

**PULSSILEIMAUSKAMMIO: IOT-LAITTEEN SUUNNITTELU JA  
TOTEUTUS**



Ammattikorkeakoulututkinnon opinnäytetyö  
Tieto- ja viestintäteknikka, biotalouden koulutus, Forssa  
Syyslukukausi 2021  
Petri Niemi

Tieto- ja viestintäteknikka, biotalouden koulutus

Tiivistelmä

Tekijä Petri Niemi

Vuosi 2021

Työn nimi Pulssileimauskammio: IoT-laitteen suunnittelu ja toteutus

Ohjaajat Ari Hietala, Jari Hyväluoma

---

## TIIVISTELMÄ

Opinnäytetyön tavoitteena oli suunnitella ja toteuttaa HAMK Bio -tutkimusyksikölle HiiletIn-hankeeseen mittalaite, joka mahdollistaa jatkotutkimuksiin tarvittavien raiheinäkoejäsenten pulssileimauksen <sup>13</sup>CO<sub>2</sub>-hiilidioksidilla.

Toimeksiannossa laitteelle määriteltiin seuraavat kriteerit:

- Laitteen tulee rakenteellisesti mahdollistaa leimaustapahtuma kenttäolosuhteissa ja sen tulee olla toistettavissa luotettavasti.
- Laitteen pitää pystyä mittaamaan ja keräämään leimaustapahtumalle kriittistä dataa.
- Laite tulee olla käyttöönottotestauksen mahdollistavassa kehitysvaiheessa vuoden 2021 kesäkuun loppuun mennessä.

Toiminnallisen opinnäytetyön suunnittelu ja toteutus aloitettiin toukokuussa 2021. Laitteen käyttöönottotestaus suoritettiin heinäkuussa 2021.

Opinnäytetyön lopputuloksena syntynyt IoT-laite mahdollistaa tilaajalle raiheinäkoejäsenten pulssileimauksen kenttäolosuhteissa sekä datan tallennuksen ja seuraamisen leimaustapahtumasta reaaliaikaisesti.

Avainsanat IoT, Laitesuunnittelu, Pulssileimaus

Sivut 49 sivua ja liitteitä 24 sivua

---

ABSTRACT

The aim of the thesis was to design and implement a measuring instrument for the HAMK Bio -research unit in the HiiletIn project. The device should allow pulse-labelling of test members with labelled  $^{13}\text{CO}_2$  necessary for further research into the project.

In the assignment, the following criteria were defined for the device:

- The device should structurally enable a labelling event under field conditions and be reproducible.
- The measuring device must be able to measure and collect critical data for the labelling event.
- The measuring instrument must be in the development phase enabling commissioning testing by the end of June 2021.

The planning and implementation of the functional thesis began in May 2021. The commissioning testing of the device was carried out in July 2021.

The IoT device, which was the end result of the thesis, enables the client to pulse label test members in field conditions and to record and track data from the pulse labelling event in real time.

Keywords IoT, Device design, Pulse-labelling

Pages 49 pages and appendices 24 pages

## Sisällys

1	Johdanto .....	1
2	Toimeksianto .....	1
2.1	Toimeksiannon määrittely .....	1
2.2	Tavoite ja tarkoitus .....	2
2.3	Alustava aikataulu .....	3
3	Internet of Things .....	3
3.1	IoT-historia lyhyesti.....	3
3.2	Mihin IoT on menossa? .....	4
3.3	Käyttökohteet .....	6
3.3.1	Älykoti.....	7
3.3.2	Päälle puettavat ja mukana kulkevat laitteet .....	8
3.3.3	IIoT – Teollisuuden esineiden internet .....	8
3.3.4	Älykkäät ajoneuvot.....	8
3.4	IoT-laitteen ominaisuuksien määrittäminen käyttökohteen mukaan .....	9
3.4.1	Kehitysalustan valinta .....	9
3.4.2	Järjestelmän skaalautuvuus ja tietoturva .....	10
4	Leimauskammion suunnittelu ja toteutus .....	11
4.1	Leimauskammion suunnittelu.....	12
4.1.1	Kupu .....	12
4.1.2	Jalusta.....	14
4.1.3	Kammion tiivistäminen .....	14
4.2	Tekniikan suunnittelu.....	15
4.2.1	Sensarit.....	15
4.2.2	Datan hallinta ja yhteydet .....	17
4.2.3	Hallintapaneeli .....	17
4.2.4	Virranhallinta.....	17
4.3	Kammion toteutus .....	18
4.4	Tekniikan toteutus .....	20
4.4.1	Sensoryyksiköt.....	21

4.4.2	Tekniikan kotelointi ja sensoritelineet .....	23
4.4.3	Ilmankiertojärjestelmä .....	25
4.4.4	Jäähdytysjärjestelmä .....	26
4.4.5	Hallintapaneeli .....	27
4.4.6	Virranhallinta.....	28
4.5	Ohjelmointi ja datan hallinta .....	29
4.5.1	Laiteohjelma.....	29
4.5.2	Datan hallinta .....	29
4.5.3	Selainpohjainen käyttöliittymä .....	30
5	Pulssileimauskammion toiminta ja testaus.....	31
5.1	Hiilidioksidisensoreiden kalibrointi.....	32
5.2	Esitestausta .....	32
5.2.1	Testiympäristö.....	33
5.2.2	Testauksen toteutus.....	33
5.2.3	Esitestien tulokset .....	34
5.2.4	Esitestausta pohjalta tehdyt muutokset .....	36
5.3	Pulssileimauskammion käyttöönottestaus .....	37
5.3.1	Testiympäristö.....	38
5.3.2	Testien toteutus .....	39
5.3.3	Testitulokset.....	39
5.3.4	Käyttöönottestauksen pohjalta tehdyt muutokset .....	40
6	Johtopäätökset ja pohdinta.....	42
6.1	Opinnäytetyön tulokset .....	43
6.2	Kehitysehdotukset .....	44
6.3	Toimeksiantajan arvio sekä laitteen käyttöönotto.....	45
	Lähteet.....	47

## **Liitteet**

- Liite 1 Polykarbonaatin ja akryylin tekniset ominaisuudet
- Liite 2 Pulssileimauskammion datan lähetys laitteesta palvelimelle
- Liite 3 Saapuvan HTTP Post -viestin vastaanottaminen ja siirto tietokantaan
- Liite 4 Tietokantataulun luominen MySQL-relaatiotietokantaan Alwaysdata-palvelussa
- Liite 5 Käyttöliittymä
- Liite 6 CSV Export -skriptin luominen HTML-käyttöliittymään
- Liite 7 Laiteohjelman lähettäminen Lily TTGO Sim800I -mikro-ohjaimen
- Liite 8 Hiilidioksidisensorin suojaaminen auringolta
- Liite 9 Pulssileimauskammion käyttöohjeet ja käyttöönottestauksen leimaustaulukko
- Liite 10 Pulssileimauskammion esitestaus vaiheet 2 ja 3

## 1 Johdanto

Opinnäytetyössä käydään läpi toimeksiannon pohjalta toteutetun IoT-laitteen suunnittelu, toteutus ja testausvaiheet käyttöönottestaukseen asti. Aluksi kerrotaan hieman IoT-historiasta ja tulevaisuuden näkymistä sekä IoT-laitesuunnittelusta yleisellä tasolla. Osissa pohditaan myös millaisia asioita tulisi ottaa huomioon IoT-alustaa ja datahallintaa suunnitellessa.

Suunnitteluvaihe on jaettu kahteen osioon. Ensimmäisessä vaiheessa keskitytään pulssileimauskammion rakenteellisiin ratkaisuihin. Toisessa vaiheessa perehdytään laitteen tekniseen suunnitteluun. Pulssileimauskammion toteutusvaihe sekä ohjelmointiosio käydään läpi heti suunnitteluvaiheen jälkeen.

Testausosio jakaantuu esitestaukseen ja käyttöönottestaukseen. Testitulokset sekä tehdyt muutokset tarkastellaan molempien testivaiheiden lopussa. Yhteenvedossa käydään läpi toimeksiannon kokonaisuuden arviointi tekijän näkökulmasta ja huomioidaan tilaajan antama palaute. Yhteenvedossa pohditaan myös toteutetun laitteen jatkokehitystä vaativia osa-alueita.

## 2 Toimeksianto

Pulssileimauskammion on tilannut Hämeen ammattikorkeakoulun HAMK Bio-tutkimusyksikkö. Opinnäytetyönä valmistuva prototyyppi, käyttöliittymä, dokumentaatio sekä kerätty data luovutetaan tilaajalle kehitystyön päätyttyä. Opinnäytetyö suoritetaan vuoden 2021 aikana.

### 2.1 Toimeksiannon määrittely

Toimeksiannossa tilatun pulssileimauskammion tulee sisältää seuraavat ominaisuudet:

1. Pulssileimauskammion materiaalit ja mitat tulee soveltua raiheinän leimaamiseen kenttäolosuhteissa.

2. Pulssileimauskammion tulee olla tiivis ja sen tulee mahdollistaa  $^{13}\text{CO}_2$ -leimojen syöttö kammioon injektioruiskulla.
3. Kammioista mitataan hiilidioksiditasoja leimausprosessin ajalta. Mittaustulokset tulee olla nähtävillä käyttäjälle reaaliaikaisesti.
4. Mitattu data pitää pystyä tallentamaan ja se tulee olla saatavissa muodossa, joka mahdollistaa data-analyysin tekemisen.
5. Pulssileimauskammion tulee kestää säilytyksen ja operoinnin puolesta suomalaisen kesän ulko-olosuhteita.

Projektin edetessä tilauksen määrittelyä voidaan päivittää tarpeen vaatiessa. Laitteen toiminta varmistetaan käyttöönottoasteissa valvotuissa olosuhteissa Luonnonvarakeskuksen tiloissa. Käyttöönottoasteiden aikana leimattavan kasvin isotooppirakenteen tarkistaa Jyväskylän Yliopisto.

## 2.2 Tavoite ja tarkoitus

Opinnäytetyössä tilattua pulssileimauskammiota tullaan käyttämään osana HiiletIn-hanketta. Hankkeessa tutkitaan peltoaan orgaanisen aineksen ja hiilen kertymistä ja hävikkiä, sekä muutosten taustalla vaikuttavia prosesseja. HiiletIn-hankkeen tiedottamisesta vastaa ProAgria. (ProAgria, 2021)

Pulssileimauskammiota käytetään raiheinän leimaamiseen  $^{13}\text{CO}_2$ -hiilidioksidilla, sekä mittaamaan kammion ja ympäristön olosuhteita prosessin aikana. Lopputuloksena tavoitellaan laitetta, joka mahdollistaa raiheinäkoejäsenten leimaamisen hallituissa olosuhteissa. Koejäseniä hyödynnetään hankkeeseen liittyvissä jatkotutkimuksissa orgaanisen aineen hajoamiseen sekä hiilen sitoutumiseen erilaisiin maaperiin. Onnistuneella koejäsenellä on kuivatusprosessin jälkeen sidottuna riittävä määrä leimattua  $^{13}\text{C}$ -hiiltä, jotta sen isotooppijakauma on mahdollista selvittää massaspektrometrillä.

Kasvukauden 2021 aikana on tarkoitus tuottaa kolme koejäsentä kahdessa vaiheessa. Ensimmäinen koejäsen kasvatetaan käyttöönottoasteausvaiheessa heinäkuussa 2021. Kaksi muuta koejäsentä kasvatetaan kenttäkokeessa, joka toteutetaan elokuussa välittömästi



käyttöönottestausvaiheessa leimatun koejäsenen jatkotutkimustulosten varmistuttua. Koejäsenen liittyvät jatkotutkimukset tehdään Luonnonvarakeskuksen ja Jyväskylän Yliopiston toimesta. Pulssileimauskammion kerättyä dataa kehitys- ja testausvaiheista hyödynnetään kenttäkokeen leimausaikataulun suunnittelussa, leimauksien kokonaismäärien tarpeen arvioinnissa ja laiteoptimoinnissa. Opinnäytetyö rajataan laitteen suunniteluun, toteutukseen, esitestaukseen sekä käyttöönottestaukseen.

### **2.3 Alustava aikataulu**

- 03.05.2021-07.05.2021: Tilauksen vastaanottaminen. Projektin määrittely.
- 10.05.2021-31.05.2021: Pulssileimauskammion suunnittelu.
- 01.06.2021-31.07.2021: Tekninen toteutus ja testaus.
- 01.08.2021-31.08.2021: Kenttäkoe.

## **3 Internet of Things**

Internet of Things tai suomeksi käännettynä esineiden internet kattaa laajan joukon dataa keräviä laitteita, jotka ovat yhteydessä verkkoon. McKinsey Global Institute (2013, s. 52) määrittelee asioiden internetin seuraavasti: "The Internet of Things refers to the use of sensors, actuators, and data communications technology built into physical objects—from roadways to pacemakers—that enable those objects to be tracked, coordinated, or controlled across a data network or the Internet."

### **3.1 IoT-historia lyhyesti**

Ensimmäisen yleisesti tiedossa olevan IoT-laitteen tarina sai alkunsa 1980-luvun alkupuolella, kun Carnegie Mellon -yliopiston tietotekniikan linjalla Pittsburghissa opiskellut David Nichols kyllästyi epätietoisuuteen virvoitusjuoma-automaatin saatavilla olevista tuotteista ja niiden lämpötiloista. Nicholsin ideana oli toteuttaa etäseuranta, jolla välttyttäisiin turhilta kävelyretkiltä automaatile kampuksen sisällä. Mukaan laitteen toteutukseen lähtivät

opiskelijat Mike Kazar ja Ivan Durham sekä koulun tutkimusinsinööri John Zsarnay. (IBM, 2018)

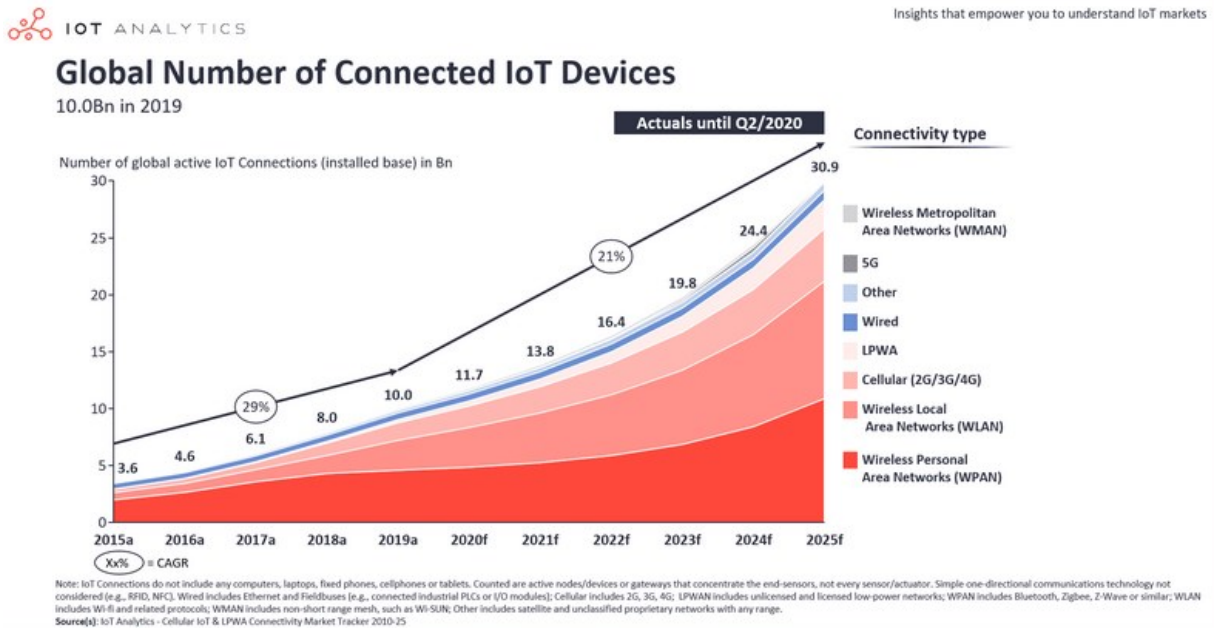
Juoma-automaatin tilanneseuranta toteutettiin havainnoimalla laitteen etupaneelin punaisia indikaatiolamppuja, jotka kertoivat kuuden pylväsmaisen pullonsyöttölinjan tilasta. Kun laitteesta ostettiin juoma, välähti sen linjaston valo muutaman sekunnin ajan. Linjaston ollessa loppuunmyyty syttyi merkkivalo palamaan, kunnes automaatti täytettiin uudelleen. Data siirrettiin kaapelilla osaston päätietokoneelle, joka oli kytkettynä nykyisen internetin edeltäjäksi pidettyyn ARPANET-verkkoon. Päätietokoneelle kirjoitettu ohjelma vertaili saapuvaa dataa ja siitä pystyttiin arvioimaan automaatin inventaario, sekä seuraavaksi myytävän juoman jäähtytysaika. Sovellus oli käytössä kaikissa kampuksen ARPANET-verkon tietokoneissa 1980-luvun alkupuolella. (IBM, 2018)

Internet of Things tai lyhyemmin IoT-nimitystä käytti ensimmäisen kerran Kevin Ashton vuonna 1999 esitellessään Protec & Gamble yritykselle toimitusketjunhallintaa radiotaajuisten etätunnisteiden avulla. Internetin ollessa 1990-luvun lopun kuumimpia trendejä, päätti Ashton nimetä esitelmänsä ytimekkäästi ”Internet Of Things”. Vaikka esitelmä sai aikaan pientä huomiota yritysjohdossa, yleistyi IoT-nimityksen käyttö vasta 2010-luvun puolella. (IoT Analytics, 2014)

### **3.2 Mihin IoT on menossa?**

IoT-laitteiden muodostamien yhteyksien määrä ylitti vuoden 2020 lopulla ensimmäistä kertaa muiden laitteiden muodostamien yhteyksien kokonaismäärän. Maailman yhteenlaskettujen yhteyksien määrästä arviolta 54 % eli 11.7 miljardia oli IoT-laitteista. IoT-laitteiden kokonaismäärän kasvun kehitys on ollut vauhdikkaampaa kuin oletettiin ja arvioita tulevaisuuden laitemäärästä on jouduttu korjaamaan ylöspäin toistuvasti. Tuoreen ennusteen mukaan (Kuva 1) vuonna 2025 IoT-laitteita tulee olemaan 30.9 miljardia. (IoT Analytics, 2020)

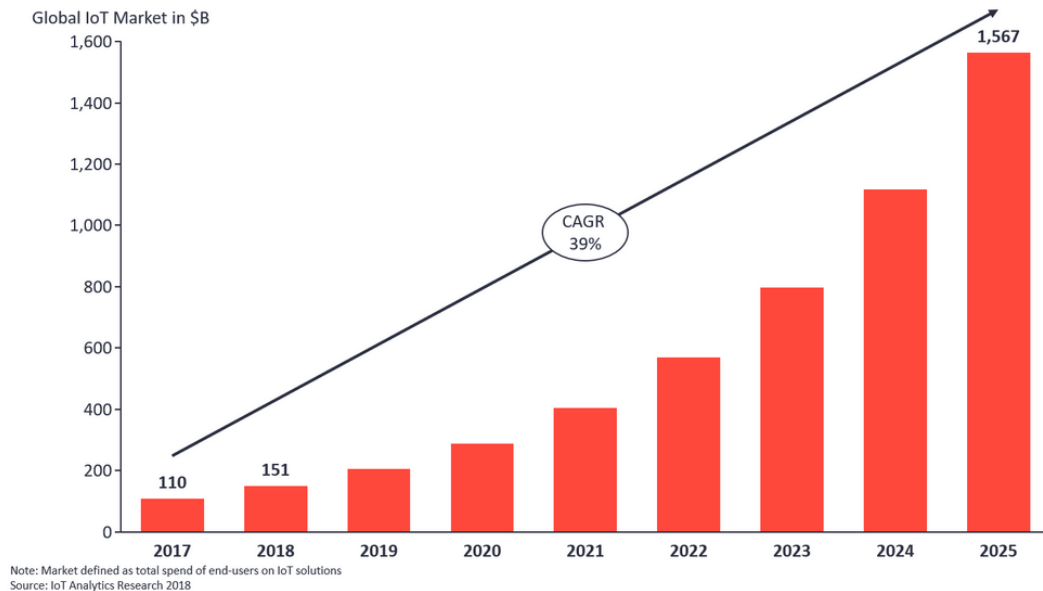
Kuva 1. Arvio verkossa olevien IoT-laitteiden kokonaismäärän kehityksestä vuoteen 2025 mennessä (IoT Analytics, 2020).



Laitemäärän huimaa kasvua on vauhdittanut mobiiliyhteys 5G:n ja vähävirtaisten LPWA-yhteyksien kuten Lora, NB-IoT, LTE-M ja Sigfox kehittyminen ja saatavuuden paraneminen viimeisen viiden vuoden aikana. LPWA-yhteyksien määrä odotetaan kasvavan 27 % vuositasolla 2019 vuodesta eteenpäin. Vähävirtaisuus sekä yhteyksien laaja kantama on mahdollistanut kevyiden ja halpojen akkukäyttöisten laitteiden markkinoille saapumisen. (IoT Analytics, 2020)

Kuva 2. Globaalin IoT-markkina-arvon odotetaan moninkertaistuvan vuoteen 2025 mennessä (IoT Analytics, 2018b).

## Global IoT Market Forecast



IoT-segmenttien osalta älykkäät kaupungit vastaavat 24 % uusien projektien kohteista. Yhdessä teollisuuden ja autoilun kanssa ne vastaavat yli 50 % IoT-projektien kokonaismäärästä. Suurin osa tunnetuista IoT-hankkeista toteutetaan Pohjois-Amerikassa (43 %) ja Euroopassa (35 %). (IoT Analytics, 2018a)

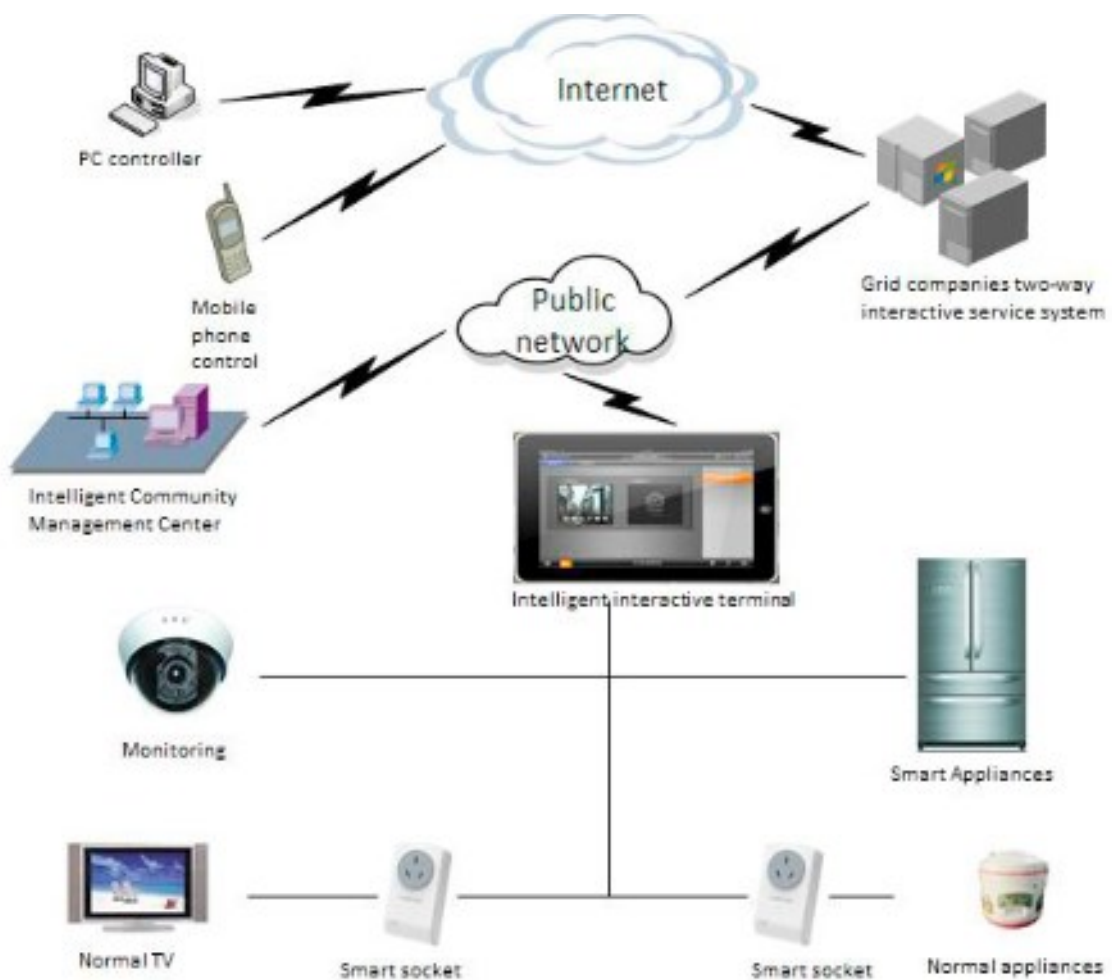
### 3.3 Käyttökohteet

Tämän otsikon alle listataan yleisiä IoT-käyttökohteita ja sovelluksia. Laitteiden parantunut saatavuus ja halventunut hinta on mahdollistanut IoT-laitteiden hyödyntämisen arkisissa käyttökohteissa. IoT-laitteiden yleistymisen tarjoaa mahdollisuuden myös uudelleenlaisille bisnesmalleille.

### 3.3.1 Älykoti

Älykoti-käsite on tullut kiihtyvällä tahdilla suuren kansan tietoisuuteen. Uutta kotia rakentaessa hyödynnetään lukuisia jo pitkään saatavilla olleita IoT-ratkaisuita. Laitteilla halutaan parantaa muun muassa energiataloutta, asumismukavuutta sekä ennakoivaa riskinhallintaa. Yleisiä älykotien IoT-laitteita ovat erilaiset termostaatit, vesijohtojen tippalukot, sähkölukot, älykkäät pistokkeet sekä älyvalot. Laitteiden data sekä etäohjaus on kätevästi hallittavissa esimerkiksi mobiililaitteilla tai ohjausyksiköllä. Kuvassa kolme esitellään yleisen älykodin järjestelmärakenne. (Li, ym., 2018, ss. 395–399)

Kuva 3. Havainnekuva älykodin järjestelmärakenteesta (Li, ym., 2018, s. 396).



### 3.3.2 Päälle puettavat ja mukana kulkevat laitteet

Päälle puettavien IoT-laitteiden suosion sekä markkinoiden kasvaminen on helposti havaittavissa päivittäisessä markkinoinnissa. Perinteisten puhelinten rinnalle on saapunut päälle puettavien seurantalaitteiden kuten älykellojen sekä älysormusten tapaiset laitteet. Kyseisten laitteiden toiminta perustuu erilaisten sensoreiden sekä sovellusten keräämään ja analysoimaan dataan laitetta kantavasta henkilöstä tai ympäristöstä. Laitteiden tueksi tarjotaan usein käyttäjän kannalta helppokäyttöisiä sovelluksia, joilla voidaan kerättyä dataa visualisoida reaaliajassa. (Lifewire, 2020)

### 3.3.3 IIOT – Teollisuuden esineiden internet

Teollisuus 4.0 lähtökohtana on viedä laitteiden välistä kommunikaatiota seuraavalle tasolle. IIoT tai Industry internet of Things on pikkuhiljaa yleistynyt käsite puhuttaessa teollisuuden IoT-ratkaisuista. Yritysten kiinnostusten kohteena on erityisesti prosessiketjujen seuraamisen tarkentuminen niin työntekijöiden kuin käytettävien teknologisten ratkaisuiden osalta. IIoT luo esimerkiksi mahdollisuuden tehostaa sekä nopeuttaa toimintamalleja, helpottaa inventaariota ja auttaa ennakoimaan laitehuoltoja. (Paessler, n.d)

### 3.3.4 Älykkäät ajoneuvot

Teknologinen kehitys datan keräämisen suhteen on ollut erityisen nopeaa autoteollisuudessa. Mobiiliverkkojen laajentuneet toiminta-alueet ovat mahdollistaneet lähes katkeamattoman datavirran autojen ja niiden valmistajien välille. Yhteydet mahdollistavat esimerkiksi ajoneuvojen etäpäivitykset ja auton järjestelmien etäseurannan.

IoT-laitteiden tiedonkeruupotentiaali on huomattu myös vakuutusyhtiöiden toimesta. Iso-Britanniassa on mahdollista saada alennusta ajoneuvoon liittyvistä vakuutusmaksuista todistamalla olevansa vastuullinen kuljettaja. RAC-yrityksen Black box insurance -palvelussa autoon asennetaan nimellisesti ilmailualalta tuttu mustalaatikko, joka tallentaa sijainti- ja kiihtyvyydsdataa. Data välitetään vakuutusyhtiölle mobiiliyhteyden avulla. Käyttäjä saa

ajokäyttäjyymisestäään pisteytyksen, joka on luettavissa palveluun kehitetyllä RAC Black Box Driver -sovelluksella. (RAC, n.d)

### **3.4 IoT-laitteen ominaisuuksien määrittäminen käyttökohteen mukaan**





IoT-laitteen suunnittelussa sekä valmiin tuotteen hankinnassa pätee osittain samoja elementtejä. Laitteen todellisen tarpeen määrittäminen on tärkeää, jos halutaan välttää käytönaikana ilmenevät kompastuskivet. Yleisiä liitettävyyteen, tiedonsiirtoon ja tallennukseen liittyvä ongelmia ilmenee, kun huonosti skaalautuvaan järjestelmäkokonaisuuteen lisätään suunniteltua suurempi määrä päätelaitteita.

#### **3.4.1 Kehitysalustan valinta**

Käyttökohteen mukaan tulee pohtia, millainen mikro-ohjainratkaisu on tarpeen. Markkinoilla olevat vaihtoehdot sekä niiden tarjoamien ominaisuuksien kirjo on laaja. Suosittuja mikro-ohjaimia harrastekäyttöön ovat Atmel AVR -piirien päälle rakennetut Arduinot sekä Espressif Systemsin ESP8266- ja ESP32-piireihin pohjautuvat kortit. Järeämpää laskentatehoa ja ominaisuuksiltaan laajasti integroitua ratkaisuja tarvitsevat saattavat löytää etsimänsä ARM-prosessoreita hyödyntävistä Raspberry Pi -valmistajan tietokonetarjonnasta. (nabto, 2020)

Taulukossa 1 listatut mikro-ohjaimet tarjoavat laajan dokumentaation käyttäjälle. Laitteiden suosio selittyy hyvällä saatavuudella, monipuolisilla ominaisuuksilla ja hinnalla. Laitteiden yleistymisen takia internetin keskustelupalstoilta on löydettävissä runsaasti avoimesti julkaistuja projekteja ja niihin liittyvien ongelmien ratkaisuun perehtyviä viestiketjuja.

Taulukko 1. Neljän yleisen mikro-ohjaimen suppea ominaisuusvertailu pulssileimauskammion suunnittelua varten.

				
Microcontroller	Arduino Mega r3	Nodemcu ESP8266 v3	Lily TTGO sim800L	Raspberry Pi 4 B
CPU	ATmega2560	Xtensa Singe-core 32-bit L106	ESPRESSIF-ESP32 240MHz Xtensa® single-/dual-core 32-bit LX6 microprocessor	4x ARM Cortex-A72 1.5 GHz
Speed of proccerssor	16MHz	80Mhz	240MHz	1.5 GHz
RAM	8kb	160 kb	520 kb SRAM	1, 2, 4 or 8 GB
Memory card	-	-	-	x
GPU	-	-	-	Broadcom VideoCore VI @ 500 MHz
I/O pins	54 digital 16 analog	16 DIO, 1 ADC	18 ADC, 2 DAC	17x GPIO
Bluetooth- / wifi	-	WI-FI 802.11 b/g/n	bluetooth v4.2BR/EDR and BLE standard, WI-FI 802.11 b/g/n	Bluetooth 5.0, WI-FI b/g/n/ac dual band 2.4/5 GHz
UART	4x	2x	3x	4x
GSM / Ethernet	-	-	GPRS	-
Operating voltage	5	3.3	3.3	3.3
Special features	USB	MICRO-USB for power and connection	USB-C for power and communication, Integrated GPRS modem and mini-sim card slot	4x usb, HDMI, 3.5mm phone jack, USB-C for power
Power consumption	Max 800mA Sleepmode 1-2mA	Active 70-400mA Deep Sleep 20 uA	Active 160~260mA light sleep 0.8mA Deep Sleep 10 uA	600 mA (3 W) average when idle, 1.25 A (6.25 W) maximum under stress (monitor, keyboard, mouse and Ethernet connected)
Price €	~30	~7	~ 10	~ 35-80

### 3.4.2 Järjestelmän skaalautuvuus ja tietoturva

Suunnitellessa IoT-laitetta ja siihen liittyviä tiedonsiirto- ja datakerroksia on hyvä ymmärtää tulevaisuuden tarpeet skaalautuvuuden suhteen. Laitteiden identifiointi, verkkoliikennekapasiteetin riittämättömyys tai sovelluserroksen suorituskyvyn aiheuttamat ongelmat voivat olla haastavia sekä kalliita korjata jälkikäteen. Over-the-air tai lyhyemmin OTA-päivitykset mahdollistavat järjestelmän laitteiden joustavan ylläpidon ja päivittämisen verkon välityksellä. (Gupta ym., 2017, ss. 1619-1622)



IoT-laitteiden tietoturvariskit jakautuvat usealle kerrokselle. Iskuja voidaan kohdistaa suoraan laitteeseen, viestikerrokseen tai sovelluskerrokseen. Tyypillisimpiä tietoturvauhkia ovat seuraavat:

- IoT-laite:
  - Solmun fyysiseen rakenteeseen kajoaminen.
  - Palvelunestohyökkäys.
  - Laiteohjelman muokkaaminen.
  - Verkkoliikenteen ohjaaminen valesolmun avulla.
- Viestikerros:
  - Viestiliikenteen salakuuntelu ja verkon tilan tarkkailu.
  - Järjestelmäsolmuna esiintyminen väärennetyllä identiteetillä.
- Ohjelmakerros:
  - Datavuoto.
  - Palvelunestohyökkäys.
  - Injektiohyökkäykset missä etsitään ja käytetään hyväksi sovellusten heikkouksia.

(Cisco, n.d)

Tietoturvaa voidaan IoT-laitejärjestelmissä parantaa muun muassa erottamalla laitteet omaan verkkoonsa. Vahvojen salasanojen käyttö, sekä viestiliikenteen salaaminen standardit täyttävillä protokollilla on välttämätöntä. On myös hyvä miettiä, milloin laitteiden on tarpeellista olla yhteydessä verkkoon ja minimoida laitteen turha päällä oleminen. (Avast, 2021)

#### **4 Leimauskammion suunnittelu ja toteutus**

Laitteen rakenteelliset ja teknilliset vaiheet on tässä opinnäytetyössä jaettu omiin alalukuihinsa. Laite- ja käyttöliittymäohjelmointi sekä datanhallinta käydään läpi luvun lopussa.

## 4.1 Leimauskammion suunnittelu

Leimauskammion suunnittelu lähti liikkeelle toukokuun 2021 alussa. Kiireellisestä aikataulusta sekä maailmanlaajuisen tavarantoimitusongelmien takia suunnittelussa jouduttiin hyödyntää ketterää kehitysmallia. Käytännössä tämä tarkoitti suunnittelun, toteutuksen ja testaamisen aikaikkunoiden sulauttamista yhteen niiltä osin, kun se oli tarpeellista. Laitteen suunnittelussa otettiin huomioon ominaisuuksien ja hinnan lisäksi myös saatavuus, henkilökohtaiset kokemukset aikaisemmista projekteista sekä aiheen tiimoilta julkaistujen tutkimusprojektien tulosten vertailusta.

### 4.1.1 Kupu

Kuvun tärkeimpänä ominaisuutena on läpäistä valoa, olla kaasutiivis ja mahdollistaa kaasun syöttäminen kammion sisälle hallitusti. Valoa hyvin läpäisevien materiaalien ominaisuuksien vertailu toimi lähtökohtana kuvun suunnittelulle. Helposti saatavilla olevat materiaalit rajoittuivat lasiin, polykarbonaattiin (PC) sekä akryyliin (PMMP). Iskunkestävyys, vaikeat muotoiluominaisuudet sekä paino pudottivat lasin materiaalivertailusta pois. Akryyli ja polykarbonaatti soveltuvat helposti muokattavina ja kestävinä materiaaleina tarkoitukseen. Keskinäisessä vertailussa akryylissä on hieman parempi UV-säteilynkestävyys, korkeampi valonläpäisevyys ja pienempi valonheijastavuus (Liite 1).

Kuvun muoto ja koko tulee mahdollistaa kasvatuksessa käytettävän ruukun ja täysikokoisen kasvin mahtumisen kammion sisälle. Tämän lisäksi kammioon tulee mahtua mittauksessa käytettävät sensorit, sensoritelineet, jäähdytysjärjestelmä sekä olosuhteiden tasaamiseen tarvittava ilmankiertojärjestelmä. Muodon puolesta sylinterimallinen kupu mahdollistaa suorakulmaiseen särmiömalliin verrattuna kestävyden sekä tiivistettävien liitoskohtien osalta yksinkertaisen rakenteen. Kuvassa neljä havainnoidaan sylinterimallisen, ulkomitoiltaan 300 \* 600 mm olevan kuvun koko suhteessa punaiseen kasvatusruukkuun ja 400 \* 400 \* 18 mm jalustalevyyn.

Kuva 4. Autodesk Inventor 2020 -ohjelmalla suunniteltu havainnekuva sylinterimallisesta kammioista. Kammion sisälle on sijoitettu kasvatusruukkuun vastaava kappale.



Tarjousvertailussa kävi ilmi, että tarvittava seinävahvuudeltaan 4 mm ja ulkomitoiltaan 300 \* 600 mm korkea akryyliputki on tilaustuote ja pienin toimituserä on kaksi metriä.

Akryyliputken toimitusaikaa ei myöskään voitu vahvistaa. Epävarmuudet toimituksessa ja korkea hinta estivät sylinterimallisen akryyliputken käytön projektissa. Suorakulmaisen särmiön muotoon tehdyn kuvun soveltuvuutta leimauskammioon puolsi vastaavien ilma- ja vesitiiviiden rakennusohjeiden löytyminen akvaarioille ja minikasvihuoneille. Akryyliä oli myös yleisesti saatavana hyllytuotteena 3–4 mm seinämävahvuudella.

Akryliosien yhteen liittäminen onnistuu tarkoitukseen soveltuvalla silikonilla. Ennen silikonin levittämistä akryliosien liitospinnat tulee karhentaa esimerkiksi hiekkapaperilla ja puhdistetaan epäpuhtauksista. Silikonin valittaessa tulee huomioida soveltuvuus ulkokäyttöön, synteettiselle polymeerille (akryyli) ja tuotteen UV-säteilyn kestävyys. (The-Roost, 2013)

Kupuun tulee lisätä myös mahdollisuus  $^{13}\text{CO}_2$ -hiilidioksidin syöttämiseksi akryyliseinämän läpi niin että kammion tiiveys ei vaarannu. Syöttöprosessi tulee voida toistaa luotettavasti kenttäolosuhteissa. Vastaavaan tarkoitukseen on saatavilla erilaisia kumista valmistettuja tulppia ja tiivisteellisiä läpivientejä. Läpivienti on myös mahdollista suunnitella ja 3D-tulostaa itse. Kappale rakenne voisi yksinkertaisuudessaan koostua pulttityyppisestä läpivientikappaleesta kierteellä, mutterista sekä kumitiivisteistä.

#### **4.1.2 Jalusta**

Kammion jalustalevy on hyvä tehdä vanerista. Vaneria on helposti saatavilla, sitä on helppo käsitellä ja muokata, mutta tarjoaa silti tukevan ja kestävä rakenteen kammiolle.

Filmivaneri soveltuu käyttöön erinomaisesti tiiviin rakenteen ja hyvän säänkestävyyden puolesta. Filmivanerin paksuudeksi riittää yleisesti hyllytavarana löytyvät 15–18 mm koot koska laitteen käyttöpaino tulee jäämään 10 kilon tietämille.

Jalustan kulmiin lisätään säädettävät kalustejalat. Jalkojen tulee olla riittävän tukevat kantamaan kammion kokonaisuudessa. Jalkojen tulee olla myös tarpeeksi korkeat, jotta jalustan alle saadaan sijoiteltua tekniikka kotelot, johdotukset, tarvittavat läpiviennit sekä kammion hallintapaneeli. Säädettävät jalat mahdollistavat myös kammion tasapainottamisen lievästi epätasaisella alustalla.

#### **4.1.3 Kammion tiivistäminen**

Leimauskammion kuvun ja jalustan välinen tiiveys luodaan vesitiivisteellä. Vesitiiviste on jalustaan kiinnitettävä kourumainen kappale, joka suunnitellaan ja 3D-tulostetaan lopullisten kuvun mittojen mukaan. Vesitiiviste mahdollistaa kammion helpon avaamisen ja sulkemisen kenttäolosuhteissa, sekä toimii samalla kammion ja ympäristön välisenä automaattisena paineentasausventtiilinä. Vesitiivisteiden ominaisuuksiin ja käyttökohteisiin käytiin tutustumassa asiantuntijatapaamisessa Luonnonvarakeskuksella viikolla 21.

Vaihtoehtoinen ratkaisu olisi luoda kappaleiden välinen tiiveys kumitiivisteellä, mutta siinä ratkaisusta kuvussa tulee olla riittävästi painoa tai se joudutaan kiristämään erillisellä

kiinnitysratkaisulla jalustaan. Koskettavien pintojen viimeistelyn laatu tulee myös olla erinomainen luotettavan tiiveyden takaamiseksi. Kumitiivistemalli ei myöskään tasaa kammion sisäpuolen painetta automaattisesti.

## 4.2 Tekniikan suunnittelu

Liitteessä 1 käytiin läpi eri valmistajien tarjoamien mikro-ohjainten ominaisuuseroja. Pulssileimauskammion sensoreiden kokonaismäärä, datan lähetys ja tallennus sekä riittävä muisti laiteohjelmalle ovat olennaisessa osassa. Tehoiltaan aikaisemmin listatut mikro-ohjaimet takaavat riittävän suorituskyvyn mittauksien toteuttamiseen ja tallentamiseen.

Laitteen loppusijoituspaikan Wi-Fi verkon saatavuudesta ei ollut suunnitteluvaiheessa tietoa. Tiedonsiirtotekniikasta muodostuikin yksi olennainen kysymys mikro-ohjainta valittaessa. Arduino- ja Raspberry Pi -laitteille on saatavilla GSM-shieldejä, jotka mahdollistavat tiedonsiirron puhelinverkon avulla. Tekijälle kuitenkin tutumpi ESP32-pohjainen Lily TTGO sim800L -mikro-ohjain sisälsi GPRS-modeemin valmiiksi piirilevyllä integroituna. Vaihtoehtoisia tiedonsiirtomenetelmiä olisi ollut tarjolla LPWAN-verkkojen osalta, mutta osien saatavuus kiireellisellä aikataululla osoittautui haastavaksi Euroopan sisäisillä markkinoilla toukokuussa 2021.

### 4.2.1 Sensorit

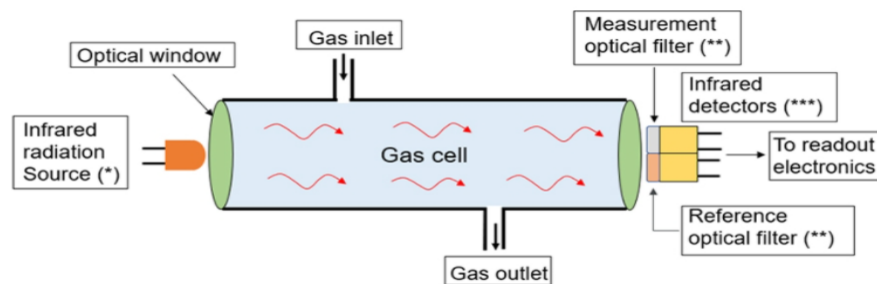
Leimauskammion sensorikokonaisuus koostuu kahdesta yksiköstä, jotka vastaavat kammion sisä- ja ulko-olosuhteiden mittaamisesta. Mitattavia määreitä ovat hiilidioksidi, lämpötila, kosteus, ilmanpaine ja valonmäärä. Laitteessa käytettävien sensoreiden absoluuttinen mittaustarkkuus ei ole yhtä tärkeä kuin resoluutio ja luotettavuus. Sensoreiden virrankulutus sekä käyttöjännite on huomioitava laitteeseen valitun mikro-ohjaimen mukaan.

Kammiossa suoritettavan isotooppileimauksen kannalta olennainen määre on hiilidioksiditason mittaaminen. Hiilidioksidia mitataan yleisesti kemiallisilla tai optisilla sensoreilla. Kemiallisten sensoreiden käytöstä pulssileimauksessa ei löytynyt luotettavia

lähteitä mutta 2014-vuonna julkaistussa tutkimuksessa mitaaminen suoritettiin optisilla NDIR-sensoreilla onnistuneesti. (Soong, ym., 2014, s. 3)

Non-Dispersive Infrared Sensor tai lyhyemmin NDIR-sensorin toiminta perustuu kaasumolekyylien absorptioon tietyllä infrapunasäteilyn aallonpituudella. NDIR-kaasuanturit havaitsevat sensorin sisällä tapahtuvan infrapunavalon hävikin, joka on suoraan suhteessa kaasun pitoisuuteen. NDIR-sensorin toimintaperiaate ja rakenne on havainnointu kuvassa viisi. NDIR-sensoreita käytetään yleisesti teollisuus-, kasvihuone- ja tiedekäytössä missä vaaditaan parempaa tarkkuutta, luotettavuutta sekä pidempää käyttöikää kuin harrastekäytössä. Optisten sensoreiden haittapuolena on laitteen fyysinen koko ja hinta. (Vaisala Oyj, n.d)

Kuva 5. Lämpileikkauskuva optisen NDIR-sensorin rakenteesta (trinamiX, 2020).



Leimauskammion olosuhteiden mittaamisen tarkkuudesta haasteellisen tekee  $^{13}\text{CO}_2$ -hiilidioksidin rakenne. Suurin osa markkinoilla olevista hiilidioksidisensoreista on optimoitu havaitsemaan  $^{12}\text{CO}_2$ -tasoja  $3.91\ \mu\text{m}$  ja  $4.26\ \mu\text{m}$  aallonpituudella (Heimann Sensor, n.d). Osa  $^{13}\text{CO}_2$ -hiilidioksidin absorptiosta on nähtävissä samoilla aallonpituuksilla, mutta tarkkaan mittaamiseen kalibroidut sensorit ovat erikoistuotteita ja vaikeasti saatavissa. Odotettavissa onkin, että leimauksissa tullaan näkemään tavallisella NDIR-sensorilla noin kolmasosa leimatun hiilidioksidin kokonaismäärästä (Soong, ym., 2014, s. 7).

#### **4.2.2 Datan hallinta ja yhteydet**

Datanhallintaratkaisun on tarkoitus mahdollistaa mitatun datan luotettava tallentaminen ja datan saatavuus ajasta tai paikasta riippumatta. Laitteen tuottama tiedonmäärä on kooltaan pientä, joten suuria siirtonopeuksia tiedon välittämiseen ei tarvita. Laitteen ei tarvitse olla myöskään vähävirtainen, joten mobiiliverkkoyhteyden käyttäminen on mahdollista. Mittauksissa kerättävää tietoa lähetetään 1–5 minuutin välein.

Tiedon tallentamista varten luodaan yksinkertainen relaatiotietokanta, joka tallentaa laitteesta saapuvat datastringit eli tavujonot sensoridatalle varattuun tauluun. Datan lukemiseen tietokannasta luodaan yksinkertainen HTML-käyttöliittymä. Käyttöliittymän on tarkoitus mahdollistaa datan selaaminen mobiililaitteilla lähes reaaliaikaisesti.

#### **4.2.3 Hallintapaneeli**

Hallintapaneelin on tarkoitus tarjota mahdollisuus erillisten järjestelmien päälle kytkemiseen. Kehityksen kannalta on olennaista päästä kokeilemaan pulssileimauskammion eri järjestelmiä toisistaan erillään sekä yhtenä kokonaisuutena. Hallintapaneeliin on hyvä lisätä myös indikaatio siitä, millaiset olosuhteet kammiossa vallitsevat ja toimiiko laite niin kuin on odotettu. Informaatio voidaan tuoda esimerkiksi pienelle nestekidenäytölle tai ilmoittaa indikaatioledien avulla. Halpojen näyttöjen ongelma ulkokäytössä on heikko kontrasti sekä vikaherkkyys kosteissa olosuhteissa.

#### **4.2.4 Virranhallinta**

Laitteen käyttökohteessa on mahdollisuus verkkovirran hyödyntämiseen. Tämän takia akkulähtöisen virranhallinnan suunnittelu ei ole tarpeellista. Laittekokonaisuus tarvitsee toimiakseen 5V ja 12V käyttöjännitteen. Laittekehityksen helpottamiseksi mikro-ohjaimen ja vesipumpun virranhallinta erotetaan toisistaan. Mikro-ohjaimen virtalähteenä hyödynnetään 5V 1A älypuhelimien laturia, joka riittää laitteen ja olosuhdesensoreiden käyttämiseen.

Jäähdytysjärjestelmän vesipumppu, ilmankierrätyksestä vastaava tuuletin ja hiilidioksidisensorit ovat laitteen eniten virtaa vievät komponentit. Virrankulutuksen lisäksi hiilidioksidisensorit tarvitsevat noin viiden minuutin esilämmityksen toimiakseen laitevalmistajan lupaaman virhemarginaalin sisällä. Erillinen virtalähde mahdollistaa vesipumpun ja tuulettimen testaamisen sekä hiilidioksidisensoreiden esilämmityksen ennen laitteen kytkemistä päälle.

### 4.3 Kammion toteutus

Pulssileimauskammion kupuosan materiaaliksi valittiin kirkas 4 mm paksu PMMA-akryyli. Kuvusta tehtiin suorakulmaisen lieriön muotoinen. Kuvun ulkomitat ovat 292 \* 270 \* 596 mm ja kappaleet tilattiin valmiiksi mittoihin sahattuna. Sisätilan kokonaistilavuus on noin 45.5 litraa kun jätetään huomioimatta tekniikan sekä vesitiivisteiden varaama tila kammion sisällä. Kappaleen lopulliset mitat suunniteltiin tekniikan, kasvatusruukun sekä kasvin tarpeiden mukaan. Seinämien levyt liitettiin toisiinsa akryylille ja akvaariokäyttöön soveltuvalla lasitussilikonilla. Ennen silikonin lisäämistä pinnat karhennettiin 800- karkeusasteen hiekkapaperilla ja puhdistettiin huolellisesti pölystä ja rasvasta. Kuvun seinämien liittämässä 90-asteen kulmiin hyödynnettiin ruuvipuristimia sekä puupalkkeja. Kuvun ulkoreunat vahvistettiin 20 \* 20 mm alumiinilistoilla ja ne kiinnitettiin paikoilleen lasitussilikonilla. Kuvun saumojen annettiin kuivaa kolme vuorokautta silikonin valmistajan ohjeiden mukaisesti.

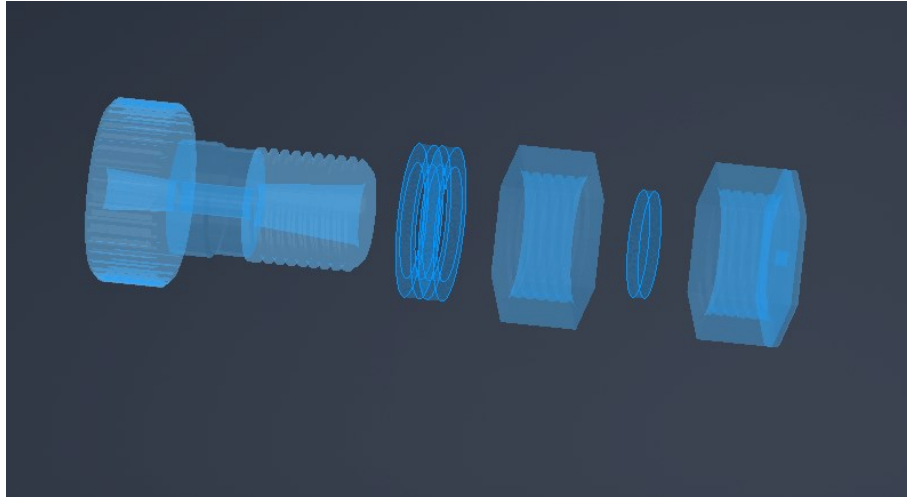
Hiilidioksidileimojen syöttämistä varten suunniteltiin kammion hallintapaneelistä katsottuna oikealle sivulle läpivientiventtiili. Venttiilin rakenne koostuu pultista, kahdesta mutterista ja tiivisteistä. Pultin keskelle jätettiin riittävä käytävä kaasun syöttämistä varten. Uloimman mutterin rakenne on suunniteltu niin, että se mahdollistaa 6 \* 1.5 mm vaihdettavan tiivisteiden käyttämisen pultin ja uloimman mutterin välillä. Tiiviste mahdollistaa kaasun syöttämisen injektioneulalla venttiilin läpi vaarantamatta kammion tiiveyttä. (Kuva 6)

Läpivientiventtiilin osat mallinnettiin Autodesk Inventor 2020 -ohjelmalla. Venttiilin kantavan rakenteen kappaleet 3D-tulostettiin ABS-materiaalista ja tiivisteosat TPU-95-materiaalista.



Tiiveyden varmistamiseksi läpiviennissä käytettiin lasitussilikonია ja putkimiehen tiivistenauhaa.

Kuva 6. Läpivalaisukuva läpivientiventtiilin rakenteesta.



Jalusta tehtiin 400 \* 400 \* 22 mm filmivanerista. Kappaleen materiaali valittiin sahatavaran asiantuntijan suositusten mukaisesti ja se tilattiin valmiiksi mittoihin sahattuna. Jalustan kulmiin sijoitettiin säädettävät jalat, jotka mahdollistavat kammion korkeuden säätämisen ja tasaamisen hieman epätasaisellakin alustalla. Jalat on tehty 6 mm kierretangoista ja niiden kiinnityksessä on käytetty lukko- ja siipimuttereista. Jalkojen päähän on 3D-tulostettu ABS-muovista kengät. Kenkien tarkoitus on helpottaa korkeuden säätämistä sormin sekä vähentävät laitteen alla olevan pinnan naarmuuntumisen riskiä. Jalustaan on lisäksi tehty läpiviennit johdotuksille, vesiputkille sekä sensoritelineiden kierretangoille. Läpiviennit on tiivistetty kuumaliimalla.

Vesitiiviste on suunniteltu ja 3D-tulostettu kuvun mittojen mukaan. Vesitiivisteeseen rakenne on kasattu viidestä osasta ja se on korkeudeltaan 38 mm. Kuvassa 7 näkyvän vesitiivisteeseen valkoinen alaosa on tulostettu yhdessä osassa PLA-materiaalista ja punaiset reunukset neljässä osassa PETG-materiaalista. Syy tähän on Wanhao D9 500 -tulostimen hajoaminen kesken tulostuksen. Tulosteen alku onnistui kuitenkin riittävän hyvin, jotta se oli järkevää hyödyntää vesitiivisteeseen rakenteessa. Puuttuvat kappaleet tulostettiin pienemmillä Prusa i3 MK3S -tulostimilla. Kappaleiden yhdistämisessä ja tiivistämisessä käytettiin nestekumia ja pikaliimaa. Vesitiivisteeseen mahtuu kuvun reunuksen kanssa noin 2.5 dl vettä. Vesitiiviste

on kiinnitetty kahdellatoista puuruuvilla jalustan keskelle. Kappaleiden välinen tiivistys on varmistettu lasitussilikonilla.

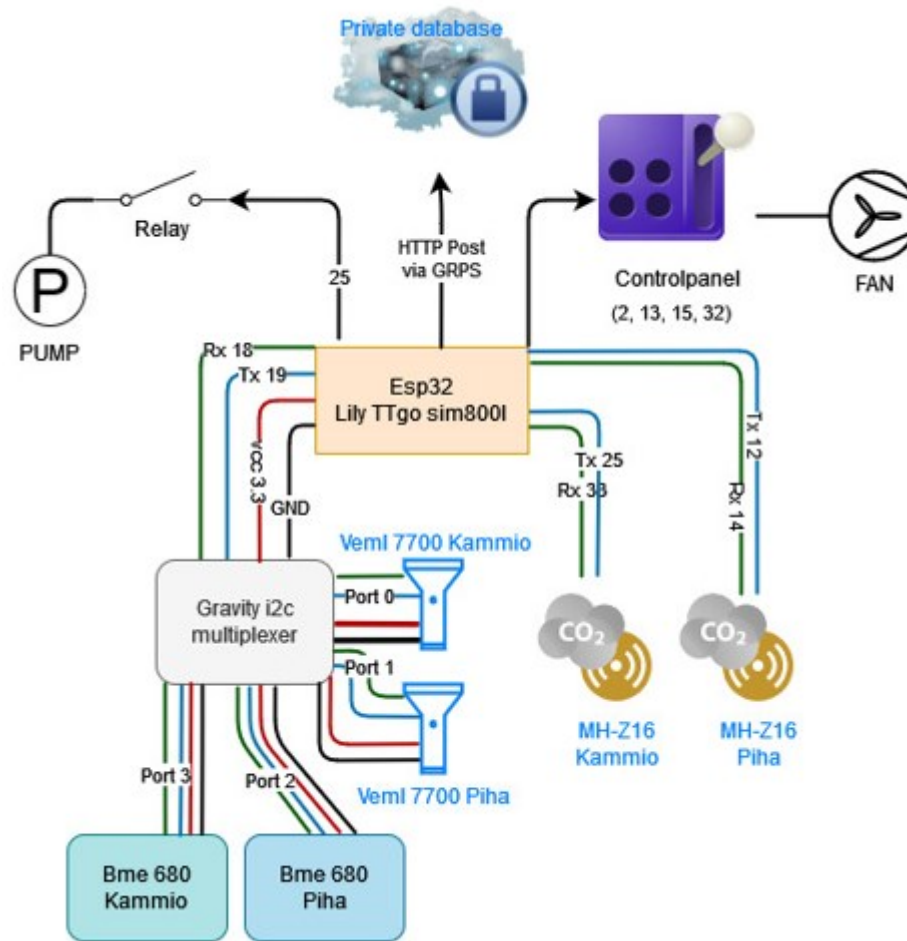
Kuva 7. Pulssileimauskammion rakenne prototyypiversiossa 1.0.



#### 4.4 Tekniikan toteutus

Pulssileimauskammion mikro-ohjaimeksi valittiin LILY TTGO Sim800l v1.3. Laite pohjautuu Espressif-ESP32 Xtensa LX6 -mikroprosessoriin. Yleisten ESP32-korttiin integroitujen ominaisuuksien lisäksi laitteeseen on lisätty GPRS-modeemi ja paikka nano-SIM kortille. Laitteessa on myös cp2104-silta, joka mahdollistaa ohjelmoinnin ja virransyötön USB-C-naaras liitännän avulla. Sensorit kytkettiin mikro-ohjaimen I2C- ja UART-väylien kautta. Data lähetetään GPRS-yhteydellä tietokantaan tallennettavaksi. Laitteen sensorikytkennät on esitelty kuvassa kahdeksan. Kuvaan ei ole lisätty virtalähteitä eikä niiden kytkentöjä.

Kuva 8. Pulssileimauskammion kytkentäkaavio.



#### 4.4.1 Sensoriyksiköt

Laitteeseen toteutettiin kaksi sensoriyksikköä joista toinen sijaitsee laitteen sisällä ja toinen ulkopuolella. Sensoriyksiköt koostuvat kolmesta erillisestä komponentista ja yhteensä viidestä mitattavasta määreestä. Yksiköt pyrittiin telakoimaan niin, että sisä- ja ulkoyksikön tulokset olisivat mahdollisimman vertailukelpoisia keskenään (Kuva 7).

Hiilidioksidin mittaamiseen valittiin DFROBOT Gravity: SEN0220 -versio MH-Z16 NDIR -sensorista (Kuva 9). Sensorin valintaan vaikutti saatavilla oleva tutkimustieto vastaavanlaisista projekteista, sensorin hinta sekä nopea saatavuus. Sensorielementin on valmistanut Winsen Electronics Technology Co. Molemmat järjestelmässä käytettävät sensorit on kytketty mikro-ohjaimen UART-väyliin.

Kuva 9. MH-Z16-hiilidioksidisensori (Zhengzhou Winsen Electronics, 2019).



Virtalähteenä hiilidioksidisensoreille toimii mikro-ohjaimen virtaratkaisusta erillään oleva 5V virtalähde. Sensorin MH-Z16 mittausalue on 0–50000 ppm ja tarkkuus  $\pm 100$  ppm + 6 % luetusta arvosta. Resoluutio on 1 käytettäessä UART-liitäntää. Sensorissa on automaattinen kalibrointi, joka ei kuitenkaan sovellu käytettäväksi suljetussa tilassa. Automaattinen kalibrointi on kytketty laiteohjelmassa pois päältä. (Zhengzhou Winsen Electronics, 2019)

Olosuhdemittaukseen valittiin useamman sensorin sisältävä Adafruit BME 680 -sensorikokonaisuus. Laite pohjautuu BOSCH Sensortec BME 680 -sensoriin, joka mittaa ilmakehän kosteuden, lämpötilan, ilmanpaineen ja ilmanlaadun. Ilmanlaadunmittaamiseen tarkoitettua sensoria ei hyödynnetä pulssileimauskammiossa epätarkkuutensa vuoksi. Sensori on kytketty I2C-väylään ja saa 3.3V käyttöjännitteen mikro-ohjaimelta. Sensorin mittaustarkkuuteen liittyvät ominaisuudet löytyvät taulukosta 2.

Taulukko 2. BME 680 -sensorin mittaustarkkuus (BOSCH Sensortec, 2017).

Sensori	Mittausalue	Tarkkuus	Resoluutio
Lämpötila	-40–85 °C	$\pm 1.0$ °C (0 ~65 °C)	0.1
Ilmakehän kosteus	0–100 % r.H.	$\pm 3$ % r.H. (20–80 % r.H., 25°C)	1
Ilmanpaine	300–1100 hPa	$\pm 0.6$ hPa (300-1100 hPa, 0~65°C)	1
IAQ	0~500	$\pm 15$ %	1

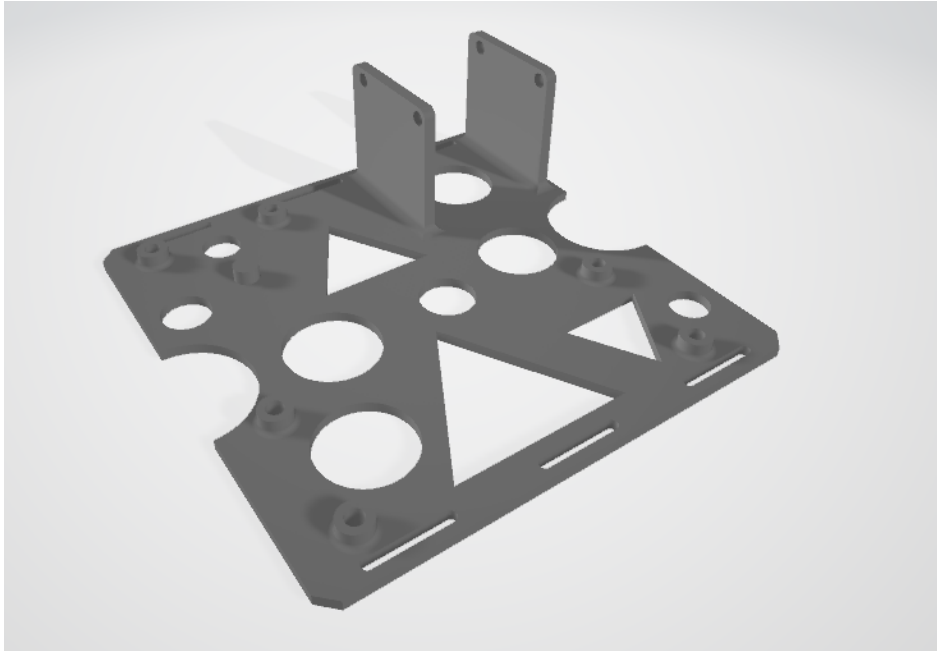
Ympäristön valoisuus mitataan DFROBOT Gravity I2C VEML7700 -sensorilla. Sensori pohjautuu VISHAY VEML7700 -sensorielementtiin. Sensorin mittausalue on 0 - 120Klx ja tarkkuus 0.0036 lx / ct. Elementin luvataan toimivan -25 - +85 °C lämpötila-alueella. Sensori on kytketty I2C-väylään ja saa 3.3V käyttöjännitteen mikro-ohjaimelta. (Vishay Semiconductors, 2016)

I2C-väylään liitettyjen identtisten komponenttien osoitteiden päällekkäisyyksien takia ratkaisussa joudutaan käyttämään I2C-multiplekseriä. Multiplekseri mahdollistaa useiden samalla kiinteällä osoitteella olevan sensorin käyttämisen samassa väylässä. Järjestelmässä on käytetty DFROBOT Gravity digital 1-to-8 I2C -multiplekseriä. Laite pohjautuu Texas Instruments TCA9548A -moduuliin. Laitteessa on 8 porttia ja se saa 3.3V käyttöjännitteen mikro-ohjaimelta. (Texas Instruments, 2016)

#### **4.4.2 Tekniikan kotelointi ja sensoritelineet**

Testilaitteen tekniikka ja virranhallinta sijoitettiin kammion jalustalevyn alle kahteen erilliseen ABB AP 10 -jakorasiaan. Jakorasioiden IP55-luokitus sekä koko 104 \* 104 \* 46 mm soveltuvat suunnitellun laitekokonaisuuden tarpeisiin. Mikro-ohjaimen jakorasian pohjaan suunniteltiin ja 3D-tulostettiin ABS-filamentista kuvassa 10 nähtävä sovitepala, joka mahdollistaa komponenttien kiinnityksen jakorasiaan M3 \* 8 mm -ruuveilla. Sovitepalan ansiosta komponentit telakoituivat tukevasti koteloon ja sen tavoitteena oli pienentää teknisten häiriöiden riskiä, sekä helpottamaan huoltotoimenpiteiden suorittamista varsinkin kenttäolosuhteissa.

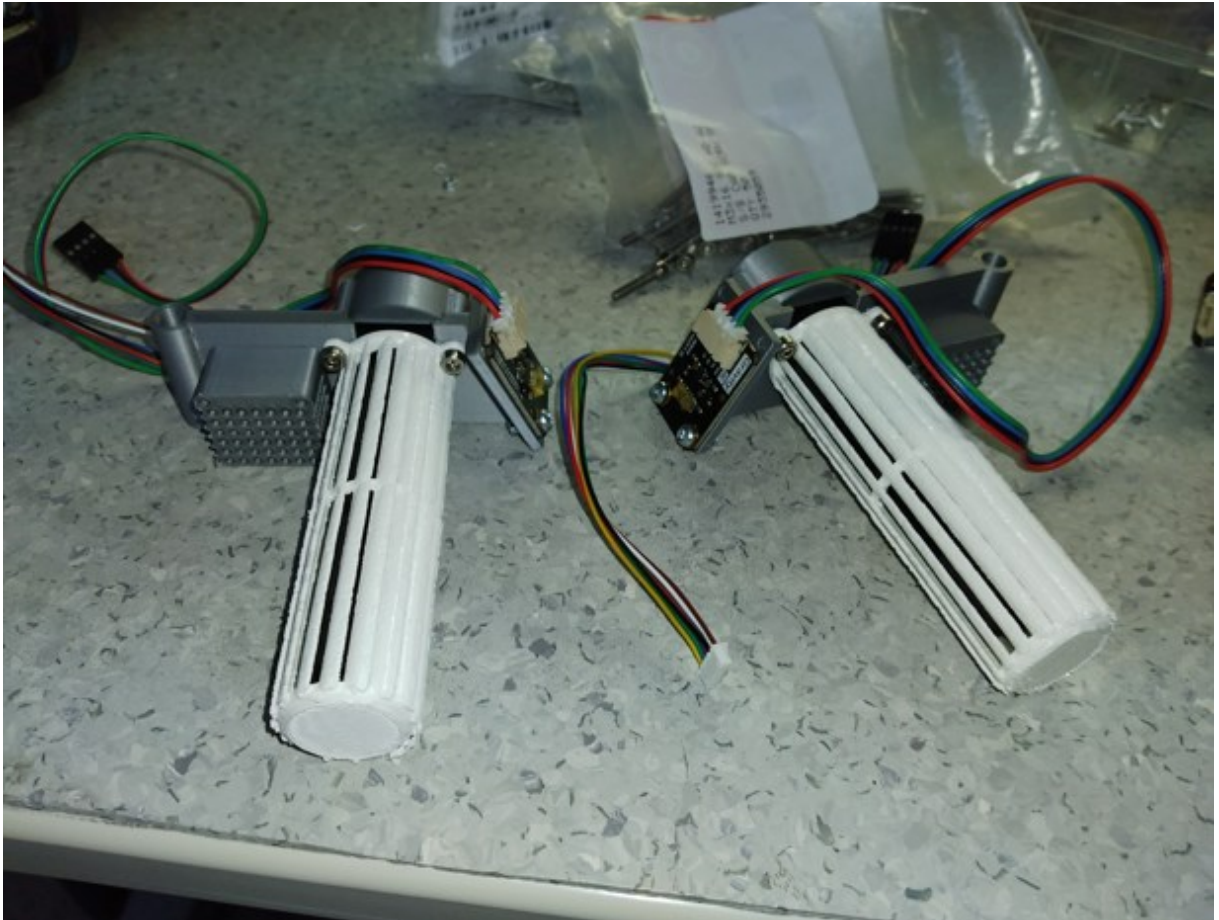
Kuva 10. ABB AP-10 -koteloon suunniteltu sovitepala mikro-ohjaimelle, kahdelle MH-Z16 sensorin ohjainkortille sekä I2C-multiplekserille.



Virranhallinnanjakorasiaan sijoitettiin jänniteregulaattori, jäähdytysjärjestelmässä käytettävän vesipumpun rele sekä ohjauspaneeliin tulevien ilmankierto ja jäähdytysjärjestelmän virtakytkinten liitokset. Jänniteregulaattori ja rele on kuumaliimattu kotelon pohjalle. Virranhallinta- ja tekniikkajakorasiat on kiinnitetty kammion jalustan pohjaan neljällä puuruuvilla.

Sensoreiden kiinnitystä varten suunniteltiin ja 3D-tulostettiin PETG-materiaalista kuvassa 11 näkyvät sensoritelineet. Sensoritelineiden tarkoitus on suojata komponentteja sekä helpottaa sensoryksiköiden kiinnitystä kammioon. Sensoritelineiden kantavan rakenteen lisäksi hiilidioksidisensoreille valmistettiin erilliset suojakotelot, jotka estävät suoran auringonpaisteen sensorelementteihin. Suojakoteloiden päälle jouduttiin testausvaiheen alkupuolella lisäämään foliosta tehty suojakerros auringonpaisteesta johtuvan ylikuumentumisen välttämiseksi (liite 8).

Kuva 11. Leimauskammion sensoriyksiköt.



#### 4.4.3 Ilmankiertojärjestelmä

Leimauskammion olosuhteiden tasaaminen suoritetaan tuulettimella, joka on kiinnitetty kammion sisäpuolen pohjan kulmaukseen niin että jäähdytysjärjestelmän putkistolle, johdotuksille ja kasvatusruukulle jää riittävästi tilaa. Järjestelmä koostuu yhden tuulettimen lisäksi ABS-filamentista tulostetusta kiinnityspalasta, sekä ohjauspaneeliin sijoitetusta virtakytkimestä.

Tuuletin on mallia NMB TECHNOLOGIES 1606KL-01W-B50-L00 ja toimii 5V käyttöjännitteellä kuluttaen 240 mA. Tuuletin mahdollistaa 0.23 m<sup>3</sup>/min ilmankierron. Tuulettimen sijoittelussa painottuu hiilidioksidileiman sekoittamisen tärkeys ja se on sijoitettu välittömästi kaasunsyöttöventtiilin alapuolelle. Laite on tarkoitettu käytettäväksi niin että ilmankiertojärjestelmä on aina päällä. Ilmankiertojärjestelmään on mahdollistettu

tuulettimen kytkeminen pois päältä esimerkiksi kammion avaamisen ajaksi. Tuulettimen sijainti on nähtävissä kuvassa 7 sivulla 20.

#### 4.4.4 Jäähdytysjärjestelmä

Ulkona kenttäolosuhteissa kammion sisäpuolen lämpötilan muutokset ovat nopeita ja vaikuttavat sekä kasvin käyttäytymiseen että sensoreiden toimintaan. Jäähdytysjärjestelmä luotiin tasapainottamaan olosuhteita niin, että vältetään kasvin ja sensoreiden kannalta liiallinen kuumuus sekä samalla hallitsemaan kammion kosteustasapainoa.

Jäähdytysjärjestelmä koostuu vesipumpusta, silikoniputkistosta, jäähdytinelementistä, kylmävesiastiasta, releestä sekä virtakytkimestä.

Pumppu on mallia DFROBOT FIT0563 ja sen maksimi kapasiteetti on noin 280 L/h. Pumppu saa käyttöjännitteen 12V-virtalähteestä. Pumpun ja virtalähteen väliin on sijoitettu virtakytkin sekä rele, jota kontrolloidaan mikro-ohjaimella. Pumppu on sijoitettu kylmävesisäiliön pohjalle ja se kierrättää jäähdytysnestettä putkiston läpi palaten letkua pitkin takaisin kylmävesisäiliön pinnalle.

Jäähdytinelementti koostuu kahdeksasta 45–55 cm ja 8 mm paksusta alumiiniputkesta. Jäähdyttimen tulo- ja lähtövesiputki sekä U-käännökset on tehty 10 mm silikoniputkesta. Liitosten tiivistykset on tehty lasitussilikonilla sekä varmistettu sähkömiehenteipillä. Uloimmat jäähdyttimen alumiiniputket on tuotu pohjalevyn läpi poratuista rei'istä ja ne on tiivistetty lasitussilikonilla. Läpivedetyt alumiiniputket yhdistyvät tulo ja lähtövesiputkiin. Jäähdytinputkille 3D-tulostettiin yksinkertaiset tukijalat, joiden tarkoitus on tukea putkistoa ja pitää ne pystyssä. Putket kiinnitettiin jalustaan ja tuettiin toisiinsa kiinnityslaatan ja nippusiteiden avulla. (Kuva 7)

Kylmävesiastiaksi suunniteltiin alun perin vesikanisteria, mutta siihen tehtiin muutos ennen käyttöönottotestauksen aloittamista. Lopullisessa versiossa kylmävesiastiaksi valittiin 32 L muovinen kylmälaukku. Kylmälaukun kanteen tehtiin lähtö- ja paluuletkuille sekä pumpun virtajohdolle riittävä läpivienti. Laitetta käytettäessä kylmävesisäiliöön lisätään kylmää vettä sekä jäisiä kylmäkalleja olosuhteiden vaatimusten mukaan. Testausvaihe osoitti, että



hellepäivänä 10 L hanakylmää vettä, sekä 2 L jäitä riittivät pitämään kammion toimintakunnossa noin kahden tunnin ajan.

Jäähdytinsäätöjärjestelmän ohjaus perustuu kammiossa ja sen ulkopuolella tapahtuvan lämpötilan vertailuun sekä esiasetettuun raja-arvoon. Pumppu on aina toiminnassa kammion lämpötilan noustessa yli 25 C°-asteen. Kammion lämpötilan ollessa alle 25 C°, vertaillaan kammion sisä- sekä ulkolämpötilan erotusta. Jäähdytysjärjestelmä kytkeytyy päälle, jos kammion sisäilman lämpötila nousee +1.0 C° korkeammaksi kuin ulkolämpötila. Jäähdytysjärjestelmän testaus osoitti, että lämpötilaeron noustessa yli kahden asteen niin että kammion sisäilma on ulkoilmaa lämpimämpi, tiivistyy kuvun sisäpuolen akryylipinnoille kosteutta. Järjestelmän toimiessa suunnitellulla tavalla kosteus tiivistyy jäähdytinputkiin ja pitää kuvun akryylipinnat kirkkaina sekä kammion kosteusprosentin halutulla 60–70 % alueella.

#### 4.4.5 Hallintapaneeli

Laitteen tilaaja halusi kammioon selainpohjaisen käyttöliittymän ohella yksinkertaisen hallintapaneelin, mistä on mahdollista todeta, onko kammiossa oleva kasvi jo sitonut sille syötetyn hiilidioksidileiman vai ei. Kammion hallintapaneeliin asennettiin kaksi kappaletta RG-ledejä, jotka mahdollistavat osittaisen kammion tilanteen seuraamisen. IO-ledi indikoi mikro-ohjaimen suorittaman mittauksen vaiheista ja ilmoittaa mahdollisesta ongelmasta. Co2-ledi ilmoittaa hiilidioksiditason suhteessa esiasetettuun raja-arvoon sekä kertoo mahdollista sensorin lukuvirheestä. Hallintapaneelin toiminta esitellään taulukossa 3.

Taulukko 3. Hallintapaneelin informaatioledien toiminta.

Ledin väri	IO-ledi	Co2-ledi
Punainen	Laite suorittaa mittausta	Co2 pitoisuus ylittää raja-arvon
Vihreä	Dataa lähetetään tietokantaan	Co2 pitoisuus alittaa raja-arvon
Keltainen	-	Mittausvirhe: sensori ei vastaa
Ei päällä	Laite nukkuu ja odottaa seuraavaa mittausta.	-

Laitteen informaatioledit toimivat, vaikka datanlähetyks pilveen estyisi. Tämä ominaisuus mahdollistaa leimaamisen suorittamisen loppu vaikka tarkkaa tietoa kammion olosuhteista ei olisi saatavilla esimerkiksi mobiiliverkon ongelmatilanteiden takia.

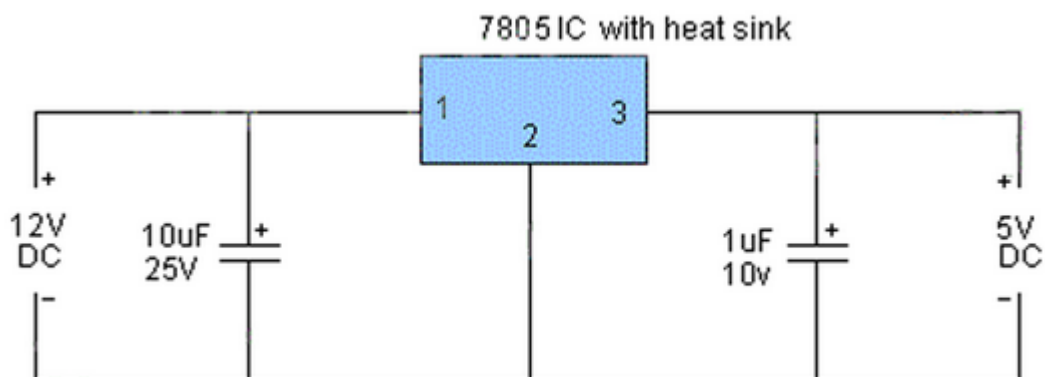
#### 4.4.6 Virranhallinta

Laitteessa käytettävä Lily TTGO S800L -mikro-ohjaimen käyttöjännite on 2.2–3.6V. Kortissa itsessään on integroitu jännitesäädin, joka mahdollistaa 5V virtalähteen käyttämisen.

Laitteen huollon kannalta käytännöllisin tapa oli toteuttaa virransyöttö USB-C-portin kautta kännykän 5V 1A seinälaturia hyödyntäen. Virtaratkaisussa käytettävää USB-C-liitäntää hyödynnetään myös laiteohjelman päivittämisessä ja sarjanportin dataliikenteen seuraamisessa.

Leimauskammion ilmankierto- ja jäähdytysjärjestelmien virtaratkaisu on suunniteltu erillään mikro-ohjaimesta. Järjestelmät saavat virtansa yhteisestä 12V 3.5A DC virtalähteestä. Jäähdytysjärjestelmän vesipumppu toimii 12V käyttöjännitteellä, mutta ilmankierrossa käytettävää tuuletinta sekä hiilidioksidisensoreita varten virranhallintajakorasiaan lisättiin 5V jännitesäädin. Jännitteen säätö on toteutettu LM7805 IC -jänniteregulaattorilla ja kytkentä on havainnointu kuvassa 9. Regulaattorin molemmin puolin on lisätty kondensaattorit tasaamaan jänniteväreilyä. Ylikuumenemisen välttämiseksi LM7805 IC-piiriin on kiinnitetty alumiinisili. Komponentin lämmönvälitysaineena käytetään lämpötahnaa.

Kuva 12. Havainnekuva laitteessa käytettävästä jännitesäädöstä (Rehmani, 2020).



## 4.5 Ohjelmointi ja datan hallinta

Pulssileimauskammion ohjelmointi on jaettu kolmeen alalukuun. Osioissa on viitattu liitteisiin, missä on nähtävissä projektissa hyödynnettyjä ohjelmointirakenteita. Laiteohjelmaa ei julkaista kokonaisuudessaan tässä opinnäytetyössä.

### 4.5.1 Laiteohjelma

Lily TTGO sim800I -laiteohjelman päivitys suoritetaan USB-C-väylän kautta. Apuna tarvitaan lisäksi tietokone, millä onnistuu C-kielen kirjoitus ja laiteohjelman kääntäminen päätelaitteelle sopivaksi. Pulssileimauskammion laiteohjelma on kirjoitettu avoimen lähdekoodin Visual Studio Code -tekstieditorilla. Ohjelma mahdollistaa normaaliin tekstieditoriin verrattuna tuen virhekorjaukselle, automaattiselle koodin täydennykselle, Git-tuen sekä syntaksin korostuksen. Laiteohjelman lähetys mikro-ohjaimen suoritettiin Arduino IDE 1.18.16 -kehitysalustalla (Liite 7).

Laiteohjelman rakenne on jaettu useampaan aliohjelmaan, jotka vastaavat yksittäisistä toimintakokonaisuuksista. Ohjelman modulaarinen rakenne helpottaa yksittäisen laiteominaisuuden testausta ja ongelmakohtien paikantamista. Laiteohjelman yhteysasetusten määrittely on nähtävissä liitteessä 2.

### 4.5.2 Datan hallinta

Verkkosisäntöintipalveluksi valittiin Alwaysdata, joka mahdollisti projektille riittävät mahdollisuudet relaatiotietokannan ja verkkosivujen ylläpitoon. Valitun tarjoajan vahvuutena oli hintatehokas ratkaisu suhteessa kilpailijoihin sekä kattava ohjeistus ja turvallisuusseloste. Yritys on myös sitoutunut noudattamaan GDPR-säännöstä. Yrityksen palvelimet isännöidään Euroopasta. (Alwaysdata, n.d. -a; Alwaysdata, n.d. -b)

Tietokannan rakenne on pidetty mahdollisimman yksinkertaisena koska tiedon lisäämiseen ja muokkaamiseen käyttöliittymän sisällä ei koettu tarpeelliseksi. Tietokanta koostuu yhdestä datataulusta ja se sisältää yhteensä 14 kenttää. Kymmenen sensoriarvon lisäksi

tallennetaan viestin ID laitteen nimi, sijainti ja aikaleima. Laitteen sijainti on manuaalisesti laitesovellukseen kirjattu muuttuja, mutta sen tilalle voisi tallentaa esimerkiksi GPS-sensorilla mitatut koordinaatit. Aikaleima otetaan dataan siitä hetkestä, kun viestin tietosisältö tallennetaan tietokantaan. (Liite 4)

IoT-laitteesta lähtevä tieto lähetetään GPRS-verkossa HTTP Post -metodia hyödyntäen. Vastaanottavassa päässä on PHP-skripti, joka varmentaa ja siirtää tulevan tiedon tallennettavaksi relaatiotietokantaan. Payload, eli yhden lähetyksen hyötykuorma sisältää laitteen nimen, sijainnin sekä sensoridatojen lisäksi API Key -tunnisteen, jolla yksilöidään viestin lähettävä laite. Jos saapuvan hyötykuorman mukana tuleva API Key ei löydy PHP-skriptin tarkistuksessa, saapuvan viestin käsittely lopetetaan välittömästi. (Liite 2 ja Liite 3)

Viestin käsittelevälle PHP-skriptille on tietoturvasyistä luotu tietokantaan oikeuksiltaan rajoitettu käyttäjäprofiili. Käyttäjällä on mahdollisuus tallentaa tietoa pelkästään ennalta määritellyssä taulussa. Käyttöprofiilin luominen Alwaysdatan palvelussa on esitelty liitteessä 4.

#### **4.5.3 Selainpohjainen käyttöliittymä**

Selainpohjaisen käyttöliittymä on toteutettu HTML-sivuna ja se ja isännöidään Alwaysdata-palvelimelta. Käyttöliittymän näkymä on luettelomainen ja pelkistetty. Päivitetäessä sivua PHP-skripti hakee tietokannasta saatavilla olevan datan. Luetulle datalle tehdään muotoiluun liittyvät muutokset ja kellonaika päivitetään vastaamaan GMT+2 kellonaikaa. Tietokannasta jätetään lukematta sijainti ja laitteen nimitiedot, jotta käyttöliittymään latautuva turhan datan määrä olisi minimaalista ja että käyttökokemus mobiililaitteilla olisi parempi. (Liite 5)

Kuva 13. Kammiodata käyttöliittymä versio 0.2 skaalattuna Apple iPhone 5/se -näyttökoolle.

Kammiodata  
versio 0.2

ID	Ca2 Kammio	Temp Kammio	Hum Kammio	Luc Kammio	Pressure Kammio	Ca2 Pila	Temp Pila	Hum Pila	Luc Pila	Pressure Pila	CreateTime
0119	1341	22.19	94.81	0.70	996.26	787	22.59	56.75	1.01	999.01	2012-09-03 07:42:11
0118	1345	22.22	94.57	0.70	996.29	787	22.57	56.72	0.98	999.03	2012-09-03 07:41:59
0117	1340	22.17	94.80	0.70	996.24	789	22.50	56.80	0.98	999.99	2012-09-03 07:42:14
0116	1355	22.16	94.84	0.75	996.23	789	22.50	56.80	0.98	999.99	2012-09-03 07:38:24
0115	1353	22.15	94.82	0.75	996.24	782	22.55	56.83	0.98	999.01	2012-09-03 07:38:29
0114	1351	22.14	94.83	0.89	996.24	782	22.54	56.83	0.92	999.04	2012-09-03 07:37:38
0113	1347	22.13	94.82	0.72	996.23	781	22.53	57.15	0.95	999.02	2012-09-03 07:36:42
0112	1352	22.12	94.83	0.89	996.24	784	22.52	57.12	0.92	999.03	2012-09-03 07:35:53
0111	1356	22.11	94.86	0.72	996.23	782	22.52	57.29	0.92	999.03	2012-09-03 07:34:55
0110	1353	22.09	94.88	0.64	996.19	783	22.51	57.32	0.92	999.01	2012-09-03 07:34:04
0109	1350	22.08	94.88	0.72	996.19	785	22.50	57.30	0.92	999.98	2012-09-03 07:33:10
0108	1303	22.07	94.90	0.64	996.20	786	22.49	57.39	0.89	999.00	2012-09-03 07:32:08
0107	1301	22.05	94.92	0.64	996.14	785	22.47	57.46	0.92	999.96	2012-09-03 07:31:15
0106	1359	22.03	94.82	0.75	996.17	785	22.46	57.55	1.07	999.95	2012-09-03 07:30:13
0105	1307	22.02	94.90	0.89	996.13	801	22.45	57.50	0.98	999.94	2012-09-03 07:28:18
0104	1305	22.04	94.70	0.89	996.11	786	22.43	57.61	0.92	999.94	2012-09-03 07:28:23
0103	1309	21.98	95.02	0.72	996.10	800	22.41	57.73	0.87	999.94	2012-09-03 07:27:27
0102	1276	21.87	95.05	0.64	996.08	802	22.39	57.82	0.89	999.93	2012-09-03 07:27:01

Sivulla käytettävä JavaScript versio on JQuery 3.1.0. Tyyliuotoilu on toteutettu Bootstrap 3.3.6-versiolla. Sivun pääominaisuuden eli tuoreimman leimauskammiodatan saatavuuden lisäksi on mahdollisuus ladata relaatiotietokannan taulu kokonaisuudessaan CSV Export -nappia painamalla. Linkki aktivoi Export-skriptin, jolle on annettu oikeus lukea relaatiotietokannan taulun sisältö. Export-skripti tekee ladattavaan dataan jatkokäsittelyä helpottavat muokkaukset ja tallentaa datapaketin CSV-tekstitiedostona käyttäjän koneelle. (Liite 5 ja Liite 6)

## 5 Pulssileimauskammion toiminta ja testaus

Tässä opinnäytetyön testausvaiheessa keskityttiin validoimaan laitteen ominaisuudet. Testimittauksissa seurattiin kammion toimintaa sekä silmämääräisesti että kerätyn

sensoridatan perusteella. Tarkastelun kohteena tekniseltä puolelta oli erityisesti kasvin leimaamiseen olennaisesti vaikuttavat tekijät kuten kammion kaasutiiveys, sensorijärjestelmän toiminta, jäähdytysjärjestelmän tehokkuuden riittävyys sekä datan siirto ja tallennus pilveen. Laitteen rakenteelliselta puolelta seurattiin kammion sekä materiaalien kestävyyttä, sekä arvioitiin käytön vaativuutta kenttäolosuhteissa.

## 5.1 Hiilidioksidisensoreiden kalibrointi

Testejä edelsi MH-Z16-sensoreiden kalibrointi. Kalibrointi suoritettiin laitevalmistajan ohjeiden mukaisesti antamalla sensoreiden lämmitä 20 minuuttia ja pitämällä ne ulkona vakaissa hiilidioksidiolosuhteissa. Kalibrointipaikkaa valittaessa pyrittiin myös välttämään suoran auringonvalon osuminen sensoreihin sekä minimoimaan muiden ulkoisten tekijöiden vaikutus kalibroinnin onnistumiseen. Kalibroinnissa käytettiin Arduino Uno r.3-mikro-ohjainta sekä siihen tehtyä laiteohjelmaa. Laiteohjelman alkuvaiheessa määritetään sensoripinnit ja lisätään sensorikirjasto. Ohjelman funktiovaiheessa sensoreista kytketään pois automaattinen kalibrointi, jonka jälkeen odotetaan valmistajan määrittämä 20 minuutin sensoreiden lämmitysvaihe. Lämmitysvaiheen jälkeen lähetetään Zero Point Calibration -komento sensoreille. Manuaalinen kalibrointi tulee suorittaa vähintään kuuden kuukauden välein. (Zhengzhou Winsen Electronics, 2019)

## 5.2 Esitestaus

Esitestausvaiheen tarkoituksena oli todeta komponenttien, sensoreiden ja kammion toiminta laitteen kehitysvaiheessa. Tuloksien pohjalta laitteen fyysistä rakennetta, asetuksia sekä toimintalogiikkaa optimoidaan tarpeiden mukaan.

Esitestauksessa tarkasteltavat asiat:

- Leimauskammion tiiveys.
- 3D-tulostetun hiilidioksidiläpivientiventtiilin toiminta.
- Leimauskammion jäähdytysjärjestelmän toiminta.
- Mikro-ohjaimen ja sensoreiden toiminta.

- Hyötydatan lähetys ja tallennus relaatiotietokantaan.
- Virranhallinta.
- Selainpohjaisen käyttöliittymän toiminta.
- Hallintapaneelin toiminta.

### 5.2.1 Testiympäristö

Esitestausvaihe suoritettiin kotiolosuhteissa kesäkuussa 2021. Olosuhteet olivat koko testausajankohtana aurinkoiset ja helteiset. Testauksia suoritettiin sisätiloissa, aurinkoisella terassilla ja varjoisalla takapihalla.

### 5.2.2 Testauksen toteutus

Ensimmäisessä vaiheessa varmistettiin laitteen perusominaisuuksien toiminta sekä datan siirto ja tallennus tietokantaan. Vesitiivisteeseen saumaan lisättiin 2.5 dl vettä ja kammion kupu laskettiin pienessä kulmassa saumaan, jotta kammion sisä- ja ulkopuolen paineet tasoittuisivat. Laitteen molemmat virtalähteet kytkettiin päälle samanaikaisesti. Jäähdytysjärjestelmän pumppu kytkettiin suoraan 12V virtalähteeseen ja pidettiin päällä koko ensimmäisen testausvaiheen ajan. Testauksen ensimmäisessä vaiheessa leimauskammion tekniikan annettiin olla päällä sisäolosuhteissa noin 13 tuntia ja mittauksia suoritettiin noin 4 minuutin välein.

Toiseen testausvaiheeseen siirryttiin, kun laitteen teknisten perusominaisuuksien toiminta oli saatu varmistettua. Toisessa testausvaiheessa tarkasteltiin hiilidioksidin syöttämistä ja näkyvyyttä kammion sisäpuolen MH-Z16-hiilidioksidisensorilla. Testin alkuvaiheessa odotettiin, että hiilidioksidisensorit ovat ehtineet lämmitä ja mittausarvot tasaantuneet. Tämän jälkeen kammioon syötettiin 20 ml elintarvikehiilidioksidia injektioruiskulla kuvussa olevan kaasusyöttöventtiilin läpi. Hiilidioksidin lähteenä toimi virvoitusjuomakäyttöön tarkoitettu Sodastream-hiilihapotuskone mistä kaasua päästiin laskemaan hiilidioksidin välisäiliönä toimineeseen pieneen muovipussiin. Haluttu määrä kaasua pystyttiin siirtämään injektioruiskuun piikittämällä pussin läpi ja vetämällä kaasu injektioruiskuun. Ruiskun kyljessä olleen asteikon perusteella voitiin päätellä kammioon syötettävän kaasun määrä

millilitroina. Kammion sisäilmaa sekoitettiin jatkuvasti kammion pohjalle, välittömästi kaasunsyöttöventtiilin alapuolelle sijoitetun tuulettimen avulla. Testien aloitus suoritettiin vastaavalla tavalla kuin ensimmäisessä vaiheessa. Tämä testauksen vaihe sisälsi kaksi erillistä testikierrosta ja se suoritettiin ulkona osittain varjoisalla paikalla puun katveessa. Toisen testausvaiheen yhteenlaskettu kesto oli noin 11 tuntia ja mittausväli 4 minuuttia.

Esitestauksen kolmanteen vaiheeseen otettiin mukaan testikoejäsen eli raiheinä. Raiheinä idätettiin ja kasvatettiin Luonnonvarakeskuksella kesäkuun 2021 aikana ja sen ominaisuudet oli määritelty vastaamaan myöhemmin koekentällä kasvatettavia koejäseniä. Raiheinä oli istutettu ennalta määriteltyyn 228 \* 234 mm ruukkuun. Testausvaihe poikkesi aiemmista testeistä siinä, että hiilidioksiditasoja seurattiin reaaliaikaisesti web-käyttöliittymästä ja kun sensorin näyttämä hiilidioksidin taso laski 0–100 ppm välille, lisättiin kammioon 40–90 ml elintarvikehiilidioksidileimoja. Kolmas testausvaihe sisälsi yhteensä kuusi testipäivää sekä 22 erillistä leimaustapahtumaa. Leimaustapahtumat on listattu taulukossa 4. Laitteen operointi toteutettiin vastaavalla tavalla kuin aiemmissa esitesteissä. Testauspaikkana toimi aurinkoinen terassi.

Taulukko 4. Esitestivaiheen 3 -pulssileimaustaulukko.

Kasvi id	Päivää niitosta	Kaasu	Kokonaismäärä ml	Leimojen määrä
H1	28	12-co2	260	4
H1	29	12-co2	240	4
H1	3	12-co2	120	2
H1	4	12-co2	240	4
H1	6	12-co2	240	4
H1	7	12-co2	240	4

### 5.2.3 Esitestien tulokset

Leimauskammion tiiveys ei ollut toivotulla tasolla ensimmäisessä ja toisessa testausvaiheessa. Toisen testausvaiheen pulssileimaustesteissä hiilidioksidivajoama oli -14.4 ppm / h ja -22.5 ppm / h. Vuoto paikannettiin johtojen läpivienteihin. (Liite 10)

Datan siirtäminen GPRS-modeemilla Telian verkossa Alwaysdata-palvelimelle toimi moitteetta. Saapuneen datan aikaleimoja vertailtiin oletettuihin laitteen mittausajankohtiin



Excel taulukko-ohjelman avulla. Verkkopalvelun saavutettavuus oli testien ajalta 100 %. Relaatiotietokanta sekä siihen yhdistetty taulukkomainen käyttöliittymä toimi suunnitellulla tavalla.

Käyttöliittymän skaalauksen toimivuus testattiin seuraavilla mobiililaitteilla:

- Apple iPad Pro 2019.
- Xiaomi MiA 3.
- Nokia 3.4.

Hiilidioksidileimojen syöttämiseen valmistettu kaasunsyöttöventtiili todettiin toimivaksi. Venttiiliin sisälle TPU-95A-materiaalista tulostettu 1.5 mm tiiviste todettiin kestävän esitesteissä suoritettujen 22 leimausta. Jatkokäytössä on kuitenkin järkevää vaihtaa tiiviste säännöllisesti, koska nähtävissä oli huomattavaa käytönjälkeä. Injektioruiskussa käytettävä neulan koko vaikuttaa tiivisten käyttöikään.

Sensoreilla näkyvä <sup>12</sup>CO<sub>2</sub>-määrä suhteissa leimauksen kokoon oli leimaustestien 1 ja 2 osalta 91.6 % ja 89.4 % (Liite 10). Arvio laskettiin seuraavasti:

Leimauksen näkyvyysprosentti =  $(co2H - co2L) / (Lk / Ks)$ , missä:

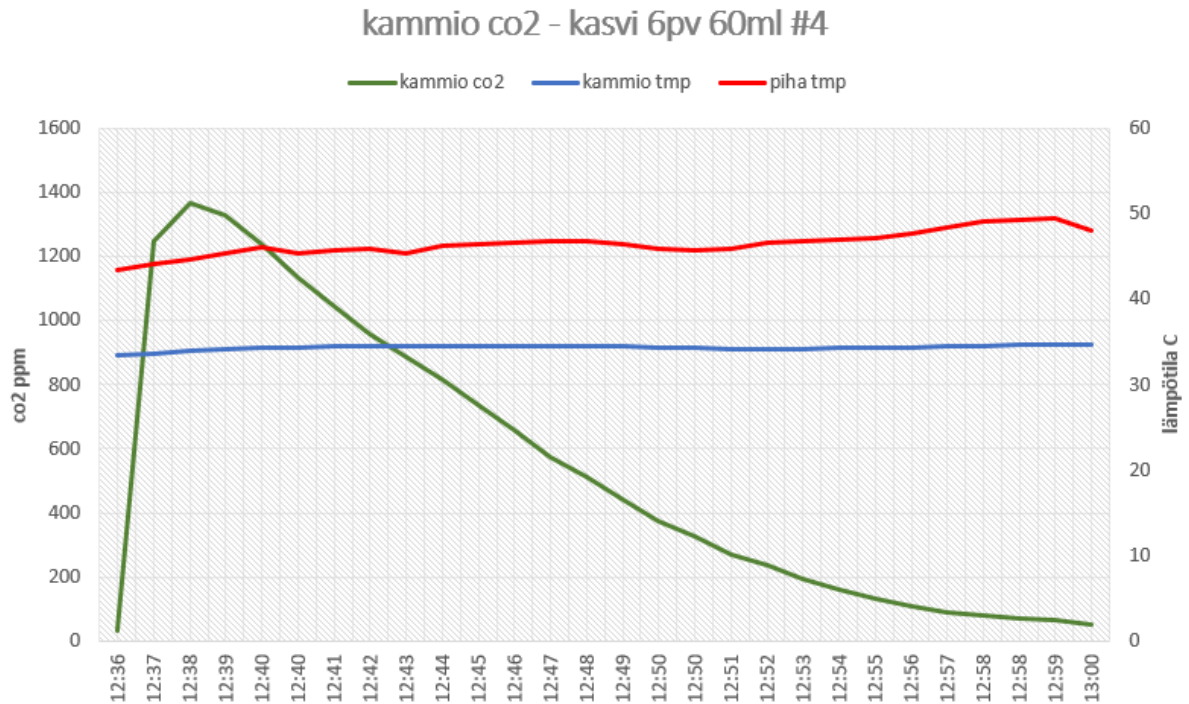
- co2H = co2 huippuarvo ppm
- co2L = co2 lähtöarvo ppm
- Lk = Leimauksen koko ml
- Ks = Kammion sisätilavuus m<sup>3</sup>

Ilmankierrosta vastannut 40 mm tuuletin toimi suorituskyvyn ja luotettavuuden puolesta kiitettävästi. Hiilidioksidimittauksien huippuarvot saavutettiin keskiarvolla kahden mittauksen kuluessa leimauksesta ja se todettiin pulssileimauskammion käyttöä ajatellen riittäväksi (kuva 14).

Jäähdytysjärjestelmä auttoi pitämään kammion sisälämpötiloja viileämpänä ja vakaampana muutoksille kuin ulkopuolelta mitattu data. Testien ajoitus kesäkuu-heinäkuu taitteeseen oli

jäähdytysjärjestelmän testauksen kannalta erinomainen. Pihalämpötilat ylittivät hellerajan jokaisena testipäivänä ja lämpötilan ollessa suorassa auringon paisteessa yli 40 C°, kammion jäähdytys joutui todelliseen testiin.

Kuva 14. H1-kasvin pulssileimaustesti. Kasvin iitosta kulunut 6 vuorokautta.



Jäähdytysjärjestelmä pystyi laskemaan lämpötiloja noin 10–15 C° astetta suhteessa suoraan auringonpaisteesta mitattuun lämpötilaan (Kuva 15). Huomioitavaa kuitenkin on, että esitesteissä ollut noin 10 litran vesisanko täytettynä hanakylmällä vedellä sekä kahdella litralla jäitä riitti noin kahdeksi tunniksi ennen kuin jäähdytysjärjestelmän teho laski olemattomaksi. Jäähdytysjärjestelmän ollessa riittämätön, kammion sisäinen lämpötila nousee auringossa nopeasti ulkopuolen olosuhteita lämpimämmäksi ja kosteus pääsee tiivistymään kammion sisäseiniin ja sensorelementteihin. Veden kondensoituminen elektroniikan pinnalle heikentää mittausprosessin luotettavuutta.

#### 5.2.4 Esitestauksen pohjalta tehdyt muutokset

Esitestit koejäsenen kanssa osoittivat, että alkuperäinen 4 minuutin mittausväli on aivan liian hidas olosuhteiden muutoksien seuraamiseen. Laiteohjelman sensoreiden mittausaikataulun

ajoituksia, viiveitä sekä pääohjelman Deep Sleep -aikoja muutettiin. Lopullisessa käyttöönottotesteihin muokatussa versiossa yhdeksi mittauskierroksen pituudeksi tuli datan lähetys pilveen mukaan lukien noin 52 sekuntia. Tarkkaa mittauksen pituutta ei pystytty määrittämään nykyisellä toimintamallilla, missä mittauksen aikaleima otetaan datan saapuessa relaatiotietokantaan. Mittauksen kokonaispituuteen vaikuttaa olennaisesti GPRS-modeemin yhteyden muodostaminen matkapuhelinverkkoon. Esitestien aikana pisimmän ja lyhyimmän mittauksen välillä oli lähes 20 sekunnin ero ja varianssia eri mobiilimastojen alueilla oli toistuvasti noin 10 sekuntia keskiarvosta.

Leimauskammion tehtiin kaikkien johtojen läpivientien osalta uudelleen tiivistys. Esitestien ensimmäisessä ja toisessa vaiheessa oli havaittavissa aiemmin mainittua hiilidioksiditason laskua (Liite 10). Kaikki pohjalevyn läpiviennit tiivistettiin uudelleen lasitussilikonilla. Kaasunsyöttöventtiiliin tiivisteet vaihdettiin uusiin ja läpivientiventtiiliin kierteet tiivistettiin PTFE-teipillä. Vesitiivisteiden ja kammion pohjalevyn välinen kosketuspinta tiivistettiin uudelleen lasitussilikonilla. Läpivientien uudelleentiivistyksen päätteeksi kammion suoritetiin erillinen tiiveystesti, missä todettiin hiilidioksiditason pysyvän vakaana kahden tunnin mittausjakson ajan.

Jäähdytysjärjestelmän vesisäiliö muutettiin esitesteissä käytetystä ämpäristä 32 litran styroksilla eristettyyn muoviseen kylmälaukkuun. Tavoitteena oli hidastaa veden lämpiämistä aurinkoisissa olosuhteissa sekä estää veteen pääsevä siitepöly ja muut roskat, jotka voisivat häiritä säiliössä olevan pumpun toimintaa.

### **5.3 Pulssileimauskammion käyttöönottotestaus**

Pulssileimauskammion käyttöönottotestaus suoritettiin aikavälillä 12.07.2021 – 31.07.2021. Käyttöönottotestauksen tarkoitus oli varmistua pulssileimauskammion ja kaasunsyöttölaitteiston toimintavarmuudesta kenttäolosuhteissa. Käyttöönottotestien leimauksissa käytettiin  $^{13}\text{CO}_2$ -hiilidioksidia. Testissä pyrittiin saada kasvi sitomaan riittävästi leimattua hiilidioksidia kasvin jatkotestejä varten.

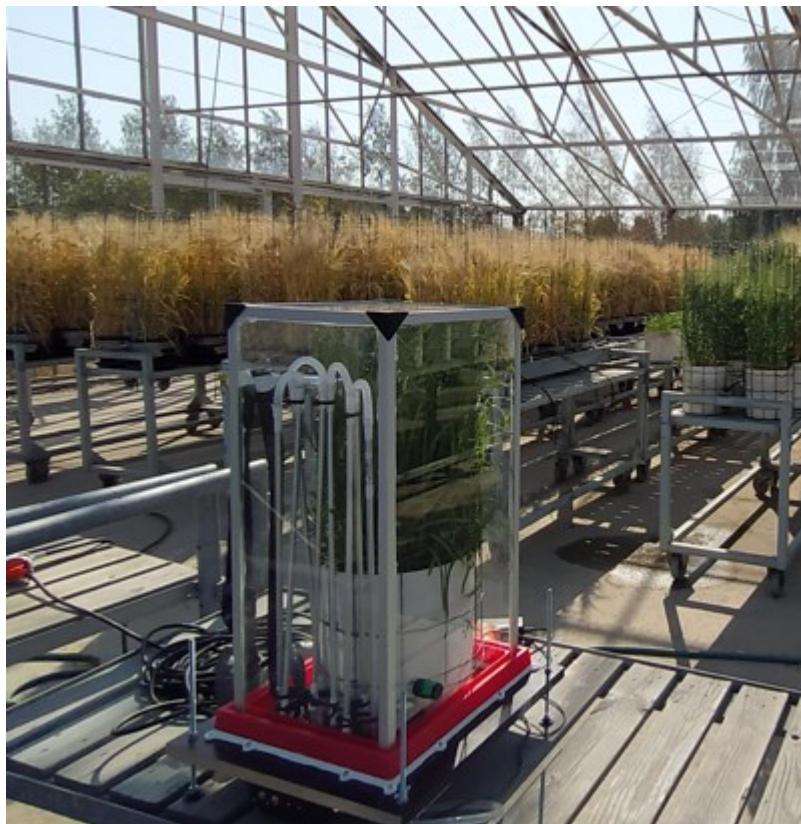
Käyttöönottotestauksessa tarkasteltavat asiat:

- Kammion tiiveys ja kaasunsyötön toiminta.
- Tekniikan toimintavarmuus.
- Datatallennus ja käyttöliittymän toiminta.
- $^{13}\text{CO}_2$ -näkyminen MH-Z16-sensorilla.

### 5.3.1 Testiympäristö

Testi suoritettiin Jokioisilla sijaitsevan Luonnonvarakeskuksen kasvatusaitauksessa. Tavallisesta kasvihuoneesta poiketen aitauksen seinät oli valmistettu tiheäsilmäisestä metalliverkosta ja katto lasilevyistä. Kasvatusaitauksen seinästä avoin mutta päältä katettu rakenne takasi suojaosan ja turvallisen paikan kasveille ja laitteistolle mittauksen ajaksi (Kuva 15). Alueelle oli testien aikana rajoitettu pääsy sivullisilta.

Kuva 15. Pulssileimauuskammio kuvattuna käyttöönottotestauspaikassa Jokioisilla 26.07.2021.



### 5.3.2 Testien toteutus

Testien leimausaikataulusta sovittiin aloituspalaverissa. Palaverissa käytiin läpi testiympäristö, aikataulu ja leimaustavoite. Leimauspäivien ajankohdat sijoitettiin viikonpäivistä maanantaille, keskiviikolle ja perjantaille. Tällä haluttiin saada tasainen leimaustahti testausjaksolle. Leimausaikataulua suunnitellessa jouduttiin myös varautumaan oikukkaisiin sääolosuhteisiin, jotka mahdollisesti haittaisivat testausta.

Käyttöönottotestiä varten luotiin pulssileimauskammion ohjeistus esitestausvaiheen pohjalta. Jokainen testauspäivä aloitettiin laitteelle määritellyn ohjeistuksen mukaisesti. Leimausten ylös kirjaamiseen tehtiin paperinen leimauslomake. Lomakkeelle kirjattiin jokaisesta leimaustapahtumasta kasvi id, leimaus numero, käytetty kaasu, leimauksen määrä, ajankohta sekä leimauksen tehnyt henkilö. Paperisen leimauslomakkeen lisäksi vastaavat tapahtumat kirjattiin Excel-pohjaiseen leimaustaulukkoon. (Liite 9)

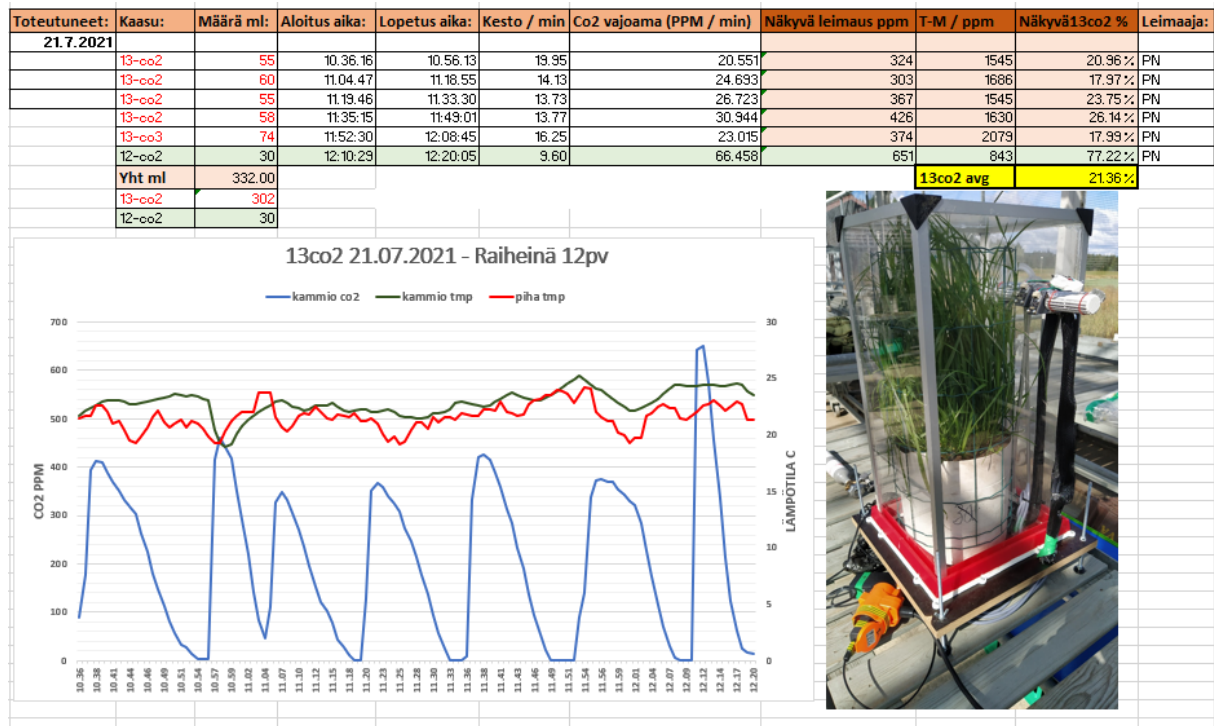
Käyttöönottotesteissä käytettiin isotooppileimattua  $^{13}\text{CO}_2$ -hiilidioksidia. Kaasu ja sen hallittuun säätelyyn tarvittavat lisätarvikkeet kuten sulkuventtiili, regulaatioventtiili sekä venttiileiden väliset tiivisteet hankittiin Sigma Aldrich -yritykseltä. Kaasun syöttämisessä kammioon käytetty injektoriruisku tarvikkeineen saatiin Luonnonvarakeskuksen laboratoriolta.

### 5.3.3 Testitulokset

Käyttöönottotesteissä pulssileimauskammion rakenne toimi odotetusti. Kupu, läpivientiventtiili, vesitiiviste sekä jalusta eivät aiheuttaneet testien aikana ongelmia. Hallintapaneeli, kytkimet sekä indikaatioledit toimivat odotetusti. Laitteella kerätty data analysoitiin päivittäin ja tuloksia vertailtiin aiempiin saatuihin tuloksiin (Kuva 16).

Leimauksien osalta tavoiteltu kokonaismäärä saavutettiin kahdeksassa leimauspäivässä, olosuhteet olivat testaukselle viimeistä leimauspäivää lukuun ottamatta erinomaiset. Viimeisenä testauspäivänä taivas oli vahvassa pilviverhossa ja kasvin kuluttaman hiilidioksidin määrä oli erittäin hidasta.

Kuva 16. Viides käyttöönottotestauspäivä ja tulosten visualisointi Excel-taulukko-ohjelmassa.



Tekniikan osalta toimintavarmuus oli 21 tunnin ja 35 minuutin mittausajalta 93.5 %.

Ongelmat koostuivat tiedonsiirron estymisestä ja kammion sisäpuolen olosuhdesensori BME 680 -ongelmasta. Ongelmat saatiin ratkottua joko kentällä tai välipäivänä ennen seuraavaa testiä. Testijakson viimeiset 10 tuntia 12 minuuttia sujuivat 100 % toimintavarmuudella.

HiiletIn-hankkeen jatkotutkimusten kannalta oli olennaista saada koejäsen sitomaan riittävää määrää isotooppileimattua hiilidioksidia. Tavoiteltu minimimäärä hiilen  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  -isotooppisuhteelle oli 0.025. Isotooppisuhte selvitettiin rikastuskoneen avulla Jyväskylän Yliopiston toimesta. Leimatusta kasvista saadut tulokset olivat 0.048 ja 0.0435 (Jyväskylän Yliopisto, henkilökohtainen tiedonanto, 1.9.2021).

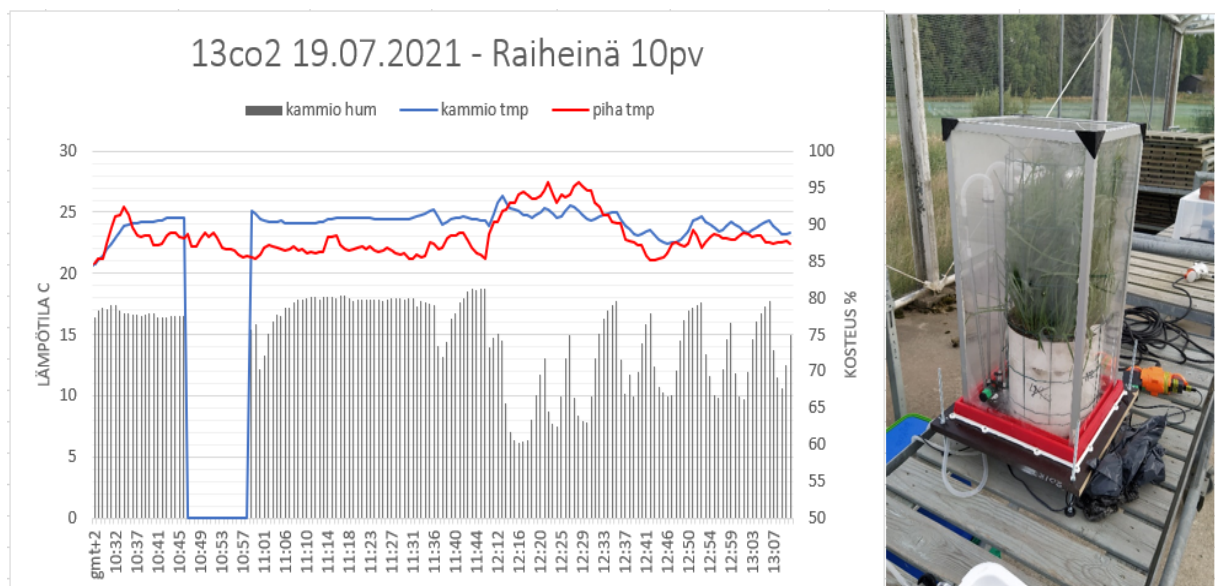
### 5.3.4 Käyttöönottotestauksen pohjalta tehdyt muutokset

Kuumimpana leimauspäivänä 14.07.2021 mikro-ohjaimen SIM-korttipaikan kuumaliimakiinnitys irtosi ja se johti kahden pulssileimauksen ja yhteensä 73 minuutin datan menetykseen. Laiteohjelma oli kuitenkin toteutettu niin, että jos modeemi ei saa yhteyttä

mobiiliverkkoon, jatkaa laite normaalia mittaustoimintaansa muilta kuin datan lähetyksen osalta. Laitteeseen lisätty hallintapaneeli indikaatioledeineen tuli tarpeeseen, sillä päivän loput leimauksien aloitukset ja lopetukset suoritettiin hallintapaneelin antaman informaation perusteella. SIM-kortin uudelleenkiinnitys varmistettiin 3D-tulostamalla PETG-materiaalista U-mallinen klipsi, joka piti kortin paikallaan myös helteessä.

Toinen sääolosuhteista aiheutunut ongelma koettiin aurinkoisena päivänä ulkolämpötilan ollessa alle 25 °C. Esitestausvaiheessa jäähdytysjärjestelmän pumpun toimintalogiikka oli muutettu tavoittelemaan 25 °C lukemaan. Ulkolämpötila laskiessa kaksi astetta kammion sisälämpötilaa alemmas, mutta kuitenkin niin että sisälämpötila ei noussut yli 25 °C, alkoi kosteusprosentin nousu kammion sisäpuolella. Saavutettaessa noin 80 % ilmakosteus, alkoi kosteuden tiivistyminen kammion seinämiin ja sensorelementteihin. Tämä johti BME 680 -sensorin lukuvirheeseen, joka on nähtävissä kuvassa 17. Ongelma korjattiin muuttamalla jäähdytysjärjestelmän toimintalogiikkaa niin että pumpun rele aktivoituu aina kammion sisälämpötilan noustessa yli 25 °C tai kun kammion- ja ulkolämpötilan erotuksen ollessa yhtä suuri tai suurempi kuin 1 °C.

Kuva 17. Käyttöönottotestauksen neljäs leimauspäivä sisälsi Jäähdytysjärjestelmän ongelmia, jotka johtivat sensoreiden mittavirheisiin ja kuvun huuruuntumiseen.



## 6 Johtopäätökset ja pohdinta

Tilaaajalla oli opinnäytetyön lopputuloksena kehitetylle pulssileimauskammiolle aito kiinnostus ja tarve. HiiletIn-hankkeen raiheinäkoejäsenten pulssileimauksen kriteerit täyttävää kaupallista laitetta ei ollut suoraan saatavilla, joten pulssileimauskammio oli kehitettävä mittatilaustyönä.

Tekijälleen opinnäytetyö oli haastava, mutta myös erittäin palkitseva ja opettavainen kokemus. Koulussa opittuja projektin toteutus- ja suunnittelumenetelmiä sai hyödyntää opinnäytetyön useilla eri osa-alueilla. Opinnäytetyö tuntui eräänlaiselta jatkumolta koulussa tehdyille kehitysprojekteille, missä opiskelijat pääsivät toteuttamaan työelämälähtöisiä IoT-laitesuunnitteluun ja toteutukseen liittyviä toimeksiantoja. Koulun tarjoamissa kehitysprojekteissa saavutetut onnistumiset rohkaisivat tekijää ottamaan opinnäytetyöaiheen vastaan.

Pulssileimauskammion suunniteltujen ja toteutettujen ratkaisuiden toimivuuden arviointi sekä kriteereiden määrittäminen tuotti tekijälle haasteita. Miten todeta, mikä on hyväksyttävä tarkkuus kullekin mitattavalle määreelle ja milloin voidaan arvioida, että laitteen toimintavarmuus on riittävä? Vastaavantyyppisissä kehitysprojekteissa niin tekijän kuin tilaajan kannalta on hyvä osata arvioida etukäteen käytettävissä olevat kokonaisresurssit, erilaiset riskit huomioon ottaen. Liian monimutkaisen tilauksen vastaanottaminen vajailla resursseilla johtaa todennäköisesti lopputulokseen, missä vähintään toinen projektin osapuoli ei ole tyytyväinen. Riskejä voidaan tekijän puolelta vähentää olemalla rehellisiä oman osaamisen suhteen, sekä ymmärtämällä tilaajan tarpeet niin hyvin kuin mahdollista. Tilaaja sekä tekijä ovat tasapuolisesti vastuussa tilausmäärittelyn onnistumisesta.

Vaikeammin hallittavia riskejä ovat erilaiset yllättävät tapahtumat, jotka joko hidastavat tai pahimmassa tapauksesta pysäyttävät kehitysprojektin etenemisen. Pulssileimauskammion kehitysvaiheessa suurimpia ongelmia aiheuttivat komponenttien saatavuus. Toukokuun puolivälissä tilattujen osien alkuperäinen toimitusaika oli kesäkuun alkuun mennessä. Komponenttitilauksia tehtiin useammalta eri toimijalta ja muutama laitteen kehityksen kannalta olennainen osa, kuten SD-korttimoduuli saapui vasta juhannusviikolla. Kammion



sekä tekniikan testaus oli aloitettava aikaisemmin ja tämä pakotti suunniteltujen laiteominaisuuksien uudelleen määrittelyyn lopullisessa prototyyppiversiossa.

Opinnäytetyössä mukana olleet sidosryhmät, erityisesti HAMK Bio ja Luonnonvarakeskus ansaitsevat ison kiitoksen. Tilaajan puolelta oli koko projektin ajan saatavilla aitoa kiinnostusta, tukea ja asiantuntia-apua opinnäytetyökokonaisuuden eri osa-alueille. Luonnonvarakeskuksen tarjoama asiantuntijuus sekä tilat kenttätestien järjestämiseen olivat olennainen osa laitteen onnistunutta käyttöönottotestausvaihetta.

## 6.1 Opinnäytetyön tulokset

Opinnäytetyön tuloksena valmistunut pulssileimauskammio tarjoaa tilaajalle valmiuden suorittaa pulssileimauksia koejäsenille sekä kerätä dataa operaation ajalta niin kammion sisältä kuin testiympäristöstä. Järjestelmän helppokäyttöisyys onnistuttiin saamaan tekijän tavoittelemalle tasolle. Laitteen käynnistys ja mittauksien aloittaminen onnistuu käyttöohjeita seuraamalla vaivattomasti muutamassa minuutissa, eikä se vaadi laitteen tekniikan syvempää tuntemista. Selainpohjaisen käyttöliittymänosalta, käyttäjältä odotetaan osaamista QR-koodin lukemisesta mobiililaitteella. Tietokantaan tallentuva data on ladattavissa kokonaisuudessaan käyttöliittymästä löytyvästä linkistä CSV-muodossa.

Pulssileimauskammion rakenteessa käytetyt materiaalit soveltuvat ulkokäyttöön ja kestävät kosteutta. Kuvun akryylipinnat läpäisevät valoa riittävästi ja ovat helposti puhdistettavissa esimerkiksi siitepölystä kostealla talouspaperilla. Huomioitavaa kuitenkin on, että akryyli on helposti naarmuuntuva materiaali ja käyttöönottotestauksessa kasvin ympärille aseteltu tukiverkko aiheutti kammion sisäpuolelle lievää naarmuuntumista.

Vesitiivisteessä, jäähdytysjärjestelmässä ja kaasunläpivientiventtiilissä runsaasti hyödynnetty 3D-tulostus tarjosi joustavan tavan suunnitella, valmistaa ja testata laitteen eri kappaleita. Vesitiiviiden 3D-tulosteiden tuottaminen voi kuitenkin olla hankalaa ja 3D-tulostin, tulostusmateriaali sekä tulostusasetukset vaikuttavat oleellisesti lopputuloksen laatuun. Vesitiivisteiden osalta PETG- ja PLA-materiaalista tulostettu malli täyttää kriteerit, mutta vaatii

ylimääräisen eristyksen saumoihin nestekumilla. Kaasunläpivientiventtiili täyttää kriteerit mutta vaatii kierteiden tiivistämisen PTFE-teipillä.

Tekniikan osalta käyttöönotto-testeissä saavutettu 93.5 % toimintavarmuus yllätti tekijän positiivisesti varsinkin, kun laitteen toiminnassa ongelmia aiheuttaneet syyt pystyttiin selvittämään ja ratkaisemaan. Hallintapaneeli osoittautui testeissä toimivaksi informaation lähteeksi laitteen operoinnissa sekä hyödylliseksi varmuusjärjestelmäksi tiedonsiirron yhteysvirheen aikana.  $^{13}\text{CO}_2$ -mittaamisen osalta MH-Z16 NDIR -sensorit toimivat johdonmukaisesti ja testitulokset ovat toistettavissa.  $^{12}\text{CO}_2$ -hiilidioksidien havainnointiin optimoidut sensorit näyttivät  $^{13}\text{CO}_2$ -arvoista käyttöönotto-testien perusteella 27.3 %. Tuloksessa pitää kuitenkin huomioida kammiossaan olleen kasvin sekä ilmankiertojärjestelmän yhteisvaikutus mittaustulokseen. Käyttöönotto-testien jälkeen  $^{13}\text{CO}_2$ -hiilidioksidilla suoritettiin kolme testileimausta tyhjään kammioon sisätilaolosuhteissa ja sen näkyvyyttä mitattiin 30 minuuttia jokaista leimaa kohden. Tuloksien perusteella optimaalisissa olosuhteissa MH-Z16-sensorilla voidaan nähdä noin 52 % syötetystä  $^{13}\text{CO}_2$ -leimasta. Käyttöönotto-testauksen jälkeen tyhjään kammioon suoritettua tiiveystestissä keskimääräinen hiilidioksidivajoama oli 116 minuutin aikana 0,017 ppm / 60 s.

Leimausprosessin osalta koejäsenenä saatiin sidottua riittävästi isotooppileimattua hiilidioksidia. Tavoitearvo oli 0.025 ja se ylitettiin selvästi pääsemällä Jyväskylän Yliopiston suorittamissa testeissä arvoihin 0.0418 ja 0.0435. Leimauksiin käytettiin nelinkertainen määrä kaasua verrattaessa tavoitearvon minimimäärään. Kasvin sitoman  $^{13}\text{C}$ -hiilidioksidin hyötysuhde oli käyttöönotto-testin perusteella 42.65 %.

## 6.2 Kehitysehdotukset

Laitteiston yksittäisen mittauksen kestoa voitaisiin lyhentää optimoimalla käytettäviä sensoreita, sensoreiden määrää ja laiteohjelmaa. Testit osoittivat, että minuutin aikana ehtii tapahtua isoja muutoksia kammion olosuhteissa. Nopeammalla frekvenssillä mitattu data auttaisi pulssileimausprosessin tarkemmassa analysoinnissa.

Jäähdytysjärjestelmän vesisäiliöön pitäisi sijoittaa lämpötilasensori. Tämä mahdollistaisi veden vaihtamisen ja jäiden lisäämisen optimoinnin. Lisäksi jäähdytys laitteiston tehokkuutta olisi helpompi arvioida ja se tarjoaisi lisää mahdollisuuksia jäähdytysjärjestelmän hallintalogiikan optimoimiseen.

Leimausprosessista kerätty data tallennettiin SD-korttilukijan toimituksen myöhästymisen takia pelkästään relaatiotietokantaan. Laitteeseen olisi hyvä lisätä mahdollisuus tallentaa data myös paikallisesti. Tämä mahdollistaisi pulssileimauskammion täysimääräisen hyödyntämisen sekä data-analyysin, vaikka tiedonsiirtoyhteyksissä ilmenisi ongelmia.

Datan hakeminen tietokannasta käyttöliittymään olisi miellyttävämpää, jos hakuja pystyisi rajaamaan yksinkertaisten suodattimien avulla. Laitte id, päivämäärä, kellon aika tai laitteen sijainti voisivat olla käyttökelpoisia määreitä varsinkin, jos leimattavia kasveja tai pulssileimauslaitteita on useita. Datan visualisointi tietokannasta reaaliaikaisesti käyttöliittymään on myös mahdollista ja se voisi tuoda lisäarvoa ymmärtämään pulssileimauksien aikana tapahtuvia mittaustrendejä. Datan reaaliaikaisesta visualisoinnista olisi varsinkin hyötyä silloin, kun tuloksia esitellään taholle, jolla ei ole tarkkaa ymmärrystä leimausprosessista.

Pulssileimauskammiolla kasvatettava kasvimateriaali vaatii nykyisellään paljon työresursseja. Laitteohjelman päivittäminen sekä asetusten muuttaminen vaatii teknistä osaamista ja se onnistuu vain kaapelin avulla. Järjestelmään olisi mahdollista rakentaa käyttäjäystävällinen OTA-päivitysmalli esimerkiksi selainpohjaisen käyttöliittymän yhteyteen. Laitteen operoiminen vaatii myös käyttäjältä jatkuvaa kammion olosuhteiden seuranta, leimojen manuaalista syöttämistä ja tapahtumien kirjapitoa. Järjestelmän sensoreiden keräämä data mahdollistaisi kaasun syötön automatisointilogiikan rakentamisen.

### **6.3 Toimeksiantajan arvio sekä laitteen käyttöönotto**

Pulssileimauskammio oli toimeksiannon mukainen ja täytti tehtävänsä. Tiukasta aikataulusta huolimatta laitteen rakentaminen ja leimaukset saatiin suoritettua aikataulun mukaisesti. Laitteen toiminta oli varmaa ja toiminnasta johtuvia viivästyksiä ei tullut. Laitteen anturointi

tuotti leimausprosessista paljon dataa, mitä pystytään hyödyntämään tulevassa käytössä ja jatkokehityksessä. Lisäksi dataa pystyttiin hyödyntämään kalliin leimatun hiilidioksidin annostelun optimoinnissa.

Kasvien tehokkuudesta sitoa leimattua hiilidioksidia ei ollut varmuutta ennen testien aloittamista. Tiedossa oli, että NDIR-sensorit eivät pysty havaitsemaan  $^{13}\text{CO}_2$ :sta täydellisesti. Nämä epävarmuustekijät pystyttiin hallitsemaan työssä hyvin ja tuotetun kasviaineksen ominaisuudet ylittivät ennen leimausta asetetun tavoitetason.

Opinnäytetyön tuloksena tehty pulssileimauskammio otetaan käyttöön HiiletIn-hankkeen raiheinä koejäsenten pulssileimaukseen. Laitteen käyttöönotto tapahtuu kasvihuoneolosuhteissa Luonnonvarakeskuksella syyskuussa 2021.

## Lähteet

Alwaysdata. (n.d -a). *Transparency*. Haettu 12.6.2021 osoitteesta

<https://www.alwaysdata.com/en/transparency/>

Alwaysdata. (n.d -b). *Security*. Haettu 12.6.2021 osoitteesta

<https://help.alwaysdata.com/en/security/>

Avast. (2021). *Internet of Things Security Risks*. Haettu 8.10.2021 osoitteesta

<https://www.avast.com/c-iot-security-risks>

BOSCH Sensortec. (2017). *BME 680 – Datasheet*. Haettu 9.11.2021 osoitteesta [https://cdn-](https://cdn-shop.adafruit.com/product-files/3660/BME680.pdf)

[shop.adafruit.com/product-files/3660/BME680.pdf](https://cdn-shop.adafruit.com/product-files/3660/BME680.pdf)

Cisco. (n.d). *What Is a Cyber attack?* Haettu 9.11.2021 osoitteesta

<https://www.cisco.com/c/en/us/products/security/common-cyberattacks.html>

Google. (n.d). *Using API keys*. Haettu 11.10.2021 osoitteesta

<https://cloud.google.com/docs/authentication/api-keys>

Gupta, A., Christie, R. & Manjula, P. (2017). *Scalability in Internet of Things: Features Techniques and Research Challenges*. Haettu osoitteesta

[https://www.ripublication.com/ijcir17/ijcirv13n7\\_06.pdf](https://www.ripublication.com/ijcir17/ijcirv13n7_06.pdf)

Heimann Sensor. (n.d). *NDIR Gas Detection*. Haettu osoitteesta

<https://www.heimansensor.com/NIDR-gas-detection>

IBM. (2018). *The little-known story of the first IoT device*. Haettu 7.10.2021 osoitteesta

<https://www.ibm.com/blogs/industries/little-known-story-first-iot-device/>

IoT Analytics. (2014). *Internet of Things: Definition, history, disambiguation*. Haettu

7.10.2021 osoitteesta <https://iot-analytics.com/internet-of-things-definition/>

IoT Analytics. (2018a). *New Research on 1,600 Enterprise IoT Projects: Upsurge in Smart City and Connected Building Related IoT Projects*. Haettu 7.10.2021 osoitteesta

<https://iot-analytics.com/global-overview-1600-enterprise-iot-projects/>

IoT Analytics. (2018b). *State of the IoT 2018: Number of IoT devices now at 7B – Market accelerating*. Haettu 7.10.2021 osoitteesta [https://iot-analytics.com/state-of-the-iot-](https://iot-analytics.com/state-of-the-iot-update-q1-q2-2018-number-of-iot-devices-now-7b/)

[update-q1-q2-2018-number-of-iot-devices-now-7b/](https://iot-analytics.com/state-of-the-iot-update-q1-q2-2018-number-of-iot-devices-now-7b/)

IoT Analytics. (2020). *State of the IoT 2020: 12 billion IoT connections, surpassing non-IoT for the first time*. Haettu 7.10.2021 osoitteesta [https://iot-analytics.com/state-of-the-iot-](https://iot-analytics.com/state-of-the-iot-2020-12-billion-iot-connections-surpassing-non-iot-for-the-first-time/)

[2020-12-billion-iot-connections-surpassing-non-iot-for-the-first-time/](https://iot-analytics.com/state-of-the-iot-2020-12-billion-iot-connections-surpassing-non-iot-for-the-first-time/)

- Li, M., Gu, W., Chen, W., He, Y., Wu, Y. & Zhang, Y. (2018). *Smart Home: Architecture, Technologies and Systems*. Haettu osoitteesta <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.04.219>
- Lifewire. (2020). *All the Things You Can Track With Wearables*. Haettu osoitteesta <https://www.lifewire.com/what-wearables-can-track-4121040>
- Mckinsey Global Institute. (2013). *Disruptive technologies: Advances that will transform life, business, and the global economy*. Haettu 7.10.2021 osoitteesta [https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/business%20functions/mckinsey%20digital/our%20insights/disruptive%20technologies/mgi\\_disruptive\\_technologies\\_full\\_report\\_may2013.ashx](https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/business%20functions/mckinsey%20digital/our%20insights/disruptive%20technologies/mgi_disruptive_technologies_full_report_may2013.ashx)
- nabto. (2020). *A Complete Guide to Microcontrollers for IoT*. Haettu 17.11.2021 osoitteesta <https://www.nabto.com/iot-microcontroller-guide/>
- Paessler. (n.d). *IT Explained: IIoT*. Haettu 7.10.2021 osoitteesta <https://www.paessler.com/it-explained/iiot>
- ProAgria. (2021). *Laaja tutkimus käynnistyi peltojen hiilensidonnasta, toimintatavoista ja taloudesta*. Haettu 7.10.2021 osoitteesta <https://www.proagria.fi/ajankohtaista/laaja-tutkimus-kaynnistyi-peltojen-hiilensidonnasta-toimintatavoista-ja-taloudesta>
- RAC. (n.d). *Black Box Car Insurance*. Haettu 7.10.2021 osoitteesta <https://www.rac.co.uk/insurance/black-box-insurance>
- Randomnerdtutorials. (n.d). *ESP32 Publish Data to Cloud without Wi-Fi (TTGO T-Call ESP32 SIM800L)*. Haettu 16.5.2021 osoitteesta <https://randomnerdtutorials.com/esp32-sim800l-publish-data-to-cloud/>
- Rehmani, A. (2020). *12V to 5V Converter using LM7805 IC – Power Supply*. Haettu 17.11.2021 osoitteesta <https://circuits-diy.com/12v-to-5v-converter-using-lm7805-ic-power-supply/>
- Soong, J., Pinney, C., Boyack, T., Haddix, M., Stewart, C. & Cotrufo, F. (2014). *Design and Operation of a Continuous C-13 and N-15 Labeling Chamber for Uniform or Differential, Metabolic and Structural, Plant Isotope Labeling*. Haettu osoitteesta <https://www.researchgate.net/publication/259881967>
- Texas Instruments. (2016). *TCA9548A*. Haettu osoitteesta <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tca9548a.pdf>

The Plastic People. (n.d -a). *Acrylic: Technical Data Sheet*. Haettu osoitteesta

[https://xometry.eu/wp-content/uploads/2020/11/datasheet-acrylic\\_3.pdf](https://xometry.eu/wp-content/uploads/2020/11/datasheet-acrylic_3.pdf)

The Plastic People. (n.d -b). *Polycarbonate: Technical Data Sheet*. Haettu osoitteesta

<https://www.theplasticpeople.co.uk/ThePlasticPeople/media/The-Plastic-People/Products/Cut%20To%20Size/Data%20Sheets/datasheet-polycarbonate-2014.pdf>

The-Roost. (2013). *Video: Silicone Product Test on Acrylic*. Haettu osoitteesta

<https://www.youtube.com/watch?v=mReJB4qc9QU>

trinamiX. (2020). *Comparison of gas detection limits of NDIR Thermopile, pyroelectric and PbSe detectors*. Haettu 4.8.2021 osoitteesta

[https://trinamixsensing.com/media/application\\_note\\_-\\_ndir\\_detectable\\_gases\\_and\\_their\\_detection\\_limits\\_1.pdf](https://trinamixsensing.com/media/application_note_-_ndir_detectable_gases_and_their_detection_limits_1.pdf)

Vaisala Oyj. (n.d). *How to Measure Carbon Dioxide*. Haettu 4.8.2021 osoitteesta

<https://www.vaisala.com/sites/default/files/documents/VIM-G-How-to-measure-CO2-Application-Note-B211228EN.pdf>

Vishay Semiconductors. (2016). *High Accuracy Ambient Light Sensor with I2C Interface*.

Haettu osoitteesta

<https://dfimg.dfrobot.com/nobody/wiki/0be3f21972c823a0231555061e24593d.pdf>

Zhengzhou Winsen Electronics. (2019). *MH-Z16 Intelligent Infrared Gas Module: User's*

*Manual 2.4*. Haettu osoitteesta <https://www.winsen-sensor.com/d/files/MH-Z16.pdf>

## Liite 1: Polykarbonaatin ja akryylin tekniset ominaisuudet

Akryylin tekniset ominaisuudet (The Plastic People, n.d-a)

### Acrylic

#### Advantages

- Half the weight of glass yet equal to it in clarity and up to 17x more impact resistant
- Exceptional weathering characteristics
- Excellent insulator
- Excellent resistance to Mineral Oils
- Good resistance to Dilute Acids, Aldehydes and Aliphatic Hydrocarbons
- Limited resistance to Bases
- Poor resistance (not recommended for use) with Concentrated Acids, Alcohols, Esters, Aromatic and Halogenated Hydrocarbons, Ketones, Vegetable Oils and Oxidizing Agents.
- Machine-able and heat-bendable
- Acrylic can be solvent bonded
- Extruded acrylic can be flame polished to obtain a glass-like finish

	Test Standard	Units	Guide Values
<b>General</b>			
Relative Density	ISO 1183	g/cm <sup>3</sup>	1.19
Water Absorption	ISO 62	%	0.2
Light Transmission	ASTM D-1003	%	>92
Refractive Index	ISO 489/A		1.49
<b>Mechanical Properties</b>			
Tensile Strength at yield	ISO 527	MPa	75
Tensile Strength at break			
Elongation at yield			
Elongation at break	ISO 527	%	4
Tensile Modulus of Elasticity			
Flexural Modulus	ISO 178	MPa	3210
Flexural Strength at yield	ISO 178		
Izod Impact Strength	ISO 180/1A	kJm <sup>-2</sup>	N/A
Charpy Impact Strength	ISO 179	kJm <sup>-2</sup>	12
Impact Falling Weight			
Rockwell Hardness	ISO 2039-2	M Scale	102
<b>Thermal Properties</b>			
Vicat Softening Temperature	ISO 306	°C	>110
Coefficient of Thermal Expansion	ASTM D-696	mm/m °C	0.077
Flammability	BS 476 Part 7	-	Class 3
<b>Electrical Properties</b>			
Dielectric Strength	IEC 243	kV/mm-1	15
Surface Resistivity	IEC 93	Ω m-2	>10 <sup>14</sup>

All information contained in this literature corresponds with our current knowledge of the products. The Plastic People assume no liability whatsoever in respect of application, conversion or use made of the aforementioned information or products, or any consequence thereof. The buyer undertakes all liability in respect of the application, conversion or use of the aforementioned information or products. Existing intellectual property rights must be observed and The Plastic People reserve the right to make technical alterations.



Polykarbonaatin tekniset ominaisuudet (The Plastic People, n.d-b)

## Polycarbonate

### Advantages

- Polycarbonate is one of the toughest transparent plastics available, about 300 times stronger than single-strength glass.
- Polycarbonate machines well and brake forms cold.
- Can be joined mechanically, solvent bonded, and welded with lots of practice.
- Excellent resistance to dilute acids and mineral oils.
- Good resistance to Alcohols and vegetable oils.
- Limited resistance to Aldehydes.
- Poor resistance (not recommended for use) with Concentrated Acids, Bases, Esters,
- Aliphatic Hydrocarbons, Aromatic Hydrocarbons, Halogenated Hydrocarbons, Ketones and Oxidizing Agents.

		Test Standard	Units	Guide Values
<b>General</b>				
Density		DIN 53479	g/m <sup>3</sup>	1,2
Refraction index n <sub>D</sub>		DIN 53491	no	1,58
Moisture absorption		DIN 53495	%	0,36
Permeability to steam (0,1mm)		DIN 53122	g/m <sup>2</sup> d	15
<b>Mechanical Properties</b>				
Yield stress $\sigma_y$		DIN 53455	N/mm <sup>2</sup>	>80
Stress at break $\sigma_r$		DIN 53455	N/mm <sup>2</sup>	>70
Yield strain $\epsilon_y$		DIN 53455	%	6
Strain at break $\epsilon_r$		DIN 53455	%	>100
Tensile modulus of elasticity E		DIN 53457	N/mm <sup>2</sup>	2200
Strength Impact $a_n$	+23°C	DIN 53453	kJ/m <sup>2</sup>	65
	-40°C	DIN 53453	kJ/m <sup>2</sup>	65
Resiliency $a_k$ at +23°C		DIN 53453	kJ/m <sup>2</sup>	35
Impact stress Izod with notch		ASTM 256-56	J/m	>700
Brinell Hardness H30		DIN 53456	N/mm <sup>2</sup>	110
<b>Thermal Properties</b>				
Linear thermal expansion $\alpha$		DIN 53752	mm/m °C	0,065
Thermal conductivity $\lambda$		DIN 52612	W/m K	0,20
Softening temperature VICAT		DIN 53480	°C	145-150

All information contained in this literature corresponds with our current knowledge of the products. The Plastic People assume no liability whatsoever in respect of application, conversion or use made of the aforementioned information or products, or any consequence thereof. The buyer undertakes all liability in respect of the application, conversion or use of the aforementioned information or products. Existing intellectual property rights must be observed and The Plastic People reserve the right to make technical alterations.

## Liite 2: Pulssileimauskammion datan lähetys laitteesta palvelimelle

Laiteohjelman tiedonsiirtoon sekä modeemin määrittelyyn on hyödynnetty randomnerdtutorials-sivuston projektia Lily TTGO Sim800L -mikro-ohjaimella. (Randomnerdtutorials, n.a)

Tiedonsiirto tapahtuu HTTP Post -metodilla. Siirrettäessä dataa mikro-ohjaimelta serverille, tulee yhdyskävä ja Api Key olla oikein määritetty. Ohjelman alussa määritellään myös mobiiliyhteyden APN-osoite ja PIN-koodi. Alkumäärittelyssä tulee lisätä myös vaadittavat kirjastot ja konfiguroida modeemin asetukset.

```

/*----- Sim800L and upload setup-----*/
)
const char apn[]      = "internet"; // APN
const char gprsUser[] = "";
const char gprsPass[] = "";

const char simPIN[]  = "1234"; // sim pinkoodi

// Serverin tiedot
const char server[] = "kuvitteellinen.serverin.osoite.fi"; // domain
const char resource[] = "/pulssileimauskammio/reciever.php"; // kohde osoite
const int  port = 80; // serverin portti
String apiKeyValue = "xxxxxxxxxxxx"; //api key. Avaimen tulee olla sama kuin php-skriptissä

// TTGO T-Call pinnit
#define MODEM_RST      5
#define MODEM_PWKEY   4
#define MODEM_POWER_ON 23
#define MODEM_TX       27
#define MODEM_RX       26
#define I2C_SDA        21
#define I2C_SCL        22

// Set serial for debug console (to Serial Monitor, default speed 115200)
#define SerialMon Serial
// Set serial for AT commands (to SIM800 module)
#define SerialAT Serial1

// Configure TinyGSM library
#define TINY_GSM_MODEM_SIM800 // Modem is SIM800
#define TINY_GSM_RX_BUFFER 1024 // Set RX buffer to 1Kb

#include <Wire.h>
#include <TinyGsmClient.h>

#ifdef DUMP_AT_COMMANDS
#include <StreamDebugger.h>
StreamDebugger debugger(SerialAT, SerialMon);
TinyGsm modem(debugger);
#else
TinyGsm modem(SerialAT);
#endif
//-----
// I2C for SIM800 (to keep it running when powered from battery)
TwoWire I2CPower = TwoWire(0);

// TinyGSM Client for Internet connection
TinyGsmClient client(modem);

#define IPS306_ADDR      0x75
#define IPS306_REG_SYS_CTL0 0x00

bool setPowerBoostKeepOn(int en) {
  I2CPower.beginTransaction(IPS306_ADDR);
  I2CPower.write(IPS306_REG_SYS_CTL0);
  if (en) {
    I2CPower.write(0x37); // Set bit1: 1 enable 0 disable boost keep on
  } else {
    I2CPower.write(0x35); // 0x37 is default reg value
  }
  return I2CPower.endTransmission() == 0;
}

```

Modeemin SETUP-määrittelyt hoidetaan ohjelmasilmukan sisällä olevalla initializeModem-aliohjelmalla. Aliohjelmassa määritellään baudrate, pinnien asetukset sekä tila. Asetusten

määrityksen jälkeen modeemi uudelleen käynnistetään ja SIM-kortin lukitus avataan tarvittaessa. Jos PIN-koodi on poistettu käytetystä, voi simPIN[] muuttujan jättää tyhjäksi ohjelman alussa.

```

void initializeModem() {
    /*----- Start I2C communication-----*/
    I2CPower.begin(I2C_SDA, I2C_SCL, 400000);

    bool isOk = setPowerBoostKeepOn(1);
    SerialMon.println(String("IP5306 KeepOn ") + (isOk ? "OK" : "FAIL"));

    // pinmode määrittäykset
    pinMode(MODEM_PWKEY, OUTPUT);
    pinMode(MODEM_RST, OUTPUT);
    pinMode(MODEM_POWER_ON, OUTPUT);
    digitalWrite(MODEM_PWKEY, LOW);
    digitalWrite(MODEM_RST, HIGH);
    digitalWrite(MODEM_POWER_ON, HIGH);

    // modeemin uartpinnien ja baudraten määrittäminen
    SerialAT.begin(115200, SERIAL_8N1, MODEM_RX, MODEM_TX);
    delay(3000);

    // modeemin bootti
    SerialMon.println("Initializing modem...");
    modem.restart();

    // Unlock your SIM card with a PIN if needed
    if (strlen(simPIN) && modem.getSimStatus() != 3 ) {
        modem.simUnlock(simPIN);
    }
    //-----
}

```

Tiedon lähettäminen suoritetaan HTTP Post -aliohjelmassa. Alussa testataan APN-yhteys ja tarkistetaan, onko kohde palvelin nähtävissä. Jos kysely ei onnistu, datan lähetyksivaihe hypätään yli ja siitä tulostetaan virheviesti komentoriville. Jos tarkistus läpäistään, luodaan kerätyistä muuttujista yksi string-muuttuja eli tavujono. String lähetetään ohjelman alussa määritellyyn serverin kohdeosoitteeseen. Serveri palauttaa lähettävälle laitteelle statuskoodin. Lähetteen onnistuessa paluukoodina saadaan 200. Koodien selitykset ovat nähtävissä sivulta:

<https://umbraco.com/knowledge-base/http-status-codes/>

```

void httpPost(){
    SerialMon.print("Connecting to APN: ");
    SerialMon.print(apn);
    if (!modem.gprsConnect(apn, gprsUser, gprsPass)) {
        SerialMon.println(" fail");
    }
    else {
        SerialMon.println(" OK");

        SerialMon.print("Connecting to ");
        SerialMon.print(server);
        if (!client.connect(server, port)) {
            SerialMon.println(" fail");
        }
        else {
            SerialMon.println(" OK");

            // ilmoitus seriamonitoriin lähetyksen aloituksesta
            SerialMon.println("Performing HTTP POST request...");
            // tehdään sensoridatasta yhtenäinen sting
            String httpRequestData = "api_key=" + apiKeyValue + "&sensor=" + sensorName
                + "&location=" + sensorLocation + "&value1=" + String(kammiooco2)
                + "&value2=" + String(bmeTempKammio) + "&value3=" + String(bmeHumKammio)
                + "&value4=" + String(luxKammio) + "&value5=" + String(bmePressureKammio)
                + "&value6=" + String(pihaco2) + "&value7=" + String(bmeTempPiha)
                + "&value8=" + String(bmeHumPiha) + "&value9=" + String(luxPiha)
                + "&value10=" + String(bmePressurePiha) + "";

            //serial printti lähetettävästä datasta
            client.print(String("POST ") + resource + " HTTP/1.1\r\n");
            client.print(String("Host: ") + server + "\r\n");
            client.println("Connection: close");
            client.println("Content-Type: application/x-www-form-urlencoded");
            client.print("Content-Length: ");
            client.println(httpRequestData.length());
            client.println();
            client.println(httpRequestData);

            //stringin lähetyks
            unsigned long timeout = millis();
            while (client.connected() && millis() - timeout < 10000L) {
                // Print available data (HTTP response from server)
                while (client.available()) {
                    char c = client.read();
                    SerialMon.print(c);
                    timeout = millis();
                }
            }
            SerialMon.println();

            // yhteyden katkaisu
            client.stop();
            SerialMon.println(F("Server disconnected"));
            modem.gprsDisconnect();
            SerialMon.println(F("GPRS disconnected"));
        }
    }
}
}

```

Tiedonsiirtoon liittyvät aliohjelmat kutsutaan pääohjelman silmukassa sensorimittausfunktioiden jälkeen.



### Liite 3: Saapuvan HTTP Post -viestin vastaanottaminen ja siirto tietokantaan

Pulssileimauskammioilta saapuva HTTP Post -viesti eli mikro-ohjaimen lähettämä tavujono vastaanotetaan palvelimeen tarkoitukseen ohjelmoidun PHP-skriptin avulla.

```

1 <?php
2 // serverin osoite
3 $servername = "kuviteltu.serveri.fi";
4
5 // Database nimi
6 $dbname = "pulssileimauskammio";
7
8 // käyttäjän tiedot
9 $username = "kuviteltu_username";
10 $password = "kuviteltu_salasana";
11 // määrätty api key mikro-ohjaimessa
12 $api_key_value = "xxxxxxxxxxxxxxxx";
13
14 $api_key= $sensor = $location = $value1 = $value2 = $value3 = $value4 = $value5 = $value6 = $value7 = $value8 = $value9 = $value10 = "";
15
16 // alustetaan vastaus + pallokeräilykset sekä sensoridatan omina muuttujina tallennus
17 if ($_SERVER["REQUEST_METHOD"] == "POST") {
18     $api_key = test_input($_POST["api_key"]);
19     if($api_key == $api_key_value) {
20         $sensor = test_input($_POST["sensor"]);
21         $location = test_input($_POST["location"]);
22         $value1 = test_input($_POST["value1"]);
23         $value2 = test_input($_POST["value2"]);
24         $value3 = test_input($_POST["value3"]);
25         $value4 = test_input($_POST["value4"]);
26         $value5 = test_input($_POST["value5"]);
27         $value6 = test_input($_POST["value6"]);
28         $value7 = test_input($_POST["value7"]);
29         $value8 = test_input($_POST["value8"]);
30         $value9 = test_input($_POST["value9"]);
31         $value10 = test_input($_POST["value10"]);
32
33         // Yhdistetään tietokantaan
34         $conn = new mysqli($servername, $username, $password, $dbname);
35         // tarkastetaan yhteyden muodostus
36         if ($conn->connect_error) {
37             die("Connection failed: " . $conn->connect_error);
38         }
39
40         $sql = "INSERT INTO SensorDataFull (sensor, location, value1, value2, value3, value4, value5, value6, value7, value8, value9, value10)
41 VALUES ('" . $sensor . "', '" . $location . "', '" . $value1 . "', '" . $value2 . "', '" . $value3 . "', '" . $value4 . "', '" . $value5 . "', '" . $value6 . "', '" . $value7 . "', '" . $value8 . "', '" . $value9 . "', '" . $value10 . "')";
42
43         if ($conn->query($sql) === TRUE) {
44             echo "sql insert onnistui";
45         }
46         else {
47             echo "Error: " . $sql . "<br> " . $conn->error;
48         }
49
50         $conn->close();
51     }
52     else {
53         echo "Wrong API Key provided.";
54     }
55 }
56
57 }
58 else {
59     echo "No data posted with HTTP POST.";
60 }
61
62 function test_input($data) {
63     $data = trim($data);
64     $data = stripslashes($data);
65     $data = htmlspecialchars($data);
66     return $data;
67 }
68

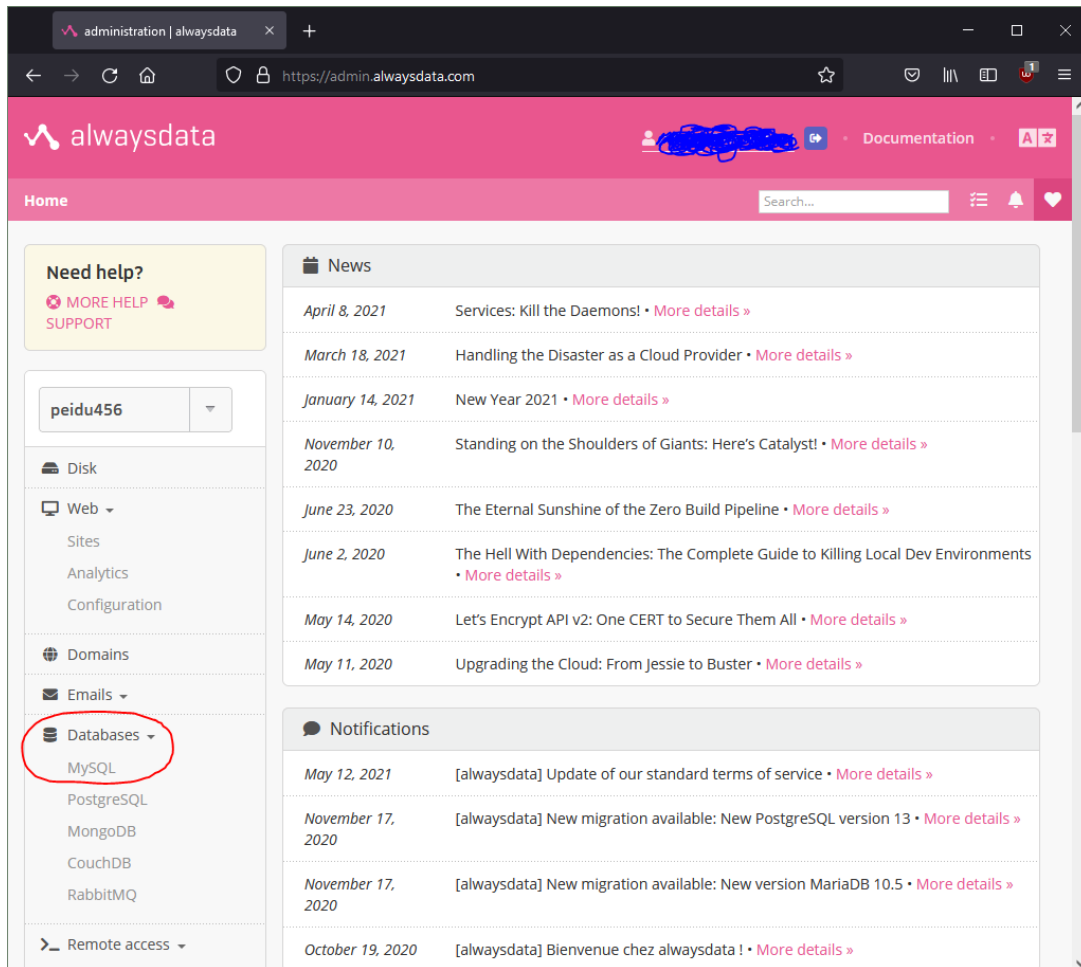
```

Skripti sisältää relaatiotietokannan osoitteen, tietokannan käyttäjän tiedot sekä hyväksytyjen API Key -arvojen listan. Vastaanotetusta tavujonosta tarkistetaan api\_key ja skriptissä olevan API\_key arvojen identtisyys. Jos arvot ei täsmää, ohjelma lopetetaan. Arvojen ollessa samat, saapuva hyötykuorma jaetaan erillisiin muuttujiin. API Key:n käytöstä löytyy lisätietoa Google Cloud dokumentaatiosta (Google, n.a).

Tämän jälkeen tarkistetaan yhteys relaatiotietokantaan. Jos yhteys toimii, syötetään data *\$sql* = "INSERT INTO" -komennolla haluttuun kohdetauluun ja lokeroihin. Prosessin onnistumisesta palautetaan viesti PHP-skriptille.

## Liite 4: Tietokantataulun luominen MySQL-relaatiotietokantaan Alwaysdata-palvelussa

Alwaysdata-palvelussa on serveripuolelle asennettu projektin kannalta kaikki tarvittava. Kun palveluun on tehty käyttäjätili ja päästy kirjautumaan osoitteeseen: [admin.alwaysdata.com](https://admin.alwaysdata.com) voidaan aloittaa tietokannan taulun lisääminen.



Tietokannamäärittelyyn liittyvät tiedot löytyvät vasemmasta palkista. Leimauskammiossa on käytetty MySQL-relaatiotietokantaa.

## USER

### Details

Nom\*

? The name must start with [REDACTED]

Password\*

### Options

SSL connection required

Authorized IP address.

? IP address authorized to connect with this user. Example: 192.0.2.38, 2001:DB8::1.

### Permissions

[REDACTED] testi\*

all rights  read only  no rights

[REDACTED]

all rights  read only  no rights

Tietokantaan tulee määrittää käyttäjät. Käyttäjämäärittäminen voi tehdä MySQL-valikon kautta löytyvästä USERS-välilehdestä. Käyttäjämäärittämisessä valitaan myös mitä tietokannan datatauluja oikeudet koskevat.

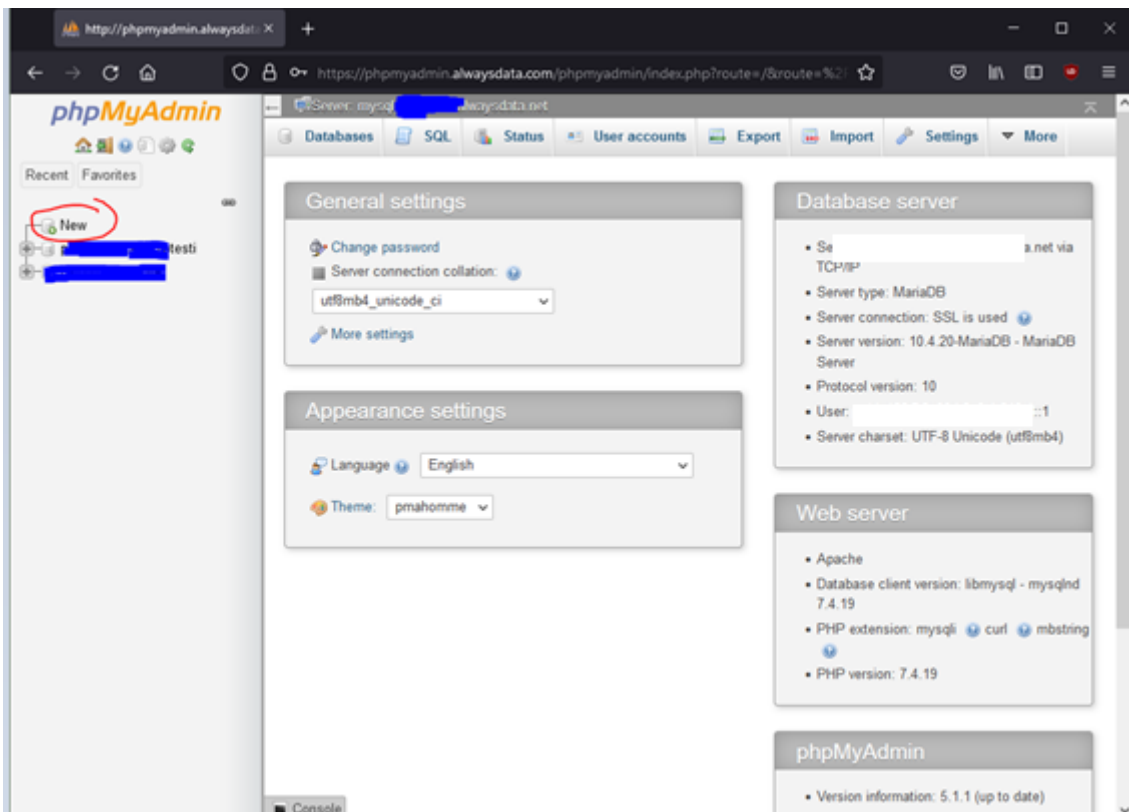
Projektissa on käytetty seuraavia käyttäjätyppejä:

- **Pääkäyttäjä** Oma kaikki oikeudet tietokannan ylläpitoon.
- **Tallentaja** omaa oikeudet tallentaa vain yhteen ennalta määritellyyn tauluun.
- **Lukija** omaa oikeuden lukea tietoja ennalta määritellystä taulusta.

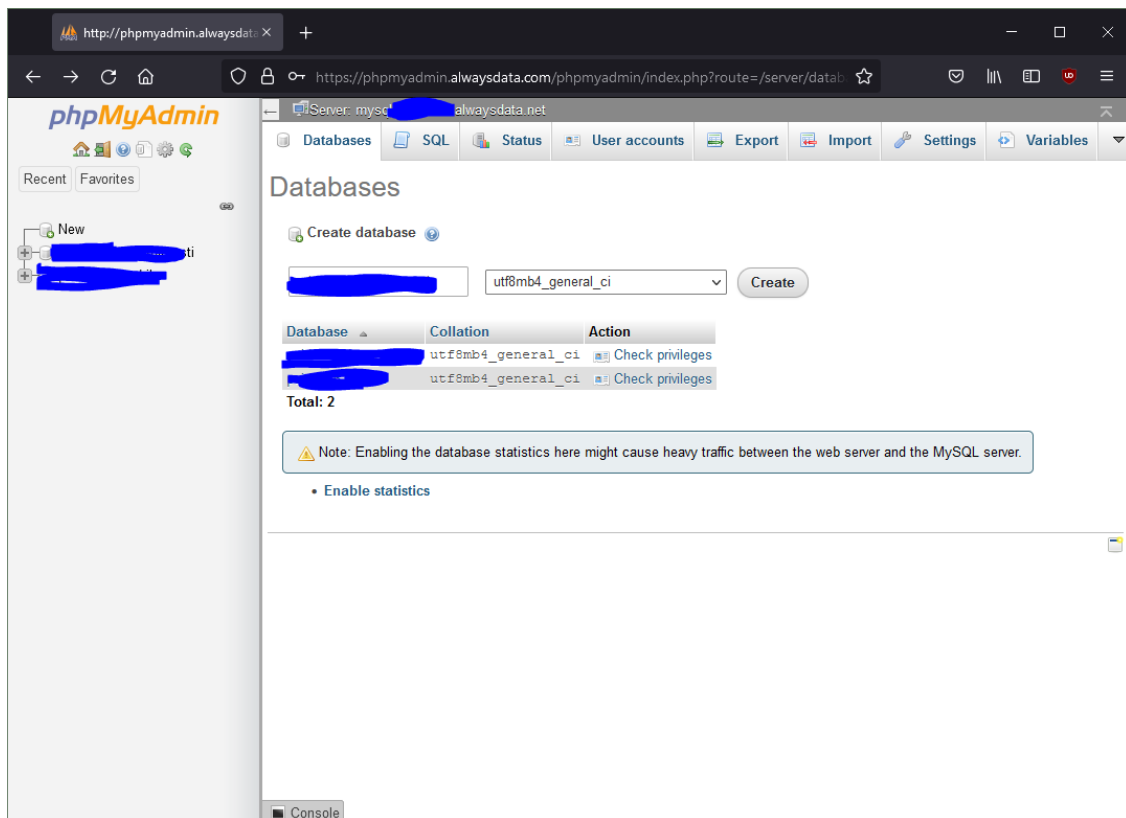


MySQL-Sivulta löytyy myös oman tietokannan osoite mikä on muotoa mysql-käyttäjä\_nimi.alwaysdata.net ja sen kautta pääsee kirjautumaan tietokantaan edellisessä vaiheessa tehdyllä käyttäjällä.

Leimauskammion relaatiotietokannan versio on 10.4.20-MaridaDB. Webserverinä toimii Apache ja tietokannan asiakasversio on libmysql – mysqlnd 7.4.19. PHP versio on 7.4.19.



Tiekantaan lisätään uusi taulu. Se onnistuu sivun vasemmasta valikosta NEW-näppäimestä. Alle tulee näkyviin jo luodut taulut, jos niitä on olemassa.



Luotavalle tietokannalle annetaan nimi. Tietokantaa luotaessa määritellään myös tekstiin liittyvät määrittymiset. Tässä tapauksessa `utf8mb4_general_ci`.

Taulun luominen haluttuun tietokantaan onnistuu tietokannan SQL-välilehdestä. Sivun komentoriville on mahdollista syöttää SQL-komentoja. Uuden taulun luominen onnistuu alla olevan kuvan esimerkkiä noudattaen.

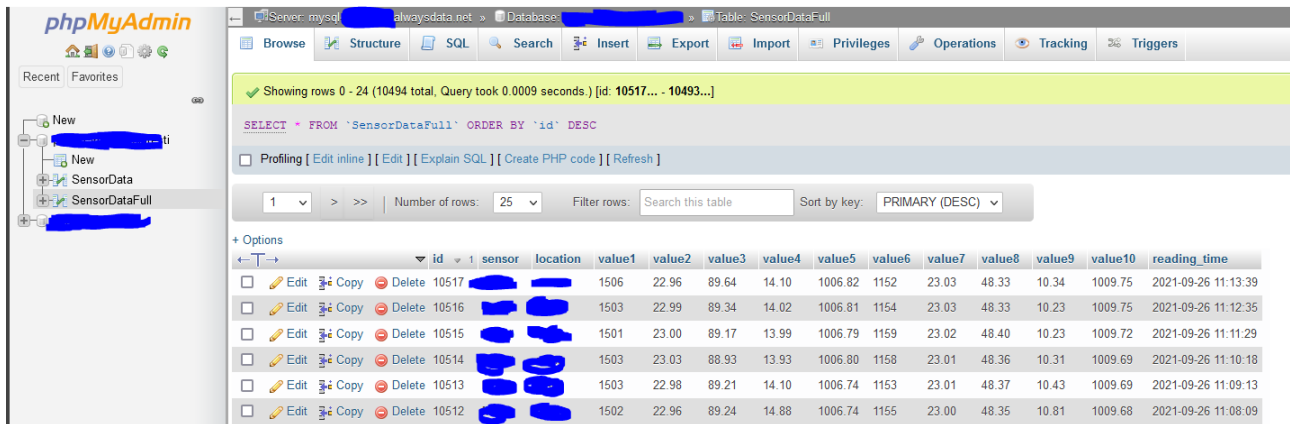
```

1 CREATE TABLE SensorData
2     id INT(6) UNSIGNED AUTO_INCREMENT PRIMARY KEY,
3     sensor VARCHAR(30) NOT NULL,
4     location VARCHAR(30) NOT NULL,
5     value1 VARCHAR(10),
6     value2 VARCHAR(10),
7     value3 VARCHAR(10),
8     reading_time TIMESTAMP DEFAULT CURRENT_TIMESTAMP ON UPDATE CURRENT_TIMESTAMP
9

```

Taululle määritetään nimi (kuvassa `SensorData`) ja tauluun lisättävät sarakkeet sekä niiden ominaisuudet. ID sarakkeelle on määritelty `AUTO_INCREMENT`, eli automaattisesti arvoa lisäävä ominaisuus sekä `PRIMARY KEY` -määrittely. Aina kun tietokantaan tallennetaan viesti, ID-arvo kasvaa

yhdeällä. Sensor ja Location kohdat kuvaavat laitteen nimi ja sijaintitietoja. Value1 – value3 kuvaavat kolmen sensorin datasaraketta. Reading\_time sarakkeeseen tallennetaan aikaleima. Sarakkeiden määrää, nimiä, datamuotoa ja maksimipituutta voidaan muokata tarpeen mukaan.



Showing rows 0 - 24 (10494 total, Query took 0.0009 seconds.) [id: 10517... - 10493...]

```
SELECT * FROM `SensorDataFull` ORDER BY `id` DESC
```

Profiling [ Edit inline ] [ Edit ] [ Explain SQL ] [ Create PHP code ] [ Refresh ]

Number of rows: 25 Filter rows: Search this table Sort by key: PRIMARY (DESC)

	id	sensor	location	value1	value2	value3	value4	value5	value6	value7	value8	value9	value10	reading_time
<input type="checkbox"/>	10517			1506	22.96	89.64	14.10	1006.82	1152	23.03	48.33	10.34	1009.75	2021-09-26 11:13:39
<input type="checkbox"/>	10516			1503	22.99	89.34	14.02	1006.81	1154	23.03	48.33	10.23	1009.75	2021-09-26 11:12:35
<input type="checkbox"/>	10515			1501	23.00	89.17	13.99	1006.79	1159	23.02	48.40	10.23	1009.72	2021-09-26 11:11:29
<input type="checkbox"/>	10514			1503	23.03	88.93	13.93	1006.80	1158	23.01	48.36	10.31	1009.69	2021-09-26 11:10:18
<input type="checkbox"/>	10513			1503	22.98	89.21	14.10	1006.74	1153	23.01	48.37	10.43	1009.69	2021-09-26 11:09:13
<input type="checkbox"/>	10512			1502	22.96	89.24	14.88	1006.74	1155	23.00	48.35	10.81	1009.68	2021-09-26 11:08:09

## Liite 5: Käyttöliittymä

Käyttöliittymä toteutettiin HTML-sivuna. Ohjelmoinnissa hyödynnettiin Visual Studio Code -ohjelmointiympäristöä.

```

1 <?php
2 $connect = mysqli_connect("mysql[REDACTED]alwaysdata.net", "[REDACTED]reader", "[REDACTED]", "[REDACTED]testi");
3 $query = "SELECT * FROM SensorDataFull ORDER BY id desc";
4 $result = mysqli_query($connect, $query);
5 ?>

```

Sivun alussa otetaan yhteys tietokantaan. Tietokannan ja käyttäjähallinta selitetään liitteessä 4. Yhdistäminen ja kysely suoritetaan sivun käyttäjältä piilossa PHP-ohjelmointikielen avulla.

```

6 <!DOCTYPE html>
7 <html>
8   <head>
9     <title>Kammiodata</title>
10    <script src="https://ajax.googleapis.com/ajax/libs/jquery/3.1.0/jquery.min.js"></script>
11    <link rel="stylesheet" href="https://maxcdn.bootstrapcdn.com/bootstrap/3.3.6/css/bootstrap.min.css" />
12    <script src="https://maxcdn.bootstrapcdn.com/bootstrap/3.3.7/js/bootstrap.min.js"></script>
13  </head>

```

Toisessa osiossa määritetään tiedoston tyyppi. Head-osiossa sivulle lisätään sivun muotoiluun liittyvät jquery sekä bootstrap.

```

6 <!DOCTYPE html>
7 <html>
8 >   <head> ...
13   </head>
14   <body>
15     <br /><br />
16     <div class="container" style="width:900px;">
17       <h2 align="center">Kammiodata</h2>
18       <h3 align="center">versio 0.2</h3>
19       <div>
20         <br />
21         <form method="post" action="export.php" align="center">
22           <input type="submit" name="export" value="CSV Export" class="btn btn-success" />
23         </form>
24         <form method="post" action="http://[REDACTED]alwaysdata.net/[REDACTED]testi.html" align="center">
25           <input type="submit" name="Kammiotesti #1" value="Kammiotesti1" class="btn btn-secondary" />
26         </form>
27         <form method="post" action="http://[REDACTED]alwaysdata.net/[REDACTED]testi2.html" align="center">
28           <input type="submit" name="Kammiotesti #2" value="Kammiotesti2" class="btn btn-secondary" />
29         </form>
30         <form method="post" action="http://[REDACTED]alwaysdata.net/[REDACTED]testi3.html" align="center">
31           <input type="submit" name="Kammiotesti #3" value="Kammiotesti3" class="btn btn-secondary" />
32         </form>
33       <br />
34     </div>
35 >   <div class="table-responsive" id="SensorDataFull"> ...
79   </div>
80 </div>
81 </body>
82 </html>

```

Sivun yläosassa kerrotaan käyttöliittymän nimi ja versio. Version alle on sijoitettu Export-näppäin, joka mahdollistaa tietokannan taulun lataamisen kokonaisuudessaan CVS-tiedostona käyttäjän tietokoneelle. Linkki on yhteydessä Export.php -skriptiin. (Liite 6)

Tämän jälkeen vuorossa on 3 linkkiä esitestausvaiheen testeihin 1–3. Testeistä ei tehty esitestausvaiheen testien 1–3 jälkeen enempää verkkosivuja liian työlään prosessin vuoksi suhteessa niiden tuomaan hyötyyn nähden.

```

33     <br />
34 </div>
35 <div class="table-responsive" id="SensorDataFull">
36     <table class="table table-bordered table-striped">
37         <thead>
38             <tr>
39                 <th width="5%">ID</th>
40                 <th width="10%">Co2 Kammio</th>
41                 <th width="8%">Temp Kammio</th>
42                 <th width="8%">Hum Kammio</th>
43                 <th width="8%">Lux Kammio</th>
44                 <th width="8%">Pressure Kammio</th>
45                 <th width="10%">Co2 Piha</th>
46                 <th width="8%">Temp Piha</th>
47                 <th width="8%">Hum Piha</th>
48                 <th width="8%">Lux Piha</th>
49                 <th width="8%">Pressure Piha</th>
50                 <th width="11%">Datetime</th>
51             </tr>
52         </thead>
53         <?php
54         while($row = mysqli_fetch_array($result))
55         {
56             <?
57         >
58             <tr>
59                 <td><?php echo $row["id"]; ?></td>
60                 <td ><?php echo $row["value1"]; ?></td>
61                 <td ><?php echo $row["value2"]; ?></td>
62                 <td><?php echo $row["value3"]; ?></td>
63                 <td><?php echo $row["value4"]; ?></td>
64                 <td><?php echo $row["value5"]; ?></td>
65                 <td ><?php echo $row["value6"]; ?></td>
66                 <td><?php echo $row["value7"]; ?></td>
67                 <td><?php echo $row["value8"]; ?></td>
68                 <td><?php echo $row["value9"]; ?></td>
69                 <td><?php echo $row["value10"]; ?></td>
70                 <?php $row_reading_time = $row["reading_time"];
71                 $row_reading_time = date("Y-m-d H:i:s", strtotime("$row_reading_time + 1 hours")); ?>
72                 <td><?php echo $row_reading_time?></td>
73             </tr>
74         <?php
75         }
76         <?
77         >
78     </table>
79 </div>
80 </div>
81 </body>
82 </html>

```

Lopuksi sensoriarvoille rakennetaan taulukko. Lokeroille annetaan otsikot, muotoillaan teksti ja muokataan lokeron koko tarpeisiin sopivaksi. Taulukko on myös määritelty skaalautumaan käyttäjän näyttöresoluution mukaan.

Taulukon luonnin jälkeen lokeroihin haetaan tietokannasta lokeroa vastaava data PHP-kyselyllä. Kuvan esimerkissä `reading_time`, eli tietokannan aikaleimaan lisätään yksi tunti, jotta käyttöliittymään luettu data on ajassa GMT+2.

## Liite 6: CSV Export -skriptin luominen HTML-käyttöliittymään

Käyttöliittymän kautta tapahtuva tietokannan taulun tietojen tallennus CSV-tekstitiedostoon tehtiin PHP-skriptin avulla.

```

1 <?php
2 if(isset($_POST["export"]))
3 {
4 $connect = mysqli_connect("mysql://[redacted]@alwaysdata.net", [redacted], [redacted], [redacted]);
5 header('Content-Type: text/csv; charset=utf-8');
6 header('Content-Disposition: attachment; filename=data.csv');
7 $output = fopen("php://output", "w");
8 fputcsv($output, array('ID', 'sensor', 'location', 'value1', 'value2', 'value3', 'value4', 'value5', 'value6', 'value7', 'value8', 'value9', 'value10', 'reading_time'));
9 $query = "SELECT * from SensorDataFull ORDER BY id DESC";
10 $result = mysqli_query($connect, $query);
11 while($row = mysqli_fetch_assoc($result))
12 {
13     fputcsv($output, $row);
14 }
15 fclose($output);
16 }
17 ?>

```

CSV tiedostoon liittyvät määrytykset tapahtuvat riveillä 5–8. Tiedostolle määritetään tyyppi sekä nimeämiskäytäntö. Tiedoston ensimmäinen rivi toimii otsikkorivinä ja esimerkkitapauksessa siihen tulostetaan 'ID', 'sensor', 'location', 'value1', 'value2', 'value3', 'value4', 'value5', 'value6', 'value7', 'value8', 'value9', 'value10', 'reading\_time'. Muoto mahdollistaa datan erottelun omille sarakkeilleen esimerkiksi Excel-  
taulukkolaskentaohjelman avulla.

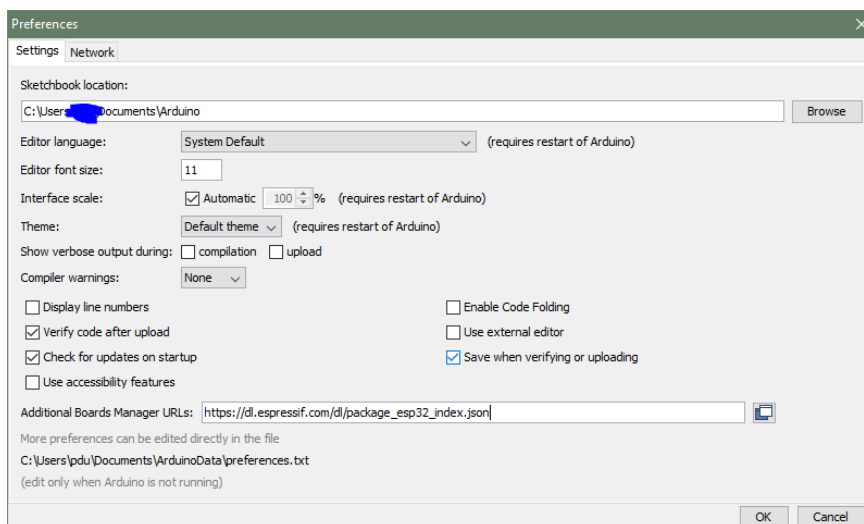
Tietokantaan muodostetaan yhteys komennolla: `$connect = mysqli_connect("mysql-käyttäjän_nimi.alwaysdata.net", "Tietokannan_käyttäjä_nimi", "Salasana", "Tietokannan_nimi");`

Kyselyssä haetaan kaikki tiedot `$query = "SELECT * from SensorDataFull ORDER BY id DESC";` komennolla taulusta SensorDataFull suurimmasta ID-arvosta pienimpään. Skriptin lopussa yhteys tietokantaan katkaistaan ja CSV-tiedosto suljetaan.

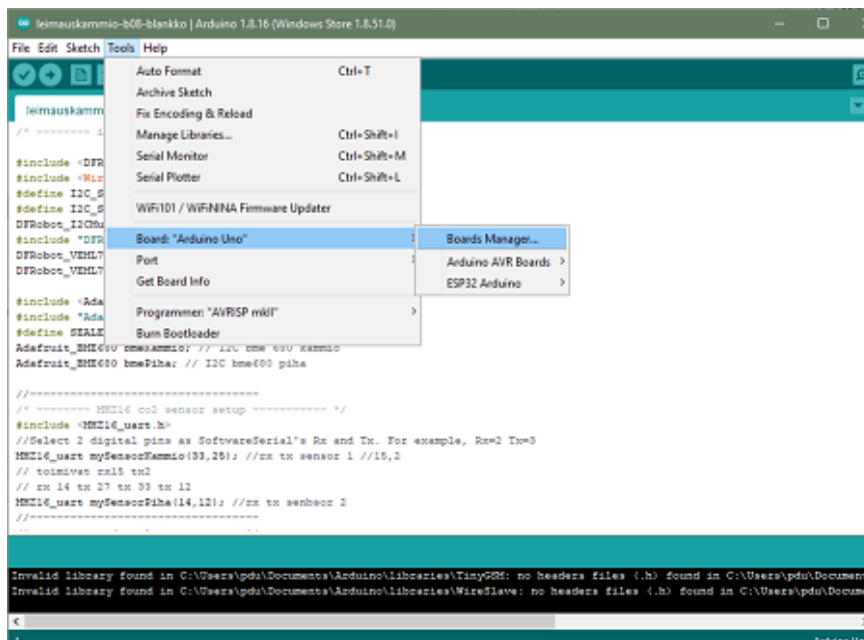
## Liite 7: Laiteohjelman lähettäminen Lily TTGO Sim800I -mikro-ohjaimen

Käytettäessä Arduino IDE -tekstieditoria ESP32-siruun pohjautuvaan mikro-ohjaimen ohjelmoinnissa, tarvitsee käyttäjän lisätä ohjelman Preferences-valikkoon url:

[https://dl.espressif.com/dl/package\\_esp32\\_index.json](https://dl.espressif.com/dl/package_esp32_index.json)

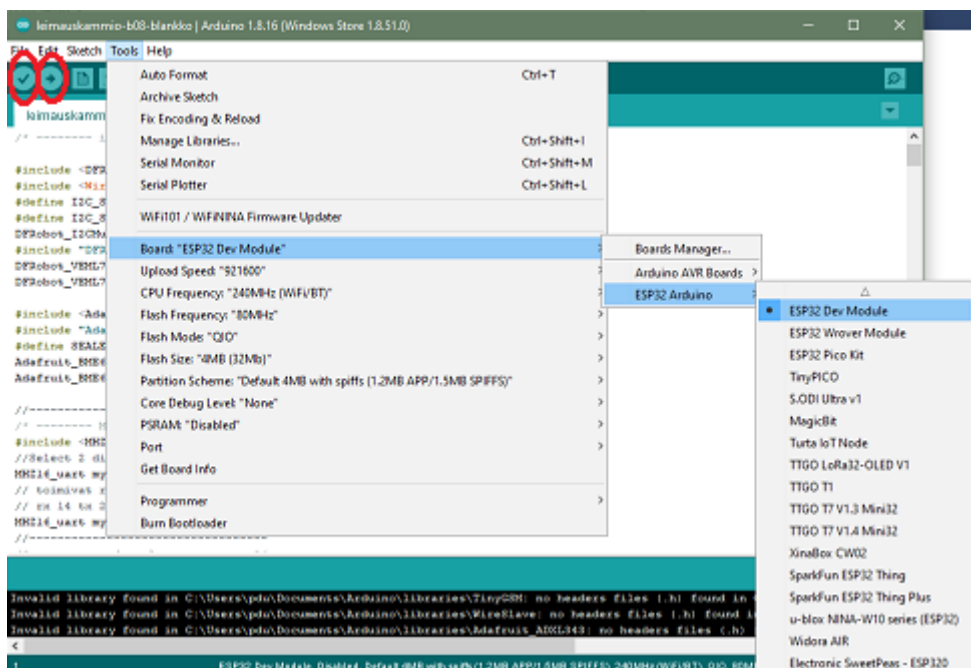


Seuraavaksi mennään valikkoon Tools / Boards / Boards Manager, joka lataa automaattisesti tuen ESP32 mikro-ohjaimille.





Boards Manager -päivityksen jälkeen Board -valikosta löytyy ESP32 Arduino -valikko, joka pitää sisällään laajan tuen erilaisille ESP32-mikro-ohjaimille. Lily TTGO Sim800I -kortille ei ole listassa omaa valmista profiilia, mutta ohjelmointi onnistuu ESP32 Dev Module -profiilin avulla. Kortin asetusvalikosta tulee valita myös oikea portti. Jos porttia ei näy ja laite on kytkettynä koneeseen, tarkista USB-ajureiden yhteensopivuus.



Tekstieditoriin kirjoitetun laiteohjelman kasaus (compile) ja laitteeseen lähetyk (upload) onnistuu kuvaan punaisella merkatuilla näppäimillä.

**Liite 8: Hiilidioksidisensorin suojaaminen auringolta**

Kuvassa hiilidioksidisensoreiden suojakoteloiden päälle on lisätty alumiinifoliosta tehty säteily suoja sekä myöhemmässä kehitysvaiheessa valoisuussensoreille suunnitellut kupolimaiset valonsuodattimet.



## Liite 9: Pulssileimauskammion käyttöohjeet ja käyttöönottestauksen leimaustaulukko

Ohjeista on poistettu suora linkki käyttöliittymään.

07.07.2021 | Petri Niemi

# Pulssileimauskammio

## Käyttöohje:

1. Aseta leimauskammio tukevasti pöydälle tai muulle jalustalla niin että jäähditysjärjestelmän vesikanisterille on tilaa kammion alapuolella.
2. Täytä vesitiiviste vedellä. ~2dl
3. Täytä vesikanisteri kylmällä vedellä ja asettele se kammion alapuolelle. *Jäähditys järjestelmän tehokkuus perustuu nesteen lämpötilaan ja veden kiertoon putkistossa. Jäiden käyttö veden viilennyksessä mahdollista.*
4. Asettele pumppu vesikanisterin pohjalle ja veden paluuletku niin, että se valuttaa kierrosta palautuvan veden kanisterin pinnalle.
5. Varmista että kytkimet co2 ja fan ovat OFF / ala-asennossa.
6. Kytke virtajohto 1 jatkojohtoon ja odota n. 1min! *Johdossa merkattu pistokkeille omat puolet. virtalähde 1 hoitaa co2 sensoreiden, vesipumpun ja kammion tuulettimen virransaannista.*
7. Kytke virtajohto 2 jatkojohtoon. *Virtalähde 2 on laitteen mikro-ohjaimelle. Laitte käynnistyy ja aloittaa datan lähetyksen pilveen. Mittaus sykli n.55-60 s riippuen 2 g verkon saatavuudesta. Punainen -i led syttyy indikaatioksi laitteen toiminnasta.*
8. Kytke FAN ja PUMP kytkimet ON / yläasentoon. *Pumppu aloittaa toimintansa, jos kammion lämpömittarin saamat arvot ylittävät raja-arvon 25.*
9. Varmista että mitattu data on luettavissa käyttöliittymästä! Pääset käyttöliittymään linkillä tai QR-koodilla.



10. Ennen leimauksen aloittamista odota 5 mittaus sykliä / 5 minuuttia. *Co2 sensoreiden tarkkuus paranee sensorin lämmitessä. Odotettu ympäristön co2 arvo on 350-450 ppm, sensoreiden tarkkuus on +-50ppm ja resoluutio 1ppm.*

## Leimaus

1. Aseta kasvi kammion pohjalle.
2. Laske akrylikupu vesitiivisteeseen niin että hiilidioksidin syöttöventtiilin sisäpuoli on suoraan tuulettimen yläpuolella.
3. Syötä hiilidioksidi leimauskammioon injektioruiskulla syöttöventtiilin läpi.
4. Merkkää Leimaustaulukkoon (paperinen taulukko) aika, määrä sekä kaasu.
5. Seuraa Co2 arvon muutosta käyttöliittymästä, kunnes saavutettu raja-arvo saavutetaan. Co2-led indikoi co2 tasoa kammiossa. Punainen arvo > 100ppm, vihreä alle 100ppm.

07.07.2021 | Petri Niemi

Keltainen tarkoittaa virhettä sensorin lukemissa ja näkyy käyttöliittymässä arvona -1 (lukuvirhe) tai -2 (lukuvirhe - isWarming). **HUOM testattu 12-co2!**

6. Leimauksia voidaan suorittaa useita peräkkäin.

### Leimauksen lopetus

1. Kytke FAN ja PUMP kytkimet OFF / ala-asentoon.
2. Irrota pistokkeet 1 ja 2.
3. Nosta akryylikupu varovasti.
4. Siirrä kasvi kammion ja kaada vesitiivistä tyhjäksi.
5. Nosta pumppu, pistokkeet ja letku kammion päälle laitteen siirtämistä varten.

*Jäähdytysputkistoon jää aina hieman vettä! huomioi pistokkeiden kuivaus ennen uuden mittauksen aloittamista.*



1. Akryylikupu
2. Jalusta sekä Hallintapaneeli:  
FAN ja PUMP kytkimet, io ja co2 indikaatioledit.
3. Sensoritelineet: Kammio ja piha
4. Vesitiiviste
5. Jäähdytysputkisto
6. Jäähdytyskanisteri sekä pumppu
7. Virtajohdot: 1 ja 2
8. Co2 syöttöventtiili

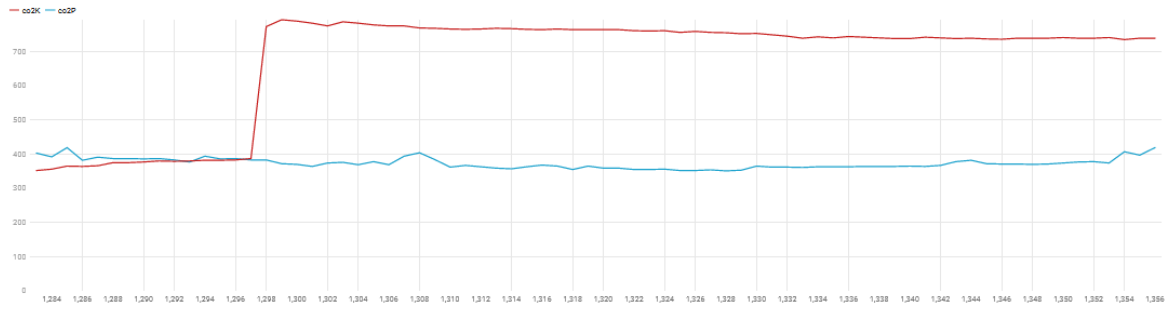
Leimauspäivä	päivää nitosta	leimaus kerrat	leimaus koko ml	kumul.tavoite /ml	kumul-toteut	toteutunut m	Tavoite	todellinen tavoite
12.7.2021	3	3	60	180	193	193	-13	180
14.7.2021	5	4	60	420	419	226	-1	227
16.7.2021	7	6	60	780	776	357	-4	361
19.7.2021	10	6	60	1140	1134	358	-6	364
21.7.2021	12	5	60	1440	1436	302	-4	306
23.7.2021	14	3	60	1620	1620	184	0	184
26.7.2021	17	3	60	1800	1797	177	-3	180
28.7.2021	19	2	43,5	1887	1887	90	0	90
Toteutuneet:	Aloitusaika:	Lopetus aika:	Kaasu:	Määrä 13co2:	Määrä 12co2:	Leimaaja:	Huom!	
12.7.2021								
	9.45.16	12.10.22	13-co2	50		PN		
	12.10.22	14.03.47	13-co2	81		PN		
	14.03.47	16.45.38	13-co2	62		PN		
14.7.2021								
	10.40.51	11.17.31	13-co2	50		PN		
	11.17.31	11.52.50	13-co2	76		PN		
	12.15.15	12.46.00	13-co2	56		PN		
	12.46.00	13.08.00	13-co2	44		PN		
	13.14.00	13.30.00	12-co2		30	PN		
16.7.2021								
	10.28.23	10.52.11	13-co2	58		PN		
	10.52.11	11.14.23	13-co2	62		PN		
	11.14.23	11.39.15	13-co2	62		PN		
	11.55.41	12.14.19	13-co2	56		PN		
	12.14.19	12.30.38	13-co2	54		PN		
	12.30.38	12.53.11	13-co2	65		PN		
	12.53.11	13.11.07	12-co2		30	PN		
19.7.2021								
	10.29.17	10.49.37	13-co2	59		PN		
	10.49.37	11.17.15	13-co2	61		PN		
	11.18.56	11.43.11	13-co2	58		PN		
	12.11.28	12.21.36	13-co2	57		PN		
	12.27.32	12.40.17	13-co2	60		PN		
	12.40.17	12.57.20	13-co2	63		PN		
	12.59.52	13.11.53	12-co2		30	PN		
21.7.2021								
	10.36.16	10.56.13	13-co2	55		PN		
	11.04.47	11.18.55	13-co2	60		PN		
	11.19.46	11.33.30	13-co2	55		PN		
	11.35.15	11.49.01	13-co2	58		PN		
	11.52.30	12.08.45	13-co2	74		PN		
	12.10.29	12.20.05	12-co2		30	PN		
23.7.2021								
	10.59.54	11.14.23	13-co2	57		PN		
	11.14.23	11.33.52	13-co2	63		PN		
	11.35.43	11.53.38	13-co2	64		PN		
	11.53.38	12.06.19	12-co2		30	PN		
26.7.2021								
	10.41.39	11.03.04	13-co2	60		PN		
	11.03.04	11.25.44	13-co2	57		PN		
	11.25.44	11.46.07	13-co2	60		PN		
	11.46.58	12.04.03	13-co2		30	PN		
28.7.2021								
	10.38.45	13.11.25	13-co2	56		PN		
	13.11.25	14.19.52	13-co2	34		PN		kamion bme680 kukuongelmia viimeisessä *30 lukukerrassa.

## Liite 10: Pulssileimauskammion esitestaus vaiheet 2 ja 3

### Leimauskammio testaus #2

#### Co2 mittaus #2 (PPM)

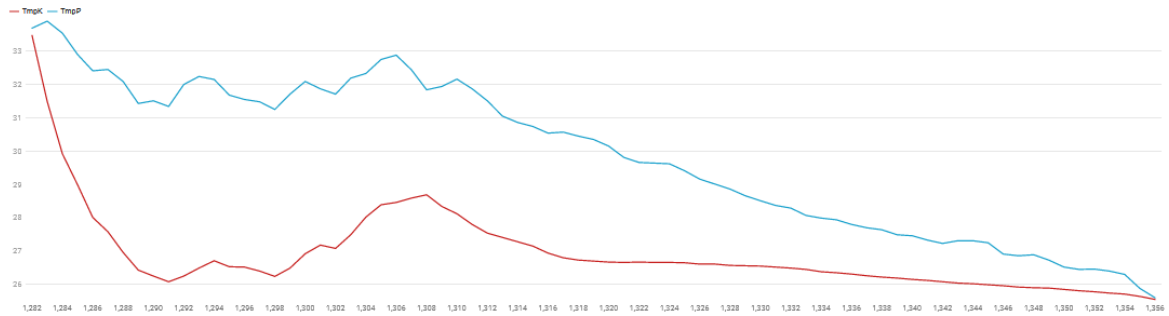
co2K = hiilidioksidin määrä kammiossa, co2U = hiilidioksidin määrä ulkona.



ID 1298 (Kio: 18.85) Kammioon lähtetty siirtoväkehiilidioksidia injektorisuikulla 20ml/min kammion kylläisä olovaate läpivienttilästä. Testiajankohta 22.06.21 klo 17.54-22.51. Mittausväli n.4min.  
 Chart: Patti Niemi - Source: Patti Niemi Labeling Chamber HamriBio - Get the data - Created with Datawrapper

#### Lämpötilamittaus #2 (C)

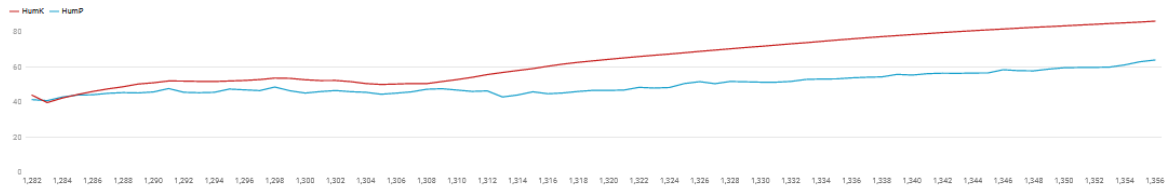
TmpK = kammion sisälämpötila, TmpP = kammion ulkolämpötila



Kammion jäähdytyshätsänä henäylinä, sekä 4 kpl 0.5litran jääpulloa. Nestettä pumpattiin alumiinilametaan läpi koko mittausajan ajan. Testiajankohta 22.06.21 klo 17.54-22.51. Mittausväli n.4min.  
 Chart: Patti Niemi - Source: Patti Niemi Labeling Chamber HamriBio - Get the data - Created with Datawrapper

#### Ilmankosteusmittaus #2 (%)

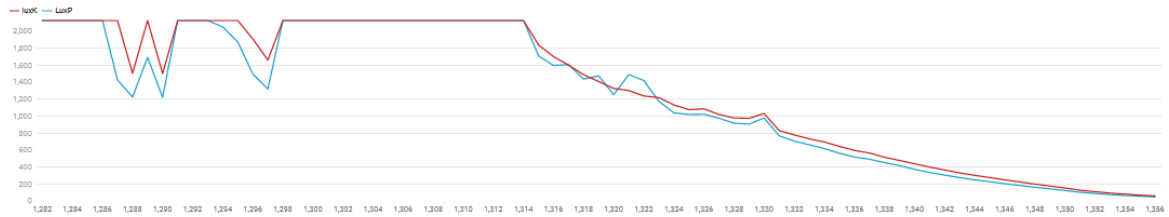
HumK = kammion ilmankosteus, HumP = ulkoilmankosteus



Testiajankohta 22.06.21 klo 17.54-22.51. Mittausväli n.4min.  
 Chart: Patti Niemi - Source: Patti Niemi Labeling Chamber HamriBio - Get the data - Created with Datawrapper

#### Valoisuusmittaus #2 (Lux)

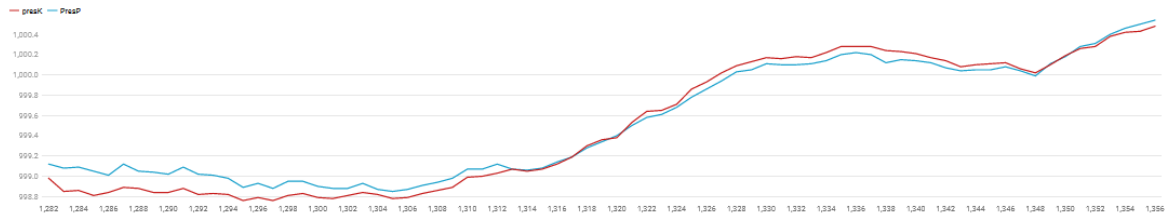
LuxK = kammion valoisuus, LuxP = ulkovaloisuus



2126.82 on sensoreiden mittaama maksimiarvo mittaushetken asetuksilla ja tarkoitte mittaushetkellä suoraan aurinkopaneelista sensoreihin. Testiajankohta 22.06.21 klo 17.54-22.51. Mittausväli n.4min.  
 Chart: Patti Niemi - Source: Patti Niemi Labeling Chamber HamriBio - Get the data - Created with Datawrapper

#### Ilmanpainemittaus #2 (hPa)

PresK = kammion ilmanpaine, PresP = ilmanpaine ulkona.

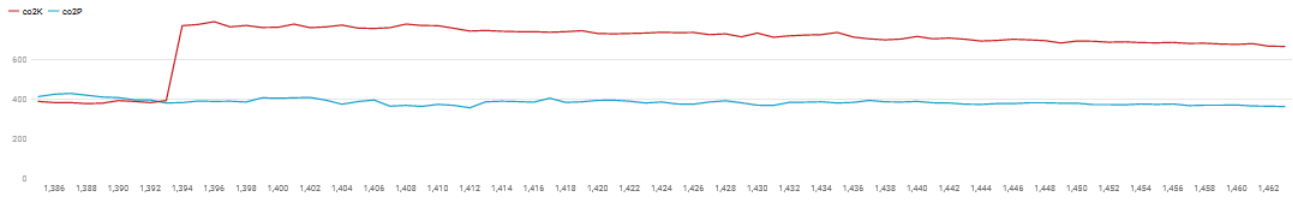


Testiajankohta 22.06.21 klo 17.54-22.51. Mittausväli n.4min.  
 Chart: Patti Niemi - Source: Patti Niemi Labeling Chamber HamriBio - Get the data - Created with Datawrapper

### Leimaukammio testaus #3

#### Co2 mittaus #3 (PPM)

co2K = hiilidioksidin määrä kammiossa, co2P = hiilidioksidin määrä ulkona.

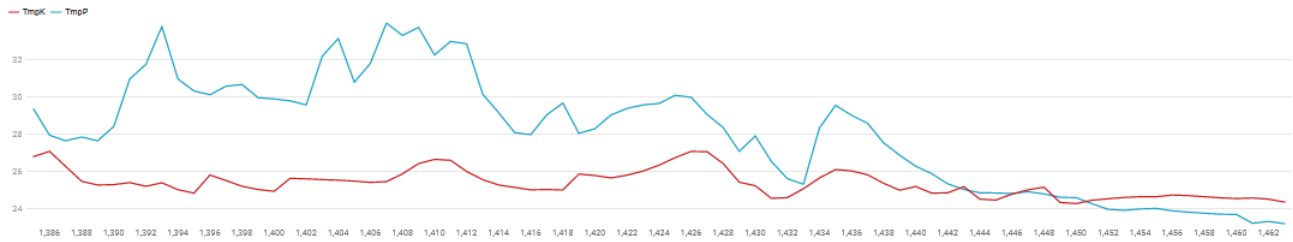


ID 1394 (kio: 16.54) Kammioon lisätty sisältörikkehiilidioksidia injektorisuikula 20ml/litraa kammion kyljessä olevasta läpivienttihuksasta. Testiajankohta 27.06.21 klo 16.17-21.11. Mittausväli n.4min.

Chart: Petri Niemi - Source: Petri Niemi Labeling Chamber HamBio - Get the data - Created with Datawrapper

#### Lämpötilamittaus #3 (C)

TmpK = kammion sisälämpötila, TmpP = kammion ulkolämpötila

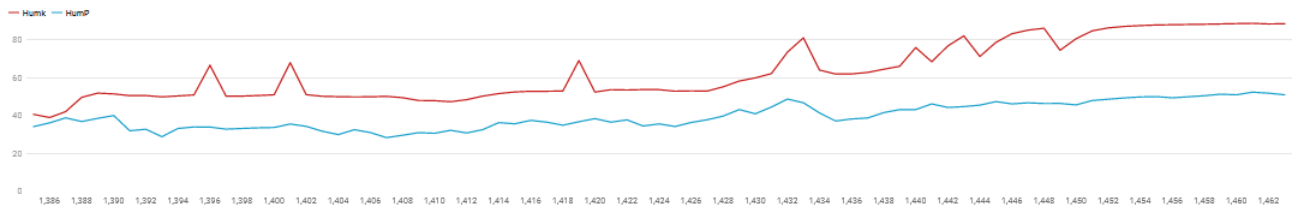


Kammion lämpötilasensori näytettiin nollaksi, sekä 4 kpl 0.5litran lämpötila. Lämpötilasensorin asennettiin pöytäin kammion sisälämpötila 25-asteeseen. Testiajankohta 27.06.21 klo 16.17-21.11. Mittausväli n.4min.

Chart: Petri Niemi - Source: Petri Niemi Labeling Chamber HamBio - Get the data - Created with Datawrapper

#### Ilmankosteusmittaus #3 (%)

HumK = kammion ilmankosteus, HumP = ulkoilmankosteus

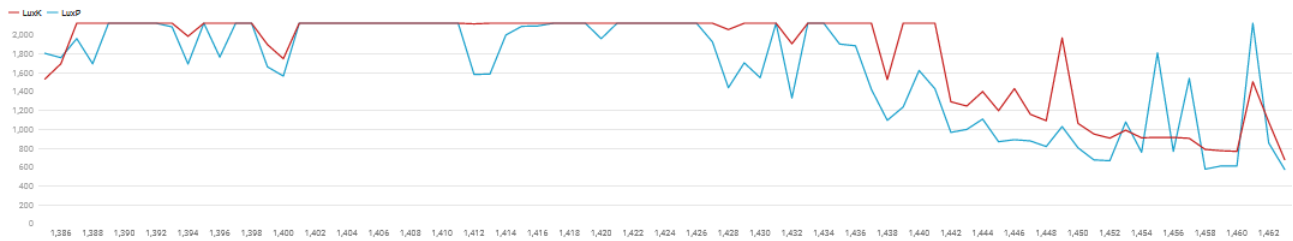


Testiajankohta 27.06.21 klo 16.17-21.11. Mittausväli n.4min.

Chart: Petri Niemi - Source: Petri Niemi Labeling Chamber HamBio - Get the data - Created with Datawrapper

#### Valoisuusmittaus #3 (Lux)

LuxK = kammion valoisuus, LuxP = ulkovaloisuus

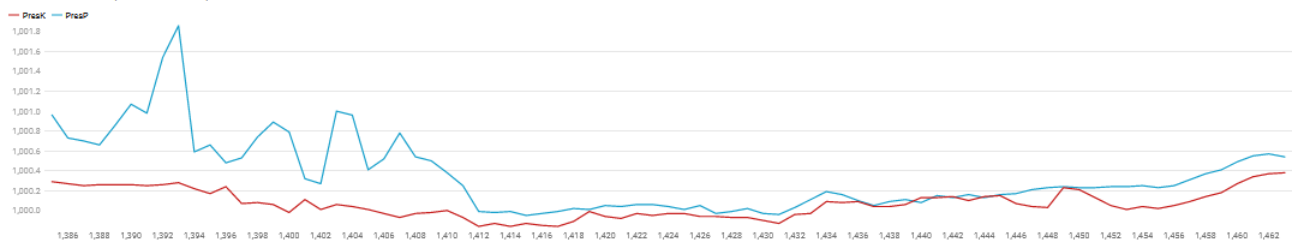


2126.52 on sensorin mittaama valoasteen mittauskameran asetuksilla ja tarkoitettua mittauskameran suoraan aurinkopaneelista sensorin. Testiajankohta 27.06.21 klo 16.17-21.11. Mittausväli n.4min.

Chart: Petri Niemi - Source: Petri Niemi Labeling Chamber HamBio - Get the data - Created with Datawrapper

#### Ilmanpainemittaus #3 (hPa)

PresK = kammion ilmanpaine, PresP = Ilmanpaine ulkona.



Testiajankohta 27.06.21 klo 16.17-21.11. Mittausväli n.4min.