

**VILJELYMAAN HIILIDIOKSIDIVUON MITTAAMISEN JA  
MALLINTAMISEN MAHDOLLISUUDET**



Ammattikorkeakoulututkinnon opinnäytetyö

Forssa, Tieto- ja viestintätekniikka, biotalous

2020

Jiri Luojukoski

Tieto- ja viestintätekniikka, biotalous  
Forssa

---

<b>Tekijä</b>	Jiri Luojukoski	<b>Vuosi</b> 2020
<b>Työn nimi</b>	Viljelymaan hiilidioksidivuon mittaamisen ja mallintamisen mahdollisuudet	
<b>Työn ohjaaja</b>	Ari Hietala	

---

## TIIVISTELMÄ

Hiilidioksidivuon vaihtelua viljelymailla on tutkittu melko vähän. Suurin osa aiemmista tutkimuksista on keskittynyt metsä- ja suoalueiden alueelliseen vaihteluun. Ympäristömuuttujat, kasvillisuuden määrä ja lämpötila vaikuttavat oletettavasti hiilidioksidivuohon. Lisäksi viljelylajien ja erilaisten viljelytoimenpiteiden voidaan odottaa vaikuttavan hiilidioksidivuon voimakkuuteen.

Kammiomittauksessa hiilidioksidivuota tutkitaan asettamalla valoa läpäisevä kammio maahan, jonka sisältä hiilidioksidipitoisuutta mitataan tietyn väliajoin. Tuubimittauksessa sen sijaan hiilidioksidianturi asetetaan valoa läpäisemättömän putken sisälle lähelle maaperää. Tällä menetelmällä voidaan todentaa lähinnä hiilidioksidin maahengityksen voimakkuutta.

Hiilidioksidivuomittauksia ei toimeksiantaja Datasense Oy:n toimesta ollut ennen toteutettu, joten ennen varsinaista tutkimusta järjestelmä piti suunnitella ja valmistaa. Tutkimuksen kannalta merkittävää oli menetelmän käyttökelpoisuus ja luotettavuus. Kammiomenetelmä pitää olla käytettävissä haastavissakin olosuhteissa. Menetelmän haasteina olivat mittausjaksojen aikavälien määrittäminen ja mahdollisimman vähän sähköä kuluttavat järjestelmän osat. Koska viljelymailla ei verkkosähköä ole saatavilla, verkkoratkaisuksi valittiin NB-IoT-verkko ja sisääntulojännitteeksi aurinkokennolla latautuva akku. Testitulokset ja aikaisempi tutkimusaineisto osoittivat, että kammiomenetelmä on luotettava paikallisen hiilidioksidivuon määrittämisessä.

**Avainsanat** Hiilidioksidivuo, respiraatio, kammiomenetelmä, maanviljely

**Sivut** 37 sivua

Degree Programme in Information and Communication Technology, Bioeconomy  
Forssa

---

<b>Author</b>	Jiri Luojukoski	<b>Year</b> 2020
<b>Subject</b>	Possibilities of Measuring and Modeling Carbon Dioxide Flux in Farming Sector	
<b>Supervisor</b>	Ari Hietala	

---

ABSTRACT

The spatial distribution of carbon dioxide fluxes in farming sector is not a very common subject of study. The focus of the previous studies has been on forest or peatland areas. Environmental factors, amount of vegetation and temperature are expected to have an impact on carbon dioxide flux level. It is also expected to have variety in carbon dioxide fluxes between different cultivated plans and planning procedures.

The chamber method is commonly used to measure the carbon dioxide flow. The translucent chamber is put on the ground. The CO<sub>2</sub> sensor is fitted inside the chamber and the CO<sub>2</sub> concentration is measured between certain time intervals, whereas in the tube method the CO<sub>2</sub> sensor is fitted inside the tube near to the ground. This method is commonly used when measuring the ground respiration.

The commissioner of this thesis was Datasense Oy. The carbon dioxide flux measurement was a new area of study for the company. Before the implementation of the study, the system had to be planned and produced. The evaluation of the usability and reliability was a significant part of the study. It was possible to use the chamber method even in difficult and challenging circumstances of which specifying measuring time periods and minimizing electric consumption were the most challenging ones. Since there is no usual power network in the farming sectors available, the input power (solar panel and battery) and network system (NB IoT) had to be executed in another way. This thesis and previous studies have pointed out that the chamber method is reliable in spatial carbon dioxide flux measurements.

**Keywords** Carbon dioxide flux, respiration, chamber method, farming

**Pages** 37 pages

# SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	1
2	HIILIDIOKSIDIN VAIKUTUKSET IHMISELLE JA YMPÄRISTÖLLE .....	2
3	MAAPERÄN HIILIVARANNOT .....	3
4	HIILEN MERKITYS MAANVIJELYSSÄ.....	5
5	HIILIDIOKSIDIPITOISUUDEN MITTAAMINEN JA MALLINTAMINEN .....	6
5.1	Ideaalikaasulaki .....	6
5.2	Infrapunateknologia.....	8
5.3	Muut mittaustekniikat .....	8
5.4	Kasvuston hiilidioksidipitoisuusmittaukset.....	9
5.5	Hiilidioksidivuon esittäminen.....	9
6	AIEMMAT TUTKIMUKSET.....	10
7	TUTKIMUKSESSA KÄYTETTÄVÄT MITTALAITTEET JA MENETELMÄT .....	19
7.1	Kammiojärjestelmän toimintaperiaate.....	20
7.2	Vaisalan hiilidioksidimittapäät .....	22
7.3	Apogeen PAR -anturi .....	23
8	KOEKENTTÄOLOSUHTEET .....	24
9	TULOKSET .....	27
10	JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA .....	32
	LÄHTEET .....	34

## 1 JOHDANTO

Tässä tutkimustyössä selvitettiin viljelymaiden potentiaalia toimia hiilinieluna. Tutkimuksessa pohdittiin maaperän ja kasvualustan hiilidioksidimittauksen mahdollisuuksia, tavoitteita, ongelmia ja tarpeita. Lisäksi selvitettiin, minkälaisia tutkimuksia on aikaisemmin tehty. Työ aloitettiin kesällä 2019 esiselvityksellä ja päätettiin kevään 2020 kenttäkokeisiin ja tulosten analysointiin. Tutkimuksen toimeksiantajana oli salolainen ohjelmistoyritys Datasense Oy.

Hiilidioksidin vapautumista ilmakehään pyritään ehkäisemään esimerkiksi sitomalla hiiltä maaperään, joten tärkeässä asemassa opinnäytetyön kannalta on maaperän CO<sub>2</sub> -pidätyskyky. Tutkimuksessa suunniteltiin järjestelmä hiilidioksidin mittaamiseen maaperän, ilmakehän ja kasvuston välillä. Järjestelmän sähkönkulutus pyrittiin minimoimaan verkkoratkaisun ja sähkönsyötön valinnoilla.

Hallitustenvälisen Ilmastonmuutospaneelin (IPCC) viidennen ilmastonmuutoksen arviointiraportin mukaan hiilidioksidin ja muiden kasvihuonekaasujen pitoisuudet ilmakehässä ovat nyt korkeimmillaan yli 800 000 vuoteen. Ihmiskunnan aiheuttamat hiilidioksidipäästöt ovat kasvaneet 1700-luvulta lähtien. Ennen teollistumista hiilidioksidipitoisuus ilmakehässä oli 40 prosenttia alhaisempi kuin nykyään, joka johtuu pääosin fossiilisten polttoaineiden käytöstä. Noin 30 prosenttia ihmisen tuottamista CO<sub>2</sub>-päästöistä on imeytynyt merivesiin, mikä on johtanut vesistöjen happamoitumiseen. Myös maankäytön muokkaaminen on IPCC:n mukaan lisännyt hiilidioksidipäästöjä. Kasveihin ja maaperään on CO<sub>2</sub>:ta sitoutunut noin 25 prosenttia. Arvion mukaan ihmiskunnan tuottamasta ylimääräisestä hiilidioksidista 15–40 prosenttia on jäljellä ilmakehässä vielä tuhannen vuoden kuluttua. Ilmastonmuutoksen vaikutukset näkyvät vielä satojen tai tuhansien vuosien päästä, ellei hiilidioksidia poisteta ilmakehästä keinotekoisesti tai päästöjä saada hallintaan. (IPCC, 2013)

Ilmastonmuutos vaikuttaa kulutustottumuksiin ja kuluttajat haluavat yhä enemmän tietoa tuotteiden hiilijalanjäljestä. Elintarviketuottajat haluavat palvella kuluttajia tarjoamalla heille tietoa tuotteidensa ilmastovaikutuksista. Alkutuotannolla ja maanmuokkaustoimenpiteillä saattaa olla hyvinkin suuri merkitys lopputuotteen hiilijalanjälkeen, mistä syystä viljelijöitä halutaan kouluttaa vähähiilisempään tuotantoon. Viljelymaiden toimimisesta hiilinieluna tiedetään vielä melko vähän, mistä syystä on tärkeää, että erilaisia menetelmiä kehitetään jatkuvasti tarkkaan hiilidioksidipäästöjen mittaamiseen.

## 2 HIILIDIOKSIDIN VAIKUTUKSET IHMISELLE JA YMPÄRISTÖLLE

Hiilidioksidi on yhdestä hiiliatomista ja kahdesta happiatomista koostuva, normaaliolosuhteissa väritön, mauton ja myrkytön kemiallinen kaasu, jota vapautuu kaikessa palamisessa. Merkittävä osa ihmiskunnan aiheuttamista hiilidioksidipäästöistä on Kuntien kestävän kehityksen indikaattorien CO<sub>2</sub>-raportin mukaan peräisin fossiilisten polttoaineiden käytöstä. Myös ihmisten, eläinten ja kasvien hengityksestä vapautuu hiilidioksidia. Kasvit kykenevät soluhengityksen lisäksi sitomaan hiilidioksidia ilmasta ja muuttamaan sen hapeksi fotosynteesissä. (MayorsIndicators, n.d.)

Korkeille CO<sub>2</sub>-pitoisuuksille altistuminen voi olla ihmiselle kohtalokasta. Taulukosta 1 selviää hiilidioksidipitoisuuden tyypilliset arvot eri olosuhteissa ja niiden vaikutukset ihmiseen. CO<sub>2</sub>-pitoisuuksia ilmaistaessa yksikkönä käytetään usein tilavuuden miljoonasosaa, ppm. Nykyilmakehän hiilidioksidipitoisuus on keskiarvoltaan hieman yli 400 ppm. (Sarvikas ym., 2017, s. 204; ks. myös Vaisala, 2013)

Taulukko 1. Hiilidioksidipitoisuuksien vaikutus ihmiseen (Vaisala, 2013)

Pitoisuus	Vaikutus
350–450 ppm	Tyypillinen ilmakehän pitoisuus
600–800 ppm	Hyvä sisäilman laatu
1000 ppm	Tyydyttävä sisäilman laatu
5000 ppm	Keskimääräisen altistumisen raja-arvo 8 h aikana
6000–30000 ppm	Vaara, ainoastaan lyhyt altistuminen
3–8 %	Nopeutunut hengitystiheys, päänsärky
>10 %	Huonovointisuus, oksentelu, tajuttomuus
>20 %	Nopea tajuttomuus, kuolema

Maapallon varhainen hiilidioksidipitoisuus on ollut sata- tai jopa tuhatkertainen nykyiseen verrattuna. (Sarvikas ym., 2017, s. 167). Dinosaurusten aikakaudella 80–100 miljoonaa vuotta sitten myös maapallon keskilämpötila on ilmasto-oppaan mukaan ollut todella lämmin. Miljoonien vuosien aikajaksolla ilmakehän hiilidioksidipitoisuus ja keskilämpötila ovat siis pienentyneet. 20 000 vuotta sitten keskilämpötila oli kuitenkin noin kuusi astetta nykyistä alhaisempi, joten lyhyemmällä aikajaksolla tarkastettuna ilmasto on lämmennyt ja tällä hetkellä elämmekin jääkausien välistä lämpimämpää ajanjaksoa. Ilmasto muuttuu luonnostaankin ja esimerkiksi auringon säteilystä, ja tulivuorenpurkauksista johtuvia lyhytaikaisia ilmastonmuutoksia on myös ollut. Vuonna 1991 Filippiineillä sattunut Pinatubo-tulivuoren purkaus pysäytti ilmaston lämpenemisen useaksi vuodeksi. (Ilmasto-opas, n.d.)

Hiilidioksidi on hiilen kiertokulun kannalta merkittävä tekijä luonnon, ihmisten ja eläinten vuorovaikutuksessa ilmakehän kanssa. Hiilidioksidi päästää auringon säteilyn lävitseen maahan, mutta estää lämmön karkaimisen takaisin avaruuteen, jolloin ilmasto lämpenee. Ihmiskunnan tuottamat kasvihuonekaasut ovat Hallitustenvälisen Ilmastopaneelin mukaan 1950-luvun jälkeisellä teollisella aikakaudella pääasiallinen syy ilmaston lämpenemiseen. Hiilidioksidin osuus ihmisen aiheuttamista kasvihuonekaasuista on merkittävin, koska sen pitoisuus ilmakehässä on korkein ja se poistuu ilmakehästä hitaasti. (IPCC, 2013)

Ilmasto on lähes kaikkien ilmastomuutoksen raportin mukaisten skenaarioiden mukaan lämpenemässä tämän vuosisadan aikana. Maapallon keskilämpötila nousee ennen vuotta 2100 vähintään 1,5 asteella. Useimpien skenaarioiden mukaan lämpötila tulee nousemaan yli 2 asteella ennen vuosisadan loppua. Ilmaston lämpeneminen tulee todennäköisesti jatkuamaan myös vuoden 2100 jälkeen. (IPCC, 2013)

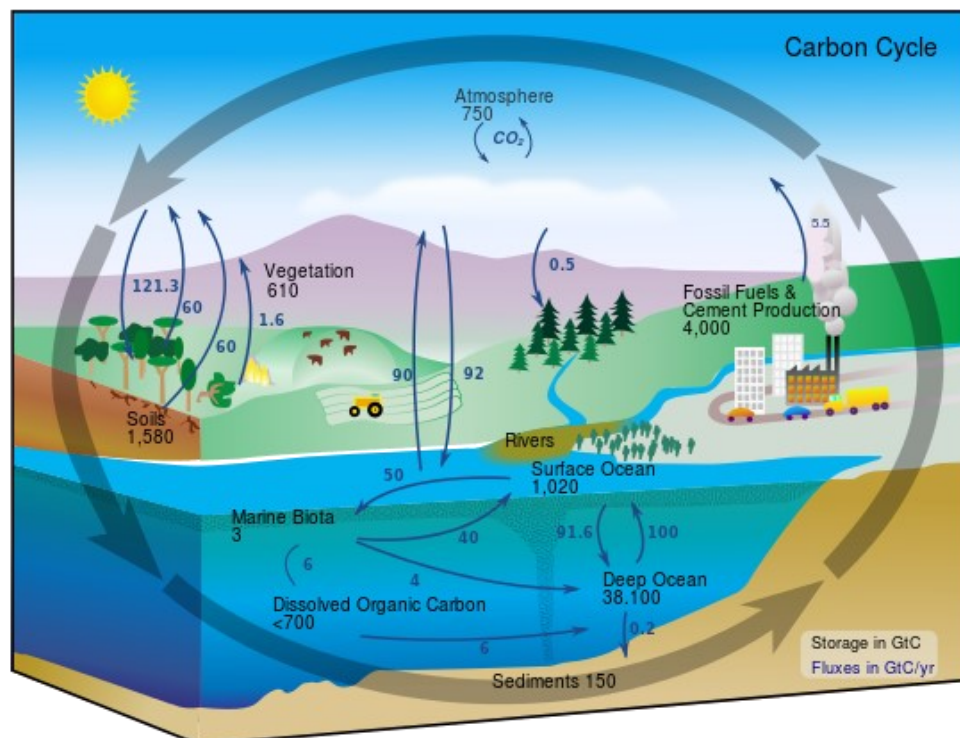
Hiilidioksidilla on myös positiivisia vaikutuksia luonnolle. Kasvien kyky yhteyttää paranee ilmakehän hiilidioksidipitoisuuden kasvaessa, mikä lisää viljelykasvien tuottavuutta. Turun kasvibiologian tutkija Esa Tyystjärvi kertoi Loimu-lehden haastattelussa, että ”uudet tutkimukset kumoavat 1970-luvulta asti olleita ajatuksia. Viljelykasvien sadon määrä todella kasvaa, jos ilmassa on enemmän hiilidioksidia.” Tyystjärven mukaan ilmastomuutosta pitäisi pyrkiä estämään kasvien avulla, koska ne ovat ilmakehän hiilidioksidin tasapainottajia. (Aaltonen, 2019)

### 3 MAAPERÄN HIILIVARANNOT

Maaperään on varastoitunut valtamerien jälkeen toiseksi eniten hiiltä. Suomen viljelymaiden hiilivarastot ovat kuitenkin pienentyneet hiilidioksidin vapautuessa yhä enemmän ilmakehään tai vesistöihin. Erityisen suurta hiilivarastojen pieneneminen on turvemaidella, joiden hiilipitoisuus vähenee 5000 kilogrammaa hehtaaria kohden vuodessa. Kivennäismailla hiilipitoisuus vähenee vuosittain noin 220 kilogrammaa hehtaarilta. EU-27-alueen maaperän hiilivaranto on 75 miljardia tonnia, josta 50 prosenttia sijaitsee Irlannissa, Suomessa, Ruotsissa ja Iso-Britanniassa. Suomessa hiilivarasto on pienentynyt, mutta esimerkiksi Ruotsissa kehitys on käänntynyt nousevaksi, mahdollisesti hevosten määrän lisääntyessä. Euroopan maaperä keskimäärin sitoo hiiltä, mutta viljelymaat ovat hiilen lähde. Viljelymaiden hiilivarannon pienenemiseen on useita syitä: pellot ovat nuoria, monivuotisia kasveja, lantaa ja kasvintähteitä on yhä vähemmän sekä ilmastomuutoksen kiihdyttämä hajotus. Viljelymaan hiilivaraston muutoksiin voidaan vaikuttaa viljelymenetelmillä ja kasvivalinnoilla. Suomessa hiiliviljelyn tavoitteena on muuttaa kivennäismaat hiilinieluksi ja hillitä turvepeltojen kasvihuonepäästöjä. (European Environment Agency, 2017; ks. myös European Environment Agency, 2012)

Maaperää hoidetaan lisäämällä siihen orgaanista biomassaa, jota syntyy esimerkiksi maaperän hiilensidontaprosessissa kasvien ilmakehästä yhteyttämällä poistaman hiilidioksidin muuttuessa kasviainekseen sitoutuneeksi hiileksi. Hiili sitoutuu ensin kasveihin ja yhteyttämästään hiilestä kasvit käyttävät noin puolet kasvuun, josta osa kohdennetaan helposti laastuviin kasvintähteisiin. Kasvintähteet jäävät yleensä maaperään hajoamaan, jolloin ne muodostavat maan pinnalle kärkekerroksen, jota mikrobit hajottavat vapauttaen samalla hiilidioksidia. Mutta jos orgaanista aineesta päätyy enemmän maaperään kuin hajotukseen, voi hiilivarasto kasvaa Luonnonvarakeskuksen Kristiina Reginan esityksen mukaan. Hajotuksen voimakkuuteen vaikuttavat kasvintähteen kemiallinen laatu, viljelymenetelmät, ympäristötekijät ja ilmastonmuutos sekä maaperän mikrobit. Yhteytystuotoksen jäännöstuotteena kasvit vapauttavat hiilidioksidia noin puolet yhteyttämällä sidotusta hiilestä hengittämällä. (Regina, 2018)

Yhteytykseen tarvitaan valoa, kun taas hengitystä tapahtuu jatkuvasti. Lämmin ja valoisa ilma kiihdyttää kasvin hengitystä. Osa maan hiilidioksidipäästöistä muodostuu kasvien juurista, joiden kasvu ja ylläpito kuluttavat energiaa eli vapauttavat hiilidioksidia. Maahengitys on suurinta lämpimässä ja kohtuullisen kosteassa maassa. Hiilen kiertokulku luonnossa on esitetty kuvassa 1. (Regina, 2018)



Kuva 1. Hiilen kiertokulku luonnossa. (Wikimedia Commons 2008)



## 4 HIILEN MERKITYS MAANVIJELYSSÄ

Hiiliviljely vähentää maatalouden kasvihuonepäästöjä ja näin ollen hillitsee ilmastonmuutosta viljelytoimenpiteiden avulla. Mikäli maaperä on hyvässä kunnossa, viljelymaiden tuottavuus ja kestävyys paranevat. Hyväkuntoinen maaperä edistää biodiversiteettiä ja vähentää ravinnekuormitusta vesistöihin, koska vesi ja ravinteet pidättäytyvät maaperässä tehokkaammin. Hiilivaraston kasvattaminen kuitenkin kumoutuu helposti, koska hiilen hävikki on nopeampaa kuin sen kertyminen. Maaperän hiilipitoisuutta voitaisiin viljelymailla lisätä lisäksi esimerkiksi kevennetyllä muokkauksella ja suorakylvöllä, kasvipeitteisyyttä ja kasvuaikaa lisäämällä, nurmella tai muilla typensitojilla monipuolisessa viljelykierrossa, kasvintähteiden palauttamisella, biohiilellä sekä lannalla. Nurmella on erityisen suuri rooli hiilensidonnassa ja nurmen kynnön on todettu aiheuttavan suuren hiilivaraston laskun. Suomen suurimmat ongelmat hiilivaraston kannalta ovat turvepellot ja lyhyt kasvukausi, joten kasvipeitteisyys ja tehostetut strategiat turvepelloille ovat olennaisia. (Regina, 2018)

Maaperän hiilipitoinen aines toimii ravinteiden ja veden varastona, joten hiilen merkitys viljelylle on arvokas. Näin ollen hiilen määrän ja muutosten mittaaminen on erityisen tärkeää kasvien tuotantopotentiaalnin seurannassa ja kasvukausien suunnittelun yhteydessä. Biochar in European Soils and Agriculture: Science and Practise -teoksen mukaan biohiilen ravinnearvot ovat moninaiset. Biohiili maaperässä esimerkiksi voi ehkäistä ilmastonmuutoksesta aiheutuvien kaasujen soluhengitystä, lisätä maaperän pH-arvoa, parantaa maaperän vedenpidätyskykyä, tehostaa ravinnearvojen merkitystä, parantaa maan rakennetta ja parantaa mikrobien assosiaatiota, lisäksi biohiili varastoi hiilen maaperään yli tuhanneksi vuodeksi. Kasvintuotannon hiilivarannot voidaan Yaran asiantuntijoiden mukaan ottaa tulevaisuudessa kaupankäynnin kohteeksi ja sille voidaan asettaa hinta. Myös elintarvikevalmistuksen arvoketjuun on mahdollista saada lisäarvoa, mikäli hiilineutraalisuus voidaan jättää huomioimatta tuotteiden hinnoissa tai niiden erilaistamisessa. Lopulta kuluttaja on tärkeässä asemassa, kun tehdään päätöksiä, miten ruoka tuotetaan. (Yara, n.d.; Shackley, Ruyschaert, Zwart & Glaser, 2016, s. 81)

Suuren sadon myötä kasvava juuristo vilkastuttaa maan mikrobiaktiivisuutta ja hiilipitoisuutta. Runsas sato mahdollistaa näin tehokkaan hiilensidonnin. Maatalouden digitaaliset ratkaisut tehostavat täsmäviljelyä, jossa esimerkiksi lannoitetta syötetään kasvustoon juuri sopiva määrä. Yaran asiantuntijoiden mukaan täsmäviljely tuo taloudellisia ja ympäristöllisiä etuja maataloille, kun suurien satojen mahdollisuudet paranevat, mikä on hyvä asia hiilensidonnin kannalta. (Yara, n.d.)

## 5 HIILIDIOKSIDIPITOISUUDEN MITTAAMINEN JA MALLINTAMINEN

Hiilidioksidipitoisuutta voidaan mitata useista erilaisista sovelluskohteista, kuten rakennuksista, kasvihuoneista ja luonnosta. Hiilidioksidi absorboi aallonpituuden ja transmission suhteen ominaisesti infrapunasäteilylle, joten sen mittaamiseen käytetään useimmiten infrapunatekniikkaa. Hiilidioksidimittapäällä voidaan mitata suoraan ympäröivän ilmatilan hiilidioksidipitoisuutta. Maahengitystä mitattaessa hiilidioksidimittapää sijoitetaan yleensä tarkoitusta varten rakennettuun kammioon tai tuubiin. (Vaisala, 2013)

Kaasumittauksissa antureita pitää usein lämmittää ennen mittausta. Lämmitysaika voi olla muutamasta sekunnista muutamaan minuuttiin. Mittapään lämmitys estää kondensaation olosuhteissa, joissa prosessin kastepistelämpötila on lähellä mittaussympäristön lämpötilaa. (Vaisala, 2013)

### 5.1 Ideaalikaasulaki

Lämpötilan ja painemuutosten vaikutuksia hiilidioksidimittaukseen voidaan arvioida ideaalikaasulain avulla, jota voidaan käyttää hiilidioksidilukemien kompensointiin. Ideaalikaasu on teoreettinen kaasu, joka koostuu hyvin pienistä, satunnaisesti liikkuvista pistehiukkasista. Ideaalikaasussa molekyylien väliset voimat ovat merkityksettömiä, koska ideaalikaasumolekyylien odotetaan törmäävän kimmoisasti sekä toistensa että säiliön seinämien kanssa. Todellisuudessa kaasut eivät käyttäydy näin, mutta mallia käytetään yleisesti kaasujen käyttäytymisen kuvaamiseen. Ideaalikaasulaki liittyy tietyn kaasumäärän tilan sen paineeseen, tilavuuteen ja lämpötilaan seuraavan kaavan mukaisesti:

$pV = nRT$ , jossa

$p$  = paine (Pa)

$V$  = kaasun tilavuus ( $m^3$ )

$n$  = kaasun ainemäärä (mol)

$R$  = yleinen kaasuvakio (= 8.3145 J/mol K)

$T$  = lämpötila (K)

Kaasuanturien ulostulosignaali on yleensä verrannollinen mitattavan kaasun molekyylitiheyteen (molekyylejä/ kaasun tilavuus). Hiilidioksidin määrää ilmaistaan useimmiten tilavuuden miljoonasosana (tilavuus/ tilavuus, ppm). Paineen ja/tai lämpötilan muuttuessa kaasun molekyylitiheys muuttuu ideaalikaasulain mukaisesti. Muutos näkyy ppm-lukemassa. Kun paine kasvaa vakioämpötilassa, anturi havaitsee enemmän hiilidioksidimolekyylejä. Lämpötilan noustessa vakioaineessa anturi havaitsee vähemmän hiilidioksidimolekyylejä. (Vaisala, 2013)

Mikäli kaasun tiheys SATP (Standard Ambient Temperature and Pressure) tunnetaan, voidaan ideaalikaasulakia käyttää kaasun molekyylitiheyden laskemiseen. Kaasun ainemäärän korvattaessa arvolla  $\rho V/M$  ja kaasun moolimassan ( $M$ ) oletetaan olevan vakio kahdessa eri tilanteessa, voidaan laskutoimitus ilmaista seuraavan yhtälön avulla:

$$\rho(T, p) = \rho(25^\circ\text{C}, 1013\text{hPa}) * \frac{p}{1013} * \frac{298}{273 + t}$$

jossa

$\rho$  = kaasun (tilavuus) pitoisuus (ppm tai %)

$p$  = paine (hPa)

$T$  = lämpötila ( $^\circ\text{C}$ )

Kaavaa voidaan käyttää arvioitaessa kaasuanturin lukeman muuttumista lämpötilan ja/tai paineen vaikutuksesta. Tyypillisesti hiilidioksidimittarit eivät mittaa painetta, joten ne eivät pysty automaattisesti kompensoimaan paineen vaihtelua. Mittalaitetta kalibroitaessa ensimmäistä kertaa tehtäällä, asetetaan paineolosuhteet vastaamaan merenpinnan olosuhteita (1 013 hPa). Mikäli mitataan muualla kuin merenpinnan tasolla on mittari kompensoitava vastaamaan paineolosuhteita. Sama pätee myös lämpötilan muutoksiin, mutta usein mittalaitteet sekä mittaavat, että kompensoivat olosuhdemuutoksia. Taulukossa 2 on esimerkki hiilidioksidianturin lukeman (1 000 ppm) muutoksista eri lämpötila- ja paineolosuhteissa, missä pystyakselilla on paine (hPa) ja vaak akselilla lämpötila ( $^\circ\text{C}$ ). (Vaisala, 2013)

Taulukko 2. Hiilidioksidianturin ppm -lukema, kun 1000 ppm pitoisuuden kaasua mitataan eri lämpötila- ja paineolosuhteissa (Vaisala, 2013)

	-20 $^\circ\text{C}$	0 $^\circ\text{C}$	25 $^\circ\text{C}$	50 $^\circ\text{C}$
<b>700 hPa</b>	814 ppm	754 ppm	691 ppm	638 ppm
<b>900 hPa</b>	1046 ppm	970 ppm	888 ppm	820 ppm
<b>1013 hPa</b>	1178 ppm	1092 ppm	<b>1000 ppm</b>	923 ppm
<b>1200 hPa</b>	1395 ppm	1293 ppm	1185 ppm	1093 ppm

Myös ilmankosteus vaikuttaa hiilidioksidianturin lukemaan. Erittäin kostean ympäristön hiilidioksidipitoisuus voidaan laskea, kun kuivatun kaasun hiilidioksidipitoisuus tunnetaan. Sekä kostean että kuivan olosuhteen kastepiste tai vesipitoisuus tulee olla tunnettu. Kaasujen osapaineet saadaan laskettua, kun ideaalikaasulakia muokataan seuraavanlaiseen muotoon:

$$p = (n_{\text{kaasu1}} + n_{\text{kaasu2}} + \dots n_{\text{kaasun}}) + \frac{RT}{V}, \text{ jossa}$$

$n_{\text{kaasu1}}$  = kaasun 1 ainemäärä (mol)

$n_{\text{kaasu2}}$  = kaasun 2 ainemäärä (mol)

$n_{\text{kaasun}}$  = kaasun n ainemäärä (mol)

$R$  = yleinen kaasuvakio (= 8.3145 J/mol K)

$T$  = lämpötila (K)  
 $V$  = kaasun tilavuus ( $m^3$ )

Daltonin osapainelain mukaisesti kaasuseoksen kokonaispaine on osapainneiden summa. (Vaisala, 2013)

## 5.2 Infrapunateknologia

Infrapunatekniikalla voidaan havaita hiilidioksidin lisäksi muitakin kahdesta tai useammasta erilaisesta atomista koostuvia kaasuja, kuten vesihöyryä, metaania ja hiilimonoksidia. Infrapuna-anturit soveltuvat hyvin kaasun mittaamiseen, jonka lisäksi niillä on Vaisalan mukaan pitkä käyttöikä ja hyvä sietokyky esimerkiksi pölyä, likaa, kosteutta sekä muita vaativia olosuhteita kohtaan. (Vaisala, 2013)

Infrapuna-hiilidioksidianturin tärkeimmät osat ovat valonlähde, mittauskammio, häiriösuodatin ja infrapunatunnistin. Infrapunasäteily ohjataan valonlähteestä mitattavan kaasun läpi tunnistimelle, jonka edessä oleva suodatin estää muiden kaasujen ominaisten aallonpituuksien kulkeutumisen tunnistimelle. Tunnistin havaitsee sille saapuvan säteilyn voimakkuuden, jonka arvo muutetaan kaasun pitoisuudeksi. (Vaisala, 2013)

## 5.3 Muut mittaustekniikat

Maaperätutka (GPR) on eräänlainen kaikuluotain, jolla erotetaan erilaisia maaperän kerroksia sähkömagneettisen pulssin lähettämiseen ja vastaanottamiseen perustuen. Menetelmä on kehitetty jo 1900-luvun alussa, mutta kuluttajamarkkinoille ensimmäiset laitteet tulivat vasta 1980-luvulla. Maatutkaluotaus on Geo-Work Oy:n mukaan kustannustehokas, laaja-alainen, nopea ja ympäristöystävällinen menetelmä maaston tutkimukseen jälkiä jättämättä. Tuloksena mittauksesta saadaan profiili- tai leikkauskuva, joka antaa hyvän käsityksen maa-aineskerroksista ja syvyyksistä. (Geo-Work, n.d.) Maaperätutkalla ei tietävästi suoraan saavuteta tietoa maaperän hiilidioksidipitoisuudesta tai pidätyskyvystä. Epäsuorasti maatutkan mittaustulokset yhdistettynä NDIR-anturista saatuun dataan perustuen saattaisivat antaa arvokasta tietoa maaperän hiilidioksidin pidätyskyvystä.

Varsinaisia lennätettäviä tutkia maaperän hiilidioksidipitoisuuden mittaamiseen ei saatavilla olevan tiedon perusteella ole markkinoilla, mutta esimerkiksi NASA:n satelliitin avulla on saavutettu tietoa ilmakehän hiilidioksidipitoisuuksista eri alueilla. Underground Storage of CO<sub>2</sub> and Energy -teoksessa käsitellyllä InSAR-tekniikalla on mahdollista seurata maaperän pitkäaikaista hiilidioksidipitoisuutta. Vastaava tekniikka saattaisi olla yhdistettävissä eri peltolohkojen maaperän rakenteen vertaamisessa ilman/maaperän hiilidioksidipitoisuuksiin. (Potenza, 2017; Busch, n.d., s. 36)

Maaperän ja ilmakehän useiden ominaisuuksien tiedetään korreloivan hiilidioksidipitoisuuksien kanssa. Esimerkiksi lämpimän ilman ja kosteuden on todettu useissa eri lähteissä kasvattavan maaperän CO<sub>2</sub>-pitoisuuksia. Fotosynteesistä aktiivinen säteily (PAR) ja lehtialaindeksi (LAI) vaikuttavat yhteyttämisnopeuteen ja näin ollen myös hiilidioksidipitoisuuksiin. Myös normalisoitu kasvillisuusindeksi (NDVI) on kiinnostava parametri tutkittaessa korrelaatiota maaperän hiilidioksidipitoisuuksiin. Pienoishelikoptereilla on mahdollisuus saada alueellinen ortokuva ja lähi-infrapuna (NIR) mittaavalla pintalämpömittarilla tai hyperspektrikameralla kuvatusta ortokuvasta on mahdollista tehdä alueellinen VARI-analyysi. Satelliittien NDVI-kartan ja VARI-indeksikartan on todettu ainakin Jori Lahden ja Juha Tiaisen esityksen perusteella korreloivan satomäärien kanssa, ja niistä on ollut apua täsmälannoituksessa. Pintalämpömittarin hyödyntämisestä hiilidioksidipitoisuuksien havainnoimisessa on tehty joitakin kokeiluja/tutkimuksia, mutta niitä ei ole tiettävästi vakiinnutettu. (Lahti & Tiainen, 2017)

#### 5.4 Kasvuston hiilidioksidipitoisuusmittaukset

Tyypillisesti kasvustosta mitattaessa havainnoidaan hiilidioksidin uloshengitystä, mutta myös varastointia voidaan seurata ja jäljittää biologisia sekä geokemikaalisia prosesseja. Maaperään haudattuna mittapää voidaan tyypillisesti asettaa maaperään joko horisontaalisesti tai vertikaalisesti. Mikäli mittalaitte halutaan lähelle maaperää, käytetään yleensä tuubijärjestelmää, jonka sisälle anturi asetetaan.

Hiilidioksidivuon mallintamisessa hyödynnetään useimmiten tarkoitusta varten rakennettua kammiojärjestelmää. Kammiossa kaasu kulkee mittalaitteen läpi ja palaa takaisin varsinaiseen kammiotilaan. Mittauspiste sijaitsee joko kammion yläosassa tai varsinaisen kammiotilan ulkopuolella, jolloin kaasu johdetaan mittalaitteelle putken tai letkun avulla.

Useimmissa tapauksissa kammio tai sen kansi on avattavissa moottorin avulla automaattisesti tietyin aikavälein. Tällöin ilma vaihtuu kammion sisällä tehokkaasti ja hiilidioksidin määrästä uloshengityksessä saadaan mahdollisimman realistisia mittatuloksia. Dataa on kuitenkin tulkittava oikein ja virheelliset tulokset on karsittava pois analyysistä. Kammio sisältää usein myös koneellisesti toimivan tuulettimen, jonka tuuletusnopeus riippuu mitattavasta kohteesta ja kammiojärjestelmän koosta. Lisäksi kammiossa käytetään usein ulostuloreikää, joka pitää kammion paineen tasaisena.

#### 5.5 Hiilidioksidivuon esittäminen

Hiilidioksidivuolla tarkoitetaan hiilidioksidin kulkeutumista ilmakehän ja maaperän sekä kasvillisuuden välillä. Hiilidioksidivuon oleellisia käsitteitä ovat GPP (Gross Primary Production, ekosysteemin bruttotuotanto), NPP (Net Primary Production, ekosysteemin nettotuotanto), NEE (Net

Ecosystem Exchange, ekosysteemin nettovaihto) sekä ER (Ecosystem Respiration, ekosysteemin respiraatio). Varsinainen hiilidioksidivuon NEE on GPP:n ja ER:n erotus. NEE:n suunta vuositasolla kertoo, onko mitattava kohde hiilidioksidinielu vai lähde. (Jylhä, 2017, s. 11)

Hiilidioksidivuon laskemisessa yksittäiset hiilidioksidipitoisuuslukemat on muutettava vuoarvoiksi. Kammiomenetelmää käytettäessä hiilidioksidipitoisuusarvojen muutokset on muutettu hiilidioksidivoiksi aikayksikköä ja kammion pinta-alayksikköä kohti. (Jylhä, 2017, s. 31–32). Hiilidioksidivuon laskemiseen ei ole standardoitu yhtä ainoaa oikeaa yhtälöä. Yhtälöksi voi soveltua esimerkiksi jokin tässä työssä esitetyistä yhtälöistä. Useimmissa tapauksissa vuo on ilmoitettu yksikössä  $\text{CO}_2 \text{ mg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ . Aika- tai painoyksikköä voidaan muokata haluttuun muotoon. Tässä työssä on käytetty sivulla 15 esitettyä yhtälöä.

## 6 AIEMMAT TUTKIMUKSET

Agricultural and Forest Meteorologyn julkaisemassa artikkelissa vuodelta 2003 vertailtiin 20:ta maaperän hiilidioksidin ulosvirtauksen mittaamiseen tarkoitettua kammiota ja kehitettiin kalibrointisäiliö. Kammioita testattiin hiekkaisilla maaperillä, joiden partikkelikoot olivat 0,05–0,2 mm ja 0,6 mm. Hiekka kosteutettiin noin 25 % kosteuspitoisuuteen. Ei-vakiotilaisilla läpivirtauskammiolla virtauksien ali- tai yliarviointi oli –21 prosentista +33 prosenttiin. Hiilivuot olivat kuitenkin 4 prosentin sisällä referenssiarvoista. Läpivirtaamattomilla ei-vakiotilallisilla kammiolla ali- ja yliarviointi oli -35 prosentista +6 prosenttiin. (Pumpanen ym., 2003, ss. 159–176)

Suurin kasvu kaasutilan hiilidioksidipitoisuuksissa tutkimuksen aikana oli 400 ppm:sta 1 750 ppm:iin. Tällä kammiolla oli myös pisin mittausaika, 30 minuuttia. Useimmissa tapauksissa kaasutilan pitoisuudet eivät kuitenkaan nousseet yli 50 ppm:a. Mittausaika oli näissä tapauksissa huomattavasti pienempi. Mittausjärjestelmien kalibroinnit suoritettiin Hyytiälän metsäasemalla käyttötarkoitukseen valmistetulla lieriömuotoisella kalibrointitankilla halkaisijaltaan 1 130 mm ja korkeudeltaan 1 000 mm. (Pumpanen ym., 2003, ss. 159–176)

Tulokset osoittivat, että eri kammiojärjestelmien välillä on eroja mittaus-tuloksissa. Useimmat ei-vakiotilalliset kammiot aliarvioivat hiilidioksidivuorvoja. Ruiskunäytteenottotekniikkaan perustuvat ei-vakiotilalliset läpivirtaamattomat kammiot aliarvioivat tuloksia eniten, aina 35 % asti. Ei-vakiotilalliset läpivirtaavat kammiot tuottivat jokseenkin referenssiarvon kaltaisia tuloksia. Jonkin verran ali- ja yliarviointia kuitenkin tapahtui. (Pumpanen ym., 2003, s. 159)

Kalibraatiojärjestelmän generoimat hiilivuovarvot olivat tasaisia ja spatiaalisesti homogeenisia, mikä sallii kammioiden rakenteelliset muutostyöt

erilaisille kammioille ja hyviä tuloksia on mahdollista saavuttaa eri kammiotyypeillä. Artikkelissa huomautetaan, että tuuletuksella saattaa olla suuri vaikutus virheellisiin tuloksiin. Liiallinen tuuletus voi aiheuttaa massiivisen turbulenssin kammioista mittalaitteelle, mutta tuuletukselta kuitenkin tarvitaan, koska hiilidioksidin tulee jakautua tasaisesti, jotta hiilidioksidivuoto voidaan laskea oikein. (Pumpanen ym., 2003, s. 174)

Kuopion Yliopiston ympäristötieteen laitoksen Elina Pahkalan tutkielma julkaistiin vuonna 2008. Kenttäkokeet suoritettiin Maa- ja elintarviketalouden tutkimuksen koepellolla Jokioisilla kesällä 2001. Viljelymaan juuri- ja maahengitystä tutkittiin mittaamalla maan hiilidioksidipäästöjä dynaamisella suljetulla kammiomenetelmällä. (Pahkala, 2008)

Tutkielmassa vertailtiin kolmen eri viljelymaan (savi-, turve- ja hietamaa) maa- ja juurihengityksestä vapautuvaa hiilidioksidin määrää. Kasvillisuutena oli nurmi tai ohraa. Pelloille perustettiin 46 \* 30 m kentät, jotka jaettiin yhdeksään 10 \* 10 m kokoiseen ruutuun. Osa ruuduista pidettiin keksannolla kemiallisella käsittelyllä. Kesantoruuduilla oli edellisellä viljelykaudella tuotettu perunaa. Koejärjestelyssä kukin kasvilaji tai käsittelytapa saunnaistettiin ruutuihin siten, että ne esiintyivät yhteensä kolmella ruudulla, yksi joka rivillä ja sarakkeella. Hiilidioksidipäästöjä mitattiin jokaiselta koekentältä viikoittain aina samana päivänä samalta koekentältä. (Pahkala, 2008)

Hiilidioksidipäästön mittalaitteena kokeessa käytettiin PP-Systemsin SRC-1 maarespiraatiokammioita, johon oli yhdistetty EGM-2 infrapunakaasuanalyysaattori sekä lämpötila-anturi. Kammiota oli lieriömäinen korkeudeltaan 15 cm ja halkaisijaltaan 10 cm. Kammiossa oli lisäksi tuuletin, jonka virtausnopeus oli  $0,3 \text{ dm}^3 \text{ min}^{-1}$ . Mittaus tapahtui jatkuvatoimisesti 120 s aikana, jolloin näyteilmaa kierrätettiin kammion ja kaasuanalyysaattorin välillä. Mittausten välillä kammiota tuuletettiin, jolloin hiilidioksidipitoisuus palautui lähelle ympäröivän ilman pitoisuutta. Samanaikaisesti maaperän  $\text{CO}_2$ -päästömittausten kanssa mitattiin hiilidioksidin nettovaihdon määrää valoa läpäisevällä kammiolla. (Pahkala, 2008, ss. 29–30)

Savi- ja turvemaalla mitattiin jatkuvatoimisesti myös ilman ja maaperän lämpötilaa, kosteutta sekä lämpö- ja hiilidioksidivuota puolen tunnin keskiarvoina mikrometeorologisella vuomittausmenetelmällä (eddy kovarianssi). Kaikilta koekentiltä mitattiin lisäksi myös lehtialaindeksi. (Pahkala, 2008, s. 30)

Turvemaan hiilidioksidipäästöt olivat tutkimuksen mukaan keväällä ennen kasvukauden alkua kaksi kertaa suuremmat kuin hietamaalla ja kymmenkertaisesti suuremmat kuin savimaalla. Erot tasaantuivat kuitenkin hiekan ohran juurien ja taimen lähtiessä kehittymään. Kokonaisuudessaan viljely lisääntyi voimakkaasti ohraruuduilla kesäkuun alussa. Kesä-heinäkuun vaihteessa kuiva ja lämmin kausi laski maasta vapautuvan hiilidioksidipitoisuuden savi- ja hietamaalla. Turvemaalla sateettomalla kaudella ei

juurikaan vaikutusta ollut. Ohran kukinnan päättyessä heinäkuun puolivälissä alkoi kokonaismaahengitys kaikilla maalajeilla selkeästi vähentyä. Maksimiarvot vaihtelivat maalajeittain seuraavasti: hieta 7. kesäkuuta ( $0,37 \pm$  keskihajonta  $0,02 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ), savi 26. kesäkuuta ( $0,29 \pm 0,05 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) ja turve 16. heinäkuuta ( $0,45 \pm 0,15 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ). (Pahkala, 2008, ss. 34–35)

Nurmiruuduilla maan hiilivuon kasvukauden aikainen vaihtelu ei ollut niin suurta kuin ohralla. Savimaalla nurmimaan kokonaishengitys vaihteli voimakkaasti keväällä ja nousi sitten maksimiarvoonsa kesäkuun alussa ( $0,24 \pm 0,04 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ). Heinäkuun alussa sateettomasta kaudesta ja niitosta johtuen maasta vapautuvan hiilidioksidin määrä laski lähelle nollaa. Niiton jälkeen arvo vielä nousi 19.7 asti, mutta lähti sen jälkeen laskuun. Hietamaalla nurmiruutujen kokonaismaahengitys pysyi lähes koko kasvukauden samansuuruisena. Kesantoruuduilla maahengityksen vaihteluissa ei ollut kovin suuria vaihteluja millään maalajilla. (Pahkala, 2008, ss. 35–36)

Molemmilla kasvilajeilla ja kesannoilla suurin maan maksimihengitys oli turpeella. Hietamaalla ohra- ja kesantoruutujen maksimiarvot olivat suuremmat ja nurmiruudun pienempi kuin savella. (Pahkala, 2008, s. 37)

Lämpötilan ja vapautuvan hiilidioksidin nousuilla oli selkeä korrelaatio. Nurmiruuduilla ja kesannoilla sen sijaan ei korrelaatiota ollut tai se oli heikkoa. Maaperän kosteudella ei ollut tutkimuksen mukaan vaikutusta ohraruutujen hiilivuohon. Nurmiruuduilla hiilidioksidin määrä vaihteli kohtalaisesti maaperän kosteuden mukaan. Turvepellon kesannolla kosteus ei korreloinut maaperän kokonaishengityksen kanssa yhtä hyvin kuin nurmella. Sademäärillä ei vaikuttanut olevan vaikutusta hiilidioksidivuon jäännös-vaihteluun millään kasvi- tai maalajilla. (Pahkala, 2008, ss. 38–45)

Savimaan hiilidioksidipäästö oli maalajeista pienin. Turvemaalla päästö oli 2,5–kertainen savimaahan verrattuna. Pelkästä maahengityksestä johtuva hiilidioksidipäästö oli yli viisinkertainen savimaahan verrattuna. (Pahkala, 2008, s. 54)

Tuuletinnopeuden kasvaessa todettiin, että myös hiilidioksidipitoisuus kasvaa. Tutkimuksessa käytetyn kammiotyyppin todettiin yliarvioivan maasta vapautuvan hiilidioksidin määrän 15–30 %. Mittauskammioiden kaulukset vaikuttivat osaltaan myös mittaus tulokseen: kammioiden tiivistäminen maahan ja jatkuva mittausalueella kulkeminen rikkoivat maan rakennetta ja näin vaikuttavat kaasun ja veden kulkeutumiseen maassa. Jos mitta-alueen lähellä oli kasvillisuutta, kammio tai kaulus saattoi vaurioittaa kasveja tai juuria, jolloin myös juurihengitys häiriintyi. Kaulukset suositellaan työn perusteella asetettavaksi ennen kasvien kasvun alkua, mutta kaulusten sisältä joudutaan todennäköisesti kuitenkin leikkaamaan kasvillisuutta mittakauden aikana. Kaulusten paikallaan pysyminen saattaa nousta ongelmaksi huokoisella turvemaalla, joka saattaa aiheuttaa osaltaan myös virheitä mittatuloksiin. (Pahkala, 2008, s. 55)



Thaimaan King Mongkutsin Yliopistossa tehdyssä tutkimuksessa selvitettiin maaperän hiilidioksidipäästöjä automaattisesti sulkeutuvan kammion ja maaperämittausmenetelmien avulla vuonna 2010. Kammio mittasi maaperästä luovutettua hiilidioksidia ja maanalainen metodi mittasi hiilidioksidipäästöjä kahdesta eri kerroksesta. Vakaisissa olosuhteissa mitattujen arvojen pitäisi olla melko samankaltaiset. Muuttuvien olosuhteiden takia mittatuloksissa havaittiin kuitenkin poikkeavuuksia. (Bulsathaporn ym., 2018, ss. 1–10)

Tutkimuksessa käytettiin 3 millimetriä paksusta akryylimuovista valmistettua automaattisesti avautuvaa kammiota kooltaan 30\*30\*30 cm<sup>3</sup>. Pohjakaulus, joka oli mittakooltaan 30\*30\*15 cm<sup>3</sup>, oli upotettu 10 senttimetrin syvyyteen maan alle, ja se oli valmistettu ruostumattomasta teräksestä. Hiilidioksidipitoisuus määritettiin Licor Corporationin LI-820 infrapunakaasuanalysaattorilla. Hiilidioksidin näytteenotto sykli kammiossa oli noin seitsemän minuuttia ja tulokset tallennettiin datankeruujärjestelmään. (Bulsathaporn ym., 2018, s. 3)

Maanalainen ulosvirtaus mitattiin tunnin välein Vaisalan GMP343 -mittapällä. Anturit oli asetettu maan alle 5 senttimetrin ja 20 senttimetrin syvyyksiin. Pitoisuutta mitattiin sekunnin välein, joista tallennettiin keskiarvo 15 sekunnin välein. Mittapäät olivat yhdistettynä lähettimeen, datankeruujärjestelmään ja tietokoneeseen, johon data tallennettiin. Mutaisten olosuhteiden takia antureita jouduttiin kalibroimaan viikon (Siipipuukasvusto) tai kuukauden (durrakasvusto) välein. (Bulsathaporn ym., 2018, s. 3)

Hiilidioksidipitoisuuksien data kerättiin muodossa  $\mu\text{mol}/\text{mol}$  tai  $\mu\text{mol}/\text{m}^3$ . Hiilidioksidivuo laskettiin kaavalla:

$$F = -D_s \frac{dC}{dz}, \text{ jossa}$$

$F$  on CO<sub>2</sub> ulosvirtaus ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ),

$D_s$  on CO<sub>2</sub> hajaantumisen kerroin maaperässä ( $\text{m}^2/\text{s}$ ),

$dC/dz$  on vertikaalinen CO<sub>2</sub> gradientti:  $C$  on CO<sub>2</sub> pitoisuus ( $\mu\text{mol}/\text{m}^3$ ),  $z$  on syvyys (m).

(Bulsathaporn ym., 2018, ss. 3–4)

Eri syvyyksistä saatuja CO<sub>2</sub>-pitoisuusarvoja vertailemalla löydettiin selkeitä eroja. 20 senttimetrin syvyydessä oli selvästi suuremmat CO<sub>2</sub>-pitoisuudet kuin 5 senttimetrin syvyydellä molemmissa kasvustoissa. Durrakasvustossa mittatulokset olivat  $2\,555 \pm 1\,054 \mu\text{mol}/\text{m}$  (5 cm) ja  $3\,672 \pm 1\,103 \mu\text{mol}/\text{m}$  (20 cm). Siipipuukasvustossa mittatulokset olivat  $3\,080 \pm 1\,075 \mu\text{mol}/\text{m}$  (5 cm) ja  $10\,246 \pm 1\,455 \mu\text{mol}/\text{m}$  (20 cm). Siipipuukasvustossa hiilidioksidin hitaan kulkeutumisen kohti pintaa saattoi aiheuttaa sateet ja kastelut, jotka tekivät maaperästä erityisen mutaisen. (Bulsathaporn ym., 2018, s. 4)

Kammiomenetelmällä mitattaessa hiilidioksidin ulosvirtauksien määrissä ei ollut kovin suuria eroja. Päivittäiset keskiarvot durrakasvustossa olivat  $478 \pm 232 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ , kun siipipuukasvuston arvot olivat  $664 \pm 253 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ . Kammiomenetelmän hiilidioksidipitoisuuksiin verrattuna siipipuukasvuston maanalaisessa mittauksessa lukemat olivat selkeästi korkeammat. Durrakasvuston pitoisuudet sen sijaan olivat samankaltaiset maan alla ja kammiossa. Eri metodien mittaustulosvertailu on esitetty taulukossa 3. (Bulsathaporn ym., 2018, ss. 6–9)

Taulukko 3. Maanalaisen mittauksen ja kammiomenetelmämittauksen tulosten vertailua eri kasvustoissa (Bulsathaporn ym., 2018, s. 6)

Metodit	Päivittäisen CO <sub>2</sub> ulosvirtauksen keskiarvo (mg CO <sub>2</sub> m <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup> ) Durrakasvustossa	Päivittäisen CO <sub>2</sub> ulosvirtauksen keskiarvo (mg CO <sub>2</sub> m <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup> ) Siipipuukasvustossa	Akkumulatiivinen CO <sub>2</sub> (g CO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> ) Durrakasvustossa	Akkumulatiivinen CO <sub>2</sub> (g CO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> ) Siipipuukasvustossa
Putki	360 ± 129	2 456 ± 614	34.05	234.77
Kammio	478 ± 232	664 ± 253	38.34	53.36

Helsingin yliopisto tutki metsäisten suoalueiden hiilidioksidipitoisuusarvojen vaihtelua vuosina 2011–2012 automaattisten kammiojärjestelmien avulla. Tutkimuksen mittausasemat järjestettiin vuoden 2010 loppupuolella Lettosuolle ja Kalevansuolle, jotka sijaitsevat noin 20 kilometrin etäisyydellä toisistaan. Molemmista paikoista valittiin kuusi mittauskohdetta erilaisista eliöyhteisöistä. Työssä kohdattiin haasteita viileiden kesäoiden mittaustapahtumissa, kun kammioista saadut mittatulokset yliarvioivat hiilidioksidin määrän. Tutkimuksen perusteella automaattisesti sulkeutuva kammiojärjestelmä on kuitenkin luotettava tapa mitata hiilidioksidivaihtelua. (Koskinen ym., 2013, ss. 347–363)

Tutkimusartikkelissa todetaan, että kammiomenetelmä toimii hiilidioksidin vaihtuvuuden mittaamisessa, jos kasvillisuus saadaan suljettua kokonaisuudessaan kammion sisään. Menetelmä toimii kosteikoissa ja ruohomaassa, mutta ei välttämättä metsissä. Kammiomenetelmällä on tutkimuksen mukaan mahdollista havainnoida ekosysteemin pienimuotoista vaihtelua ja toimintoja. Ideaalilanteessa kammiot toimisivat automaattisesti päivin ja öin kaikkina vuodenaikoina. Käytännössä pitkäaikaiseen dataan tulee usein kuitenkin aukkoja, joita on täydennettävä. Virheet datassa on osattava arvioida ja jättää tutkimuksen ulkopuolelle (Koskinen ym., 2013, s. 347)

Kammio oli valmistettu polykarbonaatista ja sen alustakehys ruostumattomasta teräksestä. Kammio oli mitoiltaan 57 \* 57 \* 30 cm (l \* s \* k). Kammioon asennettiin 12 cm tuuletin jäljittelemään 3.5 ja 0.9 ms<sup>-1</sup> tuulen nopeuksia. Kaasun tulo- ja poistoaukot vietiin kammion seinämien läpi takayläkulmista. Tuuletin asennettiin aiheuttamaan tuulenvirtauksen

sisääntuloaukosta suoraan poistoaukkoon. Kammion avaus ja sulkeminen tapahtui Linak Techline LA35 -karamoottorilla. Moottoreita kontrolloitiin ADAM 4069 -relemoduuleilla, joita hallittiin ADAM 4055 I/O -moduulilla. (Koskinen ym., 2014, s. 350)

Kaasu ohjattiin polyuretaaniputkia pitkin mittausanalysaattorille. Kaasun lähde (ympäröivä ilma vai kammion ilma) valittiin solenoidiventtiin avulla. Kun kaasu oli kulkeutunut instrumenttien läpi, se palautui kammioon. Solenoidiventtiilejä ohjattiin ADAM 4069 -releen avulla ja hiilidioksidipitoisuuden mittaaminen suoritettiin LI-840A CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O -analysaattorilla (LI-COR inc.). (Koskinen ym., 2014, ss. 350–351)

Hiilidioksidipitoisuutta mitattiin sekunnin välein ja meteorologisia ominaisuuksia 10 sekunnin välein. Ulkopuolinen ilma saavutti mittausinstrumentit noin 20 sekunnissa. Kammion sulkeutumisesta johtuvat häiriötekijät olivat loppuneet 30 sekunnin kuluessa, joten hiilidioksidipitoisuudet päädyttiin mittaamaan 30–90 sekuntia kammion sulkeutumisen jälkeen. Yöaikaan tehdyissä mittauksissa hiilidioksidipitoisuuksien keskiarvoinen määrä ei juurikaan muuttunut 120 sekunnin jälkeen kammion sulkeutumisesta, joten mittausjakson pituudeksi päädyttiin määrittämään 240 s ja mittausdataa käytettiin aikaväliltä 120...240 sekuntia kammion sulkeutumisen jälkeen. (Koskinen ym. 2014, ss. 350–356)

Hiilidioksidivuoto saatiin laskettua ideaalikaasulakiin perustuvalla yhtälöllä:

$$F = \frac{T_0}{T} * \frac{M}{V_{NTP}} * \frac{V}{A} * 3600 \frac{s}{h} * \frac{a}{10^6}, \text{ jossa}$$

$T_0$  on 273.15 °K

$T$  on ilman lämpötila kammiossa mittauksen aikana (°K)

$M$  on hiilidioksidin moolimassa (44.01 g mol<sup>-1</sup>)

$V_{NTP}$  on yhden  $M$ :n tilavuus kaasun normaalitilassa (0.0224 m<sup>3</sup>)

$V$  on kammion tilavuus (m<sup>3</sup>)

$A$  on maapinta-ala kammion sisäpuolella

$a$  on lineaarisen regression gradientti (ppm s<sup>-1</sup>)

Hiilivuon yksikkö on g CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>.

(Koskinen ym., 2014, s. 351)

Automaattinen kammiomenetelmä toimi hyvin suurimman osan ajasta, mutta data-aukkojakin syntyi. Helsingin Yliopiston tutkijatohtori Markku Koskinen kertoi haastattelussa 30.10.2019, että aineiston visuaalinen tarkastelu ja sen perusteella suodatettu data on parempi vaihtoehto kuin automaattinen suodattaminen. Huonoja mittauksia poistavaa luotettavaa algoritmia on vaikea kehittää. (Koskinen ym., 2014, s. 353; Koskinen, 2019)

Suurin syy puuttuvalle datalle oli se, että elektroniikka ei kestänyt kylmyyttä. Kammioden sisälämpötilat vaihtelivat mittausajankohtana -33°C...+32 °C välillä. Koskinen totesi haastattelussa, että vaikka kammiot onkin automaattinen, mittausjärjestelmä ei suinkaan estä mittaajaa

juoksemasta maastossa, vaan se vaatii jatkuvaa huoltoa noin kahdesti kuu-kaudessa. Kesällä ukkosmyrskyt ja talvella jäätävät säät aiheuttavat laitteiden hajoamisia ja katkoksia, jotka vaativat toimenpiteitä. Lisäksi mittauksen kohteena oleva maa-alue muuttuu kasvukauden aikana. Koskisen mukaan manuaalinen mittaustapa on myös hyvä vaihtoehto, mikäli työaikaa on riittävästi. (Koskinen ym., 2014, s. 353; Koskinen, 2019)

Läpinäkyvä kammio usein nostaa lämpötilaa kammion sisällä, jolloin on käytettävä erillistä viilennysjärjestelmää. Helsingin Yliopiston tutkimuksessa tämänkaltaisia ongelmia ei kuitenkaan havaittu, joten viilennysjärjestelmä jätettiin pois arkkitehtuurista. (Koskinen ym., 2014, s. 353)

Tuulettimen nopeudella on etenkin huokoisella maaperällä huomattava vaikutus mitattaviin arvoihin. Koskinen toteaa, että mikäli olisi mahdollista, olisi optimaalista sovittaa tuulettimen nopeus kammiota ympäröivän ilman liikkeisiin esimerkiksi kuumalankatuulimittarin avulla. Nostamalla tuuletinnopeutta mittauksen aikana hiilivuon määrä kasvoi merkittävästi. Sen sijaan hiljaisen tuuletinnopeuden ja sammutetun tuulettimen välisillä vaikutuksilla mittatuloksiin ei ollut juurikaan merkitystä. (Koskinen ym., 2014, ss. 356–360; Koskinen, 2019)

Tulevia projekteja huomioiden artikkelissa suositeltiin kokeilemaan eri tuuletinnopeuksia ja niiden vaikutusta mittatuloksiin. Maaperän ja sen läheisyydessä vallitsevan hiilivuon pitoisuuksia on myös suositeltavaa tutkia tarkemmin. (Koskinen ym., 2014, s. 362)

Kiinalaisessa Xi'an yliopistossa tehdyssä tutkimuksessa rakennettiin mitta-  
asemajärjestelmä maaperän hiilivuon seurantaan, tuotenimellä SCFSen. Järjestelmä perustuu dynaamiseen kammiomenetelmään, joka myös kommunikoi muiden mittalaitteiden kanssa. Tutkimusartikkelissa todetaan, että markkinoilla olevat laitteet ovat kalliita eikä ne kommunikoi keskenään laajalla alueella, joten projektissa suunniteltiin käyttötarkoitukseen paremmin vastaava laite. Artikkelissa suositellaan ottamaan näytteitä laajalta alalta ja suhteellisen pitkällä ajanjaksolla. (Wang ym., 2018, ss. 1–19)

Hiilidioksidipitoisuuksia voidaan mitata staattisella tai dynaamisella kammiomenetelmällä. Staattisessa metodissa hiilidioksidipitoisuutta mitataan ennen ja jälkeen ajanjakson, joiden erotuksen perusteella lasketaan hiilivuopitoisuus. Menetelmä on yleensä pitkäkestoinen; useista minuuteista tunteihin eikä tulos ole kovin tarkka. Dynaaminen menetelmä on artikkelin mukaan ideaalinen tapa mitata maahengitystä. Dynaaminen menetelmä on staattista tarkempi ja se on parempi periodillisissa mittauksissa. Hiilidioksidin leviäminen ilmassa on arvioitu paikallisesti ja ajankohdan mukaan. SCFSen järjestelmän kammiossa kaasu kiertää yläosaan rakennetun putken läpi ja palaa takaisin varsinaiseen kammiotilaan. Mittauspiste sijaitsee putkessa. Vapautuneen tai sitoutuneen kaasun määrä voidaan tällöin laskea kammioon sitoutuneen hiilidioksidin konsentraation muutosasteen mukaan, joka perustuu ilman diffuusion luonnonlakiin ja ilmakehän sekä

maaperän konvektioon. Kammiossa käytetään myös ulostuloreikää, joka pitää kammion paineen tasaisena. (Wang ym., 2018, ss. 3–4)

SCFSen kammiojärjestelmä sisältää kupumaisen kannen, jota avataan ja suljetaan moottoroidun järjestelmän avulla. Ennen kuin instrumentti alkaa mittaamaan, kontrollimoduuli käynnistää moottorin ja tankojen pyörimisliikkeen avulla kammion kansi sulkeutuu. Kun kansi on noussut kauluksen yläpuolelle, moottori pysähtyy. Mittaamisen jälkeen kansi jälleen avautuu. Kansi liikkuu siis ainoastaan vertikaalisesti. (Wang ym., 2018, ss. 7–8)

Järjestelmä sisältää prosessorimoduulin, langattoman lähettimen, hiilidioksidi-, lämpötila- ja kosteusanturit sekä moottori- ja käyttöliittymämoduulin. Käyttöjärjestelmän osat on luokiteltu taulukossa 4. (Wang ym. 2018)

Taulukko 4. Järjestelmäpiirin osat (Wang ym., 2018, s. 9)

Moduuli	Piiri
Langaton lähetin	CC2420
Hiilidioksidianturi	T6615
Lämpötila- ja kosteusanturi	SHT15
Moottorimoduuli	ZGA17RU877i5600
Alasvetokonvertteri	MAX1836
Akku	YSD-12980
LCD – näyttö	QC12864B

CC2420 tukee ZigBee -protokollaa, joka toimii langattomassa PAN -lähiverkossa IEEE 802.15.4 2,4 GHz standardiin perustuen. Akun lataamiseen käytettiin aurinkopaneelia. (Wang ym., 2018, s. 9)

Energiankulutus on pyritty saamaan järjestelmässä minimiin ja moduulit ovat sammutettuina, kun järjestelmä on valmiustilassa. Virrankulutuskäykä on esitetty taulukossa 5. (Wang ym., 2018, s. 10)

Taulukko 5. Järjestelmän virrankulutuskäykä (Wang ym., 2018, s. 11)

Moduulit	Virrankulutus (mA)	Kesto	Illustraatio
Hallintamoduuli	0.5	60 min	
Alustaminen	47.4	100 s	Lämpeneminen
Moottorin positiivinen pyörimisliike	66.4	25 s	Kammio sulkeutuu
Moottorin negatiivinen pyörimisliike	16.8	25 s	Kammio avautuu
Näytteenotto ja radiolähetys	100.0	3 min	

Järjestelmä on asetettu mittaamaan tunnin välein, jolloin energiaa kuluu 320 joulea. Kammion sulkeutumisen jälkeen näytteenottotapahtuma tarvitsee 60 sekunnin painenvaihtoajan ja 90 sekunnin havainnointiajan. 9 800 mAh ja 12 V akulla järjestelmä toimii 563 h eli 23 vrk ilman akun lataamista. (Wang ym., 2018, s. 11)

SCFSen järjestelmän mittatuloksia verrattiin kalliimman instrumentin LI-8100 mittatuloksiin. Tutkimustuloksissa ilmenneet virheet olivat artikkelin mukaan hyvin samankaltaisia ja niitä pystyttiin vähentämään kalibrointien avulla. (Wang ym., 2018, s. 11)

Suomessa hiiliviljely on noussut esiin ratkaisuna ilmastonmuutoksen hillintään erityisesti Baltic Sea Action Groupin, Ilmatieteenlaitoksen ja Sitran aloittaman hankkeen ”Carbon Action” -myötä. Hankkeessa ovat alkuvaiheessa olleet mukana myös Luonnonvarakeskus, Helsingin yliopisto, Suomen ympäristökeskus ja Tampereen teknillinen yliopisto. Hiilipilotti alkoi vuonna 2017 ja siinä on mukana sata suomalaista maatilaa, jotka toimivat hiiliviljelyn periaatteiden mukaisesti. Pilotin tähtäimessä on kymmenen vuoden tutkimus- ja pilottitoiminnan käynnistäminen. Pilotin on käynnistänyt Sitra, joka rahoitti sitä elokuuhun 2019 asti. Hankkeessa etsitään tapoja yhdessä tutkijoiden, viljelijöiden ja yritysten kesken vauhdittaa hiilen varastoitumista ilmakehästä viljelymaahan ja todentaa sen varastoituminen tieteellisesti. Pilotin tutkimustieto yhdistetään ruohonjuuritason kokeiluihin, joiden menetelmiä voidaan soveltaa maatiloilla laaja-alaisesti. Hiilensidontaan liittyviä menetelmiä ja käytäntöjä voivat olla esimerkiksi viljelykierto, maanmuokkausmenetelmät, kuitupohjaiset maanparannusaineet, orgaaniset lannoitteet ja biostimulantit. Käytännössä hankkeessa tehdään tiloilla erilaisia perusmittauksia ja otetaan maanäytteitä. Näytteiden analysoinnilla selvitetään eri menetelmien vaikutusta hiilen varastoitumiseen viljelymaassa. (Carbon Action, n.d; kts. myös Sitra, n.d.)

Ilmakehän ylimääräisen hiilidioksidin sitominen takaisin maaperään on osa siirtymää kiertomaatalouteen, jossa viljelymaat valjastetaan hiilinieluiksi. Carbon Action -hankkeen tieteellistä tutkimusta johtaa Ilmatieteenlaitos, jonka tutkimusprofessorin Jari Liskin mukaan merkittävä osa maaperän hiilestä on ylimmässä metrin paksuisessa pintakerroksessa, johon maatalous, laidunnus ja metsänhoito suoraan vaikuttavat. (Ilmatieteen laitos, 2017)

Baltic Sea Action Group ohjaa Carbon Action -hankkeen kokonaisuutta. Projektin ohjausryhmän ja BSAG:n hallituksen puheenjohtajan Saara Kankaanrinnan mukaan maaperä nähdään ratkaisuna Itämeren suurimpien päästöjen taltuttamisessa. (Ilmatieteen laitos, 2017)

Baltic Sea Action Group on aloittanut yhteistyön myös Valion kanssa, jossa maitotilallisia koulutetaan hiiliviljelijöiksi. Tilalliset oppivat uusia tapoja ja käytössä olevia viljelykäytäntöjä, joilla hiiltä voidaan sitoa maaperään. Keväällä 2019 alkaneet koulutukset käsittävät 200 maitotilaa kahden vuoden

aikana ja kaikki valiolaiset maitotilat vuoteen 2035 mennessä. Valion pitkätähtäimen tavoitteena on hiilineutraali maitoketju, jonka projektikokonaisuuteen koulutukset kuuluvat. Valiolla hyödynnetään eri hankkeista saatua tietoa ja käytännön oppeja erityisesti nurmen ja maaperän hiilensidonnasta, jotka otetaan vaiheittain osaksi maitotilojen jatkuvaa kehittämistä. Karjatalouteen liittyvät ilmastohaasteet on tunnistettu ja Valiolla halutaan tehdä aktiivisesti töitä niiden ratkaisemiseksi, toteaa Valion tutkimus- ja teknologiajohtaja Anu Kaukovirta-Norja. (Valio, 2018)

Vuonna 2019 Carbon Action -hiilipilottia on lähtenyt rahoittamaan myös S-ryhmä. SOK:n vastuullisuusjohtaja Lea Rankisen mukaan S-ryhmä on luvannut pienentää omia ilmastopäästöjään 60 prosenttia vuosien 2015 ja 2030 välillä. Myös S-ryhmä on yhdessä ProAgrian kanssa aloittamassa maataloustuottajien valmennukset, joissa heitä rohkaistaan ilmastoyrittäjiksi, jolloin tilat voisivat saada hiilensidonnasta uutta tulovirtaa. Valmennuksissa hyödynnetään Carbon Action -hankkeesta saavutettua tutkimustietoa. (Suomen Osuuskauppojen Keskuskunta, 2019)

## 7 TUTKIMUKSESSA KÄYTETTÄVÄT MITTALAITTEET JA MENETELMÄT

Tutkimusta varten suunniteltiin kolme eri kokoista dynaamista, automaattisesti avautuvaa kammiojärjestelmää. Järjestelmä sisältää kaksi erilaista Vaisalan hiilidioksidimittapäätä, Apogeen PAR-anturin, lämpötila-anturin, tuulettimen, paineentasausletkun sekä moottorin avulla avattavan kannen. Sähkönsyötöstä vastaa LiPo -akku, jota lataa aurinkopaneeli. Verkko-yhteytenä käytetään NarrowBand-IoT -verkkoa.

Kammiot ovat lieriön muotoisia. Pienin kammiojärjestelmä on halkaisijaltaan 400 mm ja korkeudeltaan 500 mm. Keskikokoinen kammio on halkaisijaltaan 400 mm ja korkeudeltaan 700 mm. Suurin järjestelmä on halkaisijaltaan 500 mm ja korkeudeltaan 1 000 mm. Kammioiden runko on valmistettu 2 mm paksusta valoa läpäisevästä (kirkkaasta) polykarbonaatista. Kammion alareunan ympärillä on kammioon integroitu alumiinista valmistettu kehys, josta kammio ankkuroidaan maaperään. Kammioiden kansi on valmistettu 3 mm paksusta polykarbonaatista. Kiinnitys- ja saumakohdissa on käytetty alumiinia. Järjestelmään kuuluu myös maaperäkehys, joka on erillään varsinaisesta kammioista asetettuna maaperään. Kammio asetetaan maaperäkehysten päälle.

Käytettävän kammiojärjestelmän koko riippuu mitattavasta viljelykasvista. Esimerkiksi nurmelle riittää pienempi kammio, mutta viljaviljelmillä tarvitaan näistä kolmesta suurin kammio. Pienemmissä kammioissa riittää yksi tuuletin, mutta suurimpaan järjestelmään tarvitaan kaksi tuuletinta. Myös mittausperiodin pituus riippuu mitattavasta kohteesta. Nurmen hiilidioksidivuomuutosten vaihtelut ovat oletetusti melko nopeita, joten mittausperiodiksi riittänee 180 sekuntia. Viljaviljelmillä muutokset ovat oletetusti

melko hitaita, joten mittausperiodin sopiva pituus on noin 240...300 sekuntia. Kuvassa 2 esitellään 700 mm korkean kammionmallin prototyyppi.



Kuva 2. 700 mm korkean kammiojärjestelmän prototyypin esittely TäsmäViljely-Foorumi -tapahtumassa Salossa 5.3.2020.

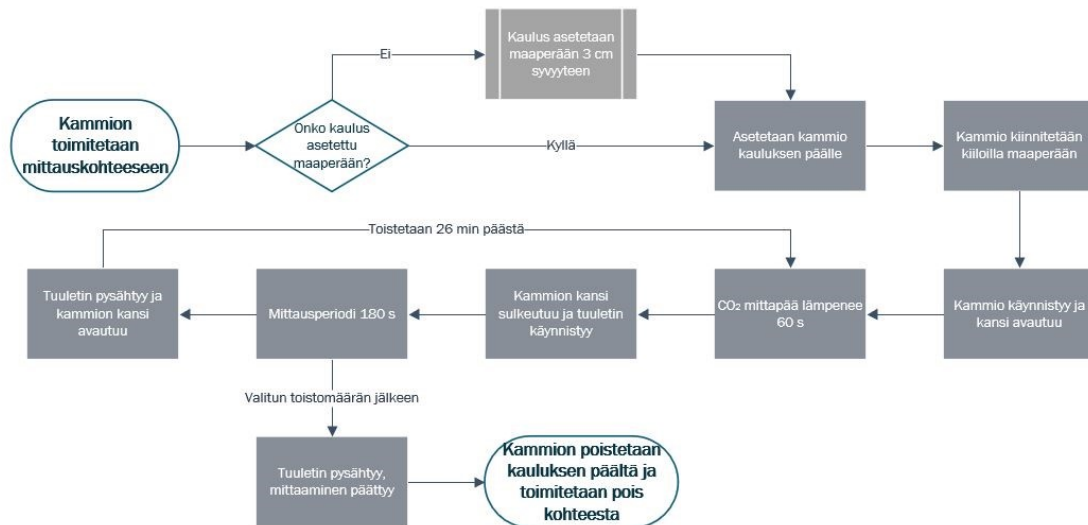
### 7.1 Kammiojärjestelmän toimintaperiaate

Kammiojärjestelmä asetetaan kauluksen päälle, joka on upotettu maaperään noin 3 cm syvyyteen. PAR-anturin kaapeliliitin osoittaa pohjoiseen (ts. lähintä napaa kohti). Kammioon integroitu kaulus ankkuroidaan maahan kiilojen avulla. PAR-anturin on oltava horisontaalisesti ja vertikaalisesti suorassa, mikä varmistetaan anturin yhteydessä olevan tasaimen avulla.

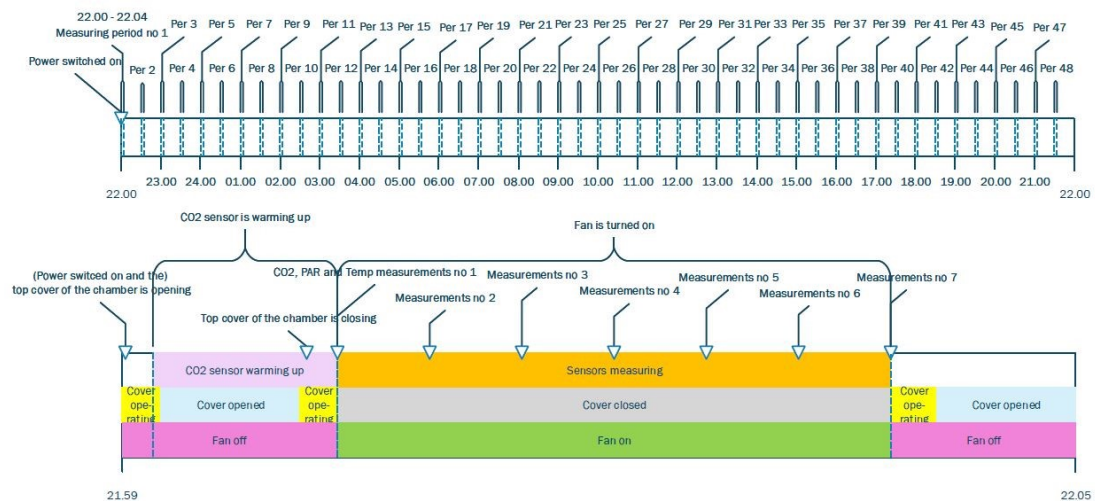


Järjestelmän käynnistyessä kansi avautuu (ellei ole jo valmiiksi avattuna) ja CO<sub>2</sub> -mittapää aloittaa 60 s kestävä lämpenemisen. Tämän jälkeen kansi sulkeutuu, tuuletin käynnistyy ja CO<sub>2</sub>-, PAR- sekä lämpötila-anturit aloittavat 180...300 s kestävä mittauseriodin. Mittausdataa tallennetaan periodissa 30 s välein. Kun mittaukset on suoritettu, tuuletin pysähtyy ja kansi avautuu.

Mittaustapahtuma on tarkoitus toistaa 30 minuutin välein ja 24 h ajan, jotta saadaan riittävästi laadukasta dataa. Toimintaperiaate on kuvattuna kuvassa 3 ja aikajanallisesti kuvassa 4.



Kuva 3. Kammiojärjestelmän toimintaperiaate kaaviona.



Kuva 4. Kammiojärjestelmän toimintaperiaate aikajanakuvaajien avulla.

## 7.2 Vaisalan hiilidioksidimittapäät

Vaisala Oyj on suomalainen yhtiö, joka toimii maailmanlaajuisesti. Vaisalan infrapunahiilidioksidimittalaitteet sopivat yhtiön mukaan moniin eri soveluksiin, kuten kuljetuksiin, varastoihin, kasvihuoneisiin, viljelmille ja ilmanvaihtokanaviin. Vaisalan CO<sub>2</sub>-mittalaitteet voivat ilmaista hiilidioksidipitoisuuden joko ppm- tai prosenttitasolla. Vaisala käyttää yhdellä säteellä ja kahdella aallonpituudella toimivaa NDIR (non-dispersive infrared) -teknologiaa hiilidioksidipitoisuuden mittaamiseen. Yhtiön käyttämässä teknologiassa hyödynnetään säädettävää kaistanpäästösuodatinta. Anturi mahdollistaa sekä CO<sub>2</sub>-absorbtiosignaalin että viitesignaalin mittaamisen yhdellä osakokoonpanolla, joka poistaa yleisimmät poikkeamia aiheuttavat tekijät. Laitteelle luvataan pitkä käyttöikä ja vakaa toiminta sekä toimivuus vaativissa ympäristöissä. Vaisalan CO<sub>2</sub>-mittalaitteet ovat tarkoitettu toimimaan ensisijaisesti ilman hiilidioksidipitoisuuden mittaamiseen. Taulukoissa 6 ja 7 (sivulla 23) on esitetty kahden eri hiilidioksidimittapäämallin tekniset tiedot. (Vaisala, 2018)

Taulukko 6. GMP252 -hiilidioksidimittapään tekniset tiedot (Vaisala, 2016)

Mittausalue	0...10 000 ppmCO <sub>2</sub> , 0...30 000 ppmCO <sub>2</sub> (alemmalla tarkkuudella)
Toimintalämpötila-alue	-40... +60 °C
kotelointiluokitus	IP65
Lähdöt	Analogiset (0...5/10 V, 0/4...20 mA), RS-485 -väylän Modbus ja Indigo 200 (langaton konfigurointi)
Käyttöjännite	Digitaalinen- ja jännitelähtö käytössä 12...30 VDC, Virtalähtö käytössä 20...30 VDC
Tehonkulutus	0,4 W (jatkuvässä käytössä)
Tarkkuus 25 °C:ssa, 1013 hPa 0...3000 ppmCO <sub>2</sub>	±40 ppmCO <sub>2</sub>
Pitkän aikavälin stabiilisuus 0...3000 ppmCO <sub>2</sub> :ssa	±60 ppmCO <sub>2</sub> /vuosi
Kompensointi	Lämpötila (integroitu lämpötilamittaus), paine, taustakaasut, happi ja kosteus (kondensoinnin esto)
Kompensoitu paine	500...1100 hPa

Taulukko 7. GMP343 -hiilidioksidimittapään tekniset tiedot (Vaisala, 2019)

Mittausalue	0...1 000 ppmCO <sub>2</sub> , 0...5 000 ppmCO <sub>2</sub>
Toimintalämpötila-alue	-40... +60 °C
kotelointiluokitus	IP65, IP66, IP67
Lähdöt	Analogiset (4...20 mA) ja digitaaliset (RS-485, RS-232)
Käyttöjännite	0...2,5 V, 0...5 V, 11...36 VDC
Tehonkulutus	< 0,1 W (lämmittämätön), < 3,5 W (lämmitettyinä)
Tarkkuus 25 °C:ssa, 1013 hPa 0...1000 ppm	±3 ppm
Pitkän aikavälin stabiilisuus	±2 % /vuosi
Kompensointi	Lämpötila, paine, happi ja kosteus
Kompensoitu paine	900...1300 hPa

### 7.3 Apogeen PAR -anturi

Apogee Instruments on yhdysvaltalainen yhtiö, joka kehittää ja valmistaa antureita ympäristöhuollon kohteisiin. Yhtiö perustettiin Utahissa 1996. Järjestelmässä käytetty, mallitunnukseltaan SQ-421 on digitaalinen anturi, joka käyttää SDI-12-protokollaa. Anturi on kalibroitu auringon valolle ja sähköisille valoille. SQ-421-anturia voidaan käyttää PPF (Photosynthetic Photon Flux Density) ja PAR (Photosynthetically Active Radiation) mittauksissa. (Apogee, n.d.). Tässä sovelluksessa mielenkiinto kohdistuu erityisesti PAR-mittauksiin, koska kasvuston olosuhteet kammiossa pyrittiin pitämään mahdollisimman luonnollisina, myös auringon säteily huomioiden. SQ-421-anturin asennuksessa on huomioitava, että se on horisontaalisesti vaakasuorassa ja, että johtoliitin osoittaa lähintä napaa kohti, tässä tapauksessa pohjoisnapaa. (Apogee, 2020). Vaakasuoruus on kammiojärjestelmässä varmistettu pienen vesivaa'an avulla. Anturin tekniset tiedot on esitetty taulukossa 8.

Taulukko 8. SQ-421 anturin tekniset tiedot (Apogee, 2020)

Sisääntulojännite	5,5 V... 24 V
Virrankulutus	1.4 mA... 1,8 mA
Kalibroinnin epävarmuus	± 5 %
Mittausten toistettavuus eri olosuhteissa	alle 1 %
Pitkäaikainen epävakaus	alle 2 % vuodessa
Epälineaarisuus	alle 1 %
Vasteaika	0,6 s... 1 s
Näkökenttä	180°
Mittausväli	410 nm... 655 nm
Suora (kosininen) vaste	± 5 % 75° lakipisteessä
Lämpötilavaste	± 0,06 % / °C
Käyttölämpötila	-40 °C... 70 °C

## 8 KOEKENTTÄOLOSUHTEET

Ensimmäiset koekäytöt suoritettiin manuaalisesti suljettavalla lieriön muotoisella kammiolla halkaisijaltaan 400 mm ja korkeudeltaan 500 mm. Järjestelmässä käytettiin kahta eri mallista kanteen kiinnitettyä Vaisalan hiilidioksidimittapäätä samanaikaisesti. Osassa testeistä kammion ilmankierto oli järjestetty pienellä tuulettimella. Järjestelmä tulee käyttöön viljelymaille, mutta koekäyttö suoritettiin kasvuston puutteen takia pihanurmella.

Koska kasvustoa ei juuri lainkaan ollut eikä kasvuston häirinnän mahdollisuus ollut olennaista, kammiojärjestelmän pinta oli osittain himmennetty. Kansi oli valoa läpäisevää polykarbonaattia, mutta seinämien suojaksi oli jätetty himmentävä kalvo. Tällä pystyttiin ehkäisemään mahdollisesti valon aiheuttama häiriö, mutta toisaalta järjestelmä ei ollut täysin valoa läpäisemätönkään (Kuvat 5 ja 6 sivulla 25).

Koekäyttö suoritettiin 4.4.2020 Somerolla. Sää oli puolipilvinen ja ulkolämpötila oli noin + 5 °C. Ilmanpaine Jokioisten sääasemalla mitattuna oli tapahtuma-ajankohtaan 1 015 hPa. Osassa testeistä mittapäitä lämmitettiin noin 60 sekuntia ennen kuin kansi laitettiin kiinni ja käytettävää dataa alettiin keräämään. Osassa testeistä mittapäät olivat valmiiksi lämmitettyinä, jolloin kansi voitiin sulkea milloin tahansa ja datankeruu voitiin aloittaa välittömästi.

Hiilidioksidilukemien ilmaisemisessa käytettiin yksikköä ppm ja mittatulokset kerättiin manuaalisesti. Data esitettiin tietokoneella ja käsimittauslaitteella samanaikaisesti. Opinnäytetyön osalta esitetty data rajoitetaan vain toisella hiilidioksidimittapäällä saavutettuihin tuloksiin. Hiilidioksidivuon laskettiin, mikäli data sen mahdollisti. Laskemiseen käytettiin sivulla 15 esitettyä yhtälöä.

Koska kasvusto ulkona oli vähäistä, testattiin kammiojärjestelmää myös Aloe Vera -huonekasvin aiheuttaman hiilidioksidivuon mittaamiseen sisätilassa, jossa lämpötila oli noin 22 °C. Tässäkin tapauksessa testit tehtiin sekä tuulettimen ollessa käytössä, että ilman tuuletusta. Kun tuuletin ei ollut käytössä, hiilidioksidipitoisuuksissa ei havaittu tapahtuvan suurta muutosta, joten testi keskeytettiin nopeammin. Ilman kiertäessä kammiossa hiilidioksidipitoisuuksia mitattiin 300 sekuntia (kuva 7 sivulla 26).

Maahengitystä mitattiin 75 \* 250 mm kokoisen putken sisään asetetulla CO<sub>2</sub> -mittapäällä. Putki oli asetettu noin 140 mm syvyydeltä hiekkaiseen maaperään (kuva 8 sivulla 26). Mittapään kärki oli asetettu noin 40 mm päähän maaperästä. Hiilidioksidipitoisuuden kasvu oli 120 sekunnin aikana hyvin nopeaa, mutta tasaantui sitten, joten datan keruu lopetettiin melko pian.



Kuva 5. Testitilanteessa käytetty kammiojärjestelmä.



Kuva 6. Testissä käytettiin kahta eri mallista Vaisalan hiilidioksidimittapäättä. Ilmankierrosta kammion sisällä vastasi pieni tuuletin.





Kuva 7. Aloe Vera -huonekasvilla tehdyt kokeet.



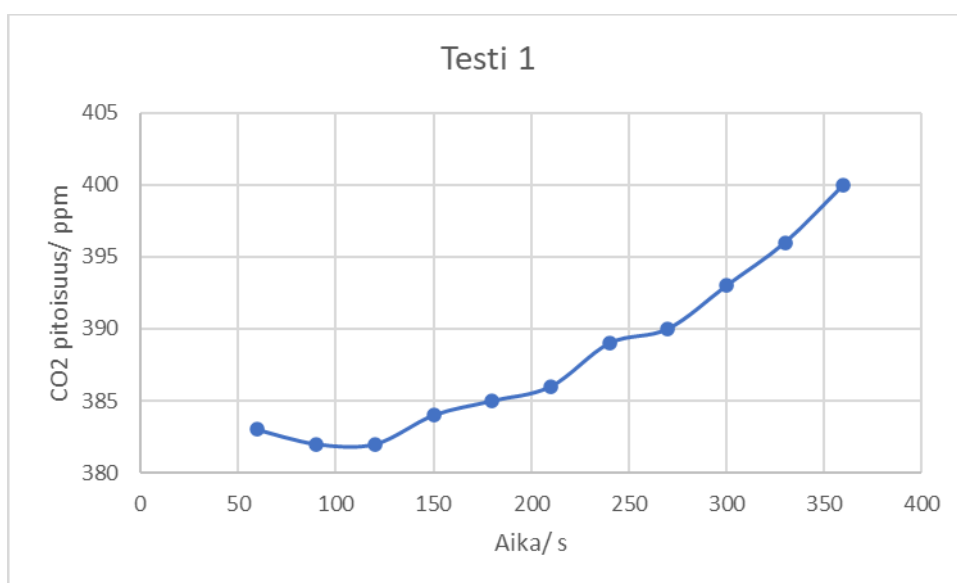
Kuva 8. Hiilidioksidin maahengityksen mittaaminen tuubijärjestelmällä.

## 9 TULOKSET

Testissä 1 mittapäitä lämmitettiin ensin 60 sekuntia, jonka jälkeen kansi suljettiin ja varsinaisen datan kerääminen aloitettiin. Testiä tehdessä voitiin todeta, että hiilidioksidipitoisuus kammiossa nousi hitaasti, joten dataa päätettiin kerätä 300 sekunnin ajalta kannen sulkeutumisesta. Ensimmäisessä testissä tuuletin oli käytössä ja ilmavirtaus suuntautui suoraan alhaalta ylöspäin. Taulukossa 9 ilmaistaan testin CO<sub>2</sub>-pitoisuudet ajanjaksoittain ja pitoisuuksien kuvaaja suhteutettuna aikaan kuvassa 9. Saatujen tulosten perusteella hiilidioksidivuoksi saatiin laskettua 0,196 g CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>.

Taulukko 9. Testin 1 hiilidioksidipitoisuudet ajanjaksoittain

Aika/ s	CO <sub>2</sub> -pitoisuus/ ppm
0	
30	
60	383
90	382
120	382
150	384
180	385
210	386
240	389
270	390
300	393
330	396
360	400

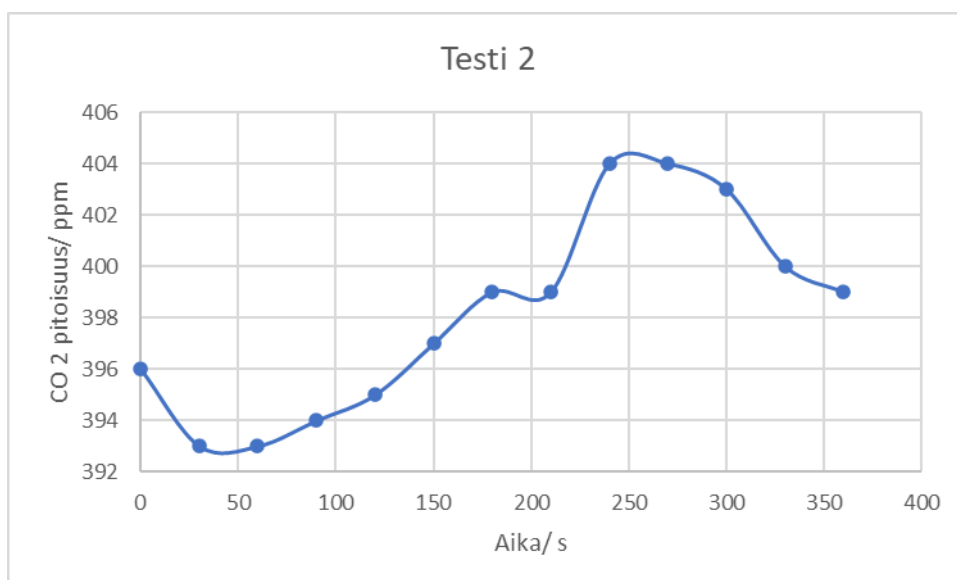


Kuva 9. Testi 1:n pitoisuuksien kuvaaja suhteutettuna kuluneeseen aikaan.

Testi 2:ta aloittaessa mittapääät olivat jo valmiiksi lämminneet, joten kansi suljettiin heti testin alussa ja käytettävää dataa voitiin kerätä ajanhetkestä 0 sekuntia lähtien. Tuuletin ei ollut käytössä tässä testissä. Lukemat tallennettiin 360 sekunnin ajalta, mutta hiilidioksidipitoisuudessa ei merkittävää muutosta tapahtunut. Taulukossa 10 ilmaistaan testin 2 CO<sub>2</sub>-pitoisuudet ajanjaksoittain ja pitoisuuksien kuvaaja suhteutettuna aikaan kuvassa 10.

Taulukko 10. Testin 2 hiilidioksidipitoisuudet ajanjaksoittain

Aika/ s	CO <sub>2</sub> -pitoisuus/ ppm
0	396
30	393
60	393
90	394
120	395
150	397
180	399
210	399
240	404
270	404
300	403
330	400
360	399



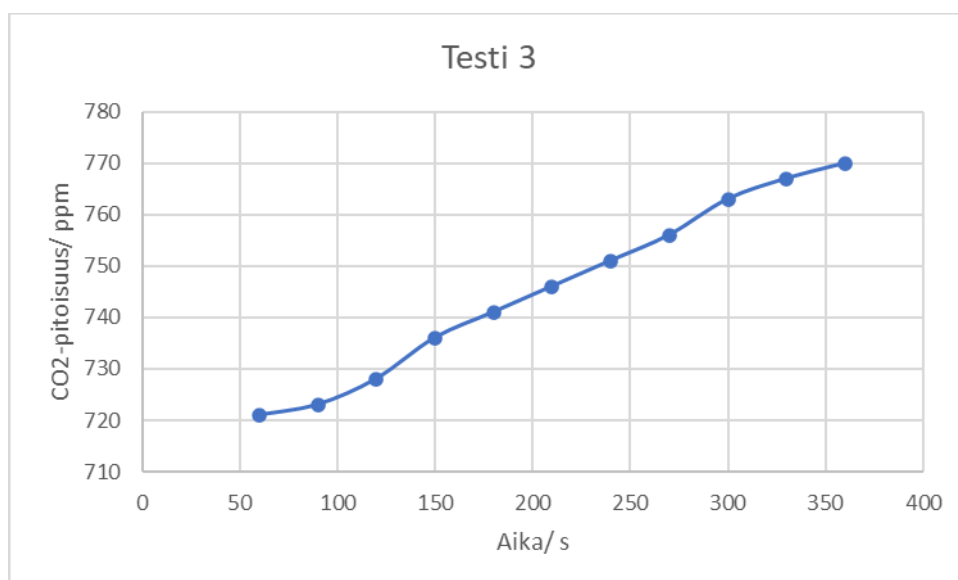
Kuva 10. Testi 2:n pitoisuuksien kuvaaja suhteutettuna kuluneeseen aikaan.



Testi 3 tehtiin Aloe Vera huonekasvilla sisätilassa. Mittapäitä lämmitettiin ensin 60 sekuntia, kunnes kansi suljettiin ja datankeruu aloitettiin. Tuuletin oli käytössä puhaltuen alhaalta ylöspäin noin 30 asteen kulmassa. Hiilidioksidipitoisuuksissa oli jatkuvaa kasvua ja dataa päätettiin kerätä 300 sekunnin ajalta. Taulukossa 11 ilmaistaan testin 3 CO<sub>2</sub>-pitoisuudet ajanjaksoittain ja pitoisuuksien kuvaaja suhteutettuna aikaan kuvassa 11.

Taulukko 11. Testin 3 hiilidioksidipitoisuudet ajanjaksoittain

Aika/ s	CO <sub>2</sub> -pitoisuus/ ppm
0	
30	
60	721
90	723
120	728
150	736
180	741
210	746
240	751
270	756
300	763
330	767
360	770

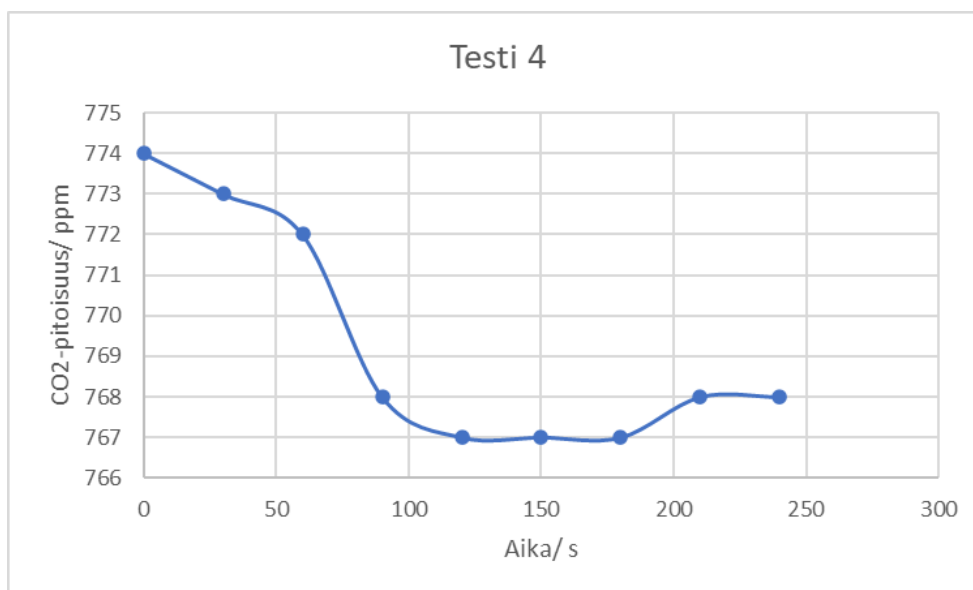


Kuva 11. Testi 3:n pitoisuuksien kuvaaja suhteutettuna kuluneeseen aikaan.

Testi 4 tehtiin myös Aloe Vera huonekasvilla. Mittapääät olivat valmiiksi lämmitettyinä, joten kansi suljettiin ajassa 0 sekuntia ja dataa alettiin keräämään välittömästi. Tuuletin ei ollut käytössä. Hiilidioksidilukemissa ei merkittävää muutosta tapahtunut. Testi päätettiin, kun aloituksesta oli kulunut 240 sekuntia. Taulukossa 12 ilmaistaan testin 4 CO<sub>2</sub>-pitoisuudet ajanjaksoittain ja pitoisuuksien kuvaaja suhteutettuna aikaan kuvassa 12.

Taulukko 12. Testin 4 hiilidioksidipitoisuudet ajanjaksoittain

Aika/ s	CO <sub>2</sub> -pitoisuus/ ppm
0	774
30	773
60	772
90	768
120	767
150	767
180	767
210	768
240	768

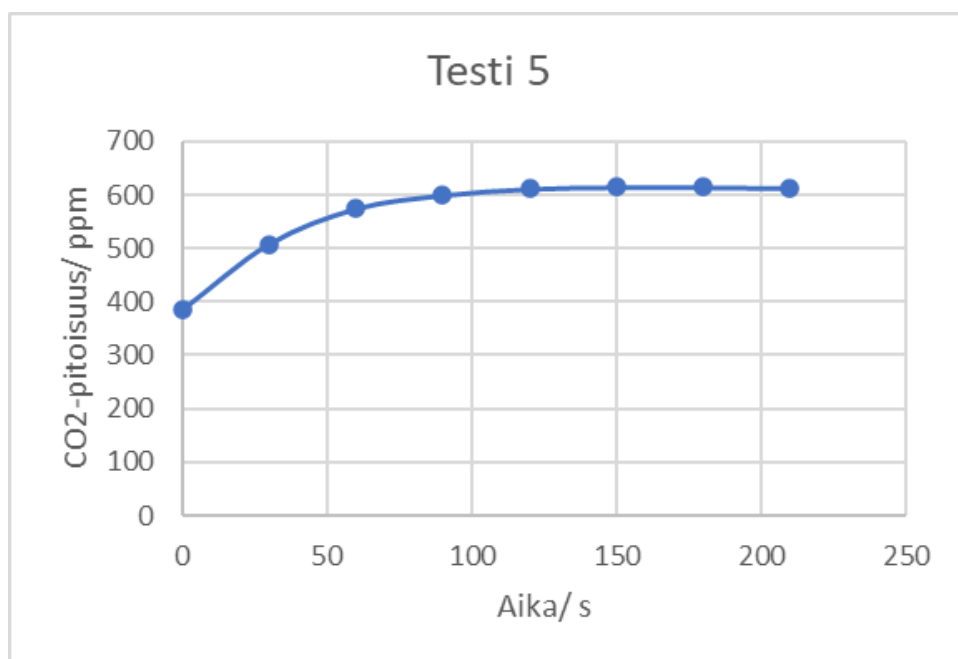


Kuva 12. Testi 4:n pitoisuuksien kuvaaja suhteutettuna kuluneeseen aikaan.

Testissä 5 mitattiin hiilidioksidin maahengitystä tuubimenetelmällä. Hiilidioksidimittapää oli valmiiksi lämmitetty, joten dataa saatiin kerättyä ajankohdasta 0 sekuntia alkaen. Hiilidioksidipitoisuus lähti välittömästi nopeaan kasvuun ja tasaantui 90 sekunnin jälkeen aloituksesta. Taulukossa 13 (s. 31) ilmaistaan testin 5 CO<sub>2</sub>-pitoisuudet ajanjaksoittain ja pitoisuuksien kuvaaja suhteutettuna aikaan kuvassa 13 (s. 31).

Taulukko 13. Testin 5 hiilidioksidipitoisuudet ajanjaksoittain

Aika/ s	GMP252
0	385
30	508
60	574
90	599
120	611
150	614
180	614
210	612



Kuva 13. Testi 5:n pitoisuuksien kuvaaja suhteutettuna kuluneeseen aikaan.

## 10 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA

Kammiojärjestelmää on käytetty hiilidioksidivuon mittaamisessa ja mallintamisessa vaihtelevissa määrin jo vuosikymmenten ajan. Järjestelmä soveltuu hyvin paikalliseen ja pistemäiseen mittaamiseen. Koko peltolohkon hiilidioksidivuon mallintaminen onnistunee, mikäli on tutkimustietoa muista yhdistävistä tekijöistä, kuten esimerkiksi NDVI-indeksin korreloivuudesta hiilidioksidipitoisuuslukemiin. Kammiojärjestelmiä voi olla myös useampia samalla loholla, jolloin useamman kammion kaasu on mahdollista kierrättää vuorotellen yhden erillisen mittapään läpi. Yksi vaihtoehto saattaisi olla myös Eddy kovarianssi -menetelmä, joka on huomattavasti kammiojärjestelmää kalliimpi.

Kammiojärjestelmät ovat usein hyvin raskasrakenteisia, eikä niitä ole tarkoitus liikutella mittauskauten sisällä. Opinnäytetyötä ja siihen liittyvää projektia varten suunniteltiin hyvin kevytrakenteinen järjestelmä, joka myös verkkoratkaisultaan ja sähkönsyötöltään mahdollistaa liikuttelun esimerkiksi samalla peltolohkolla, saman kasvukauden aikana.

Tätä tutkimusta varten suunnitellun kevytkammion etuna on myös integroitavuus. Järjestelmä sisältää kaiken laadukkaaseen tutkimukseen vaadittavan laitteiston samassa paketissa eikä erillisiä osia tarvita. Järjestelmä on hyvin nopeasti asennettavissa mittaushetkeen ja datankeruun voi aloittaa heti. Järjestelmä on myös hyvin muokattavissa haluttujen mittauseräparametrien mukaisesti. Siitä on helppo jättää osa antureista pois tai siihen voidaan lisätä joitakin lisäarvoa tuottavia sensoreita.

Kasvusto elää runsaasti kasvukauden aikana ja sääolot saattavat vaihdella huomattavasti, joten automaattisuudesta huolimatta huoltokäyntejä on todennäköisesti tehtävä parin viikon välein. Toisaalta mittaustapahtumaa ei tarvitse toistaa joka päivä, vaan esimerkiksi kahden viikon mittausväli saattaa olla riittävä.

Hiilidioksidilukemien muutos suhteessa ajan muutokseen ilmaisee, ovatko maaperä ja kasvillisuus hiilidioksidia sitovia vai vapauttavatko ne hiilidioksidia ilmakehään. Testitulanteissa kasvillisuutta oli melko vähän, mutta hitaasti nouseva kuvaaja on tulkittavissa siten, että kasvillisuus ja maaperä vapauttavat hiilidioksidia hieman enemmän kuin sitoi. Aloe Vera -huonekasvi vapautti hiilidioksidia jo huomattavasti nopeammin.

Kuvaajista lineaarisina voidaan pitää oikeastaan vain testi 1:n, testi 3:n ja testi 5:n kuvaajia. Testi 1:ssä ja testi 3:ssa tuuletin oli käytössä, testi 5 oli tuubimittaus. Testitulanteissa mittapäiden suodattimet olivat paikoillaan. Mikäli suodattimet poistetaan, saattavat lukemat olla tarkempia. Hiilidioksidivuon laskeminen oli järkevää oikeastaan vain testi 1:n pitoisuuslukemista. Vuo oli melko pieni, mutta asettuu sopivaan skaalaan aikaisempien tutkimusten perusteella saatujen tulosten kanssa. Testitulanteissa

antureiden lämmitysaika oli melko lyhyt, jolloin on mahdollista, että hiilidioksidipitoisuuden muutos kuvastaa enemmänkin mittalaitteen stabiloitumista kuin todellista hiilidioksidipitoisuuden muutosta.

Ilman kierrättäminen kammion sisällä tuulettimen avulla on kokemusten perusteella tarpeellinen, mutta testitilanteissa ilmavirtaus saattoi olla liian voimakas. Vaikka tuulettimet olisivatkin pienikokoisia, niiden tuuletusnopeus on aiempien tutkimusten suositusten mukaan säädettävä mahdollisimman pieneksi. Niiden virtausnopeutta voidaan hiljentää ja tasoittaa esimerkiksi verkon tai harson avulla. Ihannetilanteessa jäljitettäisiin kammion ulkopuolinen tuulen voimakkuus vastaamaan tuulettimien aiheuttamaa ilmavirtaa.

Pelkän hiilidioksidin maahengityksen mittaaminen onnistuu vertikaalisesti maaperään upotettavan putken avulla. Anturi sijaitsee putken sisällä lähellä maaperää. Testi osoitti, että hiilidioksidipitoisuuden muutokset saattavat olla tässä järjestelmässä hyvinkin nopeita. Menetelmän ja tulosten tarkempi analysointi jätetään kuitenkin tämän työn ulkopuolelle.

## LÄHTEET

Aaltonen, H. (2019). Kasvit ilmastonmuutoksen vastaisen taistelun eturintamassa. *Loimu* 2/2019. Haettu 12.2.2020 osoitteesta [https://www.loimu.fi/lehti/artikkelit/2019/2/Kasvit\\_ilmastonmuutoksen\\_vastaisen\\_taistelun\\_eturintamassa](https://www.loimu.fi/lehti/artikkelit/2019/2/Kasvit_ilmastonmuutoksen_vastaisen_taistelun_eturintamassa)

Apogee. (n.d.). Innovative Environmental Sensors Since 1996. Haettu 6.3.2020 osoitteesta <https://www.apogeeinstruments.com>

Apogee. (2020). Owner's Manual. Haettu 6.3.2020 osoitteesta <https://www.apogeeinstruments.com/content/SQ-421-manual.pdf>

Bulsathaporn, A., Suekhum, D., Hanpattanakit, P., Sanwangsri, M., Chidthaisong, A., Towprayoon, S., Inubushi, K. & Limtong, P. (2018). Soil CO<sub>2</sub> emissions measured by closed chamber and soil gradient methods in dry dipterocarp forest and sweet sorghum plots. *ScienceAsia*. 44(1). ss. 1–10. Haettu 28.2.2020 osoitteesta [http://scieceasia.org/2018.44.n1/scias44\\_1.pdf](http://scieceasia.org/2018.44.n1/scias44_1.pdf)

Busch, W. (n.d.). Experiences with satellite radar monitoring of ground movements over underground gas and CO<sub>2</sub> reservoirs. Teoksessa M. Z. Hou, X. Heping & J. S. Yoon (toim.) *Underground Storage of CO<sub>2</sub> and Energy*. London, UK: Taylor & Francis Group, ss. 33–37.

Carbon Action (n.d.). Haettu 28.2.2020 osoitteesta <https://carbonaction.org/etusivu/>

European Environment Agency. (2012). Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2012. Haettu 13.2.2020 osoitteesta <https://www.eea.europa.eu/publications/climate-impacts-and-vulnerability-2012/>

European Environment Agency. (2017). Soil organic carbon. Haettu 13.2.2020 osoitteesta <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/soil-organic-carbon-1/assessment>

Geo-Work. (n.d.). Maatutkaluotaus menetelmänä. Haettu 14.2.2020 osoitteesta <https://www.geo-work.com/maatutkaluotaus-ja-mittaukset/>

Ilmatieteen laitos (2015). Ilmakehä-ABC. Haettu 9.1.2020 osoitteesta [https://ilmatieteenlaitos.fi/ilmakeha-abc?p\\_p\\_id=abc\\_WAR\\_fmiwwwportlets&p\\_p\\_lifecycle=0&p\\_p\\_state=normal&p\\_p\\_mode=view&p\\_p\\_col\\_id=column-2&p\\_p\\_col\\_count=1&abc\\_WAR\\_fmiwwwportlets\\_selectedInitial=H](https://ilmatieteenlaitos.fi/ilmakeha-abc?p_p_id=abc_WAR_fmiwwwportlets&p_p_lifecycle=0&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_col_id=column-2&p_p_col_count=1&abc_WAR_fmiwwwportlets_selectedInitial=H)

Ilmasto-opas. (n.d.). Maapallon ilmastohistoria. Haettu 12.2.2020 osoitteesta <https://ilmasto-opas.fi/fi/ilmastonmuutos/ilmio/-/artikkel/b0b91934-12d1-49cd-88dd-7e08250a4e88/maapallon-ilmastohistoria.html>

Ilmatieteen laitos. (2017). Maaperästä ratkaisu ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi? Haettu 28.2.2020 osoitteesta [https://www.ilmatieteenlaitos.fi/tiedotearkisto/-/journal\\_content/56/30106/451159379](https://www.ilmatieteenlaitos.fi/tiedotearkisto/-/journal_content/56/30106/451159379)

IPCC. (2013). Climate Change 2013. The Physical Science Basis. Haettu 12.2.2020 osoitteesta [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5\\_all\\_final.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_all_final.pdf)

Jylhä, M. (2017). *Arktis-alpiinisen alueen hiilidioksidivuon mittaaminen ja mallintaminen maisemamittakaavassa*. Pro gradu -tutkielma. Maantieteen tutkinto-ohjelma. Helsingin yliopisto. Haettu 14.2.2020 osoitteesta [https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/228856/Progradu\\_Markus\\_Jylha.pdf?sequence=2](https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/228856/Progradu_Markus_Jylha.pdf?sequence=2)

Koskinen, M., Minkkinen, K., Ojanen, P., Kämäräinen, M., Laurila, T. & Lohila, A. (2013). Measurements of CO<sub>2</sub> exchange with an automated chamber system throughout the year: challenges in measuring night-time respiration on porous peat soil. *Biogeosciences*. 11/2014, ss. 347–363. Haettu 28.2.2020 osoitteesta <https://www.biogeosciences.net/11/347/2014/bg-11-347-2014.pdf>

Koskinen, M. (2019). CO<sub>2</sub> mittaaminen. Sähköpostiviesti tekijälle 30.10.2019.

Lahti, J. & Tiainen, J. (2017) Dronen tuottaman kuvan käsittely. Haettu 28.2.2020 osoitteesta <https://repo.epedu.fi/ReportronicJulkaisu/Webserver/GetDocument.aspx?c=Seamk&d=4fd1743e-f775-403a-ad54-f1fa3e3e280f>

MayorsIndicators. (n.d.). CO<sub>2</sub>-raportti. Haettu 12.2.2020 osoitteesta <https://www.co2-raportti.fi/?page=ilmastonmuutos>

Potenza, A. (2017). A NASA satellite that monitors CO<sub>2</sub> is revealing the inner workings of our planet. *The Verge*. Haettu 14.2.2020 osoitteesta <https://www.theverge.com/2017/10/12/16460014/nasa-oco-2-satellite-carbon-dioxide-earth-atmosphere-plants-ocean-climate-change>

Pahkala, E. (2008). *Maa- ja juurihengitys peltomaassa: ympäristövasteet sekä kasvilajin ja maatyypin vaikutus*. Pro gradu -tutkielma. Luonnontieteiden ja ympäristötieteiden tiedekunta Ympäristötieteen koulutusohjelma. Kuopion yliopisto. Haettu 28.2.2020 osoitteesta [https://epublications.uef.fi/pub/urn\\_nbn\\_fi\\_uef-20090056/urn\\_nbn\\_fi\\_uef-20090056.pdf](https://epublications.uef.fi/pub/urn_nbn_fi_uef-20090056/urn_nbn_fi_uef-20090056.pdf)

Pumpanen, J., Kolari, P., Ilvesniemi, H., Minkkinen, K., Vesala, T., Niinistö, S., Lohila, A., Larmola, T., Morero, M., Pihlatie, M., Janssens, I., Yuste, J. C., Grünzweig, J. M., Reth, S., Subke, J.-A., Savage, K., Kutsch, W., Østreg, G., Ziegler, W., Anthoni, P., Lindroth, A. & Hari, P. (2003). Comparison of different chamber techniques for measuring soil CO<sub>2</sub> efflux. *Agricultural and Forest Meteorology* 123(3–4), ss. 159–176

Regina, K. (2018). Hiilen sidonta peltomailla. Haettu 13.2.2020 osoitteesta [http://www.ilmase.fi/site/wp-content/uploads/2018/01/Regina\\_maatila-verkosto-2018\\_valmis.pdf](http://www.ilmase.fi/site/wp-content/uploads/2018/01/Regina_maatila-verkosto-2018_valmis.pdf)

Sarvikas, P., Suorsa, M., Rintamäki, E., Vapaavuori, E., Aro, E.-M. & Tyystjärvi, E. (2017). *Fotosynteesi*. Helsinki: Books on Demand GmbH.

Shackley, S., Ruysschaert, G., Zwart, K. & Glaser, B. (2016). *Biochar in European Soils and Agriculture: Science and Practise*. Bembo: Fish Books Ltd.

Sitra. (n.d.) Pellot hiilinieluiksi: Carbon Action pilotti). Haettu 28.2.2020 osoitteesta <https://www.sitra.fi/hankkeet/carbon-action-pilotti/>

Suomen Osuuskauppojen Keskuskunta. (2019). S-ryhmä rahoittamaan hiiliviljelyn tutkimusta tiloilla. Haettu 28.2.2020 osoitteesta [https://s-ryhma.fi/uutinen/s-ryhma-rahoittamaan-hiiliviljelyn-tutkimusta-tilo/news-5026955\\_384136](https://s-ryhma.fi/uutinen/s-ryhma-rahoittamaan-hiiliviljelyn-tutkimusta-tilo/news-5026955_384136)

Vaisala. (2013). Hiilidioksidin mittaaminen. Haettu 14.2.2020 osoitteesta <https://www.vaisala.com/sites/default/files/documents/CEN-TIA-Parameter-How-to-measure-CO2-Application-note-B211228FI-A.pdf>

Vaisala. (2016). GMP252 hiilidioksidimittapää ppm-tason pitoisuusmittauksiin. Haettu 3.3.2020 osoitteesta <https://www.vaisala.com/sites/default/files/documents/CEN-G-GMP252-Datasheet-B211567FI.pdf>

Vaisala. (2018). GMP251 -hiilidioksidimittapää prosenttitason pitoisuusmittauksiin. Haettu 3.3.2020 osoitteesta <https://www.vaisala.com/sites/default/files/documents/GMP251-Datasheet-B211487FI.pdf>

Vaisala. (2019). GMP343 Carbon Dioxide Probe. Haettu 9.4.2020 osoitteesta <https://www.vaisala.com/sites/default/files/documents/GMP343-Datasheet-B210688EN.pdf>

Valio. (2018). Maitotiloilta ratkaisuja ilmastonmuutoksen hillintään – Valio ja Itämeri-säätiö Baltic Sea Action Group yhteistyöhön. Haettu 28.2.2020 osoitteesta <https://www.valio.fi/yritys/media/uutiset/maitotiloilta-ratkaisuja-ilmastonmuutoksen-hillintaan-valio-ja-itameri-saatio-baltic-sea-action-group-yhteistyohon/>



Wang, G., Wu, X., Mo, L. & Zhao, J. (2018). SCFSen: A Sensor Node for Regional Soil Carbon Flux Monitoring. *Sensors*. 18(11), ss. 1–19. Haettu 28.2.2020 osoitteesta <https://www.mdpi.com/1424-8220/18/11/3986/htm>

Wikimedia Commons. (2008). Hiilen kiertokulku luonnossa. Haettu 3.3.2020 osoitteesta [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Carbon\\_cycle-cute\\_diagram.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Carbon_cycle-cute_diagram.svg)

Yara. (n.d.). Hiilensidonta. Haettu 13.2.2020 osoitteesta <https://www.yara.fi/tietoa-yarasta/ymparisto/hiihijalanjalki/hiilensidonta/>