikaalse liikumise kiirust, saab arvutada vertikaalse üles või alla suunatud voo gaasi kontsentratsioonile ning temperatuurile ja niiskusele (Burba 2013). Turbulentsete kovariatsioonide põhimõtet ehk kovariatsiooni huvipakkuva kontsentratsiooni ja vertikaalse tuule kiiruse vahel iseloomustab järgmine näide: “Kui on teada, et esimesel ajahetkel liigub pöörise gaasi üles kolm CO_2 molekuli ja teisel ajahetkel alla vaid kaks CO_2 molekuli, on koguvoog selle aja kohta suunatud ülespoole ja võrdne ühe CO_2 molekuliga.” (Burba 2013: 13).

Mõõdetavateks aineosakesteks võivad ökosüsteemide füsioloogia kirjeldamisel olla näiteks CO_2 , CH_4 , H_2O või N_2O . Turbulentsete kovariatsioonide meetod võimaldab registreerida nende aineosakeste liikumist atmosfääri-biosfääri vahel. (Burba 2013)

Meetod võimaldab määrata ka näiteks keskkonnateguritest tulenevat mõju ökosüsteemile läbi süsinikdioksiidi bilansi uurimise (Baldocchi 1988). See on aidanud kaasa ökosüsteemide füsioloogia kirjeldamisel ja uurimisel uute ja täpsemate mõõtmistehnikate väljaarendamisele. Meetodi peamiseks tugevusteks on uuritava ala suurus ehk jalajälg, mis võib ulatuda mõnest sajast meetrist mitmete kümnete kilomeetriteni, ning samuti ajaline tegur: ökosüsteemi gaasivoogusid on võimalik mõõta turbulentsete kovariatsioonide meetodil aastaringselt ning pikaajaliselt – tundidest mitmete aastateni. (Burba 2013) Samas kui näiteks kamermõõtmistel on uuritava ala suurus piiratud ja ka kordades väiksem (Noe et al. 2012).

3. Korrektsioonid

Mõõtmised ei ole kunagi täiuslikud, seda ka turbulentse kovariatsioonide meetodi puhul. Potentsiaalsete vigade tekkel on olulise kaaluga instrumentide väära kasutamisega kaasnevad probleemid, meetodikale rakendatud kindlate mõõtmistingimuste- ja keskkonna eelduste eiramine, füüsikaliste fenomenide esinemine ja konkreetse maastikuga seotud iseärasused. Tekkivaid vigasid on aga sobivate korrektsiooni meetodite rakendamisel võimalik parandada. (Burba 2013) Nendele korrektsioonidele keskendutakse järgnevas peatükis.

Mõõtmistest tulenevad vead liigituvad peamiselt kahte gruppi: juhuslikud vead ja süstemaatilised vead (Richardson et al. 2012).

Juhuslike vigade esinemist mõõteandmestikus ei ole võimalik ette ennustada ning samuti vähendavad nad mõõteandmete täpsust (Richardson et al. 2012). Juhuslikud vead tulenevad erinevatest teguritest: mõõtmisüsteemidest (gaasianalüsaatorid, anemomeetrid, andmesalvestus, voogude arvutamine), turbulentsest transpordist ja statistilistest vigadest (Kessomkiat et al. 2013). Samas selliseid vigasid on raske ennetada ja teinekord jäävad need korrigeerimata (Richardson et al. 2012).

Erinevalt juhuslikest on süstemaatilisi vigu võimalik kindlaid korrekture lisades parandada ja vähendada seega märkimisväärselt vigade mõju andmestikule (Richardson et al. 2012). Richardson et al oma 2012. aasta uurimuses kategoriseerib süstemaatiliste vigade tekkepõhjused tulenevalt põhiliselt kolmest tegurist:

- turbulentsete kovariatsioonide meetodi eelduste mittetäitmisest;
- instrumentide disainist ja kalibreerimise vigadest;
- andmete töötlustest tulenevatest vigadest.

Järgnevalt keskendub autor pikemalt süstemaatiliste vigade temaatikale, täpsemalt instrumentide disainist ja kalibreerimisest ning andmete töötlustest tulenevatele vigadele ja toob välja mõned võimalikud lahendused nende mõju vähendamisele.

Keskendumine süstemaatilistele vigadele on tingitud võimalusest määrata ligikaudne veamäär näiteks aastaste voogude tõlgendamisel.

3.1. Turbulentsete kovariatsioonide meetodi eelduste mittetäitmisest tingitud vead

Kindlustamaks mõõtmistel saadavate andmete täpsus, on tarvis lähtuda mõningatest mõõtmistele kehtestatud tingimustest. See on oluline, sest võimaldab erinevate tingimustega mõõtmiskohtadel registreeritavaid andmeid omavahel võrrelda. Olulisimad eeldused, millede rikkumine või ignoreerimine turbulentsete kovariatsioonide meetodi puhul võivad tekitada süstemaatilisi vigasid, on järgmised (Baldocchi 2003):

- keskkonnatingimuste stabiilsus ajas;
- mõõtmisjaamast ülestuult jääva taimkatte horisontaalne homogeensus mitmete sadade meetrite ulatuses;
- pinnareljeefi tasasus.

Jättes arvestamata nimetatud tingimustega või jättes nendest tulenevad vead hilisemas andmetöötluses parandamata, võib eelduste mittetäitmisest tekkida mõõtmistulemustes aasta lõikes CO₂ voo ebatäpsus ligi 20-130 g C m⁻², jäädes peamiselt alla 100 g C m⁻² (Papale 2006).

3.2. Instrumentidest tingitud süstemaatilised vead

Antud meetodi jaoks peavad kasutatavad mõõteseadmed korrektsete tulemuste tõlgendamiseks reageerima kontsentratsiooni, tiheduse ja temperatuuri kiiretele ja väikestele muutustele ning seda kiiresti ja täpselt (Burba 2013). Vaatamata arenenud tehnoloogiale tekib aga paratamatult instrumentidest tingitud vigasid, mida omakorda võib jagada kaheks: instrumentide disainist ja opereerimisest ja seadmete kalibreerimisest tulenevad vead (Richardson et al. 2012).

3.2.1. Gaasianalüsaatorite erinevad mudelid ja nende opereerimisest tingitud vead

Mõõtmaks kiireid muutuseid atmosfäärsete gaaside kontsentratsioonides on tarvis kiiresti reageerivaid instrumente, mõõtmisagedusega vähemalt 10 Hz, mis tähendab mõõtmist 10 korda sekundis. Selleks sobivad enim optilised infrapuna gaasianalüsaatorid. Viimastest on kasutusel peamiselt kahte erinevat ehitustüüpi –

open- ja *closed-path*¹ – infrapuna-gaasianalüsaatoreid, mis mõlemad omavad kindlates tingimustes teatud eeliseid ning samuti tekitavad disainist ja installatsioonist tulenevalt erinevaid vigu mõõtmistulemustes. (Burba 2013)

Järgnevalt käsitleb autor mõlemat tüüpi analüsaatorite häid ja halbu külgi ning kirjeldab lühidalt ka kahe uusima mudeli ehitusest tulenevaid eeliseid varasemate mudelite ees.

Open-path analüsaatori (Lisa 1) kasutamine võimaldab mõõta uuritava gaasi (näiteks CO₂) tihedust õhust *in situ*, mis tähendab, et uuritava gaasi vooge saab arvutada otse, lähtudes arvu muutujate vastastikusest lineaarsest seosest – tuule vertikaalse kiiruse ja gaasi kontsentratsiooni kovariatsioonist. Kuigi antud analüsaator omab nimetatud eelist, nõuab selle kasutamine lisamõõtmisi, sest iga (näiteks temperatuuri või niiskuse kõikumisest tingitud) muutus õhutiheduses nõuab omakorda korrigeerimist. (Järvi et al. 2009)

Voolu tarbimise ja kõrgsagedusliku andmestiku salvestamise aspektist on *open-path* sensorite kasutamine eelistatuim. Siinjuures ei ole tarvis õhku piki toru analüsaatorisse tõmmata nagu *closed-path* analüsaatorite korral, vaid uuritavate gaaside hulka mõõdetakse otse õhust. Vead mõõteandmestikus võivad *open-path* analüsaatorite puhul tekkida näiteks sademete ja sensori soojenemise või jahenemise korral, mistõttu on tarvis andmete töötlemisel rakendada parandusmeetodeid (Munger et al. 2012). Samuti peab *open-path* analüsaator paiknema piisaval kaugusel helianemomeetrist, et ei takistaks tuule loomulikku liikumist, mis võib viia omakorda vigade tekkele andmestikus. Lisaks takistavad sensorile kogunev tolm, sademed ja jää seadmete täpset mõõtmist, mistõttu on soovitatav mõõtmispaiga ülesseadmisel näiteks instrument kalde alla paigutada ning sensorit perioodiliselt puhastada. Samas on viimasel paaril aastal seadmete arendajad teinud jõupingutusi selleks, et väliskeskkonnale avatud sensoriga analüsaatorid oleksid võimalikult töökindlad ka vihmasel ja külmal perioodil. Samuti on *open-path* analüsaatori kalibreerimine keerulisem, sest ei võimalda seda teha automaatselt, vaid vajab manuaalset lähenemist (Burba 2013), mida on võimalik teostada kahel viisil: katta instrument kambriga, milles on kindel gaaside segu, või võrrelda mõõdetavate andmete täpsust teise,

¹ Termin *open-path* viitab siinjuures mõõteriistale, mille sensor on väliskeskkonnale avatud. *Closed-path* viitab väliskeskkonnast eraldatud, kinnisele sensorile.

samaaegselt töötava kalibreeritud analüsaatoriga. Viimasel juhul saadud kalibreerimise tulemus on leitud olevat usaldusväärsem ja täpsem. (Munger et al. 2012)

Erinevalt eelnevalt mainitud mõõteriistast töötavad *closed-path* analüsaatorid (Lisa 2) sissetõmmatava õhu analüüsi meetodil, mis eeldab pika sissetõmbe-toru olemasolu. Selle analüsaatori eeliseks on kindlaksmääratud temperatuuri ja rõhu juures gaasiproovi mõõtmine, mis tähendab, et hilisemas andmetöötles ei ole tarvis kasutada tiheduskorrektsioone (vt. pkt. 3.3.2.). Vajadus tiheduskorrektsioonide järele tekib, kui temperatuuri ja niiskuse muutused mõjutavad mitteuuritavate gaaside kontsentratsiooni, mis ei ole seotud uuritava gaasi vooga. See tähendab, et uuritava gaasi vood on kaudselt mõjutatud ning uuritava gaasi kontsentratsioon on moonutatud. Lisaks võimaldab pikk sissetõmbe-toru kasutada analüsaatorit tõhusamalt ebasoodsates ilmastikuoludes (näiteks vihma, lume või udu korral). Seetõttu tekib võrreldes *open-path* süsteemiga andmesalvestusel vähem lünkasid. (Foken et al. 2012a)

Closed-path analüsaatorid annavad *open-path* analüsaatorite ees küll suure eelise vähema hulga andmete kadumise näol, kuid vajavad seevastu õigete tulemuste väljendamiseks erinevaid korrektsioone aegviivise (ingl. k. *time delay*), kõrgsagedusliku filtreeringu (ingl. k. *high-frequency filtering*) ja tihedusest tulenevate mõjude suhtes (Foken et al. 2012a). Pika sissetõmbe-toru tõttu tekkivad suured sageduse kaod mõjutavad suuremalt jaolt vee ja teiste kleepuvade gaaside (ingl. k. *sticky gases*) vooge. Samuti tarbib mõõtesüsteem kasutatava pumba tõttu rohkem voolu, mis piirab mõõtmisasukoha valikut (võrreldes madalama voolunõudlusega *open-path* süsteemidega, mille korral energiaallikaks võivad olla näiteks päikesepaneelid). (Burba 2013)

Kahe eelneva kirjeldatud analüsaatori mõõtmist soodustavate tegurite integreerimisel konstrueeriti veel ka kolmandat tüüpi analüsaator, mille puhul on mõõtmisvigade tekkimise võimalus tahetud viia miinimumini (Burba 2013). 2010. aastal väljastati *enclosed* analüsaator (Lisa 3), mis põhineb *open-path* analüsaatori kapseldamisel. Taoline disain sisaldab kiiresti reageerivaid temperatuuri- ja rõhusensoreid ning integreeritud madala voolutarbimisega pumba õhu voolutamiseks (Munger et al. 2012). Nimetatud analüsaator on vastupidav sademetele ja jäätumisele, kasutab

vähem voolu ning vähendab mõõteandmete kadu tänu *closed-path* analüsaatorile sarnasele, kuid lühemale sissetõmbe-torule (Burba 2013).

Integreerides turbulentsete kovariatsioonide meetodiks vajalikud instrumendid (helianemomeeter ja infrapuna gaasianalüsaator), teatati 2012. aastal uut tüüpi gaasivoogude mõõtmise instrumendist. Niinimetatud IRGASON² (ingl. k. *Integrated CO₂/H₂O Open-Path Gas Analyzer and 3D Sonic Anemometer*) (Lisa 4) seisneb *open-path* infrapuna gaasianalüsaatori ja helianemomeetri integreerimisel saadud instrumendist, mida iseloomustab madal voolutarbimine ning omapärane disain, mis võimaldab registreerida turbulentseid gaasivooge efektiivsemalt: IRGASONi puhul kaob ära vajadus korrigeerida infrapuna gaasianalüsaatorist tingitud tuule suuna ja kiiruse moonutus. Et õhu erinevate osakeste kontsentratsiooni mõõdetakse samas kohas, kus ka tuule kiirust ja suunda, kaotatakse ka instrumentide vahelise distantssi ja sünkroonsuse korrigeerimise vajadus. (Campbell Scientific)

Open- ja *closed-path* infrapuna gaasianalüsaatorite mõõtmistega kaasnevaid vigade määrasid käsitleb autor järgnevatel peatükkides.

3.2.2. Helianemomeetrist tingitud vead

Lisaks gaasianalüsaatorite mõõtmistest ja disainist tulenevatele vigadele on oluline ära märkida ka mõõtmistel kasutatava helianemomeetri disainist tulenevad vead.

Helianemomeetri tööprintsip põhineb ultraheli impulsi läbitava tee ajalise erinevuse mõõtmisel kindla kaugusega andurite vahel ning sõltub helikiirusest ja õhutihedusest, mis omakorda sõltub õhutemperatuurist ja gaaside segusuhtest (Munger et al. 2012).

Mõõteriistadena kasutatavad helianemomeetrid võivad välitöödel väära kasutamise tagajärjel tekitada mitmeid vigu. Seda näiteks seadme valesti paigutamise tõttu mõõteplatvormile või vananenud seadmete kasutamine, millele asemele on tänapäevaks välja töötatud täpsemad mõõteriistad. Helianemomeetri korrektne paigutus mõõteplatvormile tähendab, et uurija peab arvestama domineeriva tuule suunaga vastavas mõõtmispunktis ning samuti helianemomeetri kaldega

²Instrumendi uudsuse tõttu puudub autoril ligipääs seadme töökindlust ja andmesalvestuse täpsust kinnitavatele allikatele.

horisontaalsest tasapinnast. (Munger et al. 2012) Munger et al leiab oma 2012. aasta uurimusest, et mõõtmistulemusi mõjutavad samuti vältimatud:

- Külgtuule saastamine (ingl. k. *crosswind contamination*), mis tekib, kui kahe anduri vaheline heliimpulss on moonutatud tuultest risti andurite telje suhtes. Uuemate helianemomeetrite puhul on selle veega juba arvestatud ega vaja kasutajapoolset korrektsiooni.
- Kõrvalekalde nurk tuule horisontaalsest voolujoonest (ingl. k. *attack angle*) on üks teguritest, millega peab arvestama ja mida kontrollima, et vastavad väärtused ei erineks konkreetsele anemomeetrile antud väärtustest.
Kui pideva tuule vektor ei ole horisontaalne, vaid omab teatud nurka horisontaali suhtes, võib mõõdetud tuul oluliselt erineda õigest väärtusest. Helianemomeetrite puhul väljendub antud viga andurite enesevarjutamises või anemomeetri raami tõttu tekkivas õhuvoolu häirituses. Kasutades mittelineaarset, nurgaveast sõltuvat kalibratsiooni, mis oleneb konkreetse anemomeetri suuruselt ja kujult, on võimalik antud viga parandada. (Nakai et al. 2006)
- Anemomeetri paigutus ümbritseva suhtes on samuti oluline, vähendamaks kõrvaliste objektide tekitatud õhuvoolu turbulentsist tulenevate vigade võimalikkust. Et vältida hilisemate korrektsioonide vajalikkust, on mitmed anemomeetrite tootjad mõned korrektsioonid juba seadme tarkvarasse lisanud.
- Instrumendi struktuur ja mõõtmisplatform/teised instrumendid võivad samuti ise olla õhu vabale liikumisele takistuseks, tekitades väikese ja suurema mastaabilisi turbulentsid pööriseid. Taoliste helianemomeetri anduritest tingitud tuule moonutamisest ja varjutamisest tulenevate vigade korrektsioonidega on arvestatud anemomeetrite disainis, kalibreerimises ja andmete töötamise tarkvaras.

Nakai et al leiab oma 2006. aasta uurimuses helianemomeetrite vigade analüüsil, et peamiselt mõjutavad helianemomeetritega kaasnevad vead mõõtmistulemusi olenevalt metsatüübist 2,7% - 13,2% ulatuses, omades väikseimat veamäära turbarabade korral ning suurimat segametsade korral.

3.2.3. Kalibreerimisest tulenev määramatus

Erinevalt helianemomeetritest, vajavad gaasianalüsaatorid korrektsete andmete väljundamiseks pidevat hooldust. Turbulentsete kovariatsioonide süsteemi puhul on oluline instrumentide korrapärase töötamine, mis eeldab mõõteseadmete regulaarset kalibreerimist. Siinjuures on oluline ka mõõtmisüsteemide ülesehituse printsiipide järgimine ja mõõtmispaikade pidev monitooring kindlustamiseks instrumentide korrasoleku. Samas võib ka kalibreerimise hooletu teostamine tekitada vigu mõõteandmetes. (Richardson et al. 2012)

Kalibreerimisest tingitud vead ja kõrvalekalded (ingl. k. *calibration errors and drifts*), mis põhjustavad vigasid mõõtmistulemustes, esinevad igat tüüpi instrumentide puhul. Sellised vead on üldiselt süstemaatilised, kuid omavad pikematel perioodidel vea määra ja suuna teadmatuses tingitult juhuslikku komponenti. Kalibreerimise määramatus tuleneb kas kalibreerimise standardite kontsentratsioonide määramatuses või kalibreerimise enda kõrvalekaldest. (Richardson et al. 2012)

Vigadest tingitud määramatuse vähendamiseks on soovitatav teostada kalibreerimisi regulaarselt ning võimaluse korral automaatselt (Richardson et al. 2012). Kui näiteks *closed-path* analüsaatorite puhul kasutada automatiseeritud kalibreerimisi, tuleb pöörata tähelepanu kalibreerimise ajalisele intervallile, vältimaks sedasi igapäevaselt samal ajal tekkivate lünkade tekkimist. (Munger et al. 2012)

Ocheltree ja Loescher leidsid oma 2007. aastal avaldatud artiklis CO₂ voo kõrvalekalde ühe nädala jooksul ilma kalibreerimiseta olevat ligi 5%.

3.2.4. Instrumentide pinna soojenemisest tingitud viga

Kui mõõteinstrumendi sensor on avatud väliskeskkonnale, on see paratamatult mõjutatud väliskeskkonna tingimustest, mis lisaks rutiinse kalibreerimise vajadusele nõuab ka päikesekiirguse toimel sensori soojenemisega arvestamist. Samuti soojeneb mõõteriista sensor ka enda töötamise tagajärjel. Seetõttu ongi välitingimustest enim mõjutatud avatud sensoriga seadmed, milledega mõõdetud andmed võivad seega erinevate välitingimuste puhul erineda. (Burba et al. 2008)

Open-path analüsaatorite puhul soojeneb mõõteriista sensor päikesekiirguse mõjul. Välisõhu ja sensori enda temperatuuri erinevuste tõttu võib konvektsioonist tingitud

õhu tiheduse väär registreerimine mõõteandmeid mõjutada. Selle parandamiseks on toodud mitmeid meetodeid, kuid üldisele kokkuleppele ühegi korrektsioonimeetodi paremuse kohta ei ole jõutud. (Foken et al. 2012a)

Burba et al koostatud 2008. aastal avaldatud uurimuse kohaselt tingib *open-path* instrumendi kasutamine selle sensori soojenemise tõttu muutuseid CO₂ voo registreerimises. Sellest lähtub, et enim esineb voogude väär hindamist külmemate kliimadega ökosüsteemides. Sel juhul on temperatuuride erinevus instrumendi ja välisõhu korral suurem ning alahinnates seetõttu CO₂ vooge, seob ökosüsteem registreeritud andmete järgi rohkem süsinikdioksiidi kui tegelikult. Aasta lõikes võib see viga olla ligi 100 g C m⁻² (Burba et al. 2008), metsade puhul ka 140 g C m⁻² ning linnakeskkonnas 330 g C m⁻² (Järvi et al. 2009). Vältimaks päikesekiirguse mõjul sensori soojenemist, soovitatakse gaasianalüsaator keerata pahupidi, kuid veidi kalde alla. See võimaldab ka instrumendi enda töötamisest tekkinud soojusel sensori mõõtmisteelt eemalduda ning ka sademete tõttu sensori teele kogunev vesi saab paremini maha voolata. Veel üks võimalus oleks katta analüsaatori mõõtmistee, mis eeldaks lühikese sissetõmbe toru kasutamist (vt. ptk. 3.2.1). (Foken et al. 2012a, Clement et al. 2009)

3.3. Andmete töötlemisega seotud süstemaatilised vead

Lisaks eelnevalt nimetatud võimalikele mõõteinstrumentidest tingitud vigadele esineb ka süsteemi enese kõrvalekalletest tulenevaid süstemaatilisi vigu. Järgnevalt keskendub autor peamistele andmetöötlusega seotud vigade korrigeerimisele nagu lühiimpulsid (ingl. k. *spikes*), tihedusfluktuatsioonid, spektraal ehk sageduskorrektsioonid ning andmehulkades tekkinud lünkade täitmine.

3.3.1. Lühiimpulsid

Mõõtmistulemuste kõrgsageduslik toorandmestik sisaldab tihti impulssmüra, mis väljendub eelkõige iseloomulikes lühiimpulssides, kuid ka müras, väljalangemistes (ingl. k. *dropouts*) ja pidevates väärtustes. Seetõttu on edasise andmete tõlgendamise kvaliteedi tagamiseks vaja rakendada teatud parandusi. (Rebmann et al. 2012)

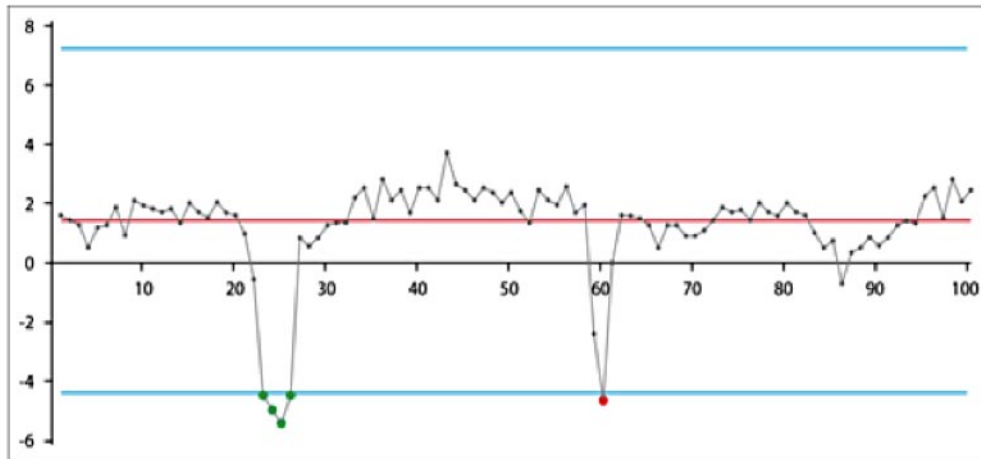
Lühiimpulsid kõrgsageduslikus mõõteandmestikus võivad olla tekitatud nii analüsaatorite (andurite ebatasasus, elektrooniline müra) kui ka helianemomeetri

häiritusest (näiteks mustus, ämblikuvõrgud, sademed) (Richardson et al. 2012). Nende esinemine ja määramatuse suurus omab ökosüsteemi aastase süsiniku bilansi raames väikest mõju, piirnedes enamasti 10 g C m^{-2} (ületades vaid harvadel juhtudel 20 g C m^{-2}) (Papale 2006).

Lühiimpulsse võib ära tunda nende amplituudi, kestuse, äkilisuse kaudu, kusjuures iga piigi detekteerimine ja eemaldamine muudab andmestikku ning on vajalik andmete edasiseks töötlemiseks (Rebmann et al. 2012).

Vickers ja Mahrt töid oma 1997. aasta uurimuses välja instrumentide talitlushäiretest tingitud vigade parandamise kvaliteedi kontrolli meetodi. See seisneb andmesalvestuse vigade markeerimises tugevate lippudega (ingl. k. *hard flags*) ja näiliselt füüsikaliste, kuid edasist andmetöötlust segavate, ebaloomulike käitumuste märkimises pehmete lippudega (ingl. k. *soft flags*). Pehmete lippudega märgitud andmestik ei ole standardsel andmete analüüsil enam kompetentne, kuid võib leida kasutust teistel eesmärkidel. Samuti võib tugevate lippudega märgitud andmestikku edasisel visuaalsel andmeanalüüsil ümber märkida pehmete lippudega, kui uurija peab seda füüsikaliseks nähtuseks.

Antud meetodil arvutatakse keskmine ja standardhälve liikuvale, kindla pikkusega niinimetatud andmeanalüüsi aknale (ingl. k. *window*). Aken liigub ühe punkti kaupa läbi mõõtmistulemuste ning iga punkt, mis ületab 3.5-kordset standardhälbe väärtust, arvatakse lühiimpulsiks, mis kõrvaldatakse ja asendatakse kasutades lineaarset interpoleerimist andmepunktide vahel. Kui registreeritakse neli või enam järjestikust 3.5-kordset standardhälbe väärtust ületavat punkti, ei loeta neid lühiimpulssideks ega ka asendata (Joonis 3). Tervet protsessi korratakse kuni enam ühtegi piiki ei leita. Korduvate analüüside käigus standardhälvet tõstetakse (teise skaneerimise puhul 3.6-kordseks ja nii edasi). Andmekogu markeeritakse tugeva lipuga, kui eraldatud lühiimpulsside hulk ületab 1% andmepunktidest. (Vickers, Mahrt 1997)



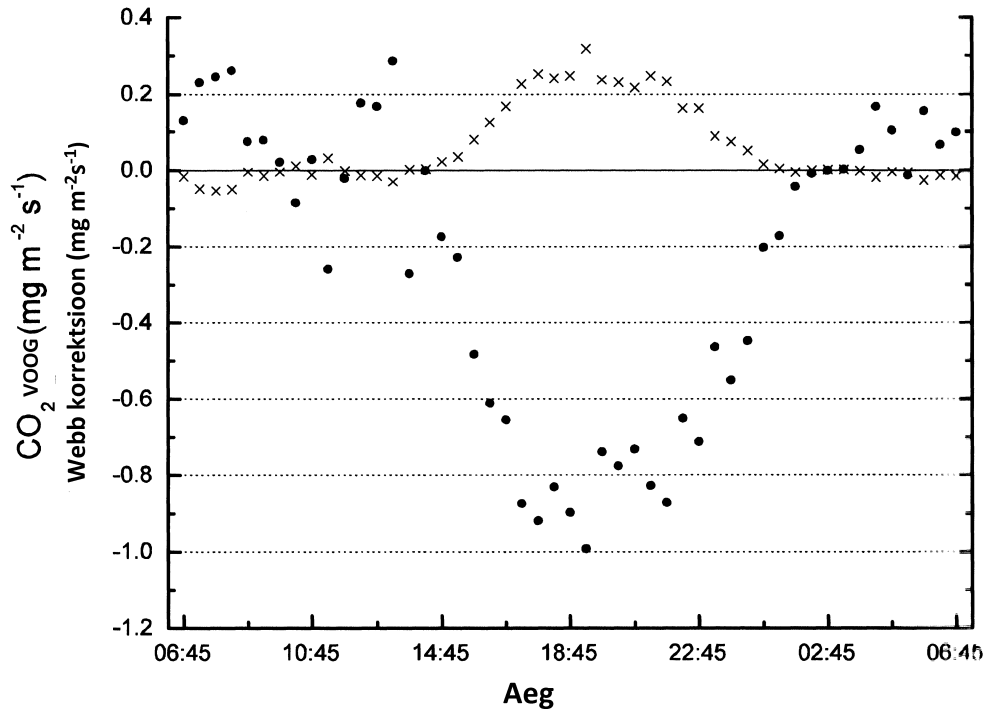
Joonis 3. Näide mõõteandmetest, kus andmepunktid ei ole arvatud lühiimpulsiks (rohelised täpid) ja punktist, mis on märgitud lühiimpulsiks ning seega määratud kõrvaldamisele (punane täpp). Punane joon märgib akna keskmist ja sinised standardhälvet. (*Eddy Pro 3.0 Help and User Guide, 2012*)

3.3.2. Tihedusfluktuatsioonid

Gaasiosakeste kontsentratsiooni korrapärasel mõõtmisel on oluline osa õhu tihedusel. Kui temperatuur ja niiskus mõjutavad uurijale ebaoluliste gaasiosakeste tihedust, siis paratamatult on sellest mõjutatud ka uuritavate osakeste osakaal uuritavas õhus. See võib turbulentsete kovariatsioonide mõõtmisel tekitada märkimisväärseid vigasid andmestikus. (Foken et al. 2012a)

Peamiseks tiheduskorrektsiooniks peetakse WPL-korrektsiooni, (Webb, Pearman, Leuning 1980) mis algselt oli mõeldud veeauru voogude parandamiseks, kuid nüüdseks saanud kolme autori poolt täiustatud korrektsioonimeetodiks gaasivoogude parandamisel (Foken et al. 2012a). Paranduse kasutamine ei ole vajalik, kui mõõdetakse ka uuritava gaasi ja kuiva õhu segusuhet. Mõõtes aga uuritava osakese tihedusfluktuatsioone otse õhust (nagu *open-path* süsteemides), tekib vajadus parandada mõõdetud tulemused soojuse ja veeauru suhtes. (Webb, Pearman, Leuning 1980)

WPL-korrektsiooni mõju illustreerib ka järgnev joonis (Joonis 4):



Joonis 4. Tüüpiline päevane CO₂ voog (•)(mg m⁻²s⁻¹) ja vastav voog pärast WPL-korrektsooni (x). (Liebethal, Foken 2003: 103) (autori poolt modifitseeritud)

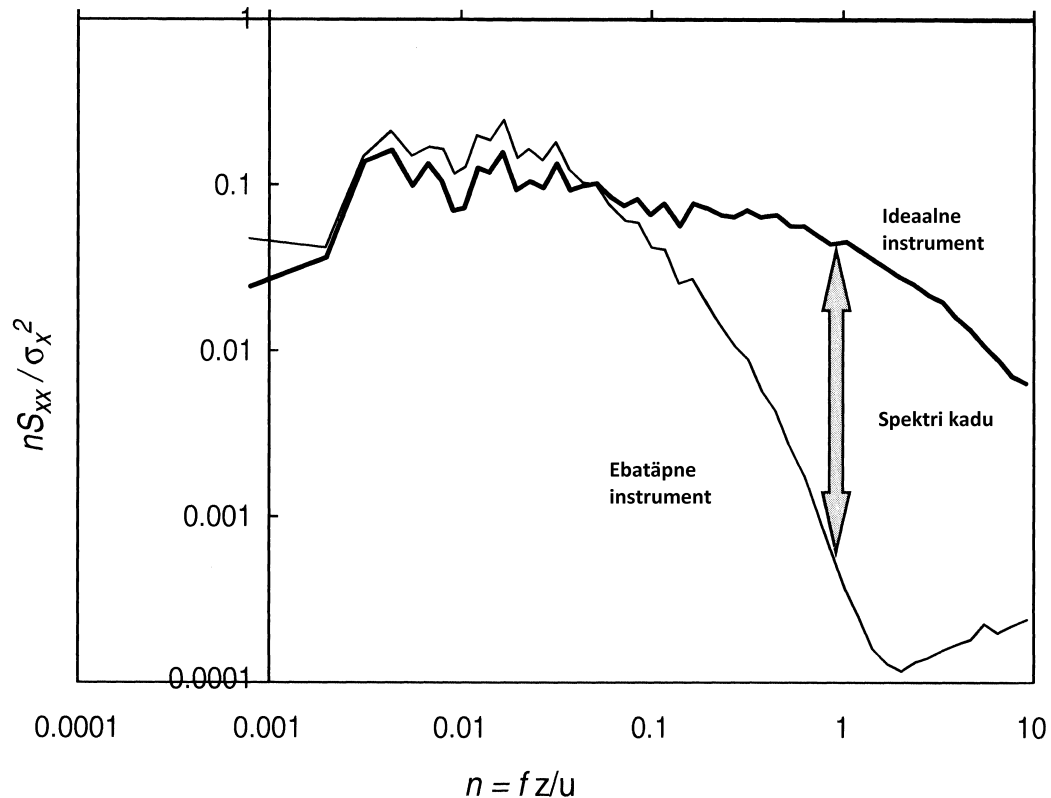
Aastane veamäär, jättes tiheduskorrektsoonidega arvestamata, erineb *open-path* ja *closed-path* instrumentide puhul suuresti, ulatudes vastavalt 190-920 g C m⁻² ja 0-160 g C m⁻² (Ibrom et al. 2007, Richardson et al. 2012).

3.3.3. Spektraalkorrektsoonid

Turbulentsete kovariatsioonide süsteemid, nagu kõik mõõtmisinstrumendid, käituvad filtritena, eemaldades kõrg- ja madalsageduslikke signaali. Kõrgsageduslikud kaod tekivad peamiselt sensorite suutmatuse tõttu registreerida kõrgsageduslikke andmeid, samuti joonkeskmistamise³ (ingl. k. *line averaging*), sensorite eraldatuse tõttu tekkiva ajanihke ja *closed-path* süsteemides ka õhu liikumise läbi torus tõttu. (Foken et al. 2012a)

Kõrgsageduslike andmete kadude mõju kospektri tihedusele on näidatud järgneval joonisel (Joonis 5):

³ Joonkeskmistamine on vajalik, sest sensorid mõõdavad skalaarsuursusi mingil teekonnal (sensorist andurini), mitte ühes kindlas punktis (Van Dijk 2004).

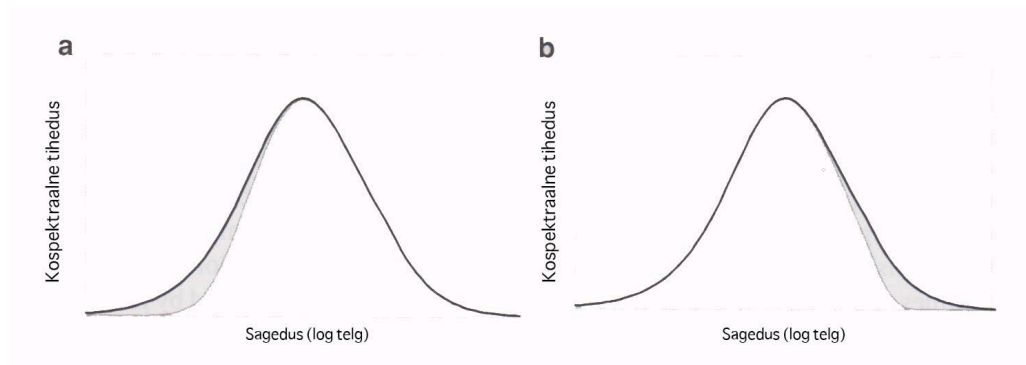


Joonis 5. Normaliseeritud turbulentsi spekter ideaalsele instrumendile, mis mõõdab mõjutamata turbulents-spektrit; ja ebatäpse instrumendiga mõõdetu. Kahe kõvera vahel puuduolev energia peab olema parandatud (n - normaliseeritud sagedus; f - sagedus; z - kõrgus; u - tuule kiirus, S_{xx} - parameetri x energiatihedus; σ_x^2 - parameetri x dispersioon) (Foken et al. 2012a) (autori poolt modifitseeritud)

Kõrgsageduslike kadude voogude arvutamiseks kasutatakse spektraalkorrektsioone (Richardson et al. 2012). Käesolevalt on ära toodud madal- ja kõrgsagedusliku filtreerimise mõjud kospektri kujule ja sellest tulenevale veale, mis mõjutab voogude arvutamist.

Väljendamaks mõõtesüsteemide iseloomulikku summutamist madal- ja kõrgsagedusele, kasutatakse tavaliselt sigmoidseid siirdefunktsioone, mis on signaali mittedummutavas sagedusalas võrdne ühega ja summutatud signaali alas nulliga (Foken et al. 2012b).

Tüüpilise kospektri mõju filtreerimisele on toodud näitena alljärgneval joonisel (Joonis 6), kus joonise a -osa kujutab madalpääsfiltreerimise mõju ja joonise b -osa kõrgpääsfiltri efekti.



Joonis 6. Tüüpiline atmosfäärne kospekter (must joon) koos kõrgpääsfiltri (a, hall joon) ja madalpääsfiltri (b, hall joon) mõjudega. (Foken et al 2012b) (autori poolt modifitseeritud)

Joonisel osad *a* ja *b* näitavad selgelt vastavalt madalpääsfiltreeringutest ja kõrgpääsfiltreeringutest tingitud kovariatsiooni kadu, mis tekitavad alati süstemaatilise vea (Foken et al. 2012b).

Kahe peamise infrapuna gaasianalüsaatoriga tehtud võrdlev uuring tõi välja vajaduse parandada CO₂ vooge aasta lõikes 11% ja 3% ulatuses vastavalt *closed-path* ja *open-path* analüsaatorite kasutamise puhul (Järvi et al. 2009).

3.3.4. Lüngatäite protseduur

Mõõteandmestikus esineb tihti lünkaid, mis võivad olla tekkinud juhuslikult, nagu näiteks volukatkestused, instrumentide kahjustumine (loomade, ümbritsevate puude langemise või äikese toimetel), ebakorrekne kalibreerimine, hooldus, samuti vandalism ja vargused. Lisaks eelmainitud juhtudele võib ka uurija ise mingi osa andmetest välja arvata, kui vastavad tulemused on mõõdetud ebasoodsates tingimustes (Papale 2012). Turbulentsete kovariatsioonide aastane keskmine andmete hulk võib süsteemi rikete tõttu katta uuringute põhjal vaid ligi 65% mõõtmistest, mistõttu on tervikliku andmestiku saamiseks määrava olulisusega lüngatäite (ingl. k. *gap-filling*) protseduur (Falge et al. 2001).

Mõõteandmestiku terviklikkuse vajadus tekib, kui on tarvis arvutada keskmistatud väärtus mingi perioodi kohta. Kuna aga lüngad mõõteandmetes ei teki täiesti juhuslikult, vaid esinevad peamiselt kindlatel perioodidel, näiteks öösel, on puuduvate perioodide leidmiseks vajalik rakendada lüngatäite meetodeid (Papale 2012), milledest olulisemaid nimetab Falge et al oma 2001. aasta uurimuses:

- Esiteks on võimalik kindlate perioodide ööpäevase keskmise andmestiku rakendamine. Selle korral asendatakse puuduvad väärtused eelnevate või järgnevate päevade keskmiste väärtustega vastava perioodi kohta.
- Teiseks enimkasutatud võimaluseks on uurimispunktide kohta koostatud meteoroloogiliste tabelite kasutamine, milles sisaldub vastavate mõõtmiskohtade varasemad andmed keskkonnatingimuste ja iseärasuste kohta. Sel juhul rakendatakse varasemate vaatluste põhjal saadud andmeid puuduvate lünkade täiteks.
- Lisaks kasutatakse mittelineaarse regressiooni meetodit, mille puhul määratakse regressiooni suhe ökosüsteemi CO₂-vahetuse ja seotud kontrollfaktorite vahel mõõtmiskoha ja perioodi kohta.

Aasta jooksul tekkiv määramatus on lüngatäite meetodite rakendamise korral Richardson and Hollinger'i 2007. aasta uurimuse kohaselt 10-30 g C m⁻².

3.4. Öiste voogude korrektsioon

Kõik siiani käsitletud vead on tingitud mõõteinstrumentidest- või süsteemidest endast. Siinjuures erineb neist öösel salvestatud andmete tõlgendamine, sest tekkivad vead on tingitud peamiselt teistsugustest meteoroloogilistest tingimustest. Öisel ajal tekkiv stabiilselt kihistatud õhk toob välja turbulentsete kovariatsioonide mõõtmistes nii instrumentidest kui ka meteoroloogilistest parameetritest tingitud puudused. Neist esimesed tulenevad peamiselt sellest, et mõõteseadmed töötavad paremini just päevasel ajal, kui turbulentsed liikumised on sagedased, piisavalt suured ja võimaldavad instrumentidel andmeid korralikult salvestada. Kuid öösel, stabiilsete atmosfääritingimuste juures, kui turbulentsed liikumised iseloomustab kõrgem sagedus ja vahelduvus, on tõenäolisem, et instrumendid ei suuda kõiki kiireid kõikumisi gaasivoogudes registreerida. Seetõttu esineb öistel mõõtmistel rohkem vigu ning samuti on tarvis arvestada teatud iseärasustega. (Massmann, Lee 2012)

Nimelt koguneb öösel maapinnast tulenev gaas maapinna lähedale (õhu madala turbulentsuse tõttu) ja tekitab allapoole mõõtmisüsteemi varu (ingl. k. *storage*), mis hakkab liikuma niipea kui ilmneb turbulents. Muutliku turbulentsse seisundi korral uhutakse gaas ökosüsteemist välja, kuid seetõttu mõõteandmetes väljenduv suurenenud gaasihulk ei kajasta antud gaasi teket vaadeldud perioodil. Seega on

ilmnev gaasi väljavoolu tihedus öise kogunemise tõttu hommikul perioodil ökosüsteemis liialdatud. Kui ökosüsteem hakkab seejärel uuesti täituma CO₂-ga, ilmneb turbulentsse segunemise vähenemisel näiline madal CO₂ voo tihedus, mis tekitab mõõtmisandmetes vigu. (Baldocchi 2003)

Antud tingimustel mõõdetud voog väljendub lihtsalt viivituses ega oma tähtsust pikaajalisel CO₂ hulga mõõtmisel, kuid põhjustab lühemate perioodide voogude hindamisel vigu. Samuti kandub õine mullas tekkinud CO₂ adveksiooni tõttu uuritavast ökosüsteemist ära, mistõttu on lisaks pooletunnistele mõõtmistulemustele vajalik parandada ka pikaajalisi CO₂ hulka kirjeldavaid mõõtmistulemusi. (Aubinet et al. 2012)

Vastavalt ökosüsteemi kõrgusele ja tihedusele võib nimetatud veamäär aasta lõikes olla viljapõldudel ja rohumaadel 50 g C m⁻² kuni 200-400 g C m⁻² troopiliste metsade puhul (Aubinet et al. 2012).

4. Arutelu ja järeldused

Turbulentsete kovariatsioonide meetodi peamised sagedased vead mõõtmistel võivad summeerides tekitada mõõteandmetes väga suuri vigasid. Meetodile rakendatud peamiste eelduste mittetäitmine on siinjuures olulisim aspekt, millega arvestada, sest vastasel korral võivad mõõdetud andmed tõlgendada uurijale mittevajalikke ja kasutuid mõõtmistulemusi. (Papale 2006) Teiseks olulisemaks korrektsioonimeetodiks peab autor öisete voogude iseärasustega arvestamise vajadust, mille vältimisel võib CO₂ aastase voo arvutamisel tekkida viga kuni 400 g C m⁻² (Aubinet et al. 2012). Samuti on oluline arvestada erinevate tegurite tõttu andmestikus tekkivate lünkadega, millede esinemine võib aasta jooksul vigu tekitada andmetes 10-30 g C m⁻² (Richardson and Hollinger 2007). Lühiimpulsside tõttu tekkiv viga mõõteandmestikus omab aastase süsiniku bilansi raames enamasti väikest mõju, jäädes vahemikku 10-20 g C m⁻² (Papale 2006).

Mõõtmisteks vajalike instrumentidega kaasnevaid vigasid on mingil määral võimalik ennetamise teel vältida, arvestades seejuures instrumentide kasutamise iseärasustega ja korrapärase kalibreerimise vajadusega ning konkreetse uurimispaiga keskkonna- ja kliimatiliste tingimustega. Seadmete kalibreerimine peaks olema rutiinne, sest vastasel korral võib nädala jooksul tekkiv kõrvalekalle mõõtmistulemustes olla ligi 5% (Ocheltree and Loescher 2007). Helianemomeetrite puhul võib seadme disainist ja installatsioonist tingitud vigade määr ulatuda sõltuvalt uuritavast keskkonnast kuni 3% turbarabade ja ligi 13% segametsade puhul (Nakai et al. 2006). Gaasianalüsaatorite korral on olulisim tiheduskorrektsioonide rakendamine mõõdetud andmetele, mis kahe peamise instrumendi tüübi – *open-path* ja *closed-path* – puhul aitab andmetes ära hoida aastas vastavalt 190-920 g C m⁻² ja 0-160 g C m⁻²-suurust viga (Ibrom et al. 2007, Richardson et al. 2012). Samuti on oluline arvestada kõrgsageduslike andmete registreerimisel tekkiva võimaliku veaga, mis võivad aastaseid CO₂ vooge mõjutada *closed-path* ja *open-path* süsteemide puhul vastavalt 11% ja 3% ulatuses (Järvi et al. 2009). *Open-path* analüsaatoritue puhul on oluline sensori soojenemise tõttu ilmnev määramatus, mis võib ulatuda aasta lõikes 140 g C m⁻² metsade puhul kuni 330 g C m⁻² linnakeskkonnas (Järvi et al. 2009).

Kõikide käsitletud vigade koostoime võib mõõdetud tulemusi oluliselt moonutada. Seetõttu on oluline, et turbulentsete kovariatsioonide meetodi kasutaja oleks nendest võimalikult teadlik.

5. Kokkuvõte

Käesolevas bakalaureusetöös käsitles autor atmosfääri-biosfääri vahel toimuvate gaasivahetusprotsesside mõõtmisel kasutatavat turbulentsete kovariatsioonide meetodit. Autor tõi välja peamiste vigade esinemise võimalused süstemaatiliste vigade kohta ning sobivad korrektsioonid nii mõõtmisinstrumentide kasutamisel kui ka andmete töötlemisel.

Turbulentsete kovariatsioonide meetodil tehtud mõõtmised ei ole kunagi täiuslikud, sest instrumentide kasutamisest tulenevad vead, meetoodika eeldused, füüsikalised aspektid ja konkreetse maastikuga seotud iseärasused mängivad suurt rolli potentsiaalsete vigade tekkel. Samas on võimalik sobivaid korrektsioone rakendades tekkivaid vigu parandada.

Mõõtmistel kasutatavate infrapuna gaasianalüsaatorite võrdlemisel ilmneseid kahe peamise erineva instrumenditüübi eelised mõõtmistele teatud tingimustes, aga ka piirangud, vead ja korrektsioonide tegemise vajadus, väljendamaks kvaliteetset andmestikku. Gaasianalüsaatorite puhul on oluline teostada pidevaid kalibreerimisi, mis tagab mõõteandmete pideva täpsuse. Samuti on oluline arvestada *open-path* ja *closed-path* analüsaatorite töökindlusega erinevates keskkonnatingimustes – teine nimetatud analüsaator võimaldab näiteks tänu disainile väiksema hulga andmete kadu äärmuslikemates keskkonnatingimustes, samas kui *open-path* analüsaator võimaldab mõõtmisi teostada ka raskesti ligipääsetavates kohtades, kus puudub seadmete töötamiseks vajaliku voolu kättesaadavus. Lisaks on käsitletud uuemat tüüpi gaasianalüsaatorite eeliseid varasemate instrumentide ees ning peamiseid helianemomeetriga mõõtmistel tekkivaid vigasid.

Järgnevalt käsitles autor mõõtmisandmete töötlemisega seotud peamiselt esinevaid vigu, tuues välja andmestiku lünkade täitmise, lühiimpulsside elimineerimise, tihedusfluktuatsioonide ja spektraalkorrektsioonide peamised olulised aspektid. Eraldi on lühidalt käsitletud öösel stabiilsete atmosfääritingimuste korral mõõdetavate andmete määramatuse põhjused, mõistmaks ööpäevaste gaasivoogude registreerimisel esinevaid iseärasusi.

Turbulentsete kovariatsioonide meetod täidab olulise lünga gaasivoogude bilansi mõõtmistes tervete ökosüsteemide ulatuses. Et tõhusa meetodi tugevusi võimalikult

efektiivselt ära kasutada, on süsteemne mõõtmistest tulenevate vigade parandamine väga suure kaaluga, kui eesmärgiks on reaalse olukorra võimalikult ligilähedane tõlgendamine. Andmete korrigeeringud ei ole triviaalsed, nad võivad summeeritult mõjutada algseid mõõdetud tulemusi suures ulatuses.

6. Summary

The importance of error corrections in eddy covariance method

Current thesis is based on evaluating the importance of dealing with errors associated with atmosphere-biosphere turbulent gas exchange measurements by Eddy Covariance method. The method is based on measurements by certain instruments, such as open-path, closed-path or enclosed infrared gas analyzer and a sonic anemometer, or the newest integrated open-path gas analyzer with sonic anemometer, called IRGASON. Open-path gas analyzers are for instance highly affected by severe weather conditions due to the sensor being exposed to ambient air. Closed-path systems suffer from high-frequency attenuation in long air intake tubes. The enclosed infrared gas analyzer, however, is basically a hybrid of the two latter analyzer types, which results in low power consumption system with short air intake tube. The integrated system of open-path gas analyzer and sonic anemometer appears to be the most suitable system mainly due to its innovative structure, which loses the need for many error correction methods.

The eddy covariance method can be used to indicate the net ecosystem exchange across a large spatial area. It can also be applied for measurements from hours to years. Because measurements are never perfect and are affected by physical phenomena, landscape heterogeneity and environmental conditions, certain corrections have to be applied. In the current thesis the author points out the main sources of errors, resulting from instrumental and data processing problems. The latter include gap-filling procedures, spike removal, density fluctuations and spectral corrections. Also nighttime flux estimation problem is discussed.

Errors resulting from measurements can be extensive due to what it is necessary to consider all the aspects of measurements as a source of error. The need for error correction in eddy covariance method is essential in order to interpret the measured data as realistically as possible.

7. Tänuavaldused

Suur tänu töö juhendajale Kaido Soosaarele, kes pakkus välja põneva teema ja osutas mitmekülgset abi erinevatest aspektidest ja töö vormistamisel.

Samuti tänan oma elukaaslast Triinu Lukas mõistva suhtumise ja mentaalse toe eest.

8. Kasutatud kirjandus

- Aubinet, M., Feigenwinter, C., Heinesch, B., Laffineur, Q., Papale, D., Reichstein, M., Rinne, J. and Gorsel, E. V. In: Aubinet, M., Vesala, T., and Papale, D. (Editors). 2012. *Eddy covariance: a practical guide to measurement and data analysis*. Springer. pp. 133-157.
- Baldocchi, D. D., Falge, E. and Wilson, K. 2001. A spectral analysis of biosphere - atmosphere trace gas flux densities and meteorological variables across hour to multi-year time scales. *Agr Forest Meteorol*, 107(1): 1-27.
- Baldocchi, D. D., Hicks, B. B. and Meyers, T. P. 1988. Measuring biosphere-atmosphere exchanges of biologically related gases with micrometeorological methods. *Ecology*, 69: 1331-1340.
- Baldocchi, D. D. 2003. Assessing ecosystem carbon balance: problems and prospects of the Eddy covariance technique. *Glob Change Biol*, 9: 478-492.
- Burba, G. G. and Anderson, D. J. 2007. Introduction to the Eddy covariance method: General guidelines and conventional workflow. *LI-Cor Biosciences*, 141.
- Burba, G. G., McDermitt, D. K., Grelle, A., Anderson, D. J. and Xu, L. 2008. Addressing the influence of instrument surface heat exchange on the measurements of CO₂ flux from open-path gas analyzers. *Glob Change Biol*, 14: 1854-1876.
- 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. *LI-Cor Biosciences*, Lincoln, NE, USA, 331.
- Burba, G. G., Schmidt, A., Scott, R. L., Nakai, T., Kathilankal, J., Fratini, G., Hanson, C., Law, B., McDermitt, D. K., Eckles, R., Furtaw, M. and Velgersdyk, M. 2012. Calculating CO₂ and H₂O Eddy covariance fluxes from an enclosed gas analyzer using an instantaneous mixing ratio. *Glob Change Biol*, 18: 385-399.
- Clement, R. J., Burba, G. G., Grelle, A., Anderson, D. J. and Moncrieff, J. B. 2009. Improved trace gas flux estimation through IRGA sampling optimization. *Agr Forest Meteorol*, 149(3): 623-638.

- Collins, M., Knutti, R., Arblaster, J., Dufresne, J.-L., Fichefet, T., Friedlingstein, P., Gao, X., Gutowski, W.J., Johns, T., Krinner, G., Shongwe, M., Tebaldi, C., Weaver, A.J. and Wehner, M., 2013. Long-term Climate Change: Projections, Commitments and Irreversibility. In: Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V. and Midgley, P.M. (Editors), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp 1029-1136.
- Desjardins, R.L. 1974. A technique to measure CO₂ exchange under field conditions. *Int J Biometeorol*, 18(1): 76-83.
- Falge, E., Baldocchi, D., Olson, R., Anthoni, P., Aubinet, M., Bernhofer, C., Burba, G., Ceulemans, R., Clement, R., Dolman, H., Granier, A., Gross, P., Grünwald, T., Hollinger, D., Jensen, N., Katul, G., Keronen, P., Kowalski, D., Lai, C. T., Law, B. E., Meyers, T., Moncrieff, J., Moors, E., Munger, J. W., Pilegaard, K., Rannik, Ü., Rebmann, C., Suyker, A., Tenhunen, J., Tu, K., Verma, S., Vesala, T., Wilson, K. and Wofsy, S. 2001. Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange. *Agr Forest Meteorol*, 107(1): 43-69.
- Foken, T., Leuning, R., Oncley, S. R., Mauder, M., Aubinet, M. Corrections and Data Quality Control. In: Aubinet, M., Vesala, T., and Papale, D. (Editors). 2012a. *Eddy covariance: a practical guide to measurement and data analysis*. Springer. pp 85-131.
- Foken, T., Aubinet, M., Leuning, R. The Eddy covariance Method. In: Aubinet, M., Vesala, T., and Papale, D. (Editors). 2012b. *Eddy covariance: a practical guide to measurement and data analysis*. Springer. pp 1-19.
- Garratt, J. R. 1975. Limitations of the Eddy-correlation technique for the determination of turbulent fluxes near the surface. *Bound-Lay Meteorol*, 8: 255-259.

- Ibrom, A., Dellwik, E., Larsen, S. E. and Pilegaard, K. 2007. On the use of the Webb-Pearman-Leuning theory for closed-path eddy correlation measurements. *Tellus B*, 59: 937-946.
- Jain, A., 2009. Global warming and climate change. In: C. N. Hewitt and A. V. Jackson (Editors), *Atmospheric science for environmental scientists*. Wiley-Blackwell, pp 268-271.
- Järvi, L., Mammarella, I., Eugster, W., Ibrom, A., Siivola, E., Dellwik, E., Keronen, P., Burba, G. and Vesala, T. 2009. Comparison of net CO₂ fluxes measured with open- and closed-path infrared gas analyzers in an urban complex environment. *Boreal Environ Res*, 14: 499-514.
- Keeling, R.F., S.C. Piper, A.F. Bollenbacher and J.S. Walker. 2009. Atmospheric CO₂ records from sites in the SIO air sampling network. In *Trends: A Compendium of Data on Global Change*. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., U.S.A.
- Kessomkiat, W., Franssen, H. J. H., Graf, A. and Vereecken, H. 2013. Estimating random errors of Eddy covariance data: An extended two-tower approach. *Agr Forest Meteorol*, 171: 203-219.
- Liebenthal, C. and Foken, T. 2003. On the significance of the Webb correction to fluxes. *Bound-Lay Meteorol*, 109(1): 99-106.
- Massman, W. J. and Lee, X. 2002. Eddy covariance flux corrections and uncertainties in long-term studies of carbon and energy exchanges. *Agr Forest Meteorol*, 113(1): 121-144.
- Munger, J. W., Loescher, H. W., Luo, H. Measurement, Tower, and Site Design Considerations. In: Aubinet, M., Vesala, T., and Papale, D. (Editors). 2012. *Eddy covariance: a practical guide to measurement and data analysis*. Springer. pp 21-58.
- Nakai, T., Van Der Molen, M. K., Gash, J. H. C., and Kodama, Y. 2006. Correction of sonic anemometer angle of attack errors. *Agr Forest Meteorol*, 136(1): 19-30.

- Noe, S. M., Kimmel, V., Hüve, K., Copolovici, L., Portillo-Estrada, M., Püttsepp, Ü., Jõgiste, K., Niinemets, Ü., Hörtnagl, L. and Wohlfahrt, G. 2011. Ecosystem-scale biosphere-atmosphere interactions of a hemiboreal mixed forest stand at Järvelja, Estonia. *For Ecol Manage*, 262 (2011): 71-81.
- Ocheltree, T. W. and Loescher, H. W. 2007. Design of the AmeriFlux portable eddy covariance system and uncertainty analysis of carbon measurements. *J Atmos Ocean Technol*, 24: 1389-1406.
- Papale, D., Reichstein, M., Aubinet, M., Canfora, E., Bernhofer, C., Kutsch, W., Longdoz, B., Rambal, S., Valentini, R., Vesala, T. and Yakir, D. 2006. Towards a standardized processing of Net Ecosystem Exchange measured with eddy covariance technique: algorithms and uncertainty estimation. *Biogeosciences*, 3: 571-583.
- Papale, D. 2012. Data Gap Filling. In: Aubinet, M., Vesala, T., and Papale, D. (Editors). *Eddy covariance: a practical guide to measurement and data analysis*. Springer. pp 159-172.
- Petit, J.R., Mounier, L., Jouel, J., Korotkevich, Y.S., Kotlyakov, V.I. and Lorius, C. 1990. Paleoclimatological and chronological implications of the Vostok core dust records. *Nature*, 343: 56-58.
- Pomerants, M. 2010. Kliimamuutus – mis see on? In: Pomerants, M., Jüssi, M., Aleksejeva, V. and Lahtvee, V. (Editors). *Kliimamuutused ja meie*. Riigikogu kantselei, Tallinn. pp 5-9.
- Rebmannm, C., Kolle, O., Heinesch, B., Queck, R., Ibrom, A., Aubinet, M. Data Acquisition and Flux Calculations. In: Aubinet, M., Vesala, T., and Papale, D. (Editors). 2012. *Eddy covariance: a practical guide to measurement and data analysis*. Springer. pp 59-83.
- Reynolds, O. 1895. On the dynamical theory of incompressible viscous fluids and the determination of criterion. *Phil Trans Roy Soc London A*174: 935-82.
- Richardson, A. D., Aubinet, M., Barr, A. G., Hollinger, D. Y., Ibrom, A., Lasslop, G., Reichstein, M. Uncertainty Quantification. In: Aubinet, M., Vesala, T., and Papale, D. (Editors). 2012. *Eddy covariance: a practical guide to measurement and data analysis*. Springer. pp 173-209.

- Richardson, A. D. and Hollinger, D. Y. 2007. A method to estimate the additional uncertainty in gap-filled NEE resulting from long gaps in the CO₂ flux record. *Agr Forest Meteorol*, 147: 199-208.
- Van Dijk, A., Moene, A. F. and De Bruin, H.A.R. 2004. The principles of surface flux physics: theory, practice and description of the ECPACK library, Internal report 2004/1, Meteorology and air quality group, Wageningen University, Wageningen, the Netherlands, 99.
- Vickers, D. and Mahrt, L. 1997. Quality control and flux sampling problems for tower and aircraft data. *J Atmos Oceanic Tech*, 14(3): 512-526.
- Webb, E. K., Pearman, G. I. and Leuning, R. 1980. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer. *Q J Roy Meteor Soc*, 106(447): 85-100.
- Wofsy, S. C., Goulden, M. L., Munger, J. W., Fan, S.-M., Bakwin, P. S., Daube, B. C., Bassow, S. L. and Bazzaz, F. A. 1993. Net exchange of CO₂ in a mid-latitude forest. *Science*, 260: 1314-1317.

Interneti allikad:

- Earth System Research Laboratory, Global monitoring division. "Carbon cycle gases, Mauna Loa, Hawaii, United States time series.": <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/dv/iadv/graph.php?code=MLO&program=ccg&type=ts> (külastatud 27.05.2014).
- EddyPro 3.0 Help and User's Guide: "Despiking and Raw Data Statistical Screening.": http://envsupport.licor.com/help/EddyPro3/Content/Topics/Despiking_Raw_Stat_Screening.htm (külastatud 20.05.2014).
- Fluxnet 2014. "Fluxnet networks." <http://fluxnet.ornl.gov/maps-graphics> (külastatud 20.05.2014).
- Campbell Scientific, Inc. "Irgason: Integrated gas analyzer and sonic anemometer." <http://www.campbellsci.com/irgason> (külastatud 20.05.2014).
- LI-COR Environmental. "LI-7500A Open Path CO₂/H₂O Analyzer."

http://www.licor.com/env/products/gas_analysis/LI-7500A/system_components.html (külastatud 25.05.2014).

LI-COR Environmental. "LI-7000 CO₂/H₂O Analyzer."

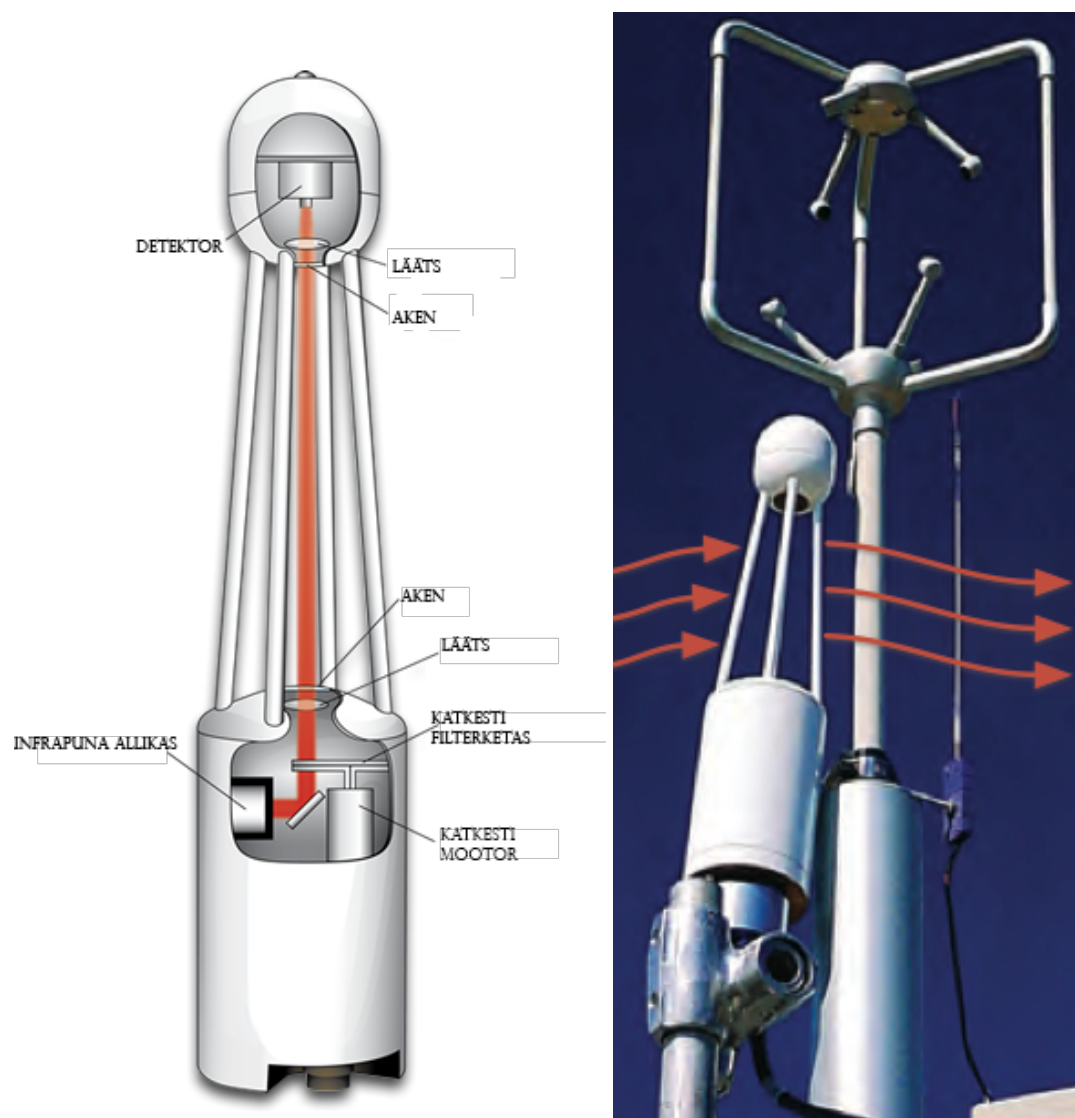
http://www.licor.com/env/products/gas_analysis/LI-7000/ (külastatud 25.05.2014).

LI-COR Environmental. "LI-7200 Enclosed CO₂/H₂O Analyzer."

http://www.licor.com/env/products/gas_analysis/LI-7200/system_components.html (külastatud 25.05.2014).

LISAD

Lisa 1. *Open-path* infrapuna gaasianalüsaator



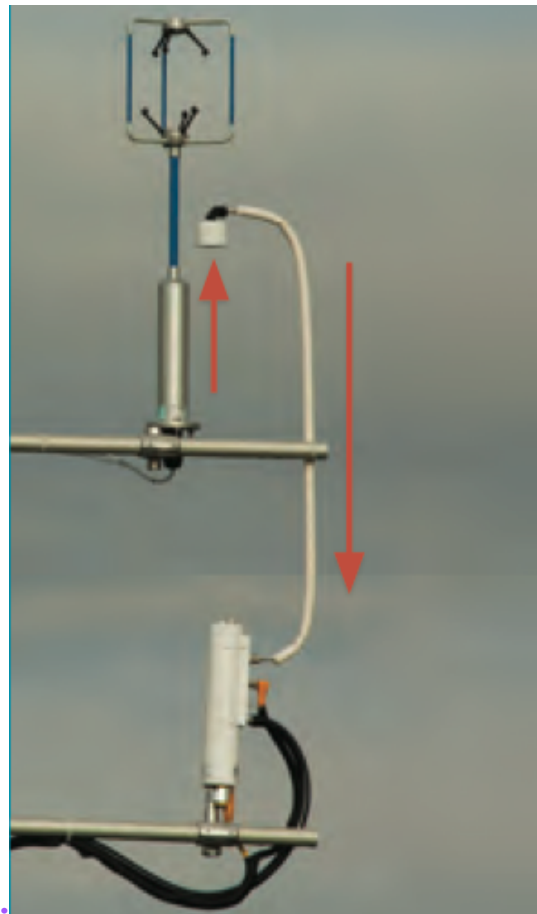
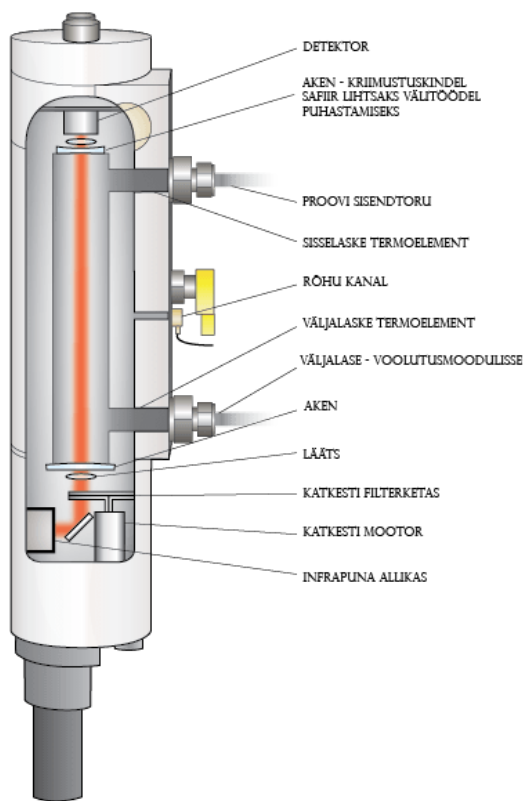
(Allikas: LI-COR Environmental, LI-7500A Open Path CO₂/H₂O Analyzer, 2014; Burba 2013)
(autori poolt modifitseeritud)

Lisa 2. *Closed-path* infrapuna gaasianalüsaator



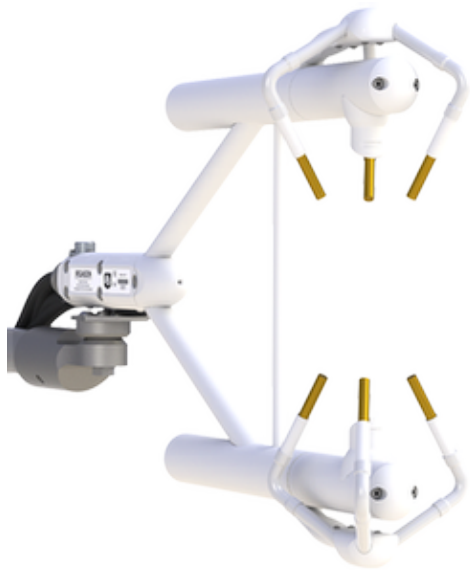
(Allikas: LI-COR Environmental, LI-7000 CO₂/H₂O Analyzer, 2014; Burba 2013)

Lisa 3. *Enclosed* gaasianalüsaator



(Allikas: LI-COR Environmental, LI-7200 Enclosed CO₂/H₂O Analyzer, 2014; Burba 2013)
(autori poolt modifitseeritud)

Lisa 4. IRGASON (integreeritud infrapuna gaasianalüsaator ja helianemomeeter)



(Allikas: Campbell Scientific, Inc. IRGASON: Integrated gas analyzer and sonic anemometer, 2014)

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

Mina _____ Erki Ani _____

(autori nimi)

(sünnikuupäev: 03.22.1990)

annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

Korrektsoonide olulisus turbulentsete kovariatsioonide meetodi kasutamisel

(lõputöö pealkiri)

mille juhendaja on _____ Kaido Soosaar _____

(juhendaja nimi)

reprodutseerimiseks säilitamise ja üldsusele kättesaadavaks tegemise eesmärgil, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace-is lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tartu Ülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace'i kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

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

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

Tartus **pp.kk.aaaa**