



Energiaomavaraisen Bluetooth-kävijälaskennan toteutus ulkokäyttöön

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Sähkötekniikan diplomityö

2023

Petri Tuominen

Tarkastaja(t): Apulaisprofessori Niko Nevaranta

TkT Tuomo Lindh

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Energiajärjestelmät

Sähkötekniikka

Petri Tuominen

Energiaomavaraisen Bluetooth-kävijälaskennan toteutus ulkokäyttöön

Sähkötekniikan diplomityö

2023

75 sivua, 37 kuvaa ja 3 taulukkoa

Tarkastaja(t): Apulaisprofessori Niko Nevaranta ja TkT Tuomo Lindh

Avainsanat: Bluetooth, IoT, kävijälaskenta

Tässä diplomityössä suunnitellaan energiaomavarainen Bluetooth-kävijälaskentatoteutus ulkokäyttöön. Diplomityössä keskitytään esittelemään järjestelmän toteutus mittauslaitteen, tietoliikenteen sekä IoT-järjestelmän osalta. Mittauslaitteen mikrokontrollerina toimi Espressif ESP32, joka täytti laitteelle vaaditut toiminnallisuudet. Tietoliikenneyhteys mittauslaitteen ja IoT-järjestelmän välillä toteutettiin LoRa-tekniologialla, hyödyntäen Digitaalin LoRaWAN-palvelua. Keskeinen osa diplomityötä oli tarkastella kehitetyn laitteen tuottamia tuloksia ja arvioida toteutuksen kyvykkyyttä tarjota luotettavaa mittausdataa, jonka pohjalta voitiin arvioida kävijämääriä erilaisissa mittauskohteissa. IoT-järjestelmän toiminta perustui ohjelmoituun Powershell-sovellukseen, jonka keskeinen tehtävä oli vastaanottaa, käsitellä ja tallentaa mittaustuloksia. Mittaustulosten visualisointia varten rakennettiin Grafana Labs -sovelluksen avulla graafinen raportointinäkymä, jossa kerättyä dataa pystyi tarkastella reaaliaikaisesti. Diplomityössä kehitetyn mittausjärjestelmän toimintaa validointiin kokeellisesti erilaisissa toimintaympäristöissä ja tehtyjen havaintojen pohjalta työssä käsitellään myös laajasti ongelmatilanteita sekä mahdollisia jatkokehityskohteita.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

School of Energy Systems

Electrical Engineering

Petri Tuominen

Implementation of energy self-sufficient Bluetooth visitor counting for outdoor use

Master's thesis

2023

75 pages, 37 figures and 3 tables

Examiners: Assistant Professor Niko Nevaranta and D.Sc. (Tech.) Tuomo Lindh

Keywords: Bluetooth, IoT, visitor counting

In this diploma thesis, an energy self-sufficient Bluetooth visitor counting implementation for outdoor use was designed. The diploma work focuses on presenting the implementation of the system in terms of the measuring device, data communication and the IoT system. Espressif ESP32 served as the microcontroller of the measuring device, which met the required functionalities for the device. The communication connection between the measuring device and the IoT system was implemented with LoRa technology, utilizing Digita's LoRaWAN service. The central part of the thesis was to examine the results produced by the developed device and evaluate the ability of the implementation to provide reliable measurement data, on the basis of which the number of visitors in different measurement sites could be estimated. The operation of the IoT system was based on a programmed Powershell application, the main task of which was to receive process and store measurement results. In order to visualize the measurement results, a graphical reporting view was built using the Grafana Labs application, where the collected data could be viewed in real time. The function of the measurement system developed in the diploma thesis is experimentally validated in different operating environments and based on the observations made, problem situations and possible further development targets are also extensively discussed in the thesis.

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

Muuttujat

$B_{countSum}$	Bluetooth-laitteiden ohitusmäärä mittausjakson aikana
B_{newSum}	Uusien kävijöiden yhteismäärä mittausjakson aikana
$B_{stay1st}$	Yhtäaikaisten Bluetooth-laitteiden aloituslukumäärä mittausjakson alusta
$B_{stayAvg}$	Yhtäaikaisten Bluetooth-laitteiden keskiarvo mittausjakson aikana
$V_{countSum}$	3D-kameran mitaama ohitusmäärä mittausjakson aikana

Lyhenteet

ADC	Analog-to-digital
API	Application Programming Interface
BLE	Bluetooth Low Energy
DAC	Digital-to-analog
I2C	Inter-Integrated Circuit
IoT	Internet of Things
IP	Internet Protocol
JSON	JavaScript Object Notation
LED	Light-Emitting Diode
LiPo	Lithium Polymer
LoRa	Long Range
MAC	Media Access Control address
MCU	Microcontroller Unit
OTA	Over-The-Air
RFID	Radio Frequency IDentification

RSSI	Received Signal Strength Indicator
RTC	Real-Time Clock
SF	Spreading factor
SPI	Serial Peripheral Interface
TCP	Transmission Control Protocol
UART	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter
UUID	Universally Unique Identifier

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Symboli- ja lyhenneluettelo

1	Johdanto.....	10
1.1	Tavoitteet ja rajaukset	11
2	Bluetooth-kävijämäärälaskennan teknologiavalinnat.....	13
2.1	Mikrokontrolleri.....	13
2.2	Bluetooth-skannaus	14
2.3	LoRaWAN	15
2.4	LoRa-moduuli	16
2.5	Energiakeräys aurinkopaneelilla	17
2.6	Energian varastointi ja tarjoaminen kulutukseen	18
2.7	IoT	20
3	Bluetooth-kävijämäärälaskennan toteutus.....	22
3.1	Mittauslaite.....	22
3.1.1	Espressif ESP32-WROOM-32U.....	23
3.1.2	LoRa-moduuli RFM95-868	24
3.1.3	Energiakeräys, varastointi ja syöttö	25
3.1.4	Kotelointi	26
3.1.5	Laiteohjelmisto	27
3.1.6	Tiedon suojaus	29
3.1.7	Mittauslaitteen kytkentäkaavio ja komponenttilistaus.....	30
3.2	LoRaWAN-tiedonsiirtoverkko.....	30
3.3	IoT-järjestelmä	33
3.3.1	Tiedonsiirtoverkko.....	33
3.3.2	Datarajapinnat ja sovellus	34
3.3.3	Tietokanta	35
3.3.4	Datan visualisointi	36
3.4	Järjestelmän kyvykkyydet.....	39

3.4.1	Mittauslaitteen energiahallinta.....	40
3.4.2	Kävijälaskenta.....	40
3.4.3	Mittauslaitteen tiedonsiirto	43
3.4.4	Mittauslaitteen säätökyky	45
3.4.5	IoT-järjestelmä.....	46
4	Tulokset	47
4.1	Mittauskohteet.....	47
4.2	Datan analysointi.....	48
4.2.1	Täyttömäen kuntoportaat	48
4.2.2	Yleinen sauna.....	53
4.2.3	Saari	54
4.3	Järjestelmän toimintavarmuus.....	57
4.4	Järjestelmän sopivuus eri ympäristöihin	58
4.5	Laitteen datan laatu ja luotettavuus.....	59
4.6	Mittaustulokseen vaikuttavat tekijät	60
4.7	Ongelmatapaukset	62
5	Jatkotutkimus ja -kehitys	67
5.1	Fyysinen laite	67
5.2	Laiteohjelmisto.....	68
5.3	Ennustemallit ja avoimen datan hyödyntäminen	69
6	Johtopäätökset	71
	Lähteet	73

Kuvaluettelo

Kuva 1: Espressif ESP32-WROOM-32U –mikrokontrolleri

Kuva 2: Ote Bluetooth-skannauksen tuloksesta

Kuva 3: LoRaWAN-verkon kattavuus Digita Oy:n tukiasemaverkostolla

Kuva 4: RFM95 LoRa-moduuli (Hoperf, 2018)

Kuva 5: Aurinkopaneeli 3 W (Seeed Studio, 2023)

Kuva 6: DFRobot lataussäädin (DFRobot, 2023)

Kuva 7: Lipo-akku 2000 mAh kapasiteetilla

Kuva 8: Jänniteregulaattori vasemmalla ja kondensaattori oikealla

Kuva 9: ESP32-mikrokontrolleri kytkettynä akkuun ja LoRa-moduuliin

Kuva 10: Valmiin mittauslaitteen kotelo ja komponentit

Kuva 11: Reolink-aurinkopaneeli

Kuva 12: Mittauslaite kiinnitettynä Reolink-aurinkopaneelin runkoon

Kuva 13: Mittauslaitteen kytkentäkaavio

Kuva 14: LoRa-laitteen konfiguraatio Digitan portaalissa

Kuva 15: Digitan LoRaWAN-portaalin ohjaama sanoma mittauslaitteelta

Kuva 16: Powershell-rajapintasovellus

Kuva 17: Näyte mittauslaitteen tuottamasta datasta

Kuva 18: Grafana Labs -sovelluksen visualisoinnin editointinäkymä

Kuva 19: Grafana Labs -kuvaaja kuuden kuukauden mittausdatasta

Kuva 20: Grafana Labs -kuvaajat useammasta datatyypistä

Kuva 21: Grafana Labs Geo-kuvaaja

Kuva 22: Arvioitu kävijämäärä Grafana Labs –kuvaajassa

Kuva 23: LoRa-sanoman pakolliset tietokentät

Kuva 24: LoRa-sanoman kokoaminen

Kuva 25: Akun jännitteen skaalaus

Kuva 26: LoRa-sanoman lähetysfunktion kutsuminen

Kuva 27: Mittauslaitteen tulos verrattuna 3D-kameran tulokseen

Kuva 28: Mittauslaitteen tulos tunnin ajalta verrattuna 3D-kameran tulokseen

Kuva 29: Yleisen saunan yhden vuorokauden mittaustulos Grafana Labs -sovelluksen kuvaajassa

Kuva 30: Mittauslaite mäntyyn asennettuna

Kuva 31: Mittaustuloksien esitys kolmen vuoden mittausjakson aikana Grafana Labs kaavioissa

Kuva 32: Mittaustuloksien esitys 2022 kesäkuun mittausjakson aikana Grafana Labs kaavioissa

Kuva 33: Virhetilanne mittausdatassa Grafana Labs kuvaajassa esiteltynä

Kuva 34: Kuntoportaiden mittauslaite rikottuna

Kuva 35: Mikrokontrollerin jännitetasot kuuden kuukauden mittausjakson aikana Grafana Labs –kuvaajassa

Kuva 36: Mittaustuloksen virhe esitettynä Grafana Labs –kuvaajassa

Kuva 37: Virheellinen toiminne laiteohjelmiston koodissa

Taulukkoluetelo

Taulukko 1: Lepoajan ja skannausajan muutos jännitteen laskiessa

Taulukko 2: Mittauslaitteen LoRa-sanoman käyttöasteet

Taulukko 3: 3D-kameran ja mittauslaitteen mittausarvot tunnin tarkasteluajalta

1 Johdanto

Kävijämäärien havaitseminen erilaisissa toimintaympäristöissä on tullut tärkeäksi tavaksi arvioida käyttöastetta. Kävijämäärien arvioimiseen käytettävät mittaustavat jaetaan passiivisiin ja aktiivisiin menetelmiin. Passiivinen menetelmä ei vaadi kävijältä osallistumista laskentaan, koska laskenta toteutetaan esimerkiksi kameralaskennalla tai valotunnistimella. Aktiivinen menetelmä vaatii kävijältä osallistumista laskentaan esimerkiksi kantamalla RFID-tunnistetta mukana, joka skannataan RFID-lukijoilla mittaushetkillä. Myös kävijöiden mukana kannettavat Bluetooth-majakat tai älylaitteet ovat osa aktiivista menetelmää, johon tässä työssä perehdytään. (Basalamah, 2016)

Tässä diplomityössä tutkitaan mahdollisuutta mitata kävijämääriä ulkotiloissa, ns. teknisen infrastruktuurin ulkopuolella, jossa laitteelta edellytetään energiaomavaraisuutta ja kykyä määrittää kävijämäärä riittävällä tarkkuudella. Työssä toteutetaan järjestelmä, jonka keskeisenä teknologiaratkaisuna on Bluetooth-laskentaa suorittava energiaomavarainen ja säänkestävä laite.

Työssä toteutetun järjestelmän tavoiteltaviin toiminnollisuuksiin kuului Bluetooth-laitteiden sanomien havainnointi ympäristöstä mittauslaitteiden avulla. Mittauslaitteen toteutuksen keskeisimpinä vaatimuksina oli energiatehokas mikrokontrolleri, Bluetooth-kyvykyys, langaton tiedonsiirto infrastruktuurin ulkopuolella, suora lataus aurinkopaneelin avulla laitteen jatkuvaa toimintaa varten, sekä matalat kustannukset ja pieni koko. Lisäksi mittauslaitteen tuottamalle datalle vaatimuksena oli luoda tiedonsiirtokanava sekä tallennuskohde IoT-alustalle. Datan analysointia varten julkaistiin julkinen www-sivu, jonka avulla havainnoitujen laitteiden ja algoritmien tuloksia voitiin tarkastella reaaliaikaisesti.

Kävijämäärien arviointi ulkoilukohteissa on koettu Helsingin kaupungilla tärkeäksi asiaksi, johon tässä diplomityössä etsitään ratkaisua. Datan hyödyntäminen on kasvussa ja sillä pyritään ohjamaan liiketoimintaa esimerkiksi kunnossapidon ja huoltotarpeiden kohdistamisessa (Business Tampere, 2022). Teknologinen tarjonta on jo useamman vuoden tarjonnut mahdollisuuden toteuttaa tämän kaltaisia aktiivisen menetelmän kävijälaskentaratkaisuja kustannustehokkaasti, mutta edelleen tarkoitukseen sopivia palvelumalleja on markkinoilla

hyvin rajallisesti. Yksi toimija on Hypercell niminen yritys, joka oli tuonut Helsingin katu-kuvaan vastaavanlaisia mittauslaitteita, kuin työssä hyödynnetään (Malminen ja Miettinen, 2021).

Diplomityön rakenne muodostuu teknisen ratkaisun toteutuksesta, datan analysoinnista, havaittujen ongelmien analysoinnista, jatkokehitystarpeiden arvioinnista ja päätelmien tekemistä. Luvussa 2 esitellään teknologiset valinnat, joiden pohjalta työssä kehitetty järjestelmä on toteutettu. Luvussa 3 esitellään Bluetooth-kävijälaskennan toteutuksen vaiheet, jossa käydään läpi mittauslaitteen kokoonpano sisältäen komponentit, laiteohjelmiston, koteloinnin, energiakeräimen ja tietoliikenneseläyksen. Tämän jälkeen esitellään järjestelmän IoT-toteutus, joka sisältää datan käsittelyosuuden ja visualisoinnin. Luvussa 4 esitellään mittauskohteet, sekä tulokset, joihin kuuluu mittausdatan perusteella tehdyt analysoinnit, mittauslaitteen ja järjestelmän kyvykkyyksien tarkastelun, sekä ongelmatapauksia. Kokeellisten testien perusteella järjestelmän toteutukseen liittyviä jatkokehitys ja –tutkimusaiheita ilmeni, joita esitellään luvussa 5.

1.1 Tavoitteet ja rajaukset

Työn tavoitteena on saada mahdollisimman hyvä ymmärrys siitä, miten toteutus on käytettävissä erilaisissa kohteissa, sekä miten tarkasti kyseisellä konseptilla voidaan mitata kävijämääriä ja mitkä tekijät vaikuttavat mittaustulokseen. Tavoitteena on myös pohtia millaisia parannuksia ja olettamia voidaan tehdä, jolla kävijämääräanalyysin tuloksia voidaan parantaa. Tutkimuskysymyksinä esiintyy seuraavia asioita:

- Voiko mittaustuloksesta päätellä kävijämäärän?
- Mitkä tekijät vaikuttavat havainnoitujen laitteiden lukumäärään suhteessa todelliseen ympäristön havaittavien laitteiden lukumäärään?
- Millainen on otollisin ympäristö mitata kävijämääriä tällä konseptilla?
- Voidaanko eritellä staattiset laitteet ympäristöstä, jotka eivät suurella todennäköisyydellä ole henkilöitä?

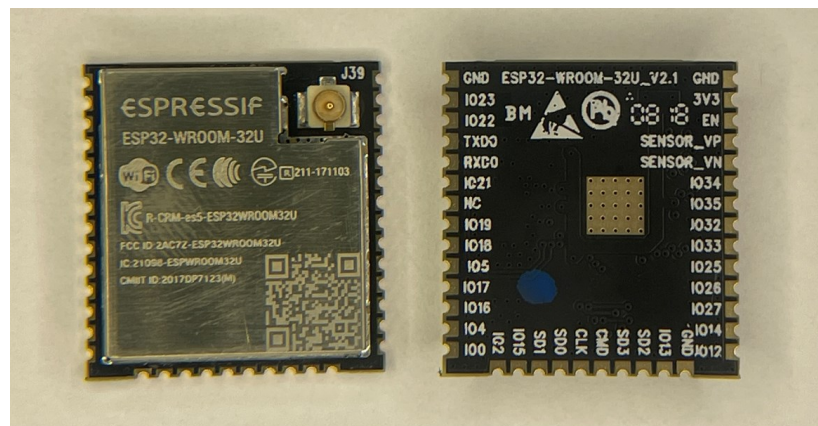
Työ rajataan toteuttamalla mittauskonsepti, joka tuottaa mittausdataa kahdesta eri mittauskohteesta, joiden samanaikainen arvioitu havaittava Bluetooth-laitemäärä pysyy alle 440 laitteessa. Työssä hyödynnettiin myös aiemman kokeilun tuloksia kolmannesta kohteesta.

2 Bluetooth-kävijämäärälaskennan teknologiavalinnat

Tässä luvussa käydään läpi työssä tarkasteltavan laitteen toiminnollisuuksia sekä toteutusta. Teoriaa. Lisäksi luvussa esitetään perusteluja laitteen tavoitellun toiminnan kannalta tärkeisiin ominaisuuksiin.

2.1 Mikrokontrolleri

Mikrokontrolleri (engl. microcontroller unit (MCU)) on piiri, joka sisältää prosessoriytimen tai useampia, integroidun muistin, sekä ohjelmoitavia sisään- ja ulostuloportteja. Mikrokontrollerin kanssa samalla kehitysalustalla voi olla myös muita komponentteja kuten Bluetooth- tai WIFI-moduuleita, kuten kuvassa 1 esiteltävässä Espressif ESP32-WROOM-32U –mikrokontrollerissa.



Kuva 1. Espressif ESP32-WROOM-32U –mikrokontrolleri.

Kyseinen mikrokontrolleri valittiin tämän diplomityön mittaustoteutukseen, koska mikrokontrollerin koko, energiansäästöominaisuudet, liitäntäväylät ja Bluetooth-kyvykyys olivat työn kannalta tarpeelliset. Lisäarvoa työn kannalta toi myös mikrokontrollerin implementoitu U.FL (IPX/AMC) -liitin Bluetooth-antennia varten, joka nähdään kuvassa 1 vasemmanpuoleisen mikrokontrollerin oikeassa yläkulmassa, jolla mahdollistettiin antennin vienti kotelon ulkopuolelle. ESP32-WROOM-32U mikrokontrollerin ominaisuuksiin kuuluu kattava kokoelma rajapintoja, kuten esimerkiksi SPI, I2C, UART, DAC ja ADC, mutta

myös Bluetooth- ja WIFI-kontrolleri, sekä energiatehokkaan lepotilan RTC (Real-Time Clock) ylläpitäessä lepotilaa. (Espressif Systems, 2023)

2.2 Bluetooth-skannaus

Älylaitteiden havaitseminen ympäristöstä perustuu Bluetooth-skannauksen tuottaman tuloksen hyödyntämiseen. Bluetooth skannauksessa hyödynnetään ympärillä olevien laitteiden mainostamaa informaatiota itsestään. Laitteiden mainostama data voidaan havaita toisella Bluetooth-kyvykkyydellä varustetulla laitteella. Tämän mainostetun datan pohjalta voidaan tehdä johtopäätöksiä Bluetooth-laitteesta ja tutkia Bluetooth-laitteen tarjoamaa informaatiota. (Silicon Labs, 2023)

Bluetooth Low Energy eli BLE teknologia on langaton lyhyen kantaman viestintäteknologia, joka on suunniteltu erityisesti vähävirtaisiin toteutuksiin (Hoang Hieu, 2023). Kuvassa 2 nähdään ote yhden skannauksen osatuloksesta, jossa esitellään Bluetooth-laitteiden mainostamaa tietoa itsestään.

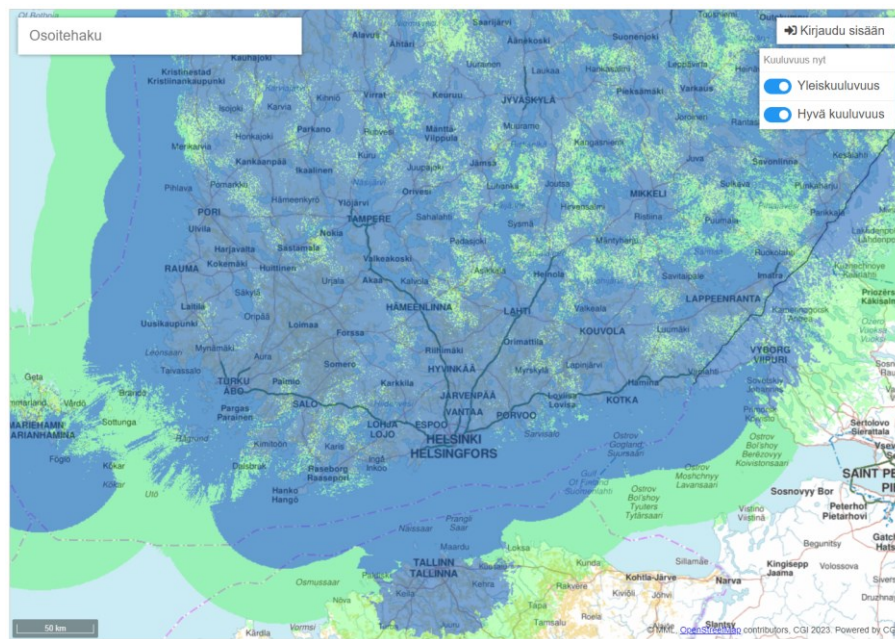
```
Address: 53:05:c7:3a:77:abRssi: -31 Name: ManufacturerData: 4c001007331be2c0fff938 ServiceUUID: TxPower: 6
Address: 58:a5:b7:6c:cf:8aRssi: -87 Name: ManufacturerData: 4c0010060bd78dd5128 ServiceUUID: TxPower: 12
Address: 58:ae:72:be:57:afRssi: -85 Name: ManufacturerData: 4c00100600199aa93e08 ServiceUUID: TxPower: 6
Address: 61:bb:fc:d0:37:58Rssi: -89 Name: ManufacturerData: 4c0010050318ae2458 ServiceUUID: TxPower: 4
Address: 72:37:c4:82:a6:44Rssi: -94 Name: ManufacturerData: 4c001007381fb818861f38 ServiceUUID: TxPower: 7
Address: 7a:92:f1:f4:b0:fcRssi: -82 Name: ManufacturerData: 4c0010052618ab2e5c ServiceUUID: TxPower: 8
Address: 7c:ca:5f:46:4c:1fRssi: -63 Name: ManufacturerData: 4c0010050e1c480c2d ServiceUUID: TxPower: 12
Address: 7e:b3:0c:35:8a:11Rssi: -72 Name: ManufacturerData: 4c0010060c191769eb58 ServiceUUID: TxPower: 12
Address: 7f:10:ae:f6:5e:9eRssi: -90 Name: ManufacturerData: 4c001007351b65505b8748 ServiceUUID: TxPower: 7
Address: 7f:b6:fb:0c:45:a0Rssi: -75 Name: ManufacturerData: 4c0010070c1f72e3603568 ServiceUUID: TxPower: 3
Address: c1:11:59:35:1b:f0Rssi: -30 Name: ManufacturerData: 4c0012020002 ServiceUUID: TxPower:
Address: c2:a4:1e:c6:48:d8Rssi: -80 Name: ManufacturerData: 4c0012020001 ServiceUUID: TxPower:
Address: c7:97:c6:7a:96:cbRssi: -82 Name: vivoactive3 ManufacturerData: 87000a8c ServiceUUID: 0000fe1f-0000-1000-8000-00805f9b34fb TxPower:
```

Kuva 2. Ote Bluetooth-skannauksen tuloksesta.

Bluetooth-laitteen mainostama data sisältää mm. laitteen nimen, MAC-osoitteen, valmistajan datan, UUID, RSSI ja lähetystehon TxPower, kuten kuvan 2 esimerkki havainnollistaa. Tietosisältö on sama, jonka pohjalta työn mittauslaite tuottaa mittaustuloksen. Työn kannalta tärkeä tieto on laitteen MAC-osoite, joka nähdään kuvassa 2 jokaisen rivin ensimmäisenä tietona. Tämän osoitteen avulla on mahdollista identifioida Bluetooth-laitteet eri skannauskertojen välillä.

2.3 LoRaWAN

LoRaWAN (Low Power Wide-Area Network)-verkko mahdollistaa pitkän kantaman, ja vähätehoisen, tiedonvälitystavan erilaisille mittausratkaisuille. Teknologia perustuu Semtech:n kehittämään hajaspektrimodulaatioon. (Hörkkö, 2020). Sijainnista riippuen tiedonvälitystavan käyttöön on annettu tietty taajuuskaista, joka EU:n alueella on 868 MHz (Hörkkö, 2020). Teknologian pitkän kantaman haittapuolena on tiedonvälityksen tietopaketin koko, joka saa hyvien käytäntöjen mukaan olla maksimissaan 250 tavua (Mikhaylov et al., 2023). Suomessa kaupallista LoRaWAN-ratkaisua tarjoaa Digita Oy, jonka kuuluvuuskartta esitetään kuvassa 3. Karttapohjan sinisellä maalatut alueet kattavat hyvän kuuluvuuden ja vihreä alue kattaa yleiskuuluvuuden.

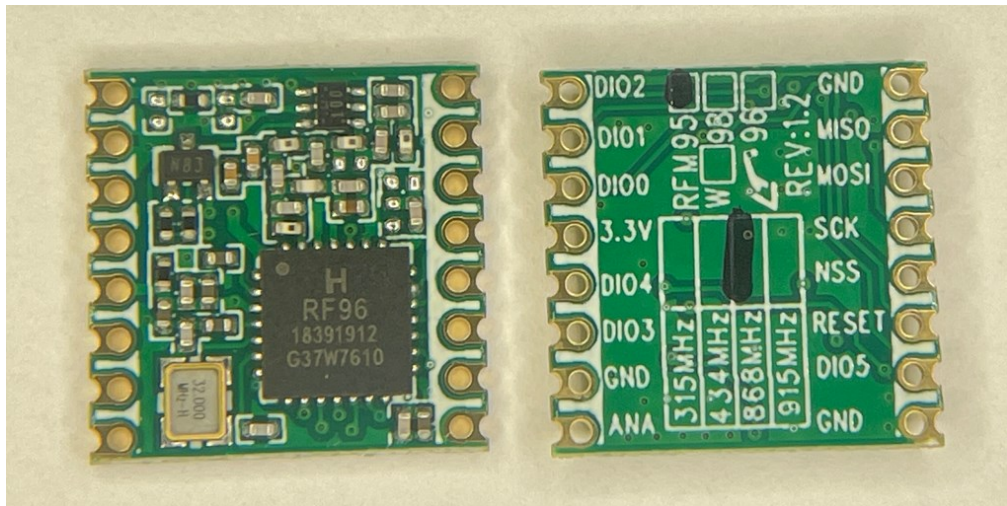


Kuva 3. LoRaWAN-verkon kattavuus Digita Oy:n tukiasemaverkostolla.

Digita tarjoaa myös verkkovierailu-palvelua, jonka avulla verkon kattavuutta voidaan hyödyntää myös muissa pohjoismaissa, sekä Alankomaissa, Sveitsissä ja Virossa (Digita, 2023). Viron kuuluvuuskartta nähdään osittain kuvassa 3. Kuten kuvasta 3 nähdään, kattavuudessa ei ollut merkittäviä puutteita, joka oli tärkeää työn kannalta, koska mittauslaitteen tuli kyetä kommunikoimaan palvelimelle mahdollisimman hyvin sijainnista riippumatta. Työn mitauskohteiden osalta pysyttiin hyvän kuuluvuuden alueella, mutta mittauslaitteen sijoitus olisi hyvinkin voinut olla myös jonkin muu sijainti Suomessa.

2.4 LoRa-moduuli

Long Range (LoRa)-moduulin tehtävänä on toimia radiolaitteena mikrokontrollerin ja LoRaWAN-tukiasemien välillä. Moduulin avulla pyritään toimittamaan mitattu tieto mahdollisimman luotettavasti tukiasemalle. Käytännössä LoRa-moduuli kykenee muodostamaan kaksisuuntaisen viestintäyhteyden 868 MHz taajuusalueella, mutta tässä työssä toteutettavan tiedonsiirron tarve on yksisuuntaista. Toisin sanoen, mikrokontrolleri käskii LoRa-moduulia viestimään LoRa-sanoman tukiasemien vastaanotettavaksi. Kuvassa 4 esitetään työssä käytetty LoRa-moduulimalli, jossa liityntäportit olivat helposti liitettävissä johtimilla mikrokontrolleriin.

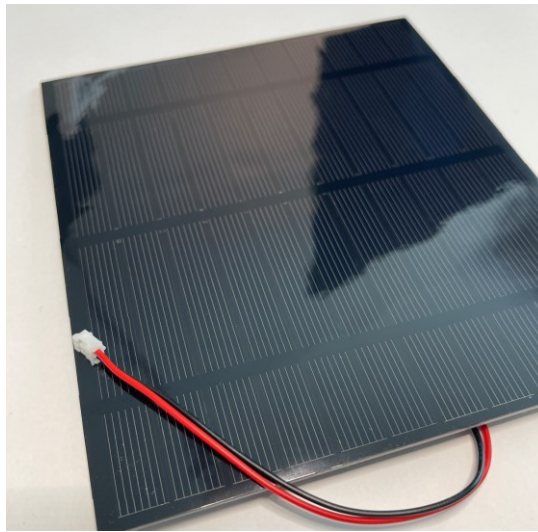


Kuva 4. RFM95 LoRa-moduuli (Hoperf, 2018).

Kuvassa 4 esitetyn oikean puoleisen LoRa-moduulin ANA-liitin on tarkoitettu antennille ja muut liittimet tiedonsiirtoon SPI-väylän kautta mikrokontrollerin ja moduulin välillä, pois lukien maadoitus (GND) ja jänniteliitäntä (3,3 V). Kuvan oikean puoleisen moduulin merkinnöistä selviää, että moduulin malli on RFM95, joka operoi EU:n taajuusalueella 868 MHz. Moduulin käyttämä jännite on 3,3 V ja toiminnan raja-arvot $-55\text{ °C} - +115\text{ °C}$ lämpötila-alueella. Korkeimmalla lähetysteholla +20 dBm saavutetaan 120 mA tyypillinen virrankulutus, sekä lähetystä vastaanottaessa saavutetaan tyypillinen virrankulutus välillä 10 – 12 mA. (Hoperf, 2018)

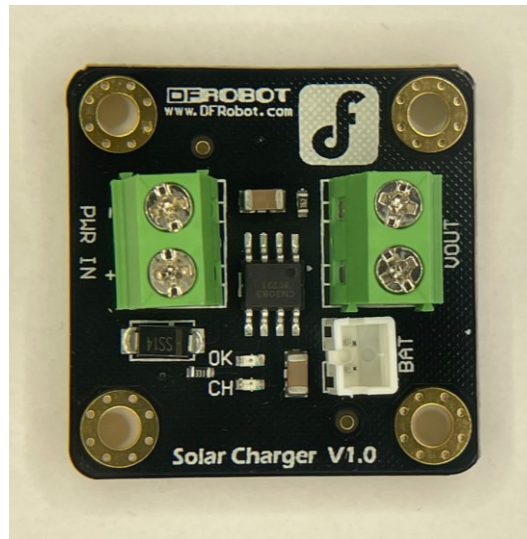
2.5 Energiakeräys aurinkopaneelilla

Aurinkokennon energiankeräyiskyky perustuu auringon säteilyn muuttamisesta sähköenergiaksi valosähköisen ilmiön avulla. Koska mittauslaite on suunniteltu ympärivuotiseen ulkokäyttöön, yksinkertaisin, tehokkain ja edullisin tapa toteuttaa energiakeräys on hyödyntää aurinkokennoa. Kuvassa 5 esitetään aurinkokenno, jolla katettiin laitteen energiantarve osassa toteutuksia.



Kuva 5. Aurinkopaneeli (teho 3 W).

Kuvassa 5 esitetyn aurinkokennon tuottama maksimiteho valmistajan mukaan on 3 W ja koko 169 x 138 mm (Seed Studio, 2023). Aurinkokenno tuottaa vaihtelevan jännitteen riippuen valon määrästä. Tämän ominaispiirteen johdosta mittauslaitteeseen on huomioitava akun ja kennon välille lataussäädin, joka vaaditaan yleisesti verkkoon kytkemättömissä sähköjärjestelmissä. Lataussäätimen yksinkertainen tehtävä on tuottaa sopiva jännite akustolle. Lataussäätimen ominaisuuksiin kuuluu akun varaustason valvonta, jolla pyritään estämään mahdolliset ylilataukset (Oja, 2019). Kuvassa 6 esiteltävä lataussäädin on DFRobot-verkko-kaupan kauppaama lataussäädin, joka valikoitui kytkentämahdollisuuksien ja jännitealueiden vuoksi tässä diplomityössä käsiteltävään laitteeseen.



Kuva 6. DFRobot lataussäädin (DFRobot, 2023).

Kuvassa 6 esitetyssä lataussäätimessä on liitäntä akulle ja ruuvattavat liittimet aurinkokennolle sekä kuormalle eli mikrokontrollerille. Säätimessä on myös kaksi LED-valoa indikoimassa kiinnitetyn akun tilaa sekä latauksen tilaa. Aurinkopaneelin jännitteen ollessa riittävä, säädin käynnistää latauksen ja LED-valo syttyy kohtaan CH. (DFRobot, 2023)

2.6 Energian varastointi ja tarjoaminen kulutukseen

Energian varastointia voidaan toteuttaa monella tavalla, mutta työssä rakennetun mittauslaitteen energiavarastoksi sopi parhaiten ladattava akku. Laitteen jatkuvan toiminnan takaamiseksi tarvittiin joko erittäin iso akku ja/tai tapa ladata akkua jatkuvan käytön mahdollistamiseksi. Lisäksi laitteen huoltovapaus on tärkeässä osassa, jos laitemäärät tulisivat olemaan suuria. Akun suuremmalla koolla voidaan ennaltaehkäistä tilanteita, joissa akun varaus on vähenemässä esimerkiksi pitkän pilvisen jakson vuoksi, mutta tähän voidaan vaikuttaa myös ohjelmallisesti säätämällä ohjelmakoodissa energiaa vievän suoritettavan työn määrää ja syklien välin pituutta. Litium-akun energiatiheuden vuoksi, joka on noin 100 – 200 Wh / kg, mahdollistettiin akulle suuri kapasiteetti suhteessa akun fyysisiin mittoihin. Eli mahdollisimman pieni akku mahdollisimman suurella varauskapasiteetilla oli työn kannalta tärkeää. Myös sopiva akkukennon jännite ja vähäinen itsepurkautuminen sopivat tarkoitukseen (Jouppi, 2019).

Kuvassa 7 esiteltävä LiPo-akku valikoitui yhdeksi akkutyypiksi, jota laitteessa voitiin käyttää. Kapasiteetti ja koko olivat tärkeitä tekijöitä. LiPo-akun normaalin toiminnan jänniteväli on 3,5 V ja 4,0 V välillä. Alle 3,5 V jännitealueelle mentäessä kuormituksen pysyessä samana, jännite alenee kiihtyvästi (Sparkfun, 2023).

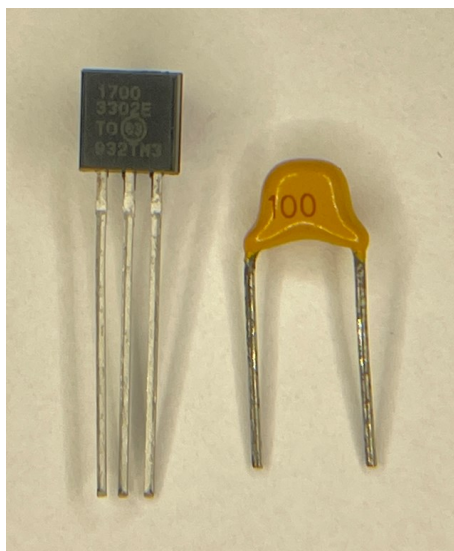


Kuva 7. LiPo-akku 2000 mAh kapasiteetilla.

Akun kylmyydensietokyky on vaatimuksena tämän diplomityön mittauslaitteessa, koska laitteen oli tarkoitus mitata ympärivuotisesti olosuhteissa, joissa voitiin alittaa jopa $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ lämpötila. LiPo-akun toiminta matalissa lämpötiloissa ei ole optimaalista. Akun lataaminen aiheuttaa Litiumin platinkia, eli Litium-partikkelien muodostamaa kerrostumaa elektrodien pinnalla (Saarinen, 2022). Tämä aiheuttaa akun kapasiteetin alenemaa ajan kanssa. Käytännön toteutuksessa ongelmaa ei ollut odotettavissa, koska mittauslaitteen komponenttien vähäinen virrankulutus oli tiedossa, jolloin platingin muodostuminen olisi myös vähäisempää, sekä todellinen kapasiteetin alenema tulisi todennäköisesti näkymään vasta vuosien päästä mittauslaitteen käyttöönotosta.

Akun varaustaso vaikuttaa suoraan jännitteeseen, joka annetaan lataussäätimen läpi mikrokontrollerille. Tämän johdosta LiPo-akun varaustason ollessa yli 4,0 V (tai jopa 4,2 V) voidaan olettaa, että mikrokontrolleri ei tule kestävään ylijännitettä, koska ESP32-mikrokontrollerin suositeltu sisääntulojännitteen maksimi on kerrottu olevan 3,6 V (Espressif Systems, 2023). Aikaisemman kokemuksen perusteella on havaittu, että mikrokontrolleri kykenee kestävään noin 4,0 V pitkäaikaisia jännitteitä, mutta tätä arvoa korkeampien jännitteiden vallitessa on riski mikrokontrollerin komponenttien rikkoutumiseen.

ESP32-mikrokontrollerin sisääntulojännitevaatimuksen vuoksi, laitteeseen on liitettävä jänniteregulaattori kuorman sisääntulon ja lataussäätimen ulostulon välille. Kuvassa 8 vasemmalla esitetään kolmijalkainen komponentti, joka on jänniteregulaattori mallia MCP1700 ja oikealla esitellään 1 μF kondensaattori. Jänniteregulaattorin tehtävä on laskea tulojännite haluttuun jännitearvoon ja samalla vakauttamaan tämä jännite tasaiseksi sitä käyttävälle kuormalle (Reiman, 2002). Kondensaattoreita voidaan käyttää elektronisissa piireissä jännitevaihteluiden tasaamiseen.



Kuva 8. Jänniteregulaattori vasemmalla ja kondensaattori oikealla.

Kuvassa 8 esitellyn vasemmanpuoleisen jänniteregulaattorin ominaisuuksiin kuuluu tuottaa ulostulojännite 3,3 V, sisääntulojännitteen ollessa välillä 2,3 V ja 6,0 V (Microchip, 2018). Mittauslaitteen tapauksessa kondensaattori mitoitettiin sopimaan jänniteregulaattorin kanssa. Jänniteregulaattorin MCP1700 tietolomakkeessa on ohjeistuksena kondensaattorin käyttäminen käytännön sovelluksissa (Microchip, 2018).

2.7 IoT

Internet of Things (IoT) on käsite, joka kattaa monipuolisen kattauksen eri osa-alueita. IoT tarkoittaa asioiden yhdistämistä eri sijainneista internettiin ja sitä kautta eri kohteisiin ja myös takaisinpäin. Käytännössä voimme liittää erilaisia esineitä ja asioita internettiin tuo-

malla niihin jokin laite, joka aistii kyseisen esineen muuttuvia tietoja, esimerkiksi kiihtyvyyttä. Tämä kiihtyvyys, joka esineestä mitataan, toimitetaan kuhunkin tilanteeseen sopivalla tiedonsiirtotavalla internetin kautta palvelimelle, jossa data tallennetaan ja sitä voidaan käsitellä. Kommunikointi tapahtuu myös takaisin laitteelle, esimerkiksi lähetetään sanoma, jossa on ohjaustietoa laitteelle. Oleellista IoT-käsitteessä on, että monipuolinen aistien kokonaisuus yhdistettynä älykkääseen automaatioon tuottaa jatkuvasti sulautuvan ja ajantasaisen kokonaisuuden, jota voidaan hallita eri tavoin. (Nevalainen, 2020)

Yksinkertaisimmillaan IoT-ratkaisu voi olla laite, joka mittaa ympäristöä, toimittaa datan halutun aikavälein palvelimelle, jossa se tallennetaan ja esitetään www-sivustolla. WWW-sivustolla esitettävän mittaustiedon lisäksi voidaan esittää toisesta lähteestä saatava dataa, kuten esimerkiksi ilmatieteenlaitoksen avointa dataa, jonka avulla voidaan verrata isomassa kuvassa historiatietoa ja etsiä korrelaatio mitatun datan ja ilmatieteenlaitoksen datan väliltä.

3 Bluetooth-kävijämäärälaskennan toteutus

Tässä diplomityössä kehitetään Bluetooth-teknologiaan perustuva kävijämäärälaskentalaitte. Idean lähteenä on ns. PAX-counter-mittauslaite, joka toteutti samantyylistä laskentaa kohteissa (Cyberman54, 2023). Erona tähän mittauslaitteeseen on se, että tässä diplomityössä esiteltävän toteutuksen mittauslaite toimii aurinkoenergialla sekä se kykenee mittamaan Bluetooth-laitteiden määrän lisäksi mittausalueelle tulevien ja pysyvien uniikkien laitteiden määrää. Tämän lisäksi energiansäästösyistä järjestelmän laitteen energiankäyttöä optimoidaan ja mittaustapaa muutetaan. Järjestelmän tietoliikenne ja sovellusratkaisut ovat myös toteutettu työn vaatimusten mukaan.

Tässä luvussa esitellään järjestelmän kokoonpano ja miten mittauslaite on rakennettu, sekä millaisia haasteita kehitystyön edetessä tuli vastaan. Luvussa käydään läpi myös tietoliikenteen kokonaisuus, joka sisältää LoRa-moduulista lähtevän sanoman Digitan LoRa-verkon palvelinten kautta IoT-alustalle. Luvussa käsitellään myös IoT:n palvelinosuus, jossa mitausdataa käsiteltiin ja esitettiin visuaalisesti.

3.1 Mittauslaite

Mittauslaite käsittää järjestelmän osa-alueesta laitteen joka vie mittauskohteeseen. Mittauslaite sisältää mittaukseen ja tietoliikenneyhteyteen tarvittavat komponentit, kotelointiratkaisun, mutta myös energianvarastoinnin kannalta oleelliset osat.

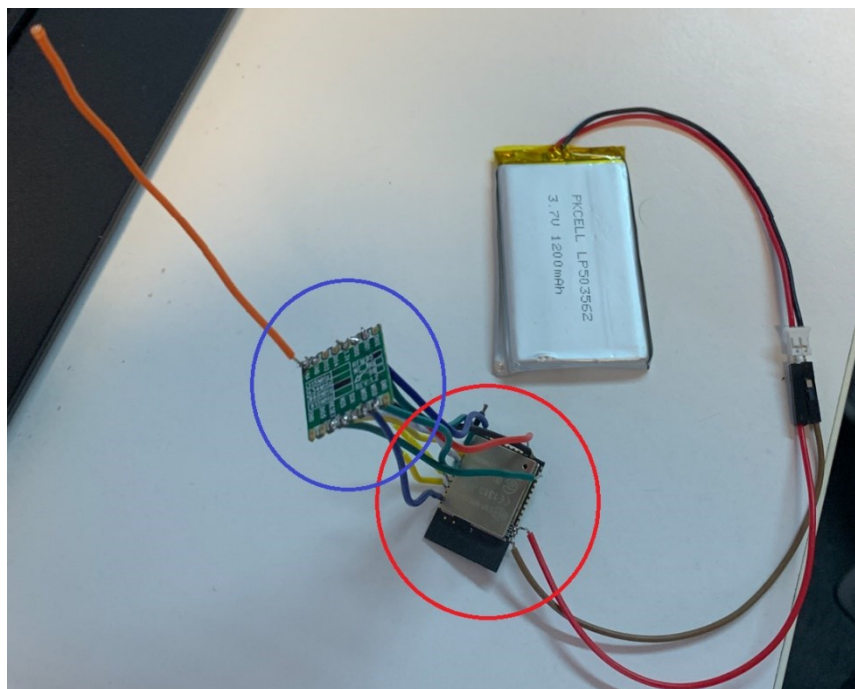
Mittauslaitteen päävaatimuksena on toimia ulkoilmassa ilman erillistä sähkönsyöttöä. Kotelointi on toteutettava vähintään vesisateen kestävä. Kaikkien komponenttien on mahdollista koteloinnin sisään, pois lukien aurinkopaneeli, jolle tuodaan kaapelointi vesitiiviiden läpivientien kautta.

3.1.1 Espressif ESP32-WROOM-32U

Vaatimuksena mikrokontrollerille on helppo ohjelmoitavuus, laaja käyttäjäkunta sekä kehitysyhteisö, joka tukee kehitystyötä tarjoamalla suuria määriä erilaisia esimerkkejä sekä laajasti internetistä saatavilla olevia ongelmanratkaisuja. Vähäinen energiankulutus, monipuolisuus ja pienet hankintakustannukset ovat tärkeitä ominaisuuksia työtä ajatellen. Mikrokontrolleri tulee olla myös asennettuna valmiiksi kompaktiin kehitysalustaan, jossa on riittävästi liitäntöjä lisämoduleja varten.

Mikrokontrollerin tulee olla varustettu valmiilla tiedonvälityskanavilla, erityisesti SPI-väylä, sekä valmiiksi integroiduilla komponenteilla. Näitä ovat Bluetooth-radio ja tallennusmuisti.

Espressif ESP32-WROOM-32U-mikrokontrollerin keskeinen tehtävä on suorittaa ohjelmakoodia, jolla skannataan ympäristöstä Bluetooth-laitteet. Mikrokontrolleri ohjaa LoRa-moduulia SPI-kommunikaatioväylän kautta, jolla mittaustulokset toimitetaan radioteitse Digitan LoRaWAN-verkon kautta palvelimelle. Kuvassa 9 esitellään varhainen testiversio, jossa punaisella ympyrällä merkitty mikrokontrolleri on kytkettynä sinisellä ympyröityyn LoRa-moduuliin ja akkuun.



Kuva 9. ESP32-mikrokontrolleri kytkettynä akkuun ja LoRa-moduuliin.

Mikrokontrollerin ja LoRa-moduulin välinen kytkentä on toteutettu SPI-väylän napoihin. LoRa-moduulin jännite tuodaan mikrokontrollerin ulostuloportista, koska työssä haluttiin optimoida LoRa-moduulin virrankäyttö niin, että virtaa annetaan vain silloin kun on tarve lähettää sanoma. Akun navat on kytketty suoraan mikrokontrolleriin, kuten kuvassa 9 on havainnollistettu. Tämä testitoteutus ei mahdollistanut energian keräystä, vaan kykeni suorittamaan mittausta vain niin kauan, kun LiPo-akussa riitti varausta. Kuvassa 10 tullaan esittämään työssä käytetty mittauslaite, jossa myös energian keräys on toiminnallisuutena.

Mikrokontrollerin keskeisinä ominaisuuksina tähän työhön on se, että laitteen virrankulutus lepotilassa on erittäin matala, jopa $5 \mu\text{A}$, mutta myös suorituksen aikainen virrankulutus on luvattu olevan matala, välillä $100 - 200 \text{ mA}$ (Espressif Systems, 2023). Maksimoimalla lepoaika ja minimoimalla suoritusaika, on mahdollista saada hyvinkin pieni keskivirrankulutus. Oleellista on se, että mitä lyhyempi mittausaika on, tai mittausten välinen aika on suuri, sitä todennäköisempää on, että jokin Bluetooth-laite jäi havaitsematta ympäristöstä. Tämän johdosta kompromissi virrankulutuksen ja mittaustarkkuuden välillä on tehtävä.

3.1.2 LoRa-moduuli RFM95-868

LoRa-radioksi valikoitui RFM95-868-moduuli, jonka hinta on alhainen ja esimerkkikoodeja löytyi internetistä monipuolisesti. RFM95-868-moduulille kommunikoidaan SPI-väylän kautta, joka on myös ESP32 mikrokontrollerin yksi liityntärajapinnoista. LoRa-moduuli kytkettiin ESP32-mikrokontrolleriin SPI-väylällä ja ohjaus tapahtui suoraan mikrokontrollerin ohjelmakoodin kautta.

Kuvassa 10 esitetään kokoonpano mittauslaitteesta, joka on viety kohteeseen suorittamaan mittausta.

Laitteen energiankeräimeksi valikoitui aurinkopaneeli, jonka tehtävänä on ladata akkua. Kuvassa 11 nähdään yksi testitoteutuksista, johon valikoitu Reolink-yrityksen valmistama aurinkopaneeli. Aurinkopaneeli on liitetty telineeseen, joka mahdollisti kiinnityksen esimerkiksi ruuvaamalla. Aurinkopaneelin virta ohjataan lataussäätimelle, PWR-liittimiin punaisella ja mustalla kaapelilla, joka nähdään kuvassa 10 virheällä ympyröitynä. Lataussäätimessä jännite muunnetaan LiPo-akun vaatimaksi latausjännitteeksi.



Kuva 11. Reolink-aurinkopaneeli.

3.1.4 Kotelointi

Koteloksi valikoitui muovinen vesitiivis rasia, jossa vesitiiviys oli varmistettu tiivistenaullahalla läpinäkyvän kannen ja kotelo-osan välissä. Kotelon koko mahdollisti kaikkien komponenttien sijoittamisen, sekä akun ja läpiviennin tekemisen. Kotelon ulkopuolelta tuotiin aurinkopaneelin kaapelointi, sekä kotelon ulkopuolelle tuotiin Bluetooth-antenni. Läpiviennit tiivistettiin pikaliimalla. Kotelon kansi on kiinnitetty neljällä ruuvilla koteloon. Kuvassa 12 esitetään yksi kotelomalleista kiinnitettynä aurinkopaneeliin, joita työssä hyödynnettiin.



Kuva 12. Mittauslaite kiinnitettynä Reolink-aurinkopaneelin runkoon.

Edellä esitetyn kuvan 11 aurinkopaneelivalinta mahdollisti mittauslaitteen kiinnittämisen aurinkopaneelin runkoon, kuten kuvasta 12 näemme. Tämän johdosta asennus helpottui kiinnittämällä vain aurinkopaneeli runko haluttuun rakenteeseen. Kotelon kiinnitettiin aurinkopaneelin runkoon. Antennivalinta Bluetooth-radiolle on taipuisa, joten antennin asento on täysin sattumanvarainen. Antennin läpivienti, kuin myös aurinkopaneelin kaapelin läpivienti on tiivistetty, kuten kuvasta 12 näemme antennin osalta.

3.1.5 Laiteohjelmisto

Mittauslaitteen laiteohjelmisto ohjelmointiin kokonaisuudessaan Arduino IDE –kehitysympäristöllä. Ohjelma kirjoitettiin C++-kielellä. Ohjelmakoodi koostui osa-alueista, jossa aluksi luettiin kirjastot ja tiedostot mukaan, sekä alustettiin muuttujat ja pinnien paikat, mutta myös Bluetooth ja WIFI toiminnallisuudet. WIFI toiminnallisuus on ohjelmassa mukana vain sen takia, että WIFI-moduulista saadaan luettua jännite, joka kertoi samalla akulta tu-

levan jännitteen. Laiteohjelmisto tuottaa myös kehitystyön kannalta tärkeää tietoa mikrokontrollerin sarjaporttiliitäntään edelleen luettavaksi erillisellä laitteella. Tämä tärkeä tieto sisälsi kommentointia ohjelmakoodin edetessä, mittausarvoja, sekä tilatietoa, joissa ohjelmakoodi milläkin hetkellä suoritusta toimitti.

Suoritettavan ohjelman karkea järjestys eteni seuraavalla tavalla.

1. RTC herättää ESP32-mikrokontrollerin levosta.
2. Alustetaan Bluetooth ja WIFI.
3. Luetaan WIFI-moduulin jännite.
4. Jos jännite on riittävä:
 - a. Skannataan Bluetooth-laitteet ympäristöstä määrätyn sekuntimäärän ajan, jotka esitellään taulukossa 1.
 - b. Tallennetaan skannattujen Bluetooth-laitteiden MAC-osoitteet taulukkoon, jos
 - i. Bluetooth-laite on jo taulukossa, päivitetään taulukossa kyseisen Bluetooth-laitteen kohdalla oleva laskuri vastaamaan ohjelmassa yleisesti juoksevaa laskuria.
 - ii. Bluetooth-laite ei ole taulukossa, lisättiin se taulukkoon.
 - c. Käydään taulukko läpi ja lasketaan Bluetooth-laitteiden laskurin ero yleisesti juoksevaa laskuria vasten. Jos ero on enemmän kuin määritelty aikamääre, poistettiin Bluetooth-laite taulukosta
 - d. Muodostetaan merkkijono LoRa-sanomaa varten.
 - e. Lähetetään LoRa-sanoma, joka sisältää seuraavan tiedon:
 - i. 1 tavun kokoiseksi pakattu arvo laitteen jännitteestä,
 - ii. viimeisimmän skannauksen Bluetooth-laitteiden lukumäärä, 2 tavua,
 - iii. taulukkoon lisättyjen uusien Bluetooth-laitteiden määrä, 2 tavua,
 - iv. taulukon Bluetooth-laitteiden kokonaismäärä, 2 tavua.

5. Asetetaan ESP32- mikrokontrolleri lepotilaan

Jos jännite ei ole riittävä, ohjelmakoodissa toimitaan eri tavalla riippuen siitä millä tasolla jännite on. Asteittain vähennetään Bluetooth-skannaukseen käytettyä aikaa, jonka jälkeen jännitteen edelleen laskiessa, jätetään Bluetooth-skannaus kokonaan pois ja toimitetaan LoRa-sanoman mukana vain akun jännite, kuten taulukossa 1 havainnollistetaan. Ohjelmakoodi ladataan mikrokontrollerille sarjaporttiliitännän avulla käyttäen CP2012 USB to UART -yhdyskäytävälaitetta. Taulukossa 1 esitetään lepoajan ja skannauksen pituuden muutos jännitteen muuttuessa.

Taulukko 1 Lepoajan ja skannausajan muutos jännitteen laskiessa.

FPort	Akun jännite (mV)	Bluetooth-skannaukseen käytettävä aika (s)	Lepoaika (s)
1	> 3200	5	60
2	3175 - 3200	4	60
3	3150 - 3175	3	60
4	3100 - 3150	2	120
5	3075 - 3100	2	240
6	3050 - 3075	1	240
7	3000 - 3050	0	1200
8	< 3000	0	86400

Taulukon 1 sisällöstä nähdään, että jännitealue, jota mitataan on pienempi verrattuna jännitealueeseen jota mitattaisiin suoraan LiPo-akulta. Jänniteregulaattori, joka luvussa 2.6 esiteltiin, tuottaa LiPo-akun varauksen ollessa noin 3,3 V jännitteen mikrokontrollerille. Tästä jännitetasosta on voitu mennä alemmas vain noin 150 mV, jonka jälkeen mikrokontrollerin on täytynyt alkaa rajoittaa laitteen suoritusaikaa merkittävästi.

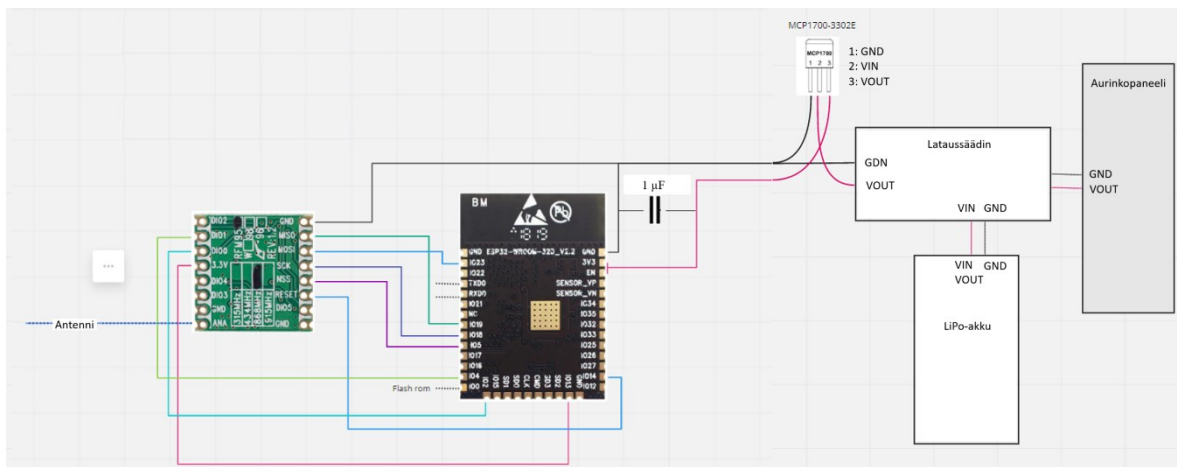
3.1.6 Tiedon suojaus

Mittauslaitteen ominaisuuksiin kuului skannata ympärillä olevia älylaitteita. Näiden älylaitteiden MAC-osoite päätyi mittauslaitteen omaan muistiin. Taulukko, johon MAC-osoitteet tallennettiin, on keskeinen osa kykyä tuottaa lukema skannattujen Bluetooth-laitteiden lukumäärästä, sekä skannauksen piirissä pysyvistä ja lähtevistä lukumääristä. Nämä MAC-osoitteet pyyhkiytyvät ennalta määritellyn ajanjakson kuluttua mittauslaitteen muistista, jos Bluetooth-laite oli kadonnut alueelta, mutta myös silloin, jos mittauslaitteen virta katkesi.

Palvelimelle toimitettava mittausdata ei sisältänyt tiedon suojauksen kannalta tärkeää tunnistetietoa Bluetooth-laitteista, vaan pelkästään havaittujen Bluetooth-laitteiden lukumääriä sekä mikrokontrollerin jännitteen.

3.1.7 Mittauslaitteen kytkentäkaavio ja komponenttilistaus

Kuvassa 13 esitetään mittauslaitteen komponenttien kytkentäkaavio. Kytkentäkaavio esittää, miten mikäänkin mittauslaitteen komponentti on kytketty toisiinsa nähden.



Kuva 13. Mittauslaitteen kytkentäkaavio, jossa esiteltynä RFM95-LoRa-moduuli (Hoperf, 2018), ESP32-WROOM-32U-mikrokontrolleri (Digikey, 2023), 1 μ F kondensaattori, jänniteregulaattori (Microchip, 2018), lataussäädin (DFRobot, 2023), LiPo-akku (Partco, 2023) ja aurinkopaneeli (Seeed Studio, 2023).

ESP32-mikrokontrollerin porteista on SPI-väylän ja jänniteulostulos lisäksi merkattuna sarjaporttiliitäntä TX ja RX pinneistä, kuten kuvasta 13 esitetään. Myös IO0 on merkattu käytettäväksi ohjelmakoodin asentamisessa. IO0 tuli olla yhteydessä maahan, silloin kun laite-ohjelmisto haluttiin päivittää.

3.2 LoRaWAN-tiedonsiirtoverkko

Työn vaatimuksena on tuottaa järjestelmä, jonka mittauslaite voi toimittaa dataa paikka riippumattomasti Suomen alueella. Valittu LoRaWAN tiedonvälitysteknologia tarjosi parhaat

edellytykset siihen. Muita teknologian tuomia hyötyjä olivat radiolaitteiden helppo implementointi mikrokontrolleriin, sekä matalat kustannukset niin tiedonsiirtomaksujen kuin komponenttien osalta.

Mittauslaitteen LoRa-sanoman parametrit asetettiin vastaamaan Digitan portaalin asiakkuiden alle luotua laitekorttia, eli laitekonfiguraatiota, joka tullaan nähdään kuvassa 14. Tämän jälkeen tukiaseman vastaanottama sanoma voitiin tunnistaa ja välittää oikean asiakkuuden alla olevan laitteen dataksi.

New device [Create] [Close]

Administrative data

Device name:

Marker: *

Administrative info:

Administrative location: *

Motion indicator:

Device identification

Manufacturer: *

Model: *

Device activation:

DevEUI: *

DevAddr: *

NwkSKey: *

Network parameters

Connectivity plan:

Application layer handling

Application server routing profile:

AppSKeys:

AppKey	Port
00000000000000000000000000000000	*

Kuva 14. LoRa-laitteen konfiguraatio Digitan portaalissa.

Esimerkkikortti, johon vaadittavat konfiguraatiot asetettiin laitteen liittämiseksi osaksi Digitan LoRaWAN-verkkoa, nähdään kuvassa 14. Oleelliset tiedot olivat laitteen aktivointitapa verkkoon, joka valikoitui ABP-tyypiksi. DevEUI, DevAddr ja NwkSKey olivat HEX-muodossa käyttäjän itse määrittelemiä tietyn pituisia merkkijonoja. NwkSKey mahdollisti sanoman salaamisen mittauslaitteen ja Digitan palvelun välisessä verkossa. AppSKey mahdollisti sanoman salaamisen mittauslaitteen ja käyttäjän oman palvelimen välillä. Connectivity plan kertoo sovitun yhteystavan, eli rajoitteet sanomien lähetyksille. Application server routing profile valinnalla voitiin laitekohtaisesti valita, miten LoRa-sanoma edelleen lähetetään. Kuvassa 15 esitetään LoRa-sanoman sisältö rikastettuna palvelun tarjoamalla tiedolla.

	UTC Timestamp	Local Timestamp	DevAddr	DevEUI	FPort	FCnt	NFCnt	AFcnt	RSSI	SNR	ESP	SF/DR	SubBand	Channel
data	2023-09-25 12:46:31.149	2023-09-25 15:46:31.149	C6D3EF19	9900F2B8CCB4EE19	1	0			-100.0	10.0	-100.41...	SF7	G2	LC8

MType: UnconfirmedDataUp
 Flags: ADR : 1, ADRACKReq : 0, ACK : 0
 Mac (hex): -
 Data (hex): SF00d0000001a [not encrypted]
 Driver metadata: model: -, application: -
 Data size (bytes): 7
 AirTime (s): 0.056576

LR	RSSI	SNR	ESP	CHAINS timestamp (GPS_RADIO)	ISM Band	RF Region	GWID	GWToken	DLAllowed	ForeignOperatorNetID	ForeignOperatorNSID
FF019E59	-100.0	10.0	-100.413925	CHAIN(0):2023-09-25T12:46:31.1494285992 (GPS_RADIO)	EU 863-870MHz	CUSTOM_Digita_EU868_8chann.7084					

Device [Lat (sol): - Lat: - Long (sol): - Long: - Loc radius: - Loc time: - Alt: - Alt radius: - Acc: - North Velocity: - East Velocity: -]
 Reporting Status: On time
 ISM Band: EU 863-870MHz
 RF Region: CUSTOM_Digita_EU868_8chann.7084
 AS ID: TWA_100013744.45929.AS,TWA_default-as-supplier.19.AS
 Frequency (MHz): 867.9
 Current class: A

AS ID	Status	Transmission errors
TWA_100013744.45929.AS	Ok	None
TWA_default-as-supplier.19.AS	Ok	None

Kuva 15. Digitan LoRaWAN-portaalin ohjaama sanoma mittauslaitteelta.

Kiinnostavia tietokenttiä kuvassa 15 ovat Data (hex), DEVEUI, RSSI sekä FPort. Data (hex) sisältää mittaustiedon, DEVEUI on mittauslaitteen yksilöivä tieto, RSSI on mittauslaitteen lähettämän sanoman voimakkuus. FPort puolestaan kertoo aiemmin taulukossa 1 esitellyn akun varaustason tilan, joka olisi pääteltävissä myös Data (hex) sisältämästä akun varaustasosta.

Tiedonsiirron määrää, eli niin sanottua ilma-aikaa rajoitetaan LoRaWAN-verkossa palvelun laadun ylläpitämiseksi. Kuvassa 15 nähdään mittauslaitteen tavanomaisen sanoman (Air-Time(s)) ilma-ajan olleen 0,0566 s, lähetettävän sanoman koon ollessa 7 tavua. Taulukossa 2 esitetään sanomamääriä, ilma-aikoja ja käyttömääriä mittauslaitteelta lähtevän sanoman ja

paluusanoman osalta, joissa Spreading Factor (SF) on eri. Spreading Factor –tasolla määritellään, kuinka monta symbolia lähetetään yhden pilkotun osan, eli viserryksen aikana, joka vaikuttaa myös bittinopeuteen (Hörkkö, 2020).

Taulukko 2 Mittauslaitteen LoRa-sanoman käyttöasteet.

SF	pkt / vrk	pkt / h	Ilma-aika / pkt	Ilma-aika / vrk	Käyttömäärä
SF7	1440	60	0,0566 s	81,5040 s	0,094 %
SF12	1440	60	1,8104 s	2606,9760 s	3,017 %

Jos tarkastellaan taulukon 2 sanomamääriä ensimmäiseltä riviltä, nähdään, että ilma-aika pysyi sallitun määrän rajoissa mittauslaitteelta lähtevän sanoman osalta, joka on Digitan palvelussa asetettu 30 minuuttiin vuorokaudessa. Duty Cycle eli käyttömäärä pysyy sallitun 1 % alapuolella. Käyttömäärällä tarkoitetaan käytettyä ilma-aikaa suhteessa sanomien lähetysväliin (The Things Network, 2023). Eli jos lähetysväli on minuutti ja ilma-aika on 56,66 ms, on käyttömäärä 0,094 %.

Digitan palvelun paluusanoma lasketaan myös mukaan ilma-aikaan ja käyttömäärään. Tätä mittauslaite ei kuitenkaan jäänyt energiansäästösyistä kuuntelemaan. Paluusanoman ilma-aika voi olla jopa 2 sekuntia, kuten taulukossa 2 nähdään toisella rivillä. Myös käyttömäärä on selkeästi yli asetetun rajan. Tämä tilanne on hyvien tapojen vastainen, joka voidaan ratkaista estämällä paluusanoman lähettäminen, jolloin raja-arvoja ei ylitetä.

3.3 IoT-järjestelmä

Mittauslaitteen tiedon käsittelyn edellytyksenä oli toimiva datan siirto mittauslaitteelta käyttöliittymään, josta voitiin havainnoida mittauksen tuloksia. Tässä osiossa käymme läpi, miten data liikkuu mittauslaitteelta eri vaiheiden kautta www-sivulle graafiseksi esitykseksi.

3.3.1 Tiedonsiirtoverkko

Mittaustuloksen ensimmäinen siirtymä tapahtuu mittauslaitteelta LoRa-moduulin radioviestinä eetteriin. Digitan LoRaWAN-tukiasemat havainnoivat viestin ja ohjaavat sen tässä työssä käytetylle tilille, josta ennalta määritellyn yhteyden kautta viesti välitetään internetin läpi työssä toteutetun IoT-alustan rajapintaan. Tätä tapahtumaa varten Digitan palvelussa

on konfiguroitu kyseisten mittauslaitteiden datan välittyvän HTTP REST-sanomana internetin välityksellä IoT-alustan REST API –sovellukseen, jossa mittauslaitteiden data käsiteltiin, tallennettiin ja esitettiin. Tämä kohdevalinta nähdään kuvan 14 esimerkkikortin Application Server Routing Profile –kohdassa.

3.3.2 Datarajapinnat ja sovellus

Datarajapinta on konfiguroitu palvelimelle, johon Digitan LoRa-sanomat ohjataan. Datarajapinta on toteutettu Powershell-sovelluksena, joka kuuntelee TCP-porttia julkisessa IP-osoitteessa. Sovellus vastaanotti datapaketin, tunnisti lähettäjän, sekä viestin sisällön, jonka perusteella viesti tallennettiin oikeaan tauluun tietokannassa. Kuvassa 16 nähdään ote Powershell-scriptin sisällöstä, jossa käsitellään HTTP-sanoma. Sanoman sisältö tallennetaan muuttujaan, jossa sitä seuraavissa vaiheissa tulkitaan ja sisällön mukaan ohjataan sanoman sisällön käsittely.

```

32 | #RECEIVE MESSAGE
33 | $context = $listener.GetContext()
34 | $httpMethod = $context.Request.HttpMethod
35 |
36 | $response = $context.Response
37 | $request = $context.Request
38 |
39 | if($request.HasEntityBody) {
40 |     $reader = New-Object System.IO.StreamReader($request.InputStream)
41 |     $body = $reader.ReadToEnd()
42 | }
43 |
44 | $response.StatusCode = 200
45 |
46 | if($request.HasEntityBody) {
47 |     $buffer = [System.Text.Encoding]::UTF8.GetBytes('{"status": "message received. Thank you!"}')
48 | }else{
49 |     $buffer = [System.Text.Encoding]::UTF8.GetBytes('there was no body in your action...')
50 | }
51 |
52 | $response.ContentLength64 = $buffer.Length
53 |
54 | $output = $response.OutputStream
55 | $output.Write($buffer,0,$buffer.Length)
56 | $output.Close()
57 |

```

Kuva 16. Powershell-rajapintasovellus.

Powershell-sovelluksessa suoritetaan eri moduuleja tarpeen mukaan, joista kuvassa 16 esitelty osuus on sanoman vastaanoton käsittely. Mittauslaitteelta Digitan verkon kautta tullut JSON-muodossa esitetty sanoma käsiteltiin hieman pidemmän putken läpi, alla esitellyssä järjestyksessä:

1. Sanoma vastaanotetaan ja luetaan muuttujaan, kuten kuvassa 16 nähdään.

2. Sanomasta tunnistetaan sisällön perusteella aihe, eli onko Bluetooth-laite peräisin Digitan LoRaWAN-palvelusta.
3. Sanoman sisältö käsitellään moduulissa, jossa seuraavat mittaustiedot tallennetaan tietokantaan: time_received, DevEUI, FPort, LrrRSSI, LrrLAT, LrrLON, mac, ESP32Batt, BLECount, newBLECount, totalBLECountUnderSupervision, visitors-New, visitorsAtArea, visitorsLeftArea, BLEBaseLaneStartPoint ja visitorsBase-LaneStartPoint.

Edellä mainitussa järjestyksessä kohdan 3 mittaustiedot esittävät mittauslaitteen tuottaman datan lisäksi myös rikastettua tietoa, joiden tarkoituksena on laskea kävijämääriä ja pohjata-soja staattisten Bluetooth-laitteiden lukumäärästä hyödyntäen mittauslaitteelta saatua tietoa, sekä tämän jälkeen tallentaa nämä tiedot. Tätä kehityksen osuutta ei kuitenkaan edistetty kehitystyön aikana riittävästi, jotta siitä olisi saanut tähän diplomityöhön sopivaa sisältöä.

3.3.3 Tietokanta

Sanoman tallennus tapahtuu Microsoft SQL tietokantaan, jonka kyvykkyys tallentaa ja tarjoaa dataa on riittävä tarkoitukseen. Tietokanta on samalla pysyvä tallennuspaikka raakadatalle, jota visualisoidaan tarpeen mukaan. Kuvassa 17 nähdään mittauslaitteen lähettämää mittaustulosta 10 peräkkäisen tuloksen osalta.

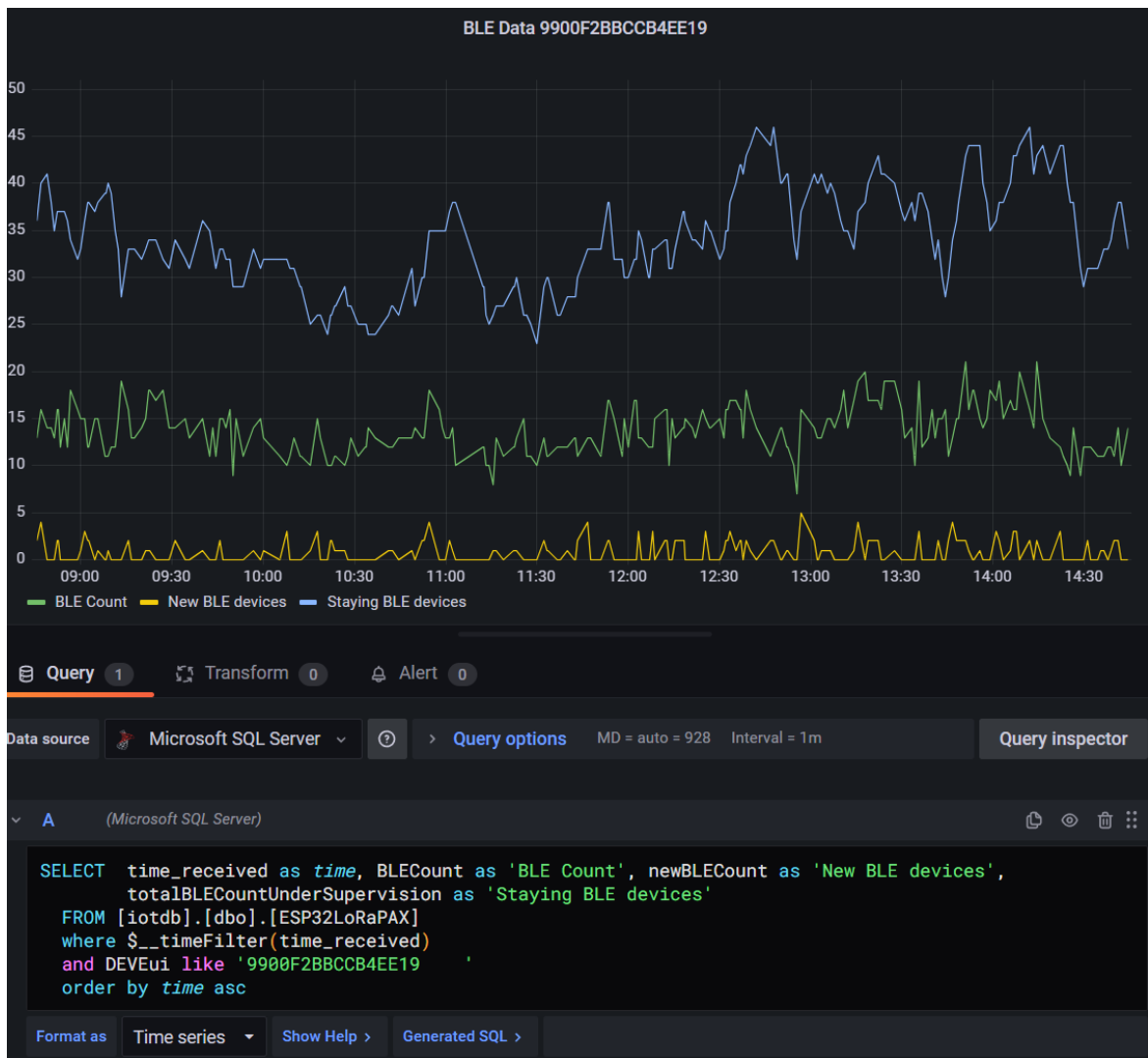
	time_received	DevEUI	FPort	LrrRSSI	LrrLAT	LrrLON	ESP32Batt	BLECount	newBLECount	totalBLECountUnderSupervision
1	2023-09-27 14:26:26.8196576 +03:00	9900F2BBCCB4EE19	1	-107	60,288528	24,947399	3268	14	0	38
2	2023-09-27 14:25:20.1578578 +03:00	9900F2BBCCB4EE19	1	-105	60,28854	24,947401	3268	9	0	38
3	2023-09-27 14:24:13.5733185 +03:00	9900F2BBCCB4EE19	1	-105	60,288536	24,947397	3268	10	0	40
4	2023-09-27 14:23:06.9246684 +03:00	9900F2BBCCB4EE19	1	-113	60,288528	24,947399	3268	11	0	44
5	2023-09-27 14:22:00.2455071 +03:00	9900F2BBCCB4EE19	1	-101	60,288517	24,947412	3268	12	3	44
6	2023-09-27 14:18:40.3218913 +03:00	9900F2BBCCB4EE19	1	-104	60,288509	24,947411	3268	13	0	41
7	2023-09-27 14:16:26.9999409 +03:00	9900F2BBCCB4EE19	1	-110	60,288521	24,947453	3268	15	0	44
8	2023-09-27 14:14:13.7413011 +03:00	9900F2BBCCB4EE19	1	-104	60,288498	24,947487	3268	21	2	43
9	2023-09-27 14:13:07.1067952 +03:00	9900F2BBCCB4EE19	1	-103	60,288486	24,947485	3268	14	0	41
10	2023-09-27 14:12:00.4700291 +03:00	9900F2BBCCB4EE19	1	-107	60,288475	24,947474	3268	16	2	46

Kuva 17. Otos mittauslaitteen tuottamasta datasta.

Tietokannan taulukosta tehdystä kyselystä, joka esitettiin kuvassa 17, nähdään mittauslaitteen tunnistetiedot eli DevEUI, signaalin voimakkuus, arvioitu sijainti GPS-koordinaatteina, akun jännite, sekä mittaustulokset Bluetooth-laitteiden lukumäärästä. Tietokantaan tallennetaan kaikki sanomat, eikä vanhempia sanomia poisteta.

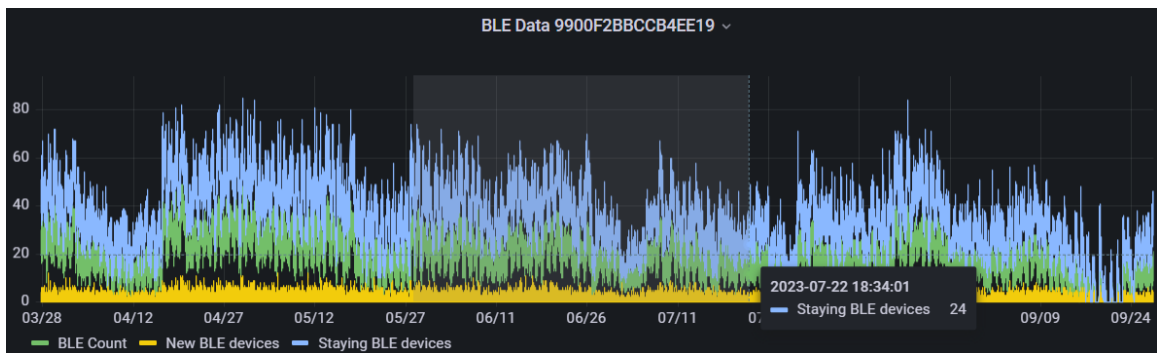
3.3.4 Datan visualisointi

Datan visualisointi on toteutettu Grafana Labs –sovelluksella, joka on ilmainen rajoitetuin ominaisuuksin (Grafana Labs, 2023). Sovellus on asennettu Microsoft Windows Server käyttöjärjestelmälle julkiseen verkkoon. Sovelluksen kyky esitellä dataa on erittäin hyvä juuri tämän tyyliiseen historiadataan, jota tässä diplomityössä käsitellään. Sovellus on nopea ja sovelluksessa on helppo luoda erilaisia esityksiä käyttäen tunnettuja kyselykieliä. Esimerkiksi MSQl kyselykieli on suoraan käytettävissä, kun luodaan visualisointeja mittausdatan pohjalta, kuten kuvassa 18 esitetään. Editoidessa kyselyä oli mahdollista nähdä reaaliaikaisesti miltä kuvaaja näytti.



Kuva 18. Grafana Labs -sovelluksen visualisoinnin editointinäkö, jossa kyselyn tuloksena esitetään kuvaajassa valitun ajanjakson arvot BLE Count vihreällä, New BLE devices keltaisella ja Staying BLE devices sinisellä.

Muokkausnäky, jossa on mahdollista testata SQL-kyselyjen toimivuutta reaaliaikaisesti niin, että kuvaaja esitti tulosta sen mukaan, miten kyselyä muokkasi, nähdään kuvassa 18. Kuvassa 19 nähdään mahdollisuus visualisoida pidempi ajanjakso, joka tässä tapauksessa on kuusi kuukautta. Harmaalla osoitettu alue esittää ominaisuutta maalata hiirellä alue, joka asetetaan kuvaajan ajanjaksoksi, jolloin sivu päivittyi vastaamaan uutta ajanjaksoa.



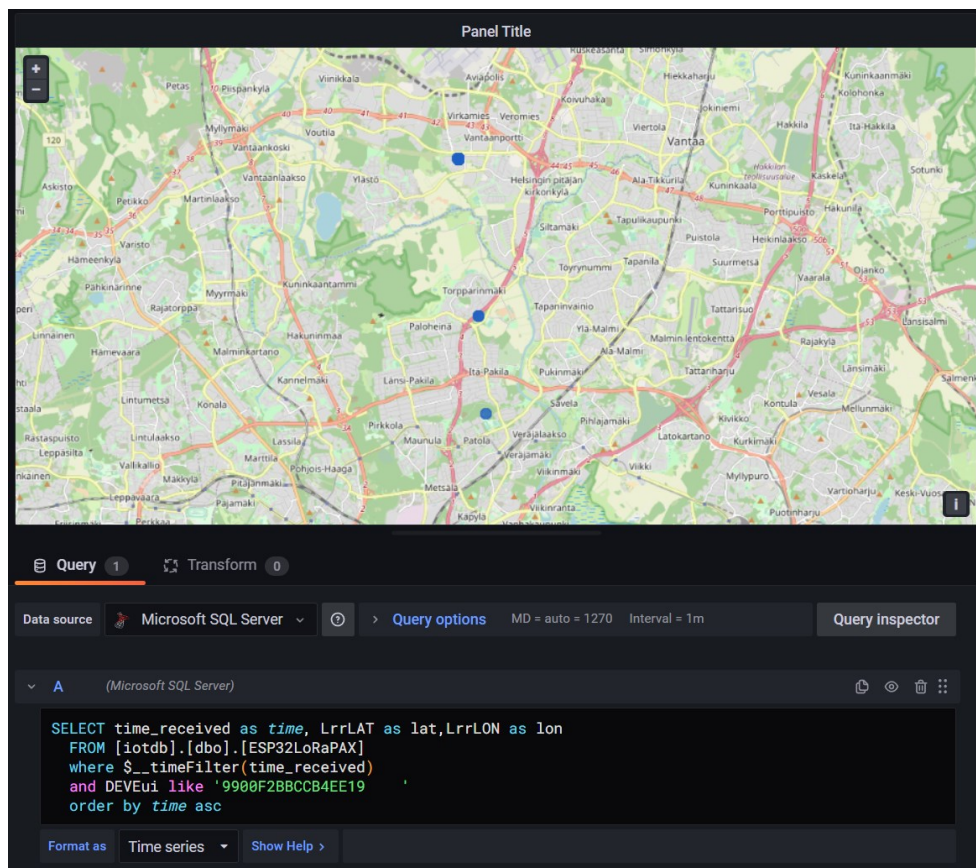
Kuva 19. Grafana Labs -kuvaaja kuuden kuukauden mittausdatasta.

Kuvassa 20 nähdään mittausarvoja noin 10 vuorokauden ajanjaksolta akun varaustasosta millivolteina, FPort-arvosta, sekä Digitan LoRaWAN-tukiaseman tulkitseman signaalin voimakkuudesta desibeleinä, joka oli saapunut mittauslaitteen LoRa-radiolta. Akun varaustason keskimääräinen trendi on noin 3270 mV tasossa, joka osoittaa jänniteregulaattorin tuottamaa jännitettä mikrokontrollerille. Jos ajanjaksoa vaihtoi, esimerkiksi maalamalla hiirellä aluetta, kuten kuvassa 19 esitetään, vaikutti se myös saman sivun muihin kuvaajiin, joita oli esimerkiksi kuvassa 20 esitetyt kuvaajat.



Kuva 20. Grafana Labs -kuvaajat useammasta datatyypistä.

Kuvassa 21 esitellään näkymää, jossa Geomap-kuvaaja näyttää datapisteiden sijainnit karttapohjalla. Datapisteiden sijainnit perustuvat GPS-koordinaatteihin, jonka Digitan palvelu on tuottanut. Kuten kuvasta 17 näimme sanoman mittaustulosten lisäksi, että tietokantaan oli tallennettuna GPS-koordinaatit jokaisen sanoman yhteyteen.



Kuva 21. Grafana Labs Geo-kuvaaja.

Kuvasta 21 näemme, että yhdelle mittauslaitteelle on osoitettu eri sijainteja kuvaajan kuuden tunnin ajanjakson aikana. Tämä on virheellinen tulkinta, koska mittauslaite oli ollut samassa paikassa koko kuvaajassa esitetyn ajanjakson aikana. Digitaalinen palvelu tuottaa sijaintitiedon, joka perustuu mittauslaitteen signaalivoimakkuuden tasoihin eri tukiasemilla. Tämä menetelmä osoittautuu epätarkaksi ainakin tämän mittauslaitteen kohdalla.

3.4 Järjestelmän kyvykkyydet

Tässä osiossa esitellään järjestelmän ominaisuuksia ja toimintamenetelmiä, joilla tuotettiin mittaustulos tarkasteltavaksi.

3.4.1 Mittauslaitteen energiahallinta

Mittauslaitteen keskimääräinen energiankulutus on pyritty saamaan mahdollisimman matalaksi. Komponentit on mitoitettu sekä valittu niin, että jokainen niistä kuluttaa mahdollisimman vähän energiaa. Mittauslaitteen toiminta on optimoitu niin, että mikrokontrollerin energiaa kuluttavien suoritusten pituudet on minimoitu. Mikrokontrollerin lepotila, jossa virrankulutus on pieni, hyödynnetään mittausten välissä. Mittauslaitteen virrankulutus lepotilan aikana on alle $6 \mu\text{A}$, joka sisältää mikrokontrollerin ja jänniteregulaattorin lepovirrankulutuksen. Tämä on toteutettu kutsumalla funktiota *esp_deep_sleep_start()*, jolle määriteltiin lepotilan ajanjakso funktiossa *esp_sleep_enable_timer_wakeup(sekuntia)*. Näitä funktioita kutsumalla asetettiin ESP32-mikrokontrolleri Deep Sleep –tilaan, jossa vain RTC-ajastin on toiminnassa. RTC-ajastimen tehtävänä on laskea aikaa, jolloin mikrokontrollerille annetaan käsky käynnistyä (Espressif Programming guide RTC).

Jänniteregulaattorin tyypillinen lepovirta on $1,6 \mu\text{A}$, joten yhdessä mikrokontrollerin kanssa saimme alle $8 \mu\text{A}$ virrankulutuksen lepotilassa. LoRa-moduulin lepovirta ei ollut oleellinen, koska mikrokontrollerin ulostulopinni on ohjelmoitu syöttämään LoRa-moduulille virtaa vain silloin, kun ohjelmakoodissa on tarve toimittaa LoRa-sanoma. Lataussäätimen lepovirta energiankeräyksen ollessa pois päältä on 0 A .

Kuten luvun 3.1.5 taulukosta 1 nähtiin, akun varastason laskiessa laiteohjelmiston suorittavan osuuden ajanjakso pieneni ja lepoaika pysyi vakiona tiettyyn pisteeseen asti, jonka jälkeen lepoaikaa kasvatettiin. Tällä tavalla kyettiin säästämään energiaa tilanteissa, joissa energian kerääminen oli syystä tai toisesta heikentynyt.

3.4.2 Kävijälaskenta

Mittauslaitteen mikrokontrollerin laiteohjelmistossa on ohjelmoitu optimaalisessa tilanteessa mittauskyvykkyys yhden minuutin välein, kuten kappaleen 3.1.5 taulukosta 1 nähdään. Eli mittauslaite mittaa viiden sekunnin ajanjakson aikana ympäröiviä Bluetooth-laitteita, tallentaa tulokset niistä mikrokontrollerin taulukkoon ja toimittaa LoRa-sanoman sillä tiedon mittaustuloksista.

Mittauslaitteen tuottama mittaustulos sisältää tiedon viimeisimmästä mittauksesta, sekä laskelman joka perustui edellisiin mittauksiin. Edelliset mittaukset tallennettiin RTC-muistin taulukkomuuttujaa, josta niistä laskettiin lukemat viimeisimmän mittaukserran arvon lisäksi. Mittaustieto on näin ollen viimeisin Bluetooth-laitteiden määrä, mittausalueella pysyvien laitteiden määrä, sekä mittausalueelle saapuvien uusien laitteiden määrä.

Mittausalue, jolta mittauslaite kykeni havainnoimaan Bluetooth-laitteita, ei ole tarkasti määritetty. Työn kokeiluluonteen vuoksi antennoja ei oltu suunnattu tai optimoitu tarkoitukseen. Arviolta mittaussäde on noin 20–40 metriä.

Viimeisin mittaustulos on aina lukema kappaleen 3.1.5 taulukosta 1 mukaisesta Bluetooth-skannauksen mittausajanjakson pituisesta havainnoinnista. Tuloksena on siis parhaassa tilanteessa 5 sekunnin aikana 20–40 metrin mittausalueella havainnoidut Bluetooth laitteet.

Mittausalueella pysyvien Bluetooth-laitteiden määrä on laskelma mikrokontrollerin RTC-muistin taulukkoon tallennettujen MAC-osoitteiden lukumäärästä. Lukumäärä kertoo havainnoitujen Bluetooth-laitteiden lukumäärän tietyn ajanjakson ajalta. Ajanjakso on ennalta ohjelmoitu arvo ohjelmakoodissa ja työn mittauslaitteissa ajanjaksot ovat välillä 10 – 60 minuuttia. Laiteohjelmistossa on funktio, joka siivosi taulukosta pois MAC-osoitteet, jotka olivat pidemmän aikaa taulukossa kuin määritellyn ajanjakson, ilman että niistä olisi tullut tuoreempia havaintoja.

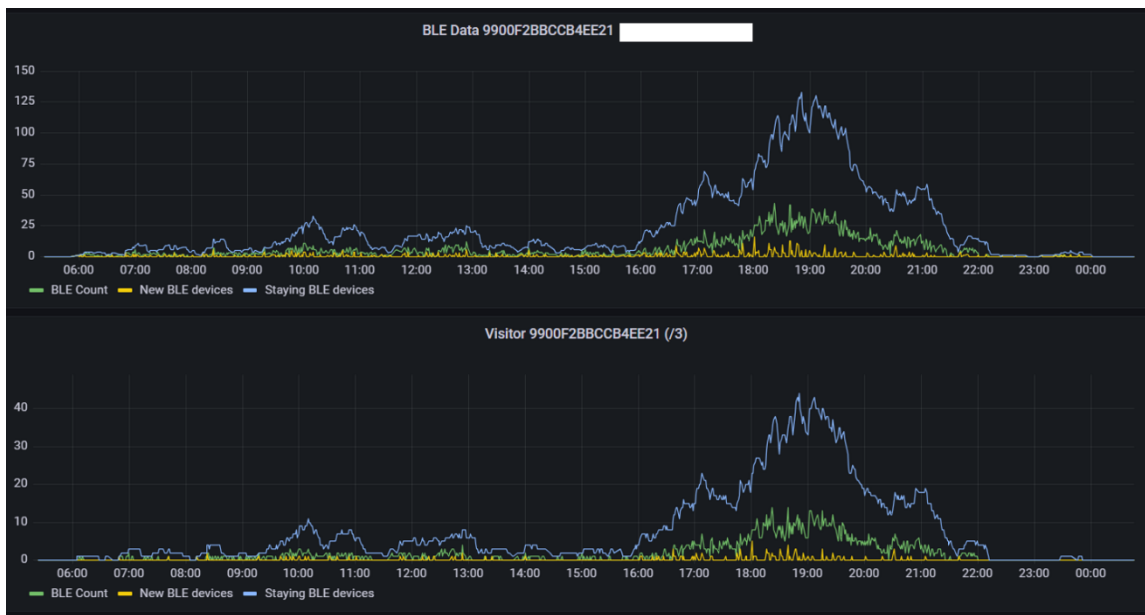
Mittausalueelle saapuvien uusien laitteiden määrä perustui myös RTC-muistin taulukon vertaamiseen viimeisimpään mittaustulokseen. Toisin sanoen pyrittiin tunnistamaan MAC-osoitteet, jotka oli havainnoitu viimeisimmässä mittauksessa, mutta niitä ei ollut vielä olemassa mittauslaitteen taulukossa.

Kyvykkyys tuottaa tieto mittausalueelta poistuvista Bluetooth-laitemääristä perustui siihen, että palvelimella ylläpidettäisiin tarkkaa tietoa mittausalueella pysyvistä Bluetooth-laitteiden ja uusien laitteiden lukumääristä, joista voitaisiin laskea mittausalueelta poistuvat määrät. Tämä ei kuitenkaan onnistunut tässä työssä mittaustuloksen tietoliikenne-epävarmuuden vuoksi, koska osa LoRa-sanomista ei saapunut palvelimelle asti.

Palvelimella tallennettava tieto piti sisällään mittauslaitteen tunnisteet, aikaleiman, LoRa-sanoman toimitustietoja, akun varaustason, sekä mittaustulokset. Näistä voitiin tuottaa reaaliaikainen kaavio mittaustilanteesta. Mittaustieto itsessään ei kertonut kävijöiden määrää,

mutta lukemien perusteella voidaan tehdä arvioita ihmismääristä, esimerkiksi arvioimalla mittauskohteen tyyppin mukaan, millainen kävijäkuunta kohteessa keskimääräisesti käy.

Voimme ajatella esimerkkitittauskohteen, jossa tyyppillinen kävijä on ulkoileva nuori tai aikuinen. Mittauskohde sijaitsee ulkoilualueella metsäalueella. Voimme olettaa, että kävijällä on mukana puhelin, älykello, älysormus ja mahdollisesti langattomat kuulokkeet musiikkia varten. Näiden yhdistelmästä saamme jo 4 mahdollista Bluetooth-laitetta. Mahdollista on myös, että kuntoilijalla on vain puhelin eli 1 mahdollinen Bluetooth-laite, tai käyttäjällä on kaikki esimerkin laitteet, mutta kuulokkeet ovat langattomat nappikuulokkeet, joissa jokainen kuuloke on yksi Bluetooth-laite, sekä tämän lisäksi latauskotelo, joka on myös todennäköisesti yksi Bluetooth-laite. Eli tällöin Bluetooth-laitteita voisi olla 6, joten voimme arvioida, että laitteita voi olla väliltä 1 – 6 kutakin henkilöä kohden. Tällä menetelmällä voimme luoda erittäin karkean arvion kyseisestä mittauskohteesta, joka olisi keskimäärin 3 Bluetooth-laitetta kutakin kuntoilijaa kohden. Kuvassa 22 verrataan Bluetooth-laitemäärämittauksia ja arviota kävijämääristä.



Kuva 22. Arvioitu kävijämäärä Grafana Labs –kuvaajassa.

Kuvan 22 ylemmässä kuvaajassa esitetään mittalaitteen havaitsemien Bluetooth-laitteiden lukumäärä ja alemmassa kuvaajassa tämän perusteella arvioitu kävijämäärä, joka oli suoraan laskettu jakamalla Bluetooth-laitteiden määrät kolmella, joka perusteltiin edellisessä kappa-

leessa. Kuvaajia tulkitsemalla ja kerrointa 3 käyttämällä on perusteltua olettaa, että jos uniikkien Bluetooth-laitteiden alueella oleskelevien määrän on havaittu olevan 125, kuten ajan- kohdassa 19:00 on havaittu, on alueella oleskelevien kävijämäärä todennäköisesti ollut yli 40. Tämä on vain hyvin karkea esimerkki, miten Bluetooth-laitemääristä voidaan arvioida kävijämääriä.

3.4.3 Mittauslaitteen tiedonsiirto

LoRaWAN-verkon rajoitteiden vuoksi, mittauslaitteen LoRa-sanoma on pakattava mahdollisimman pieneksi. LoRa-sanoman sisältö tulee olla HEX-muodossa. LoRa-sanoman niin sanottuihin pakollisiin tietokenttiin kuului laitteen tunnistetiedot ja salausavaimet. Näiden lisäksi sanomaan on mahdollista asettaa Payload, eli kuorma. Kuorman mukana kuljetettiin mittauksia mikrokontrollerilta. Pakolliset tietokentät esitetään kuvassa 23, jossa on ote laiteohjelmiston koodista.

```
#define BOXNUM 0x00
uint8_t VERSION = 0x00;

static const PROGMEM u1_t NWSKEY[16] = { 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00 };
static const u1_t PROGMEM APPSKEY[16] = { 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00 };
static const PROGMEM u1_t DEVEUI[8] = { 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, BOXNUM };
static const u4_t DEVADDR = 0xccdde00 | BOXNUM ; // <-- Change this address for every node!
```

Kuva 23. LoRa-sanoman pakolliset tietokentät.

Kuten kuvassa 23 nähdään, salausavaimet annettiin 16 tavun kokoisina ja laitetunniste 8 tavun kokoisena. Nämä avaimet toimitettiin LoRa-sanoman mukana.

Kuvassa 24 esitetään, miten LoRa-sanoman kuorma rakennettiin sanomaksi, jonka koko mittauslaitteen tapauksessa on aina 7 tavua. Ensimmäinen tavu on varattu mitatulle akun varaus- tasolle, joka oli skaalattu välille 0 – 255, eli yhdeksi tavuksi. Seuraavat kaksi tavua sisälsivät tiedon viimeisimmästä mittauksesta. Mittausalueelle saapuvien uusien laitteiden määrä asetettiin seuraavaan kahteen tavuun. Viimeiset kaksi tavua on varattu mittausalueella pysy- vien laitteiden määrälle.

```

//ESP32 BATTERY VOLTAGE
mydata[0] = (uint16_t)ESPBatteryVoltageScaled;

//BLE COUNT FROM SCAN RESULT
mydata[1] = (uint16_t)BLECount >> 8;
mydata[2] = (uint16_t)BLECount;

//NEW BLE DEVICES ON ARRAY
mydata[3] = (uint16_t)newBLECount >> 8;
mydata[4] = (uint16_t)newBLECount;

//TOTAL BLE DEVICES ON ARRAY
mydata[5] = (uint16_t)onTheArrayRecordsCount >> 8;
mydata[6] = (uint16_t)onTheArrayRecordsCount;

```

Kuva 24. LoRa-sanoman kokoaminen.

LiPo-akun varaustason tuloksen skaalaus yhteen tavuun toteutettiin yksinkertaisella menetelmällä, joka esitellään kuvassa 25. ESP32-mikrokontrollerin jännitteen mittaustulos ilmoitetaan millivolteina, jolloin lukema on normaalioloissa välillä 3000 – 4400 mV. Asetamme alarajaksi 2500 mV, jolloin esimerkiksi jännitelukema 3700 mV tuottaa skaalauksen jälkeen lukeman 150, joka mahtuu yhteen tavuun. 4540 mV jännitelukema tuottaisi suurimman luvun yhdelle tavulle, eli 255. Tämä skaalattu jännitelukema, joka kuvassa 24 ensimmäisenä lisättiin kuormaan, toimitettiin LoRa-sanoman mukana eteenpäin palvelimelle.

```

//CALCULATE SCALE A BYTE TO 1 BYTE. CALCULATION FORMULAS LOCATED IN EXCEL DOCUMENT
int ESPBatteryScaleLOW = 2500;
int ESPBatteryScaleFactor = 8;
ESPBatteryVoltageScaled = (ESPBatteryInt-ESPBatteryScaleLOW)/ESPBatteryScaleFactor;

```

Kuva 25. Akun jännitteen skaalaus.

Muille mittaustuloksille annettiin 2 tavun kokoiset osuudet LoRa-sanoman kuormassa, kuten kuvasta 24 nähdään, joka mahdollisti mittaustuloksen väliltä 0 ja 65535. Tällä mahdollistettiin hyvinkin suurien mittaustuloksien kerääminen mittauskohteista.

Kuvassa 26 esitellään funktion kutsuminen muuttujalla mydata, joka sisälsi kuvassa 24 esitellyn LoRa-sanoman kuorman. Funktiolle tuotiin myös FPort arvo, joka välittää mikrokontrollerin toimintatasosta tiedon eteenpäin palvelimelle, kuten kappaleen 3.1.5 taulukossa 1 tasot esiteltiin.

```

// Prepare upstream data transmission at the next possible time.
Serial.print("Sending data with fport: ");
Serial.println(fport);
LMIC_setTxData2(fport, mydata, sizeof(mydata), 0);
//LMIC_setTxData2(fport, sendData, sizeof(sendData), 0);
Serial.println(F("Packet queued"));

```

Kuva 26. LoRa-sanoman lähetysfunktion kutsuminen.

Kuvan 26 esitellyn ohjelmakoodin suorittamisen jälkeen tiedonsiirto mittauslaitteelta päättyi niin, että LoRa-moduulin sisääntulojännite katkaistiin, eikä mittauslaite jäänyt kuuntelemaan sanoman paluuviestiä, jossa olisi ollut tieto sanoman perille menosta. Tällä säästettiin suoritukseen käytettävää aikaa.

3.4.4 Mittauslaitteen sääilmiöiden sietokyky

Mittauslaitteen tavanomainen sijoituskohde oli ulkotila, jossa mittauslaite oli alttiina auringonpaisteelle, vesisateelle, kylmälle ja kuumalle. Komponenttien eri lämpötilojen sietokyky on todennäköisesti parempi kuin LiPo-akun. Mittauslaite oikein sijoittamalla, voitiin suojata suora auringonpaiste mittauslaitteen koteloon, jolloin LiPo-akku ei pääsisi kuumenemaan. Tämä toteutettiin käytännössä niin, että auringkopaneeli oli auringonvalon ja kotelon välissä.

Koteloinnin vedenpitävyys oli tarkoitus asettaa tasolle, jossa suoraan mittauslaitteeseen kohdistuva runsas vesisade ei aseta komponentteja alttiiksi kosteudelle. Läpiviennit toteutettiin poraamalla reikä koteloon ja liimaamalla reikä umpeen kaapelin asettamisen jälkeen.

Kylmän lämpötilan sietokyky oli teoriassa rajoitteena lähinnä LiPo-akulle, jonka varauskyky ja jännite laskevat lämpötilan laskun seurauksena. Tätä ei otettu huomioon millään tavalla suunnittelussa ja käytännössä ohjelmakoodin annetaan tulkita energiansäästötasot sen mukaan, mikä jännite akulta mitattiin. Todennäköisyys akun varauksen tyhjentymiseen on pieni, koska auringkopaneeli tuottaa myös pilvisellä säällä latausjännitteen ja energiansäästötasot ohjelmakoodissa pitävät huolen siitä, että energiaa ei kuluteta juurikaan jännitteen ollessa matala.

3.4.5 IoT-järjestelmä

Tässä diplomityössä termi IoT kattaa kaiken sensorilta mittaustuloksen esittämiseen kaavioissa. Työn IoT-järjestelmään kuului kyky vastaanottaa, käsitellä, tallentaa, esittää, muokata ja ohjata dataa. Järjestelmä on asennettuna kokonaisuudessa yhdelle palvelimelle, jossa jokainen komponentti suorittaa omaa tehtäväänsä. Skaalautuminen ylöspäin on mahdollista vain lisäämällä virtuaalipalvelimen kapasiteettia.

Järjestelmän kyvykkyyksiin kuuluu vastaanottaa kohtuullisia määriä viestejä Powershell-sovelluksen kautta. Sovellukseen kuuluu kyky validoida ja parsia vastaanotettu data sopivaksi tietokantatallennukseen. Tietokannan suurin sallittu tallennustila lisensoinnin johdosta on 10 GB. Tämä asettaa rajoitteita suurien raakadatamäärien tallentamiseen. Järjestelmä mahdollisti datan esittämisen graafisesti edellä esitetyn Grafana Labs –sovelluksen avulla. Myös Powershell-sovelluksen mahdollistama rajapintatoteutus toimi toiseen suuntaan, eli raakadatasta voidaan luoda yksinkertainen rajapinta tietoa hakeville toimijoille. Powershell-sovelluksien konfigurointi tehdään käytännössä aina koodia muokkaamalla. Esimerkiksi uuden mittauslaitteen liittäminen validointiprosessiin vaati muutaman rivin lisäämistä suoritettavaan koodiin. Tämän kokoluokan tarkoitukseen ei ollut järkevää rakentaa käyttöliittymiä.

4 Tulokset

Tässä luvussa käydään läpi työn tulokset joiden perusteella tehdään huomioita mittaustuloksista ja oletuksien pohjalta luomme arvioita kävijämääristä. Luvussa käydään läpi millaisiin ympäristöihin ja olosuhteisiin mittauslaite soveltuu sekä millaisia ongelmia työn aikana on tullut vastaan.

4.1 Mittauskohteet

Tähän työhön esittelemme kolme eri mittauskohdetta, jossa mittalaitteen kykyä arvioida käyttäjämääriä testattiin kokeellisesti. Helsingissä sijaitsevan kuntoportaiden mittauslaite ja Yleisen saunan mittauslaite ovat komponenteilta ja ohjelmakoodiltaan identtiset, mutta käytännössä vain kotelointi ja aurinkopaneeli ovat eri mallisia. Kolmas mittauskohde, Helsingin edustan saaren, on aikaisempi kokeilu, jossa kotelointi, komponentit ja ohjelmakoodi eriävät uudemmissa mittauslaitteista.

Valitut mittauskohteet olivat testitavoitteiden mukaisesti sellaisia, että niissä ulkoilijat käyvät tekemässä aktiviteetteja kohteen käyttötarkoituksen mukaan. Tavoitteena oli siis saada kohteita, joissa ei ole havaittavissa ylimääräisiä Bluetooth-laitteita, jotka eivät kuulu mittaustavoitteeseen. Esimerkiksi jos ulkoilun alueen ohi kulkisi autotie, josta jatkuvalla syötöllä tulisi mittausalueelle havaittuja Bluetooth-laitteita, olisi mittaustuloksen tulkitseminen hankalaa.

Ensimmäinen mittauskohde oli Helsingissä sijaitsevan täyttömäen mittauslaite, joka oli sijoitettu mäelle johtavan kuntoportaan keskikohtaan. Tämä sijainti oli siitä mielenkiintoinen, että samassa kohteessa sijaitsi myös toinen kävijälaskentaseensori, joka mittasi kävijöitä 3D-kameran avulla. Sijainti oli hyvä testikohteeksi myös siitä syystä, että jos alueella ei ole ulkoilijoita, saimme mittaustulokseksi 0, koska mittauslaitteen havainnointialueella ei ollut staattisia Bluetooth-laitteita.

Toinen kohde oli Helsingissä sijaitseva yleinen rantasauna-alue, joka oli aktiivien vapaaehtoisesti ylläpitämä. Sauna-alueen kävijätieto oli haluttu lisä heidän jo olemassa olevaan kattavaan mittaustoimintaan, joka kattoi esimerkiksi saunojen ja uimaveden lämpötilat, sekä

ulkoiset sääolosuhteet. Kiinnostus laitteen tuottamia mittaustuloksia kohtaan oli tästä syystä hyvin korkea. Tämä mahdollisti monipuolisten havaintojen muodostamista Bluetooth-laitteiden lukumäärästä suhteessa kävijämääriin. Yleisen sauna sijainti oli myös tähän työhön sopiva, koska se sijaitsi joutomaalla, johon ei ihmisillä ollut muuta asiaa kuin tulla saunomaan ja uimaan tai viettämään aikaa sauna-alueella.

Kolmantena tarkastelun kohteena oli Helsingin edustalla sijaitseva saari, joka oli ollut mittaustauskohteena jo vuodesta 2019. Mittauslaite sijaitsi keskeisellä grillauspaikalla puuhun asennettuna saaren länsipuolella. Mittauslaitteen esikokeiluversio oli hieman yksinkertaisempi ja mittaustulos mitä mittauslaite tuotti, oli yksinkertaisempaa. Mittauslaitteen toiminnallisuus on mitata Bluetooth-laitteiden määrä, mutta myös havaittujen WIFI-pakettien datasta parsittujen MAC-osoitteiden määrä. Mittauslaite on ollut toiminnassa yhtäjaksoisesti tämän työn kirjoittamiseen asti asennuspäivästä lähtien, joten laitteen toimintavarmuuden puolesta siitä sai arvokasta tietoa.

4.2 Datan analysointi

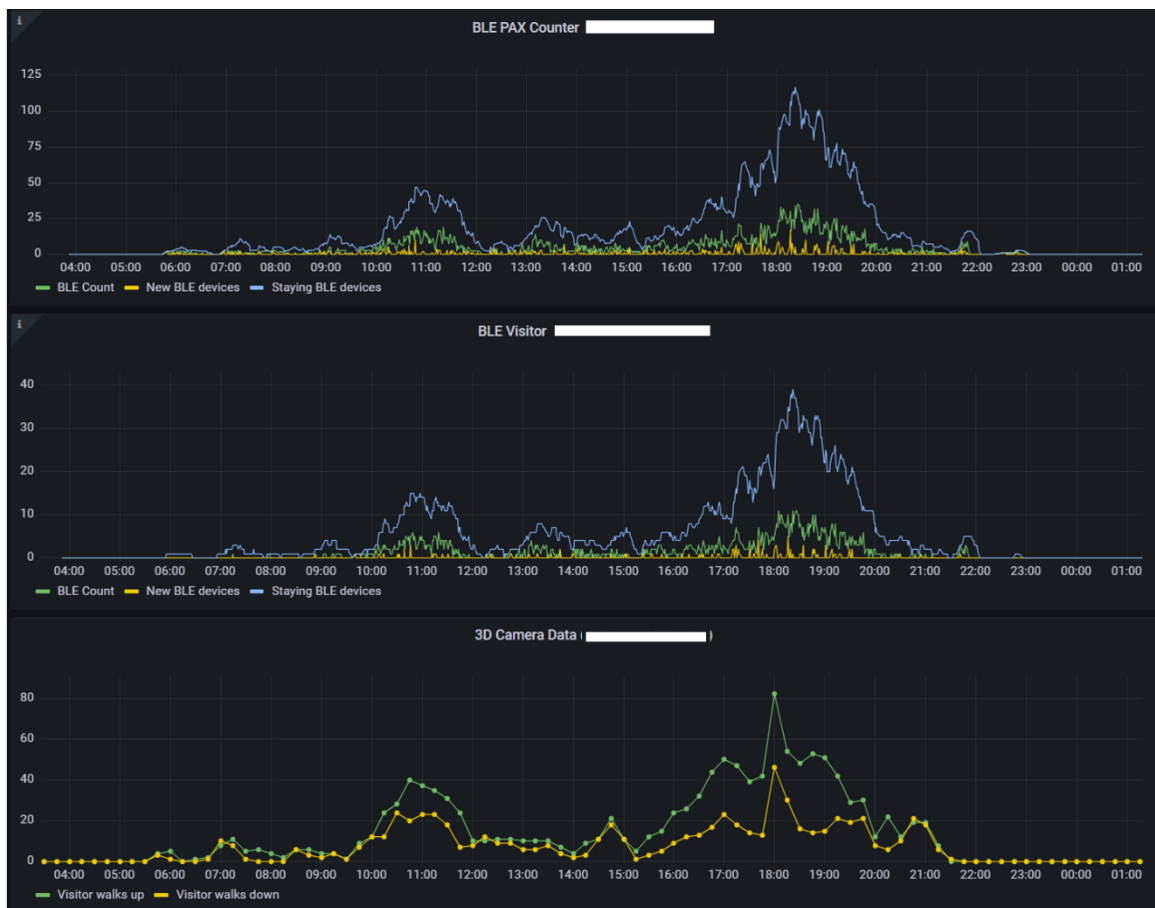
Mittauslaitteen tuottamaa dataa tulee tulkita aina sen mukaan millaisessa sijainnissa mittauslaite mittaa Bluetooth-laitteiden määrää. Voimme tehdä johtopäätöksiä sen mukaan, miten arvioimme mittaustauskohteen kävijöiden iän jakautuvan, tai millaista ihmisryhmää kohteessa tavataan. Esimerkiksi urheilutapahtumassa on kaikenikäisiä ihmisiä, mutta hyvin monella on puhelimen lisäksi älykello ranteessa, Bluetooth-sykevyö rinnassa ja lisäksi edellä mainittuja Bluetooth-laitteita. Toisessa tilanteessa voimme mitata kaukaisen vaellustuvan kävijöitä, joilla todennäköisesti on puhelimet mukana, mutta ne voivat olla lentotilassa tai pois päältä.

4.2.1 Täyttömäen kuntoportaat

Helsingin täyttömäen kuntoportaiden mittauskohde oli siitä erilainen muihin kohteisiin verrattuna, että saimme vertailutuloksia API-rajapinnan kautta samassa sijainnissa olevan 3D-kameran tuloksista.

Kuvassa 27 esitetään vajaan vuorokauden pituisen mittausajanjakso kummaltakin vertailtavasta mittaustauslaitteesta. Ylemmässä kuvaajassa nähdään työssä esitellyn mittauslaitteen tuot-

tama mittausdata, jossa on eriteltyä vihreällä Bluetooth-laitteiden lukumäärä kullakin mittausajankohdalla, keltaisella uusien uniikkien Bluetooth-laitteiden lukumäärä, sekä sinisellä alueella uniikkien pysyvien Bluetooth-laitteiden lukumäärä. Vastaavasti alemmassa kuvaajassa näkyy 3D-kameran tuottama data, joka mittaa portaita nousevat kävijät vihreällä ja laskevat kävijät keltaisella. 3D-kamera tuottaa mittaustulosta pelkästään portaista, kun mittauslaite tuottaa mittaustulosta, joka kattaa alueen reilusti portaiden ulkopuolelta. On tärkeää huomauttaa, että mittauskohteen kuntoportaiden vierestä pystyi myös kulkemaan hiekkatietä pitkin, joten 3D-kameran tuottama data ei ole täysin vertailukelpoista kehitetyn mittalaitteen kanssa, mutta se toimii tärkeänä referenssinä tuloksille.

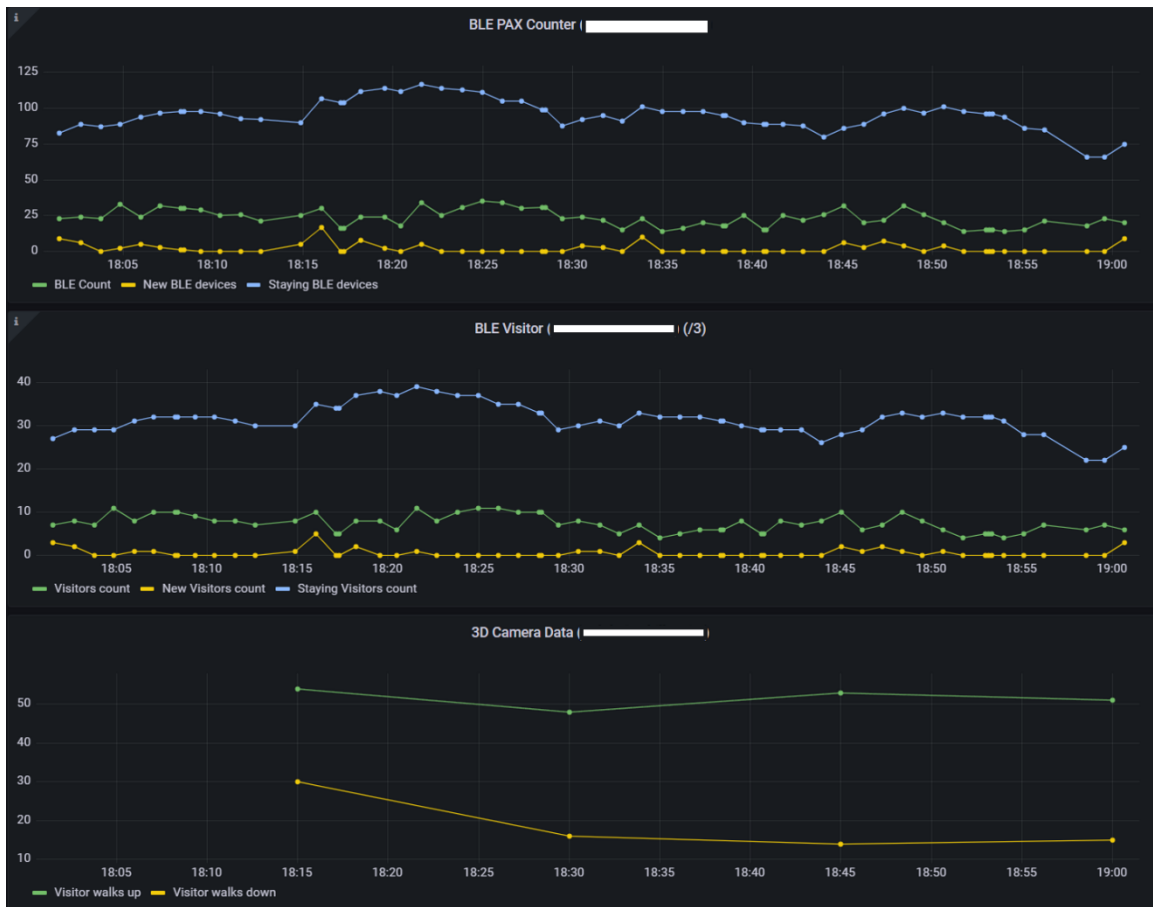


Kuva 27. Mittauslaitteen tulos verrattuna 3D-kameran tulokseen.

Kuvasta 27 nähdään miten työssä kehityn mittalaitteen mittaustulokset korreloivat 3D-kameran tuloksen kanssa. Alin kuvaaja esittää 3D-kameran mittaustuloksia, ylin mittauslaitteen havaitsemia Bluetooth-mittaustuloksia ja keskimäinen arvioitua kävijämäärää, lu-

vussa 3.4.2 esitellyn arvion pohjalta, eli jaamme kolmella mittauslaitteen Bluetooth-laiteluketat. Arvio kolmesta Bluetooth-laitteesta kullakin käyttäjällä ei mene aivan yksi yhteen 3D-kameran tuottaman mittaustuloksen kanssa, jos tarkastelemme vihreää BLE Count mittaustarvoa kuvan 27 keskimmäisestä kuvaajasta. Käytännössä on tärkeää huomata, että käyrien trendi on samanlainen ja indikoi sitä, että portaista kulkevilla (tai niiden läheisyydessä kulkevilla) henkilöillä on mukana Bluetooth-laitteita.

Jos tutkimme mittaustuloksia 3D-kameran osalta kuvan 27 ajankohdalta 18:01 – 19:01, jossa 3D-kamera tuottaa mittaustulokset viidentoista minuutin välein, menneeltä 15 minuutin ajanjaksolta, saamme ylöspäin menevien kävijöiden määräksi $54 + 48 + 53 + 51 = 206$ ja alaspäin menevien kävijöiden määräksi $30 + 16 + 14 + 15 = 75$. Yhteensä 3D-kamera oli havainnut tunnin aikana 281 kävijää, kuten yhden tunnin ajanjaksolle asetettu kuvaaja, joka esitetään kuvassa 28. Tästä huomataan, että alas tulevien kävijöiden määrä oli vähäisempi. Todennäköisesti tämä on osittain johtunut siitä, että alas tullessa osa kävijöistä kävelee hiekkatietä alas portaiden vierestä. Tämä tieto perustuu diplomityön tekijän omaan havainnointiin useina eri käyntikertoina. Kuvasta 27 nähdään että, 3D-kameran ylöspäin ja alaspäin liikkuvien kävijöiden lukumäärät poikkesivat toisistaan silloin kun alueella näyttäisi olleen ruuhkaa, eli havaitut määrät ovat olleet korkeita. Tästä voisi päätellä sen, että mahdollisissa ruuhkatilanteissa kuntoportaiden sijaa alas laskeutumiseen käytetään viereistä hiekkatietä. Voisimme tehdä johtopäätöksen, että kävijöiden ylöspäin mitattu määrä tulisi olla lähes sama kuin alaspäin mitattujen määrä, varsinkin kun haluamme vertailla tulosta Bluetooth-laitteiden määriin, joiden mittaustapahtuu myös hiekkatieosuudelta. Eli yhteenlaskettuna arvioitu kävijämäärä 3D-kameran tuottamasta mittaustuloksesta tunnin ajalta olisi 412.



Kuva 28. Mittauslaitteen tulos tunnin ajalta verrattuna 3D-kameran tulokseen.

Taulukossa 3 nähdään vertailuun tuotavat summat yhden tunnin ajanjaksolta, joista Bluetooth-lukemat ovat laskettuja summia mittaustuloksista ja 3D-kameran luku on arvioitu summa. Voimme tehdä johtopäätöksen 3D-kameran mittaustuloksen ja BLE Count lukeman arvioidusta kävijämäärästä, joka arvioitiin olevan kolme Bluetooth-laitetta yhtä kävijää kohden. Näemme, että lukemat ovat hyvin lähellä toisiaan. 3D-kamera on havainnut arviolta 412 ohitusta ja mittauslaite oli havainnut 1367 Bluetooth-laitetta tunnin ajanjakson aikana. Jos olettaisimme, että mittauslaitteen ja 3D-kameran havainnointikyky mittausalueella olisi ollut 100 %, sekä että kävijät olisivat kulkeneet portaita ylös ja portaita tai hiekkatietä alas, voisimme tehdä johtopäätöksen, että kyseisellä mittausajankohdalla Bluetooth-laitteita kuttakin kävijää kohden olisi ollut 3,32, joka saadaan laskemalla taulukon 3 BLE Count summa 1367 jaettuna 3D-kameran arvioidulla kävijämäärällä 412.

Voimme kuitenkin todeta, että mittauslaitteen havainnointikyky ei ollut samalla tasolla 3D-kameran kanssa, koska mittauslaite on lepotilassa yhden minuutin mittausten välillä, jolloin

Bluetooth-laitteita jäi todennäköisesti havainnoimatta, toisin kuin 3D-kamera, jonka mittasi keskeytyksettä. Myöskään mittauslaitteen viiden sekunnin Bluetooth-laitteiden mittausaika, ei kata kaikkien laitteiden Bluetooth-mainostusväliä. On myös mahdollista, että osa kävijöistä nousi hiekkatietä ylös ja laskeutui alas hiekkatietä, jolloin niiden osalta, 3D-kameran mittaustulosta ei saatu.

Taulukossa 3 esitetään ne mittaustulokset, jotka ovat tarpeellisia arvioita luodessa.

Taulukko 3. 3D-kameran ja mittauslaitteen mittausarvot tunnin tarkasteluajalta.

	Summa	Keskiarvo	1. mittaus	Korkein lukema	Arvioitu kävijöiden ohitusmäärä
BLE Count	1367				
New BLE devices	114			17	
Staying BLE devices		95,31	83		
3D-Camera	281				412

Jos yhtä kävijää vastaava Bluetooth-laitteiden lukumäärä oli arvioitu olevan 3,32, voimme todeta, että keskimääräinen alueella yhtäaikaisesti oleskelevien kävijöiden määrä tunnin mittausjakson aikana, joka kuvassa 28 nähdään, oli 28,72. Tämä saatiin laskettua yhtälöllä (4.1)

$$\frac{B_{stayAvg}}{\frac{B_{countSum}}{V_{countSum}}} = \text{kävijöiden määrä}, \quad (4.1)$$

jossa $B_{stayAvg}$ on taulukosta 3 yhtäaikaisten Bluetooth-laitteiden keskiarvo mittausjakson aikana, $B_{countSum}$ on Bluetooth-laitteiden ohitusmäärä mittausjakson aikana ja $V_{countSum}$ on 3D-kameran mittaama ohitusmäärä mittausjakson aikana.

Mittausjakson arvioitu uniikki Bluetooth-laitemäärä lasketaan summaamalla taulukon 3 Staying BLE devices ensimmäinen mittaustulos 83 ja New BLE devices summa 114, josta saadaan 197 Bluetooth-laitetta mittausjakson aikana. Tämä luku jaetaan luvulla, joka saadaan jakamalla BLE Count 3D-kameran arvioidulla ohitusmäärällä, jolloin saadaan arvioituksi kävijämääräksi 59,37. Yhtälöllä (4.2) voidaan laskea mittausjakson kävijämäärä

$$\frac{B_{stay1st} + B_{newSum}}{\frac{B_{countSum}}{V_{countSum}}} = \text{kävijöiden määrä}, \quad (4.2)$$

jossa $B_{stay1st}$ on yhtäaikaisten Bluetooth-laitteiden aloituslukumäärä mittausjakson alusta, B_{newSum} uusien kävijöiden yhteismäärä mittausjakson aikana, $B_{countSum}$ on Bluetooth-laitteiden ohitusmäärä mittausjakson aikana ja $V_{countSum}$ on 3D-kameran mittaama ohitusmäärä mittausjakson aikana.

Arvioidun kävijämäärän perusteella voidaan laskea arvioitu mittauspisteen ohituslukumäärä kutakin kävijää kohden. Jos mittauspiste ohitettiin 412 kertaa ja kävijöitä oli 59,37, ohitti kukin kävijä mittauspisteen 6,94 kertaa. Eli arviolta kukin kävijä nousi portaat ylös 3,47 kertaa, kun edellinen tulos jaetaan kahdella.

Tämä on yksinkertainen oletus yhden tunnin mittausdata-analyysistä. Työn kannalta tärkeää tässä on se, että pystymme mittaamaan kahdella eri toteutuksella samaa mittauskohdetta ja luomaan siitä jonkinlaisen johtopäätöksen. Kuten kuvasta 27 nähtiin, voimme havaita ylimmän ja alimman kuvaajan välillä yhteneväisyyden, katsomatta tarkemmin lukuja. Tarkempi analyysi kävijämäärien ennustamiseksi on hyvin vaikeaa, koska muuttuvia tekijöitä ja epävarmuutta on paljon.

4.2.2 Yleinen sauna

Yleisen saunan osalta, voimme pyrkiä hyödyntämään luvusta 4.2.1 saatua tietoa arvioidusta kävijämäärästä suhteessa mittaustulokseen. Yleisen saunan mittauskohteessa ei ollut mahdollisuutta verrata mittaustulosta verrokkituloksiin. Voimme havainnoida kuvan 29 vuorokauden pituista mittausjaksoa ja hyödyntää aiemman luvun 4.2.1 johtopäätöksiä hyvien tuloksien saamiseksi. Jos käytämme edellisen luvun 4.2.1 Bluetooth-laitteiden lukumäärää 3,32 yhtä kävijää kohden myös tässä arviossa, voimme laskea Bluetooth-laitemääräarvion kuvan 29 mittausjaksolta, jossa tärkeät luvut esitetään kuvan oikeassa laidassa taulukkona.



Kuva 29. Yleisen saunan yhden vuorokauden mittaustulos Grafana Labs -sovelluksen kuvaajassa.

Mittausjakson arvioitu uniikki Bluetooth-laitemäärä lasketaan summaamalla kuvan 29 Staying BLE devices ensimmäinen mittaustulos 3 ja New BLE devices summa 1110, josta saadaan 1113 Bluetooth-laitetta mittausjakson aikana. Tämä luku jaetaan luvulla 3,32, joka todettiin kertoimeksi kuntoportaiden mittausajakohdan vertailun perusteella. Arvioiduksi kävijämääräksi vuorokauden mittausjakson aikana saatiin näin ollen 335,24 kävijää.

Tässä tapauksessa loimme arvion 3D-kameran ja mittauslaitteen tuottamasta mittausdatasta niin, että voimme karkeasti arvioida toisessa sijainnissa vuorokauden kävijämäärän. Arvio perustuu siihen, että kävijöiden toimintatapa olisi samanlainen kummassakin kohteessa. Tämänkaltainen arvio ei todennäköisesti pidä paikkaansa, koska toisessa mittauskohteessa mitaamme ulkoilijoiden ja toisessa saunojen määrää. Mahdollisesti kuntoportailta toteutettua 3,32 kerrointa voisi hyödyntää samankaltaisessa sijainnissa, joissa kävijät oleskelevat kohteen läheisyydessä aktiivisesti, jonka jälkeen he poistuvat alueelta.

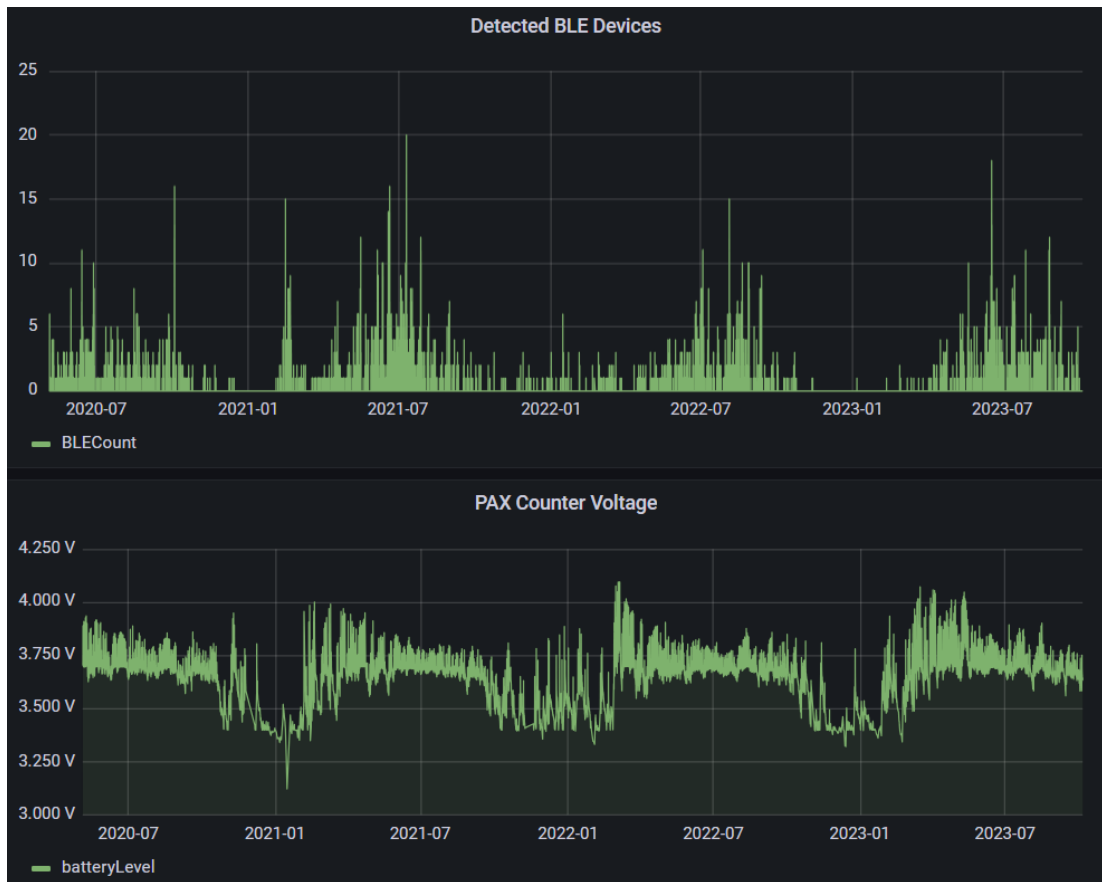
4.2.3 Saari

Mittauskohde Helsingin edustan saarella on tuottanut mittaustietoa vuodesta 2019 aina tämän diplomityön valmistumiseen asti. Mittauslaite, joka nähdään kuvassa 30, on varhainen kokeiluversio, jossa mikrokontrollerina toimi Espressif ESP8266. Akun energiansäästötoiminnallisuudet ja skannauksen pituus eroaa luvussa 3.1 esitellystä mittauslaitteesta.



Kuva 30. Mittauslaite mäntyyn asennettuna.

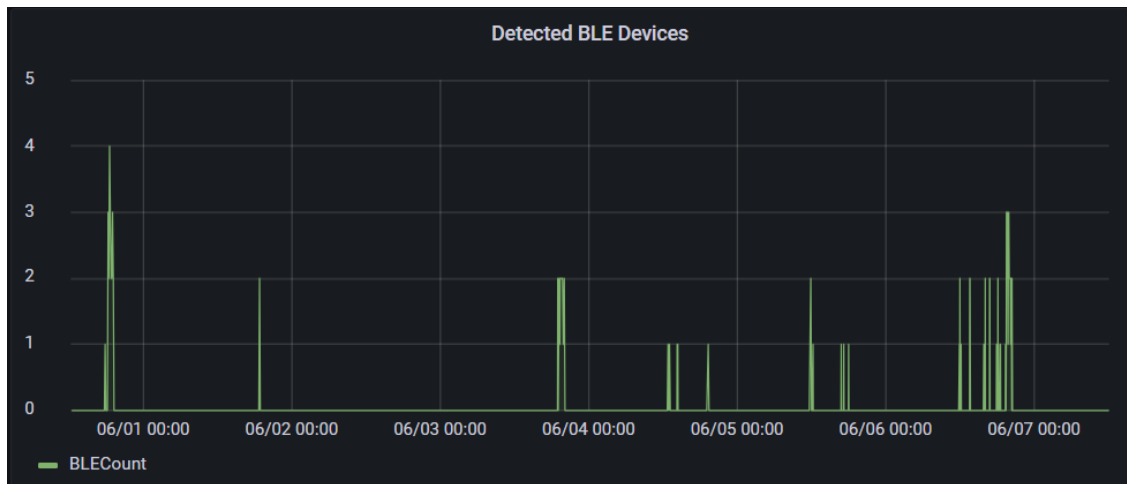
Tarkastelemme tässä luvussa erityisesti mittauskohteen luonnetta ja miten se vaikuttaa mitaustulokseen. Kuvassa 31 esitetään mittauslaitteen tuottama mitaustieto viimeiseltä kolmelta vuodelta tämän työn kirjoittamiseen asti. Yksi vuosi mitaustietoa mittauslaitteen asennuksen jälkeen 2019 oli menetetty inhimillisen virheen johdosta, mutta 2020 kesästä lähtien tieto oli saatavilla. Kuvassa 31 ylempi kuvaaja esittää Bluetooth-laitteiden lukumäärää mittausajankohtina ja alempi kuvaaja mittauslaitteen LiPo-akun jännitettä. Ylemmässä kuvaajassa esitetään muista tämän työn esimerkeistä poiketen vain mittausajankohdan Bluetooth-laitteiden lukumäärää, eikä tietoa alueella oleskelevista tai alueelle saapuvista Bluetooth-laitteista.



Kuva 31. Mittaustuloksien esitys kolmen vuoden mittausjakson aikana Grafana Labs kaavioissa.

Jos analysoimme kuvan 31 ylempää kuvaajaa, voimme todeta, että silmämääräisesti havainnoituna kesäkaudella mittauslaite havaitsi enemmän Bluetooth-laitteita mittausalueella kuin talvikautena. Poikkeuksena muihin talviin tekee vuoden 2021 ja 2022 välisen talven mittaustulos, josta näemme, että talven aikana mittausalueella on havaittu vähäisesti, mutta kuitenkin muista talvista poiketen enemmän Bluetooth-laitteita. Tämä johtui todennäköisesti siitä, että kyseisenä talvena merijää oli riittävän paksu, jotta mantereen ja saaren välinen matka oli mahdollista taittaa kävellen jään yli. Matkaa mantereelta saareen on lyhyimmillään 570 m. Kuvan 31 alemmasta kuvaajasta nähdään myös, että kyseisenä talvena akun jännite oli noussut satunnaisesti korkeammalle kuin muina talvina kuvaajan mittausjakson aikana. Voimme tehdä mahdollisen havainnon yhdistävistä tekijöistä. Aurinkopaneeli tuottaa enemmän energiaa LiPo-akulle, jos on korkeapaine ja aurinko paistaa, ja jos näin oli ollut, oli todennäköisesti ollut pakkasjaksoja, jotka olivat edesauttaneet mantereen ja jään välisen jääpeitteen muodostumisen.

Kuvassa 32 nähdään vuoden 2022 kesäkuun ensimmäisen viikon mittaustulokset. Kuvaajan mittaustulokset osoittavat, että vain yksi Bluetooth-laite on havainnointu kolmeen otteeseen 4 - 5.6.2022 väliseltä ajankohdalta.



Kuva 32. Mittaustuloksien esitys 2022 kesäkuun mittausjakson aikana Grafana Labs kaavioissa.

Kuvan 32 mittaustuloksesta voimme tehdä johtopäätöksen, että kävijällä tai kävijöillä on ollut vain yksi Bluetooth-laite yhteensä, jonka mittauslaite on havainnut. Mahdollista on myös, että jokin alus tai vene on kulkenut saaren ohi, josta mittaustulos on peräisin. Toisaalta mahdollista on myös, että mittausalueen laitamilla on ollut useampia Bluetooth-laitteita, joista vain yksi on kerrallaan havaittu yhden mittaustilanteen yhteydessä. Mahdollinen johtopäätös tästä, voi olla se, että Bluetooth-laitemäärä on todennäköisesti pienempi retkeilykohteessa kuin urheiluun tarkoitettussa ulkoilukohteessa yhtä kävijää kohden.

Mittauslaitteen toimivuus useamman vuoden ajanjaksolta yllätti positiivisesti. Laitteeseen ei ole tarvinnut suorittaa huoltotoimenpiteitä.

4.3 Järjestelmän toimintavarmuus

Järjestelmän toimintavarmuus ja luotettavuus perustuivat jokaisen komponentin luotettavaan toimintaan omassa tehtävässään.

Mittauslaitteen toimintavarmuus perustui moneen asiaan. Koteloinnin kyky eristää kosteutta on isossa osassa toimintavarmuutta, joka takaa kotelon sisäisille komponenteille mahdollisimman vakaan olosuhteen toimia normaalisti. Mittauslaite on altis lämmönvaihteluille, niin auringon paisteessa, kuin talven kovilla pakkasilla. Suurimmat riskit mittauslaitteen luotettavalle toiminnalle toi kosteus, joka aiheuttaa korroosiota komponenteissa, sekä lämpötilavaihtelut ääripäissään, jotka todennäköisesti rasittavat LiPo-akkua.

LoRaWAN verkon toimintavarmuus on järjestelmätoimittajan vastuulla. Mahdolliset sähkökatkot, verkon muutostyöt, tai muut huoltokatkot, voivat aiheuttaa ongelmia sanomien toimituksessa. Katkoja ei kuitenkaan havaittu.

IoT-järjestelmän toimintavarmuus varmistettiin sovellusten elinkaarenhallinnalla, jossa sovellusta ylläpidettiin, sekä valvonnalla varauduttiin ennalta muutoksiin. Myös IoT-järjestelmän palvelinylläpito ja valvonta mahdollistivat palvelun laadukkaan toiminnan. Suurimmat riskit olivat verkkoteknisiä, joissa jonkin muutoksen tai huoltotyön seurauksena tietoliikenneverkko palvelimelle syystä tai toisesta olisi voinut estyä.

4.4 Järjestelmän sopivuus eri ympäristöihin

Tavoitteena oli rakentaa järjestelmä, joka tarjoaa kyvykkyyden mitata paikoissa, joissa ei ole tarjolla verkkovirtaa tai kiinteitä verkkoyhteyksiä. Mittauslaitteen sijainti on ainut, joka ei ole vakio. Järjestelmän muut osa-alueet ovat lähes vakioita. IoT-järjestelmä sijaitsi konesalissa, josta oli tietoliikenneyhteys internettiin. LoRaWAN tarjosi kattavuuden Suomen alueella.

Mittauslaitteen sijainti tietoliikenteen näkökulmasta asetti rajoitteita. Mittauslaite tuli sijoittaa niin, että LoRa-sanomat kulkeutuivat palvelimelle hyvällä varmuudella. Käytännössä mittauslaite tuli sijoittaa ulos ja asennus tuli olla irti maasta, mieluiten useamman metrin korkeudessa. Mitä korkeammalla mittauslaite on, sitä parempi kuuluvuus todennäköisesti saavutetaan.

Mittauslaitteen sopivuus eri ympäristöihin Bluetooth-mittauksen näkökulmasta asetti myös rajoitteita. Rajoittavana tekijänä oli irrallaan olo teknologisesta infrastruktuurista, jossa olisi voinut olla mittaustulosta häiritseviä Bluetooth-laitteita. Vaikka mittauslaitteen datasta voitiin tunnistaa staattisten Bluetooth-laitteiden lukumäärä, olisi se luonut epäluotettavuutta

mittaustulokseen, jos esimerkiksi staattiset Bluetooth-laitteet olisivat viestineet aktiivisemmin työpäivän aikana kuin muina aikoina. Sijoituksen kannalta tuli olla huomioituna myös mahdollinen mittauspaikan ohi kulkeva liikenne, jos tarkoituksena oli mitata mittauspaikalla oleskelevaa Bluetooth-laitemäärää. Mittaustuloksesta ei voitu eritellä Bluetooth-laitteita, jotka ovat ohimeneviä tai muuten vain ulkopuolisia ”kävijöitä”, joiden paikallaoloa ei haluttu mitata.

Mittauslaitteen energiensaannin kannalta oli välttämätöntä asentaa laite niin, että aurinkopaneeli pystyi tuottamaan valosta energiaa. Tämä asetti haasteita varsinkin syksyllä jolloin puiden lehdet ovat tuuheimmillaan, mutta jatkuva matalapaine pilvineen esti auringon paisteen aurinkopaneelille. Yhdessä sijainneista ei voitu asentaa mittauslaitetta suoran auringon paisteen ulottuville, vaan jouduttiin hyödyntämään epäsuoraa valoa.

Mittauslaitteen rajallisen mittausalueen vuoksi, laite tulisi sijoittaa aina niin, että sen on mahdollisimman keskeisessä sijainnissa mitattaviin kohteisiin nähden. Luonnon muodoilla tai rakenteilla voidaan hallita myös ei haluttujen mittaustulosten ilmenemistä, esimerkiksi asentamalla mittauslaite niin että jokin fyysinen este, kuten kumpu vaimentaa ei toivotut mittaustulokset tietystä suunnasta.

Yhteenvetona oletettu otollisin sijainti mittauslaitteen sijoitukselle olisi mäen huippu, jossa suora auringonvalo osuisi aurinkopaneeliin, eikä kävijämäärän laskennan näkökulmasta tarpeettomat Bluetooth-laitteet häiritsisi mittaustulosta.

4.5 Laitteen datan laatu ja luotettavuus

Datan laatuun vaikuttaa monia tekijöitä. Pystyimme saamaan kahdesta vierekkäin olevasta samoilla komponenteilla varustetuista mittauslaitteista erilaisia tuloksia. Tietoliikenteen häiriöt, komponenttien toleranssit ja asennustavat voivat vaikuttaa lopputulokseen. Laitteen asento, mutta myös Bluetooth-antennin asento ja suunta vaikuttavat mitattavan alueen laajuuteen. Mittaustuloksia voi jäädä huomioimatta mittausalueen ääripäässä laitteen asentoa kääntämällä. Toleranssin eri päissä olevat komponentit ovat voineet tuottaa hieman eri lukemia ESP32 mikrokontrollerin mittaamasta sisäisestä jännitteestä, jolloin mittauslaitteelle

voitiin mikrokontrollerin laiteohjelmiston tulkinnan perusteella asettaa erilaiset toimintatasot kuin toiselle mittauslaitteelle, vaikka todelliset akkujen jännitteet olisivat olleet täysin samat.

LoRa-verkon kuuluvuus tai laitteen asennuspaikka vaikuttaa siihen millä todennäköisyydellä viestit menevät perille. Mittauslaitteen asennolla voidaan vaikuttaa antennin asentoon ja sitä kautta signaalin läpimenokykyyn huonolla kuuluvuusalueella. ESP32 mikrokontrolleri oli ohjelmoitu lähettämään LoRa-sanoma, jonka jälkeen mikrokontrolleri meni välittömästi lepotilaan, jättäen kuuntelemaan paluuviestiä LoRa-verkosta. Tällöin ei voitu varmistua, että viesti oli mennyt perille. Tämä on erityinen ongelma nykyisessä mittalaitteessa, koska tällöin emme saa täysin kattavaa historiatietoa mittausalueelle tulleista ja lähteneistä Bluetooth-laitteista.

Hyväksi esiesimerkiksi mittauksen luotettavuudesta voidaan ottaa tarkasteluun luvussa 3.3.3 esitetty kuva 17, jossa ajanjakson 2023-09-27 14:18 ja 2023-09-27 14:22 välillä tietokantakyselyn tuloksesta puuttuu mittausarvoja, vaikka akun jännite oli vakaa. Tässä tilanteessa LoRa-sanoman on suurella todennäköisyydellä lähtenyt mittauslaitteelta, mutta se ei ole päätyntä LoRaWAN-tukiaseman havaitsemaksi.

4.6 Mittaustulokseen vaikuttavat tekijät

Jos ajatellaan tiettyä mittaussädettä, joka voisi olla vaikka 20 metriä mittauspisteestä eli mittauslaitteen sijainnista. Todellinen Bluetooth-laitteiden lukumäärä voi olla eri kuin mitä mittauslaite kykenee havainnoimaan. Tähän vaikuttaa useampi tekijä. Laitteen toiminnallisuuden kuuluu olla lepotilassa osa ajasta. Silloin kun akun varaustila on korkea, päästään korkeimpaan mittaustiheyteen, eli 5 sekunnin skannausaika, jonka jälkeen mittauslaite on 60 sekuntia lepotilassa. Tämä katveajanjakso mahdollistaa Bluetooth-laitteiden vierailun 20 metrin säteellä mittauslaitteesta silloin kun laite ei suorittanut skannausta. Tämän johdosta, mittauslaite ei suurella todennäköisyydellä havaitse kaikkia Bluetooth-laitteita. Akun varaustason laskiessa mittaustiheys pienenee, eli havainnointikyky heikkenee.

Laitteen antennivalinnan tai asennon vaikutus laitteen tuottaman informaation laatuun on myös lopputulokseen vaikuttava tekijä. Nykyisessä kokoonpanossa antenni on toimiva,

mutta ei optimoitu kyseiseen tarkoitukseen. Myös antennin suuntaus ei ollut tärkeässä roolissa, vaan sen sijoitus kotelon ulkopuolelle vapaavalintaisella tavalla oli todettu riittäväksi työn kannalta, jolloin mittauslaite kykeni mittamaan ympäristöstä Bluetooth-laitteita. Tämä johti siihen, että tulokset eivät ole täysin vertailukelpoisia eri laitteiden kesken.

Ympäristön vaikutus laitteen tuottaman informaation laatuun on todellinen. Käytännössä voi olla tilanne, jossa mittauslaite on asennettu puuhun. Kesällä puiden oksille kertyvät lehdet, tai kova tuuli ja möröt lehdet vaikuttavat signaalien havainnointiin, mutta myös talvella sataava lumi tai vesisade, joka kastelee antennin, voi vaikuttaa havainnointikykyyn. On tekijöitä, joihin ei voida varautua ja jos todetaan optimiolosuhteissa jokin havainnointikyky, niin se ei välttämättä päde muissa olosuhteissa. Myös muutokset laitteen havainnointialueella vaikuttavat. Esimerkiksi kuorma-auto, joka parkkeerataan mitattavien kohteiden ja laitteen väliin voi vaikuttaa tulokseen tuoden esteen mitattavien kohteiden väliin.

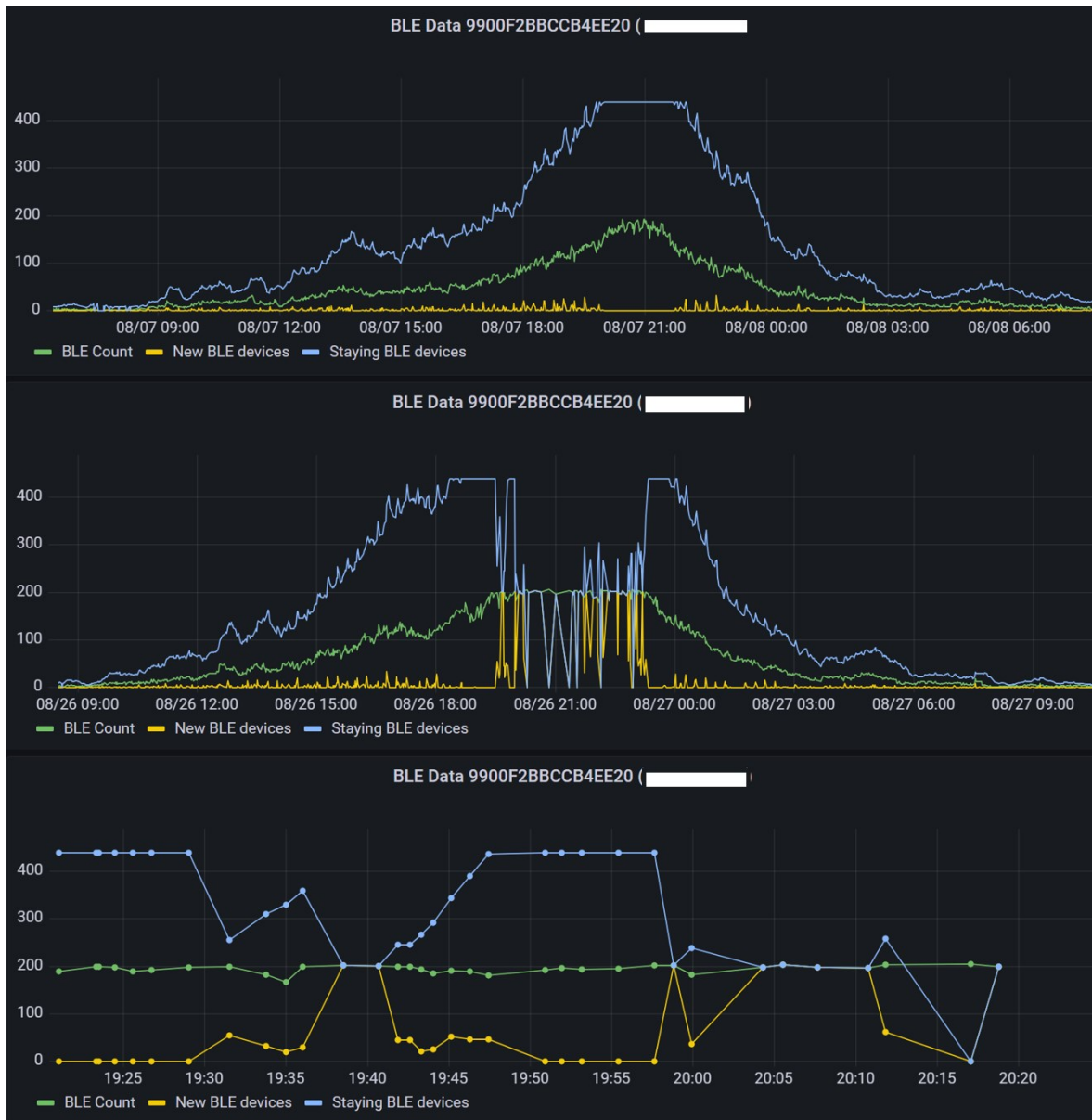
Jos mittauslaite asennetaan kohteeseen, jossa on staattisia Bluetooth-laitteita, esimerkiksi muita mittauslaitteita mittaamassa ulkokuntosalin käyttöastetta, voidaan mittaustulosta tulkita niin, että asetetaan useamman päivän seurannalla jokin lähtötaso Bluetooth-laitteiden lukumäärälle, jonka yli menevät havainnot tulkitaan vieraileviksi Bluetooth-laitteiksi. Tämä seuranta onnistuu parhaiten, jos alueella esimerkiksi yöaikaan ei ole kävijöitä ollenkaan.

Kohteen käyttötarkoitus vaikuttaa siihen, miten kävijöiden lukumäärää pystytään arvioida. Jokaisen kohteen kohdalla tulee pohtia mikä on kohteen käyttäjäkunta ja miten paljon keskimääräisellä käyttäjällä on älylaitteita mukana. Riippuen kohteen käyttötarkoituksesta voimme luoda kertoimen mallintamaan arvioitua kävijämäärää kohteessa, jota voimme hyödyntää luvun 4.2.1 yhtälöä (4.1), jonka avulla voitiin laskea arvioitu kävijämäärä.

Mittaustuloksen laadun ylläpitämiseksi mittauslaitteen kerroin, joka kertoo keskimääräisen Bluetooth-laitteiden määrän kutakin kävijää kohden, tulee olla muuttuva ja perustua nykytilaan, jossa arvioidaan jatkuvasti kohteen käyttäjäkuntaa ja teknologian kehitystä. Laatu heikenee, jos emme ylläpidä laitteen kertoimen oikeellisuutta säännöllisillä tarkistuksilla, tai jos emme automatisoi kertoimen vaihtamista internetistä saadun syötteen muutoksen seurauksena. Jokin tapahtuma lähitöillä voi vaikuttaa kertoimen oikeellisuuteen, tai ajan myötä tapahtuva muutos teknologian kehityksessä.

4.7 Ongelmatapaukset

Työn mittaus tuloksia tulkitessa ilmeni ongelmatilanne mittausdatassa, joka esitetään kuvassa 33 yhdessä normaalin tilanteen kanssa.



Kuva 33. Virhetilanne mittausdatassa Grafana Labs kuvaajassa esiteltynä.

Kuvan 33 ylimmässä ja keskimmaisessä kuvaajassa havaitsimme, että Bluetooth-laitteiden lukumäärän noustessa, alueella pysyvien Bluetooth-laitteiden lukumäärä kasvoi kohti mittauslaitteen ylärajaa 440. Keskimmaisessä kuvaajassa näemme, että kun lukumäärä 440 saavutettiin, pysyi mittaus tulos samana, kunnes tulos tippui äkisti ja nousi takaisin huippuunsa.

Tämän jälkeen alueella pysyvien Bluetooth-laitteiden lukumäärä laski äkisti ja epänormaalisti kohti tasoa 0. Alimmassa kuvaajassa näemme tarkemmalla tasolla, miten mittaustulos muuttui tunnin tarkastelujakson aikana. Mittaustuloksia esiintyi lähes tasaisesti minuutin välein ja välillä joitakin LoRa-sanomia oli jäänyt välistä. Tämä ei kuitenkaan selitä miksi pudotukset olivat olleet näin suuria. Alimman kuvaajan ajankohdan 19:57:36 mittaustulos esittää alueella pysyvien Bluetooth-laitteiden lukumääräksi 440, jonka jälkeen mittaustulos laski lukumäärään 202, joka oli mitattu ajankohtana 19:58:49. Pudotus on suuri, ja on hyvin epätodennäköistä, että 238 yhtäaikaista Bluetooth-laitetta olisi poistunut alueelta yhden minuutin aikana. Samanaikaisesti uusien Bluetooth-laitteiden lukumäärä oli noussut lukemasta 0 lukemaan 202. Kuten ylimmässä kuvaajassa ilmenee, ei samanlaista tapahtumaa ollut kyseisenä ajankohtana tapahtunut. Mittaustulos esitti tasaisesti suurinta lukua 440.

Tämänkaltaisen ongelman selvittely vaatisi virhetilanteen toistamisen niin, että mittauslaitteen sarjaportista voisi samalla tulkita mikrokontrollerin tuottamaan tilanneinformaatiota, sekä MAC-osoitetaulukon sisältöä. Virhetilanne ei kuitenkaan ollut yleinen, eikä sitä oltu havaittu aikaisemmin.

Ilkivalta on riskitekijä, kun viedään teknologiaa ulkoilualueille. Kuntoportaiden mittauslaite oli kokenut ilkivaltaa, kuten kuvasta 34 nähdään.

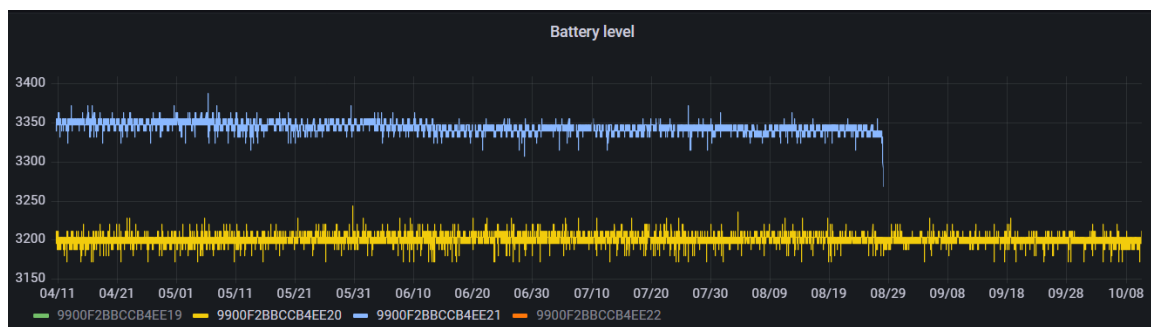


Kuva 34. Kuntoportaiden mittauslaite rikottuna.

Kuntoportaiden mittauslaitteen aurinkopaneeli oli revitty irti mittauslaitteesta ja mittauslaite oli tuottanut viimeisen kerran mittausdataa palvelimelle 28.8.2023 kello 01:34:23. Mittauslaite todennäköisesti oli vielä toiminnassa pitkään tämän tapahtuman jälkeen, mutta LiPo-akun jännitteen laskun johdosta se ei enää lähettänyt LoRa-sanomia, vaan heräsi 86400 sekunnin välein tarkistamaan pelkästään jännitteen, jatkaakseen lepotilaa.

Kuntoportaiden tapauksessa, ongelmia aiheutti myös mittauslaitteen sijoituspaikka. Sijoituspaikkaan ei paistanut suoraan aurinko muulloin kuin aamupäivästä ja silloinkin vain puiden lomasta. Keskipäivällä ja iltapäivällä mittauslaitteen ja auringon välissä oli täyttömäki, joka myös esti suoran valon pääsyn aurinkopaneelille. Käytännössä vain keskikesällä, auringon paistaessa riittävän korkealta, aurinkopaneeli sai valoa hyvin. Tämän johdosta, laitteen toimintatasot laskivat syksyn tulle hyvinkin nopeasti tasolle, jolla mittausta ei enää suoritettu. Ratkaisuna tähän olisi ollut paremman kiinnityspisteen löytäminen korkeammalta, jossa varmistetaan riittävä auringonvalo.

Laitteiden komponenttien erot vaikuttavat suuresti jännittemittaukseen mikrokontrollerilta. Kummassakin työn mittauslaitteessa oli sama jänniteregulaattori, joka oli esitelty luvussa 2.6. Jos tarkastelemme jännitetasoja, joita laitteilta raportoidaan palvelimelle, oli niiden huippuarvoissa eroja, kuten kuvassa 35 nähdään.



Kuva 35. Mikrokontrollerin jännitetasot kuuden kuukauden ajanjaksolta Grafana Labs –kuvaajassa.

Kummankin mittauslaitteen komponentit olivat samanlaisia. Jänniteregulaattori tuotti mikrokontrollerille 3,3 V jännitteen, joka ilmeni mikrokontrollerilla mitattuna kuitenkin eri jännitteenä. Tämä saattoi johtua akkujen, mikrokontrollerin sisäisten komponenttien, tai regulaattorien eroista. Ero oli huomattava ja tämä aiheutti ongelman virransäästötoiminnallisuuden hyödyntämisessä, joiden jänniterajat olivat hyvin pienillä jänniteväleillä, kuten luvun 3.1.5 taulukossa 1 esitettiin. Kuten kuvan 35 kuvaajasta nähdään, että pidemmän aikavälin

tarkastelulla jännitevaihtelut eri mittauslaitteiden välillä ovat eri jännitealueilla. Nämä erot laitteiden välillä vaikuttavat suuresti siihen, millä kynnyksellä mikrokontrolleri päättää muuttaa toimintatasoa. Ongelman ratkaisuksi voisi soveltua kalibrointi ennen käyttöönottoa ja hyväksyä erot komponenttien välillä. Emme tosin tiedä mitkä näistä eroista on muuttuvia ajan myötä, esimerkiksi LiPo-akun tapauksessa.

Laiteohjelmiston virheohjelmoinnin myötä mittaustuloksissa havaittiin ongelmatilanne aina kun Bluetooth-laitemäärä sai tulokseksi arvon 0, kuten kuvan 36 ylemmästä kuvaajasta havaitaan.



Kuva 36. Mittaustuloksen virhe esitettynä Grafana Labs –kuvaajassa.

Mittauslaitteen tuottamassa mittaustuloksessa esiintyi erityinen piirre. Aina kun BLE Count sai arvon 0, sai kaksi muutakin tulosta arvon 0. Tämä nähdään kuvan 36 ylemmästä kuvaajasta esimerkiksi ajankohdalla 14:15 ja 14:55. Laiteohjelmiston vianselvityksen tuloksena selvisi, että koodiin oli jäänyt toiminne vanhemmasta laiteohjelmistosta toiseen projektiin, joka esitetään kuvassa 37.

```

//PARSE ZEROS AWAY FROM MYDATA
int payloadLength = 0;
Serial.println("MYDATA: " );
for (int i = 0; i < sizeof(mydata)-1; i++) {

    Serial.print(mydata[i],HEX);
    if(mydata[i] == 0 && mydata[i+1] == 0 && mydata[i+2] == 0 && mydata[i+3] == 0){
        payloadLength = i;
        i = sizeof(mydata);
    }else{
        payloadLength = mydataLength;
    }
}
Serial.println("");

//MOVE DATA TO NEW BYTE-ARRAY WITH FIXED SIZE WITHOUT ZEROS
uint8_t sendData[payloadLength];
Serial.println("sendData[payloadLength]: ");
for(int i = 0; i <= payloadLength; i++){
    sendData[i] = mydata[i];
    Serial.print(sendData[i], HEX);
}
Serial.println("");

```

Kuva 37. Virheellinen toiminne laiteohjelmiston koodissa.

Toiminto, joka oli nimetty ”PARSE ZEROS AWAY FROM MYDATA” –kommentilla, kävi läpi sanomaa tavu tavulta ja jos toiminne havaitsi kolme peräkkäistä tavua, joiden arvo oli 0, asetettiin sanoman pituudeksi se kohta, josta eteenpäin on havaittu kolme tavua arvolla 0. Tämän johdosta toiminteen ”MOVE DATA TO NEW BYTE-ARRAY WITH FIXED SIZE WITHOUT ZEROS” kohdalla, lähetettävä kuorma ”sendData” sai sisällöksi vajaamittaisen sisällön. Tämä tilanne oli mahdollinen, jos BLE Count ja New BLE Count ovat arvoltaan 0, jolloin myös BLE Staying Count jäivät huomiotta kuten kuvan 36 ylemmässä kuvassa havaittiin. Näin ollen IoT-järjestelmälle saapui alle 7 tavun pituinen sanoma käsiteltäväksi, toisin kuin koostetun sanoman pituuden tuli olla, kuten luvun 3.4.3 kuvassa 24 LoRa-sanoman kuorman sisältö esitellään.

Ongelmanratkaisu oli, että laiteohjelmistosta poistettiin kuvan 38 ohjelmakoodi kokonaisuudessaan, jolloin laiteohjelmisto kokoaa aina saman pituisen sanoman, riippumatta sanoman sisällöstä.

5 Jatkotutkimus ja -kehitys

Tässä luvussa keskitytään jatkokehityssaiheisiin, joita tämän työn aikana on tullut esille. Kehitetyn järjestelmän tarkoitus oli antaa mahdollisimman kattavasti tietoa, miten kävijälaskentaa voitaisiin suorittaa kyseisellä mittaustavalla. Työn aikana ilmeni monia mittaustarkkuuteen vaikuttavia tekijöitä, mutta myös ideoita niiden parantamiseksi. Ajatuksia nousi esiin myös mittausdatan ja muiden julkisten tietolähteiden datan yhdistämisestä.

5.1 Fyysinen laite

Laitteen koteloinnissa oli muutamia heikkouksia. Ensimmäinen heikkous oli se, että ulko-olosuhteissa, tulisi jokaisen ulkoilmaan kosketuksissa olevan osan olla ruostesuojattu. Tämän työn mittauslaitteen tapauksessa ruuvit ruostuivat ajan myötä. Tämä voi aiheuttaa ongelmia huoltotoimenpiteissä, jossa kotelo tulee avata. Kehitystoimenpiteenä olisi hapon kestävien ruuvien hankinta.

Toinen huomio oli mittauslaitteen kiinnitettävyyssominaisuuksissa ulkoisiin rakenteisiin. Mittauslaitteen kotelossa tulisi olla kohdat joihin kiinnittää kiristysliina, jos esimerkiksi mittauslaite kiinnitetään puuhun. Luvun 3.1.4 kuvan 12 mittauslaitteen aurinkopaneelissa oli käytökelpoinen varsi, jossa oli mahdollisuus kiinnittää laite ruuveilla kohteen rakenteeseen. Kehitystoimenpiteenä tulisi valita kotelointimallit, joissa on mahdollisimman monipuoliset kiinnitysmahdollisuudet.

Mittauslaitteen ulkomuodon tulisi olla mahdollisimman hillitty ja kiinnostusta herättämätön. Mittauslaite kiinnitetään mahdollisesti paikkoihin, joihin satunnaiset ihmiset pääsevät kiipeämään pienellä vaivalla, joten ilkeiden mahdollisuus on olemassa. Aurinkopaneeli ja kotelo, josta näkyy elektroniikka kannen läpi, ei ole kovinkaan huomaamaton.

Bluetooth-antennin tulisi olla malliltaan kiinteä, eikä johto, joka heiluu tuulessa ja vääntyy erilaisiin asentoihin. Antennin asento voisi olla vaihdettavissa, mutta tietoisella tavalla, tietäen miten se vaikuttaa vastaanottokykyyn. Antenni tulisi myös olla optimoitu 2.402 GHz ja 2.48 GHz väliselle kaistanleveydelle.

Komponenttien asettelu kotelon sisälle tulisi tehdä huolellisemmin, kiinnittäen ne ruuveilla koteloon, eikä kaksipuoleisella teipillä, kuten työn mittauslaitteissa on tehty. Mahdollista huoltokäyntiä varten, olisi tärkeää, että jokainen komponentti olisi irrotettavissa erikseen, eli myös juotoksien sijaan tulisi käyttää pikaliittimiä komponenttien välillä.

Mittauslaite mittasi akun jännitteen kutsumalla WIFI-kirjaston komentoa `rom_phy_get_vdd33()`, jolla saadaan laitteen WIFI-radion jännite. Ongelma tässä oli se, että koska käytimme mittauslaitteessa MCP1700-jänniteregulaattoria, saimme jännitteen, joka oli tasattu noin 3,3 V tasoon. Tämä säädetty jännite kuitenkin aleni akun jännitteen alenemisen myötä, joka mahdollisti jännitteen mittaamisen mikrokontrollerilta. Koska jännitteen lasku oli huomattavasti maltillisempaa kuin akun jännitteen lasku, oli luvun 3.6.1 taulukon 1 toimintatasojen jänniteskaalat myös paljon pienempiä. Eli iso jännitteen alenema LiPo-akussa alensi mikrokontrollerilla mitattua jännitettä hyvin maltillisesti, jolloin taulukon 1 jänniteraja-arvojen tuli olla lähellä toisiaan. Tämä muodostui ongelmaksi, koska identtisillä kokoonpanoilla eri mittauslaitteet antoivat eri jännitteitä, kuten kuvassa 35 esitettiin. Jatkokehityshaasteena tähän olisi tuottaa mahdollisimman tarkka tapa mitata LiPo-akun jännite, jossa huomioidaan mahdollisimman vähäinen mittaukseen käytetty energia, sekä mittauslaitteen ulkopuolisen lämpötilan muutoksen.

Mittauslaitteen huoltotoimenpiteitä varten tulisi kehittää jokin säasuojattu sarjaporttiliitin, josta voidaan tarjota sarjaportin lähettävä ja vastaanottava rajapinta, mutta myös mikrokontrollerin ohjelmointitilaa ohjaava liitäntä, sekä jännitteen ja maan liittimet.

5.2 Laiteohjelmisto

Mittauslaitteen laiteohjelmiston kehitystarpeena on langaton laiteohjelmiston päivitys. Mahdollisuus päivittää laiteohjelmisto ilman kotelon avaamista, helpottaisi huoltotöitä suuresti. Espressif, joka mittauslaitteen mikrokontrollerin kehityksestä vastaa, on tarjonnut tarkoitukseen valmiit työkalut, nimellä Over The Air Updates (Espressif Programming Guide OTA, 2023).

Laiteohjelmiston LoRa-viestinnän kehitystarpeena olisi, muuttaa viestintä kaksisuuntaiseksi niin, että mikrokontrolleri jää odottamaan LoRa-sanoman lähettämisen jälkeistä vastaanotokuitausta. Tämän vastaanotokuitauksen avulla olisi mahdollisuus parantaa mittausdatan

laatua, kun tietäisimme, onko viesti mennyt perille vai ei. Voisimme lähettää sanoman uudestaan, tai lähettää kuorman seuraavan sanoman yhteydessä. LoRa-viestinnän kaksisuuntaisuudessa olisi myös se hyöty, että voisimme tarjota mikrokontrollerille paluuviestissä toiminta-asetukset, kuten luvussa 4.2.1 esitelly arvioita Bluetooth-laitteiden määrä kutakin kävijää kohden, jota voidaan kutsua kertoimeksi. Tämä esimerkiksi mahdollistaisi kertoimen päivittämisen mittauslaitteen mittausalueen kävijätyypin muutosten seurauksena automaattisesti. Tämä kaksisuuntaisuus aiheutti kuitenkin liiallisen LoRa-verkon käyttöasteen työn aikana, jossa LoRa-sanomien ilma-ajan ja käyttömäärien rajat ylitettiin, kuten luvussa 3.2 kerrottiin. Kehitystarpeena olisi siis LoRa-viestinnän muuttaminen hyvien tapojen mukaiseksi.

Nykyisessä kokoonpanossa käytettiin lepoajan yli tallentavaksi tallennusmuistiksi RTC-muistia. Tämän muistin nopeus oli hyvä, mutta kapasiteetti pieni tarkoitukseen nähden. Mittauslaitteen oli mahdollista tallentaa vain 440 Bluetooth-laitteen MAC-osoitetta muistiin lepotilan ajaksi. Eli mittausvirhe tulee vastaan siinä vaiheessa, jos laitteen mittaustuloksissa oli kertynyt yli 440 Bluetooth-laitetta ns. paikalla oleviksi laitteiksi. Tämä asettaa rajoitteita laitteen sijoitukselle. Esimerkiksi isompien väkijoukkojen laskenta ei ole mahdollista. Tähän ratkaisuna olisi käyttää jotain vaihtoehtoista muistia, jossa kapasiteetti ei tule vastaan. Esimerkiksi SPIFFS- tai PSRAM –muistin käyttö voisi olla kapasiteetin osalta perusteltua. Luku- ja kirjoitusajat ovat kuitenkin myös tärkeitä energiansäästösyistä.

Ohjelmiston kovennus on kehityskohde. Työssä toteutetun mittauslaitteen sarjaportin kautta oli ohjelmoitu välitettäväksi tilanneinformaatiota, koska kehitys ja vianselvitys oli sitä vaatinut. Sarjaportin kautta esimerkiksi skannattujen laitteiden MAC-osoitteet pystyi lukemaan suoraan. Tämän tilanneinformaation piilottaminen voisi olla hyvinkin perusteltua, jolloin MAC-osoitteiden kaappaaminen vaikeutuu huomattavasti.

5.3 Ennustemallit ja avoimen datan hyödyntäminen

Jatkotutkimuskohde voisi olla IoT-järjestelmän tietokannassa olevan datan hyödyntäminen niin, että voitaisiin laskea automaattisesti pohjataso Bluetooth-laitteiden lukumäärälle sijainnissa, jossa mittauslaite havaitsee staattisia Bluetooth-laitteita.

Järjestelmän tuottaman mittausdatan vertaileminen julkisesta rajaspinnasta saatavaan mitaustietoon, voisi tuoda uusia havaintoja. Esimerkiksi ilmatieteenlaitoksen avoimen datan vertaaminen kävijädatan kanssa, voisi kertoa, että sateella kävijöitä on vähemmän mittauspisteen mittausalueella. Tästä voisi tehdä ennustemallin, joka säädataan pohjautuen loisi ennusteen seuraavan vuorokauden kävijämäärästä. Myös mahdollisten mittausalueen läheisyydessä esiintyvien tapahtumien vaikutuksen arvioiminen mittaustuloksiin ennalta, voisi olla mielenkiintoinen ja monipuolinen kokeilu. Ennustemalli pitkän aikavälin mittaustiedon pohjalta tuleville vuodenojoille voisi olla myös mielenkiintoinen haaste.

6 Johtopäätökset

Tämän diplomityön tavoitteena oli toteuttaa järjestelmä, jolla voitiin mitata kävijämääriä ulkotiloissa, joihin perinteiset mittausmenetelmät eivät helposti taivu. Tavoitteena oli saada mahdollisimman monipuolista mittaus tietoa eri mittauskohteista, joiden kävijämääriä mitattiin Bluetooth-laskentaan perustuvalla menetelmällä. Tavoitteena oli tutkia mittausdataa ja luoda siitä malli, jonka pohjalta voitaisiin arvioida mittauskohteen kävijöiden määriä eri aikaväleillä. Malli onnistuttiin tuottamaan vertailemalla mittauslaitteen ja samassa mittauskohteessa olevaa toisen osapuolen mittauslaitteen tuottamaa mittaus tietoa. Näitä tietoja vertailemalla kyettiin luomaan arvio keskimääräisestä Bluetooth-laitteiden lukumäärästä kutakin kävijää kohden. Tämän arvion ja mittauslaitteen tuottaman Bluetooth-laitteiden lukumäärätiedon perusteella kyettiin arvioimaan tietyn aikavälin kävijämäärä arvio. Mittaustuloksen rikkauteen vaikutti myös työssä kehitetyn kyvykkyyden käyttöönotto, jossa mahdollistettiin mittausalueella oleskelevien uniikkien kävijöiden määrä, sekä myös alueelle saapuvien uniikkien kävijöiden määrä.

Työn tavoitteena oli myös havainnoida mittaustekniikan puutteita ja minkälaiset asiat mitaustuloksen oikeellisuuteen mahdollisesti vaikuttivat. Mittauslaitteen kuin myös mittauskohteiden ominaisuudet vaikuttivat suuresti mitaustulokseen. Mittauslaitteen komponenttivalinnoilla olisi voinut vaikuttaa mittauslaitteiden kykyyn havainnoida Bluetooth-laitteita yhtä hyvin toisiinsa nähden. Myös mittauslaitteen sijoittaminen hyvään paikkaan mittauskohteessa, esimerkiksi auringon valon saavutettavaksi, mutta myös havainnointikyvyn osalta oli tärkeää.

Työn tavoitteena oli pohtia mittauskokemusten pohjalta, millainen sijainti olisi otollisin työssä esitellylle mittauslaitteelle. Mittauslaitteen rajoitteiden vuoksi, otollisin mittauskohde sijaitsisi erillään kaupungin liikenteestä ja infrastruktuurista. Mittauskohteen tulisi olla jokin paikka, jonne kävijät saapuvat tekemään asioita. Mieluiten niin, että kohteessa joko oleskellaan tai kohde ohitetaan säännöllisesti, kuten esimerkiksi kuntoportaissa toimitaan. Sijainti olisi hyvä olla myös avoin auringon paisteelle mahdollisimman ison osan päivästä.

Tavoitteena oli myös pohtia, miten mittauskohteessa havaitut niin sanotut staattiset laitteet voitaisiin havaita ja poistaa kävijälaskennan tuloksista. Tätä ongelmaa ei kuitenkaan mittauskohteissa esiintynyt. Teoriassa kuitenkin mittausdatan tulkitsemisen avulla voitaisiin tehdä jonkinlainen johtopäätös lähtötasosta, jota alemmas keskimäärin Bluetooth-laitteiden lukumäärä ei ole mennyt pidemmällä seurantajaksolla.

Työssä kehitetyn mittausjärjestelmän tuloksia voitaisiin hyödyntää isommassa mittakaavassa, esimerkiksi tuottamalla kävijälaskentaa kunnallisten ulkoilupalveluiden eri kohteista. Tällä tiedolla voitaisiin ohjata päätöksentekoa ja tuottaa entistä parempia palveluita sinne missä niitä käytetään.

Työn kokeilevan luonteen vuoksi, monia asioita ei jalostettu sen enempää kuin oli tarve. Komponenttivalinnat, laiteohjelmisto ja IoT-järjestelmä rakennettiin niin, että ne sopivat tarkoitukseen. Tämän johdosta monia asioita voisi kehittää eteenpäin, joka mahdollistaisi luotettavamman mittaustuloksen ja sitä myötä uskottavamman palvelun.

Lähteet

- Basalamah, 2016. Sensing the Crowds Using Bluetooth Low Energy Tags. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 24.10.2023]. Saatavissa: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=7542154>
- Business Tampere, 2022. CityIoT 2 – miten data saadaan päätöksenteon tueksi? [Verkkoaineisto]. [Viitattu 13.10.2023]. Saatavissa: <https://businesstampere.com/fi/cityiot-2-miten-data-saadaan-paatoksenteon-tueksi/>
- Cyberman54, 2023. ESP32-Paxcounter. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 16.10.2023]. Saatavissa: <https://github.com/cyberman54/ESP32-Paxcounter>
- DFRobot, 2023. Solar Lipo Charger (3.7V). [Verkkoaineisto]. [Viitattu 11.10.2023]. Saatavissa: <https://www.dfrobot.com/product-1139.html>.
- Digikey, 2023. ESP32-WROOM-32U-N4. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 12.10.2023]. Saatavissa: <https://www.digikey.fi/en/products/detail/espressif-systems/ESP32-WROOM-32U-N4/9381719>.
- Digita, 2023. IoT:n kartta. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 11.10.2023]. Saatavissa: <https://www.digita.fi/iotn-kartta/>.
- Esko Jouppi, 2019. AKKUJÄRJESTELMIEN TURVALLISUUS. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 12.10.2023]. Saatavissa: <https://docs.silabs.com/bluetooth/4.0/general/adv-and-scanning/bluetooth-adv-data-basics>.
- Espressif Programming Guide OTA, 2023. Over The Air Updates (OTA). [Verkkoaineisto]. [Viitattu 12.10.2023]. Saatavissa: <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/api-reference/system/ota.html>.
- Espressif Programming guide RTC, 2023. System Time. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 12.10.2023]. Saatavissa: https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/api-reference/system/system_time.html.

Espressif Systems, 2023. ESP32 Series Datasheet. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 11.10.2023]. Saatavissa: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf.

Grafana Labs, 2023. Pricing. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 12.10.2023]. Saatavissa: <https://grafana.com/pricing/>.

Hoang Hieu, 2023 DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A BLE GATEWAY USING ESP32 CHIPSET. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 11.10.2023]. Saatavissa: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/799421/HoangHieu_Thesis.pdf?sequence=2.

Hoperf, 2018. Low Power Long Range Transceiver Module. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 11.10.2023]. Saatavissa: <https://www.farnell.com/datasheets/3622884.pdf>.

Hörkkö, 2020. LORAWAN-VERKON TUKIASEMA-ANTENNIEN LAADUNVARMISTUS MITTAUSTIEDON AVULLA. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 24.10.2023]. Saatavissa: https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/161209/diplomityo_horkko_tuomo.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

Malminen ja Miettinen, 2021. Ihmisten liikkeitä tarkastellaan pian sensoreiden avulla Helsingissä – kaikki saavat pääsyn matkapuhelinsignaaleista kerättävään liikkumisdataan. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 13.10.2023]. Saatavissa: <https://yle.fi/a/3-11924924>

Markus Nevalainen, 2020. IOT:N LISÄÄMINEN SÄHKÖASEMATYÖMAILLA. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 12.10.2023]. Saatavissa: https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/160832/kandidaatintyo_nevalainen_markus.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

Matti Oja, 2019. AURINKOSÄHKÖN KÄYTÄNNÖN TIETOPAKETTI. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 11.10.2023]. Saatavissa: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/260821/Oja_Matti.pdf?sequence=2.

Microchip, 2018. MCP1700. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 12.10.2023]. Saatavissa: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/MCP1700-Low-Quiescent-Current-LDO-20001826E.pdf>.

Mikhaylov, et al., 2023. Analysis of the Capacity and Scalability of the LoRa Wide Area Network Technology. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 11.10.2023]. Saatavissa: http://cc.oulu.fi/~kmikhayl/site-assets/pdfs/2016_EW_LoRa.pdf.

Partco, 2023. Li-Po BATTERY 3,7V 1350mAh 5x37x59mm. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 12.10.2023]. Saatavissa: <https://www.partco.fi/en/batteries/rechargeable-batteries/li-po-batteries/20365-z-lipo-1503759.html>.

Reiman, 2002. TEHOLÄHDEPIIRILEVYN SUUNNITTELU AKKUKÄYTTÖISEEN LAITTEESEEN. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 24.10.2023]. Saatavissa: <https://lut-pub.lut.fi/bitstream/handle/10024/35413/nbnfi-fe20021295.pdf?sequence=1>.

Saarinen, 2022. TEHOLÄHDEPIIRILEVYN SUUNNITTELU AKKUKÄYTTÖISEEN LAITTEESEEN. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 24.10.2023]. Saatavissa: https://lut-pub.lut.fi/bitstream/handle/10024/164671/Kandidaatinty%C3%B6_Kasper_Saari-nen.pdf?sequence=3&isAllowed=y.

Seed Studio, 2023. Small Solar Panel 138x160mm 3W. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 12.10.2023]. Saatavissa: <https://www.seedstudio.com/3W-Solar-Panel-138X160.html>.

Silicon Labs, 2023. Bluetooth Advertising Data Basics. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 11.10.2023]. Saatavissa: <https://docs.silabs.com/bluetooth/4.0/general/adv-and-scanning/bluetooth-adv-data-basics>.

Sparkfun, 2023. Battery Technologies. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 12.10.2023]. Saatavissa: <https://learn.sparkfun.com/tutorials/battery-technologies/all>.

The Things Network, 2023. Duty Cycle. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 12.10.2023]. Saatavissa: <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/duty-cycle/>.