



Sigfox-verkon analysointi: viestikoon ja liikkuvuuden vaikutus

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Tietotekniikan kandidaatintyö

2022

Niklas Nelimarkka

Tarkastaja(t): TkT Jouni Ikonen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT Teknis-luonnontieteellinen

Tietotekniikka

Niklas Nelimarkka

Sigfox-verkon analysointi: viestikoon ja liikkuvuuden vaikutus

Tietotekniikan kandidaatintyö

38 sivua, 14 kuvaa, 7 taulukkoa ja 3 liitettä

Tarkastaja(t): TkT Jouni Ikonen

Avainsanat: Sigfox, LPWAN, IoT, liikkuvuus

Tässä työssä arvioitiin Sigfox-verkon käytettävyyttä sovelluskehittäjän näkökulmasta, sekä analysoitiin viestikoon ja liikkuvuuden vaikutusta viestien kulkuaikeihin ja yhteyden laatuun. Työssä esiteltiin Sigfox-teknologia ja aikaisempia LPWAN-teknologioihin liittyviä tutkimuksia. Liikkuvuuteen liittyen löydettiin useita aikaisempia tutkimuksia, mutta kulkuajan osalta Sigfox-verkossa tehtyjä aikaisempia tutkimuksia ei löydetty.

Työssä toteutettiin koejärjestely viestien kulkuaikeiden mittaamiseksi. Mittauksia tehtiin staattisina, sekä päätelaitteen liikkeessä. Mittauksien perusteella arvioitiin viestien kulkuaikea päätelaitteelta vastaanottavalle palvelimelle. Lisäksi arvioitiin viestien yhteyden laatua.

Johtopäätöksenä todettiin viestin koon vaikuttavan kulku aikaan. Yhteyden laadun havaittiin olevan hyvä valituissa mittauspisteissä. Liikkuvissa mittauksissa havaittiin, että vain 20,5 % viesteistä vastaanotettiin onnistuneesti.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

School of Engineering Science

Software Engineering

Niklas Nelimarkka

Analyzing impact of message size and mobility in Sigfox network

Bachelor's thesis

2022

38 pages, 14 figures, 7 tables and 3 appendices

Examiners: D.Sc. Jouni Ikonen

Keywords: Sigfox, LPWAN, IoT, mobility

This study examines the usability of the Sigfox network from the application developer's perspective. The impact of message size and mobility on end-to-end delay and reception quality was evaluated. The Sigfox technology and previous research done on LPWAN end-to-end delays and mobility was presented. Many research articles on Sigfox mobility were found, but no articles on end-to-end delays were found.

In this study an experimental system to evaluate the end-to-end delays in the Sigfox network was implemented. Measurements were done both when the end device was stationary and while it was moving. End-to-end delays and reception quality were evaluated.

The conclusion is that the size of the message affects the end-to-end delay. Reception quality was found to be good in the chosen static measurement locations. In mobile experiments a large number of failed transmissions was observed, and only 20,5% of messages arrived successfully.

LYHENNELUETTELO

Lyhenteet

IoT	Internet of Things, esineiden internet
LPWAN	Low Power Wide Area Network
ISM	Industrial, Scientific and Medical
UL	Uplink
D-BPSK	Differential binary phase shift keying
DL	Downlink
GFSK	Gaussian frequency-shift keying
UNB	Ultra Narrow Band
IP	Internet Protocol
API	Application Programming Interface
GSM	Global System for Mobile communications
LTE	Long Term Evolution
GPS	Global Positioning System
SNR	Signal-to-noise ratio
RSSI	Received signal strength indicator
USB	Universal Serial Bus
CSV	Comma Separated Values
LQI	Link Quality Indicator

Sisällysluettelo

lyhenneluettelo

1 Johdanto.....	6
1.1 Tavoitteet ja tutkimusmenetelmä	6
1.2 Työn rakenne.....	8
2 LPWAN-teknologiat ja aiempi tutkimus	9
2.1 LPWAN-teknologiat.....	9
2.1.1 Sigfox	9
2.1.2 Eroavaisuudet muihin teknologioihin	10
2.2 Sigfoxin käyttökohteet	11
2.3 Aiempi tutkimus	12
3. Koejärjestelyn suunnittelu ja toteutus.....	16
3.1 Koejärjestelyihin käytetty järjestelmä	16
3.1.1 Päälaite	16
3.1.2 palvelin	18
3.2 Koejärjestelyt	20
3.2.1 Staattinen koejärjestely	20
3.2.2 Liikkuva koejärjestely	21
4. Tulokset.....	23
4.1 Staattiset mittaukset.....	23
4.1.1 Viestien kulku-aika	23
4.1.2 Yhteyden laatu	25
4.2 Liikkuvat mittaukset	27
4.2.1 Liikkuva mittaus Lappeenrannassa	28
4.2.2 Liikkuva mittaus Lappeenranta–Vihti.....	29
4.2.3 Liikkuvat mittaukset Vihti–Turku	30
4.2.4 Yhteenveto liikkuvista mittauksista	31
5. Tulosten arviointi	32
5.1 Staattiset mittaukset.....	32
5.2 Liikkuvat mittaukset	32
6. Yhteenveto	34
Lähteet	35

Liitteet

1 Johdanto

Esineiden internet (Internet of Things, IoT) voidaan kuvata älykkäiden esineiden verkostoksi, jossa esineet voivat kommunikoida keskenään [1]. Esineiden internetillä on paljon käyttökohteita, kuten esimerkiksi teollisuuden automaatio, kodin älyjärjestelmät, maatalous, infrastruktuuri ja logistiikka [2], [3].

Käytössä olevien IoT-laitteiden määrän voidaan ennustaa lisääntyvän kuluva vuosikymmenen aikana jopa yli 25 miljardiin laitteeseen [4]. Laitteiden määrän lisääntyessä IoT-viestintäyhteyksien tarve tulee kasvamaan.

Laitteiden määrän kasvaessa monet laitteista tulevat olemaan matalatehoisia laitteita, kuten erilaisia sensoreita. LPWAN-verkkoteknologiat (Low Power Wide Area Network) ovat erityisesti tällaisten matalatehoisten laitteiden käyttöön suunniteltuja teknologioita, jotka mahdollistavat matalan virrankulutuksen ja pitkän kantaman. Nämä ominaisuudet saavutetaan tyypillisesti viestikoon ja lähetysnopeuden kustannuksella [5]. LPWAN-teknologioiden avulla voidaan toteuttaa esimerkiksi erilaiset paristokäyttöiset dataa lähettävät sensorilaitteet, jolloin lähetysteknologian matalan virrankulutuksen ansiosta laitteiden käyttöikä on pitkä.

LPWAN-verkkoteknologioiden käytön yleistyessä olisi hyvä tutkia niiden ominaisuuksia. Matalan virrankulutuksen lisäksi viestinnälle tärkeitä ominaisuuksia ovat ainakin viestien kulku-aika ja yhteyden laatu/varmuus. IoT-laitteessa käytetty verkkoteknologia voidaan valita käyttökohteeseen soveltuvaksi, kun eri verkkoteknologioiden ominaisuudet ovat tiedossa.

1.1 Tavoitteet ja tutkimusmenetelmä

Tässä kandidaatintyössä keskitytään Sigfox-teknologian käytettävyyden analysointiin erityisesti sovelluskehittäjän näkökulmasta. Työn tavoitteena on arvoida Sigfox-verkon käytettävyyttä, sekä viestikoon ja liikkuvuuden vaikutusta viestinnän toimintaan. Sigfox on lisensivapailla taajuuksilla toimiva LPWAN-verkkoteknologia, joka esitellään tarkemmin luvussa 2.1.1.

Työssä toteutetaan koejärjestely, jonka avulla analysoidaan viestien kulkuaikaa, lähetysvarmuutta ja yhteyden laatua Sigfox-verkossa. Koejärjestelyn tueksi toteutetaan kyselytutkimus yrityksiin, jotka käyttävät Sigfox-verkkoa. Koejärjestelyn ja kyselyn perusteella on tarkoitus selvittää Sigfox-verkon nykyistä käytettävyyttä sovelluskehittäjän näkökulmasta, ja erityisesti siihen liittyviä mahdollisia haasteita.

Koejärjestelyssä liikkuvuuden vaikutusta pyritään selvittämään tekemällä erikseen mittauksia staattisesti, sekä lähettävän aseman liikkeessa. Vertailemalla näistä mittauksista saatuja tuloksia voidaan arvioida liikkuvuuden vaikutusta viestien kulkuaikaan ja yhteyden laatuun.

Työssä vastataan seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

1. Miten Sigfoxin käytännön toimintaa on tutkittu aikaisemmin tieteellisessä tutkimuksessa?
 - 1.1. Miten viestien kulkuaikaa on tutkittu?
 - 1.2. Miten yhteyden laatua on tutkittu?
 - 1.3. Miten liikkuvuuden vaikutusta on tutkittu?
2. Millaisia ovat Sigfoxin nykyiset käyttökohteet?
3. Millainen on Sigfox verkon käytettävyys Suomessa?
 - 3.1. Kuinka suuri on viestien tyypillinen kulkuaika?
 - 3.2. Onko yhteyden laatu tyypillisesti hyvä?
 - 3.3. Vaikuttaako lähettävän aseman liikkuvuus kulkuaikaan/yhteyden laatuun?

Toteutettavan koejärjestelyn suunnitteluun ja tulosten analysointiin käytetään Peffersin et al. [6] artikkelissaan määrittelemää design science -tutkimusmenetelmää. Taulukossa 1 alla on esiteltyä design science -tutkimusmenetelmän kuusi osa-alueita, sekä niihin liittyvät luvut. Työn rakenne on esitelty tarkemmin luvussa 1.2.

Taulukko 1. design science -tutkimusmenetelmän osa-alueet tässä kandidaatintyössä

Osa-alue	Luvut
1. ongelman määrittäminen ja sen tärkeys	1 & 2
2. ratkaisun tavoitteet	1 & 3
3. ratkaisun suunnittelu ja kehittäminen	3
4. ratkaisun toiminnan esittely	3
5. ratkaisun toimivuuden arviointi	5
6. Tuloksien esittely	4

1.2 Työn rakenne

Luvussa kaksi esitellään Sigfox, sekä sen erot muihin LPWAN-teknologioihin nähden, ja käsitellään sigfoxin käyttökohteita. Lisäksi tutustutaan aikaisempiin LPWAN-verkkojen toimintaan liittyviin tutkimuksiin. Luvussa kolme kuvataan koejärjestelyiden suunnittelu, sekä niiden toiminta. Luvussa neljä esitellään koejärjestelyiden avulla saatuja tuloksia. Luvussa viisi keskustellaan saatujen tuloksien merkityksestä ja arvioidaan mahdollisia puutteita. Lopuksi luvussa kuusi tehdään yhteenveto työstä.

2 LPWAN-teknologiat ja aiempi tutkimus

Tässä luvussa esitellään Sigfox-verkkoteknologia ja sen eroavaisuudet kahteen muuhun LPWAN-teknologiaan nähden. Luvussa esitellään Sigfoxin nykyisiä käyttökohteita. Lisäksi tutustutaan LPWAN-teknologioiden toimintaan liittyvään aikaisempaan tieteellisiin tutkimuksiin.

2.1 LPWAN-teknologiat

Tässä alaluvussa esitellään Sigfox LPWAN-teknologia. Lisäksi esitellään LoRaWAN, NB-IoT ja Sigfox teknologioiden eroja.

2.1.1 Sigfox

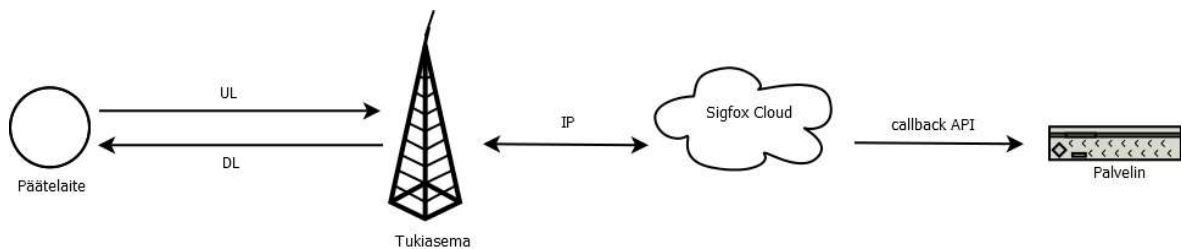
Sigfox on kehitetty vuonna 2010 Ranskassa. Sigfox-verkko on saatavilla 75 maassa. [7] Sigfox käyttää lisensoimattomia ISM (Industrial, Scientific and Medical) taajuuksia, joka on Euroopassa 868 MHz. Käytettävissä oleva taajuusalue on 192 KHz leveä välillä 868.034-868.226 MHz [8]. UL (uplink) viestien modulaatioon käytetään D-BPSK (differential binary phase shift keying) modulaatiota. DL (downlink) viesteissä modulaationa on GFSK (Gaussian frequency-shift keying) modulaatio. Sigfox käyttää UL viestien lähettämisessä UNB (Ultra Narrow Band) teknologiaa, jossa viestien kaistanleveys on 100 Hz. DL viesteissä kaistanleveys on 600 Hz. UL viestien lähetysnopeus on 100 bps ja DL viestien 600 bps. Viestejen hyötykuorman koot on rajattu UL viesteissä 12 tavuun ja DL viesteissä 8 tavuun. [9]

Viestien hyötykuorman koko voi olla mielivaltainen sallituissa rajoissa, eli 0–12 tavua UL viesteille ja 0–8 tavua DL viesteille. Sigfox-protokollassa on kuitenkin neljä määriteltyä kokoa UL viesteille: 0, 1, 4, 8 tai 12 tavua. Hyötykuorman pituus on lähetettäessä aina jokin määritellyistä pituuksista. Esimerkiksi jos hyötykuormaksi annetaan 6 tavun viesti, siihen lisätään 2 tavua, jotta lähetettäessä viestin koko on 8 tavua. DL viesteillä on vain yksi määritelty koko, joka on 8 tavua. [10]

Lisensoimattomien ISM-taajuuksien käyttö on rajattua. Tämän vuoksi Sigfox-viestien lähettäminen on rajattu 140 UL-viestiin ja 4 DL-viestiin vuorokaudessa, joten jokaisen lähetetyn

viestin saapumista ei voida vahvistaa päätelaitteelle. Viestinnän luotettavuuden varmistamiseksi viestit lähetetään kolme kertaa eri taajuuskanavilla [3]. Lisäksi vähintään kolmen tukiaseman tulisi vastaanottaa lähetetyt viestit [9].

Sigfox-verkon toiminta on esitetty alla kuvassa 1. Sigfox päätelaite voi lähettää UL-viestin minä tahansa ajankohtana ilman aikaisempaa yhteyttä tukiasemiin [11]. DL-viesti voidaan lähettää vain vastauksena UL viestiin, mikäli päätelaite on ilmoittanut odottavansa vastausta asettamalla viestin BF (Bidirectional Frag) bitin arvoon 1 [8]. Tukiasema/tukiasemat vastaanottavat viestin ja toimittavat sen IP (Internet Protocol) viestinnällä Sigfox cloud -palveluun. Sigfox cloud -palvelu tarjoaa callback API:n (Application Programming Interface), jonka avulla viestit ja niihin liittyvä metadata, kuten vastaanottoaika, voidaan toimittaa ulkopuoliselle palvelimelle [12].



Kuva 1. Sigfox verkon toiminta [8]

2.1.2 Eroavaisuudet muihin teknologioihin

Taulukossa 2 alla on esitettyä LoRaWAN, NB-IoT ja Sigfox LPWAN-teknologioiden ominaisuuksia.

Taulukko 2. LPWAN-teknologioiden ominaisuuksia [13]–[15]

Ominaisuus	LoRaWAN	NB-IoT	Sigfox
Taajuus (EU)	ISM 868 MHz	GSM/LTE 700–2100 MHz	ISM 868 MHz
Kaistanleveys	125, 250, 500 kHz	200 kHz	100, 600 Hz
Kantama	5 km (kaupunki) 20 km (maaseutu)	1 km (kaupunki) 10 km (maaseutu)	10 km (kaupunki) 40 km (maaseutu)
Max ERP (EU)	14 dBm	23 dBm	14 dBm
Uplink (UL) lähetysnopeus	0.3–50 kbps	0.5–27.2 kbps	0.1 kbps (RC1, RC3, RC5, RC6, RC7) 0.6 kbps (RC2, RC4)
Downlink (DL) lähetysnopeus	0.3–50 kbps	0.3–62.5 kbps	0.6 kbps
Suurin viestin koko	242 B	1600 B	12 B (UL), 8 B (DL)

Taulukossa 2 esitetyt ominaisuudet havainnollistavat LoRaWAN, NB-IoT ja Sigfox -teknologioiden eroja.

Käytettyjen taajuuksien osalta on huomionarvoista, että LoRaWAN ja Sigfox teknologiat käyttävät lisensoimatonta ISM taajuusaluetta, kun taas NB-IoT käyttää lisensoituja GSM (Global System for Mobile communications) ja LTE (Long Term Evolution) taajuusalueita. Lisensoimattomien taajuuksien käytön ansiosta Sigfox ja LoRaWAN -teknologioiden kustannukset ovat matalammat verrattuna NB-IoT-teknologiaan [14].

Sigfoxin kantama on pidempi kuin NB-IoT ja LoRaWAN -teknologioissa. Toisaalta on huomioitava Sigfoxilla olevan myös pienin kaistanleveys, lähetysnopeus ja viestinkoko. Tämän johdosta Sigfox sopiikin erityisesti esimerkiksi sensoridatan lähettämiseen.

2.2 Sigfoxin käyttökohteet

Sigfoxin käyttökohteita tiedusteltiin yrityksille lähetetyissä sähköpostikyselyissä. Kyselyyn vastasi neljä yritystä: Codea, Connected Finland, Integral ja Solution Compass. Saatujen vastauksien perusteella yleisiä Sigfoxin käyttökohteita ovat erilaiset etäluettavat mittarit ja esimerkiksi sisäilman laatua ja lämpötilaa seuraavat anturit.

Kirjallisuuden perusteella Sigfoxille sopivia käyttökohteita ovat erityisesti erilaiset anturit ja mittarit. Käyttökohteita rajoittavat erityisesti viestien pieni koko ja downlink-viestien

pieni lukumäärä. Näiden ominaisuuksien vuoksi Sigfox ei sovellu käyttökohteisiin, joissa tarvitaan suuria viestikokoja tai, joissa päätelaitteelle lähetetään usein paluuviestejä. [13], [14]

2.3 Aiempi tutkimus

Tässä alaluvussa perehdytään aiempaan Sigfoxin toimintaan liittyvään tutkimukseen. Tutkimuksia haettiin IEEE Xplore -alustalta. Hakuja tehtiin hakusanoilla ”Sigfox latency”, ”Sigfox performance” ja ”Sigfox mobility”. Käytetyillä hakusanoilla saatiin yhteensä 98 osumaa. Osumista valittiin otsikon ja tiivistelmän perusteella kulkuaikeisiin, yhteyden laatuun ja liikkuvuuteen liittyvät artikkelit. Artikkeleita, joissa Sigfox mainittiin vain esimerkkinä LPWAN-tekniologiasta ei valittu. Yhteensä valittiin yhdeksän artikkelia, joihin tutustutaan tässä alaluvussa.

Brotzun et al. [17] tutkimuksessa toteutettiin liikkuva koejärjestely, jossa mitattiin Sigfox viestinnän virrankulutusta ja pakettihävikkiä. Mittauksia tehtiin kaupunkiympäristössä ajoneuvon liikkua matalilla nopeuksilla. Virrankulutusta ja pakettihävikkiä verrattiin mobiiliverkolla tehtyihin mittauksiin. Sigfoxin todettiin käyttävän vähemmän virtaa ja havaittu pakettihävikki oli pienempi kuin mobiiliverkolla tehdyissä mittauksissa. Sigfox mittauksissa havaittiin vain 1 % suuruinen pakettihävikki. Koejärjestelyssä käytettiin MKRFOX1200 Sigfox lähetintä. Tässä kandidaatintyössä käytetään samaa Sigfox lähetintä, joten pakettihävikin tuloksia voitaneen verrata tähän tutkimukseen.

De Oliveiran et al. [11] tutkimuksessa tutkittiin LoRaWAN, NB-IoT ja Sigfox teknologioiden eroja viestien lähetysviiveissä. Lähetysviiveellä tarkoitettiin aikaa, joka tarvitaan viestintäyhteyden muodostamiseen. Tutkimus suoritettiin tutkimalla viestintäteknologioiden teknisiä ominaisuuksia ja arvioimalla niistä aiheutuvia lähetysten viiveitä. Tutkimuksessa todettiin, että Sigfoxilla viestit voidaan lähettää ilman erillisen viestintäyhteyden muodostamista, joten lähetysviivettä ei ole.

E et al. [18] esittelivät artikkelissaan LoRaWAN, MIOTY, Sigfox ja NB-IoT -teknologioilla tehtyjä mittauksia. Mittauksia tehtiin laboratorioissa, sekä ulkotiloissa eri etäisyyksillä vastaanottavasta tukiasemasta. Laboratorioissa tehdyissä mittauksissa arvioitiin teknologioiden kykyä sietää häiriösignaaleja. Ulkotiloissa tehdyissä mittauksissa Sigfoxin osalta arvioitiin

RSSI (Received signal strength indicator) ja SNR (Signal-to-noise ratio) -arvoja, sekä vastaanotettujen viestien osuutta eri etäisyyksillä vastaanottavasta tukiasemasta. Laboratoriossa tehdyissä testeissä havaittiin Sigfox, MIOTY ja NB-IoT -teknologioiden sietävän häiriösignaaleja hyvin. Ulkotiloissa tehdyissä mittauksissa Sigfox ja NB-IoT -teknologioilla havaittiin muita parempi kantama vastaanotettujen viestien osuutta arvioitaessa. Kaikki Sigfox-viestit vastaanotettiin 9 kilometriä pienemmillä etäisyyksillä.

Katusicin et al. [19] artikkelissa arvioitiin LoRaWAN, NB-IoT ja Sigfox -teknologioiden sopivuutta erilaisiin käyttökohteisiin. Sopivuutta arvioitiin teknologioiden teknisten ominaisuuksien perusteella. LoRaWAN ja Sigfox -teknologioiden todettiin sopivan liikkuviin käyttökohteisiin, kuten esineiden, henkilöiden ja lemmikkien paikannukseen. Sigfoxin todettiin olevan soveltumaton käyttökohteisiin, joissa laitteelle täytyy lähettää komentoja.

Lavricin et al. [9] tutkimuksessa analysoitiin IoT verkkojen ongelmia. Tutkimuksessa Sigfox verkkoa emuloitiin Sigfox SDR Dongle vastaanottimen avulla, eli SDR Dongle vastaanotin toimi tutkimuksessa tukiasemana. Lavric et al. tutkivat ON Sigfox-GEVB laitteen soveltuvuutta Sigfox verkkoon. Laitteen lähettämää signaalia analysoitiin ja sen todettiin täyttävän Sigfoxin vaatimukset.

Mikhaylovin et al. [20] tutkimuksessa tehtiin mittauksia Sigfox verkossa 311 eri mittauspisteessä kaupunkialueella. Mittauksien perusteella esitettiin arviot etäisyyden vaikutuksesta SNR ja RSI -arvoihin, sekä SNR ja RSSI arvojen välinen suhde. Mittausdatan perusteella arvioitiin myös RSSI paikannuksen tarkkuutta. Mittauksessa 94,79 % viesteistä saapui perille. Tutkimuksessa huomattiin, että samalla etäisyydeltä lähetettyjen viestien välillä SNR ja RSSI arvoissa oli paljon vaihtelua. Tässä kandidaatintyössä yhteyden laatua arvioitaessa on huomioitava, että yksittäisiä viestejä ei kannata vertailla RSSI ja SNR arvojen vaihtelun vuoksi.

Oliveiran et al. [21] artikkelissa vertailtiin LoRaWAN ja Sigfox teknologioita liikkuvissa mittauksissa. LoRaWAN ja Sigfox lähettimet sijoitettiin samaan kotelointiin. Artikkelissa esiteltiin kaksi eri mittaustapaa. Ensimmäisessä mittaustavassa LoRaWAN ja Sigfox lähettimet lähettivät viestinsä samaan aikaan. Toisessa mittaustavassa viestit lähetettiin eri ajanhetkillä. Mittauksissa kerättiin tietoa pakettihäviöistä ja SNR arvoista. SNR arvo kuvastaa signaalin ja kohinan suhdetta. Negatiivinen SNR arvo tarkoittaa, että vastaanotetun signaalin teho on pienempi kuin taustakohinan teho. Mittauksien perusteella Sigfox viestien

vastaanottaminen vaati vähintään 6 dB SNR arvon, kun taas LoRaWAN viestejä vastaanotettiin matalammilla kuin -10 dB SNR arvoilla. Molemmissa mittauksissa Sigfox viestien keskimääräinen pakettihävikki oli alle 30 %. LoRaWAN viestien pakettihävikki oli suurempi, kun viestejä lähetettiin samanaikaisesti. Viestien samanaikainen lähettäminen ei vaikuttanut Sigfox viestien keskiarvolliseen pakettihävikkiin, mutta pakettihävikissä oli suurempia vaihteluita mittauksien välillä. Tässä kandidaatintyössä yhteyden laatua voidaan arvioida RSSI ja SNR arvojen avulla, mikäli ne ovat saatavilla Sigfox backend -palvelusta. Olisi myös hyvä selvittää tämän artikkelin tapaisesti, kuinka suuri osuus viesteistä pääsee perille liikkuvissa mittauksissa.

Ribeiro et al. [22] esittelivät tutkimuksessaan Sigfox teknologiaa käyttävän paikannustietoa lähettävän laitteen. Laitteessa paikantamiseen käytettiin erillistä GPS (Global Positioning System) paikannuslaitetta. Esitellyn laitteen toimintaa testattiin kahdessa eri liikkuvassa mittauksessa. Ensimmäinen mittaus tehtiin laitteen liikkuessaa moottoritiellä keskinopeudella 57,4 km/h. Toinen mittaus suoritettiin kaupunkiympäristössä. Toisessa mittauksessa ajoneuvon keskinopeus oli 30 km/h. Mittauksissa vastaanottavia Sigfox-tukiasemia oli yksi, jonka sijainti oli tiedossa. Mittauksissa kerättiin tietoa onnistuneesti vastaanotettujen viestien lukumääristä. Ensimmäisessä mittauksessa 68 % viesteistä ei saapunut perille, toisessa 56,86 %. Ribeiro et al. mukaan mittaustuloksiin vaikuttivat liikkuvuuden lisäksi myös maaston korkeuserot, sekä käytetyn tukiaseman kattavuus.

Wangin et al. [23] artikkelissa Tehtiin kolme eri liikkuvaa mittausta, joissa arvioitiin Sigfox, NB-IoT, Cat-M1 ja LoRaWAN -teknologioilla lähetettyjen viestien kulku-aikoja ja onnistuneiden lähetysten osuutta. Sigfox viestien kulku-aikaa arvioitiin päätelaitteen ja vastaanottavan tukiaseman aikaleimojen perusteella. Ensimmäisessä ja toisessa mittauksessa päätelaitteet sijoitettiin auton kojelaudalle. Kolmannessa mittauksessa päätelaitteet sijoitettiin lennokkiin. Ensimmäisessä mittauksessa auto liikkui 100 km/h nopeudella ja toisessa 70 km/h nopeudella. Kolmannessa mittauksessa lennokka lensi 60 metrin korkeudella ja 70 km/h nopeudella. Ensimmäisessä mittauksessa Sigfox-viesteistä 61,96 % ei vastaanotettu ja viestien kulku-aika oli keskimäärin 3,63 sekuntia. Toisessa mittauksessa 73,08 % viesteistä ei vastaanotettu ja kulku-aika oli keskimäärin 3,43 sekuntia. Kolmannessa mittauksessa kaikki Sigfox-viestit vastaanotettiin ja kulku-aika lyhenyi keskimäärin 0,58 sekuntiin. Kolmannen mittauksen osalta on huomioitava, että päätelaite oli sijoitettu lennokkiin, mikä ei vastaa tämän kandidaatintyön mittaolosuhteita. Tässä kandidaatintyössä kulku-aikoja arvioidaan

päätelaitteen ja toteutettavan palvelimen välillä, joten artikkelissa esitetyt kulkuajat eivät ole verrattavissa tämän kandidaatintyön tuloksiin.

3. Koejärjestelyn suunnittelu ja toteutus

Tässä luvussa esitellään koejärjestelyjen suunnittelu ja koejärjestelyyn käytetty järjestelmä. Lisäksi käydään läpi, miten koejärjestelyt toteutetaan. Tarkoituksena on toteuttaa kahdentyyppisiä koejärjestelyjä: staattisia ja liikkuvia. Vertailemalla näistä saatuja tuloksia voidaan selvittää liikkuvuudesta aiheutuvia muutoksia kulkuajassa ja yhteydenlaadussa.

3.1 Koejärjestelyihin käytetty järjestelmä

Koejärjestelyissä halutaan arvioida viestien kulku-aikaa päätelaitteelta palvelimelle, joten tarvitaan kaksi eri osa-aluetta: Sigfox verkkoon viestejä lähettävä päätelaite ja Sigfox cloudista viestit vastaanottava palvelin. MKRFOX 1200 lähettimen käyttöön liittyen on saatavilla ohjesivut Arduinon dokumentaationsivuilla [24]. Vastaanottavan palvelimen toteutuksesta on saatavilla esimerkki Sigfoxin GitHub sivuilla [25].

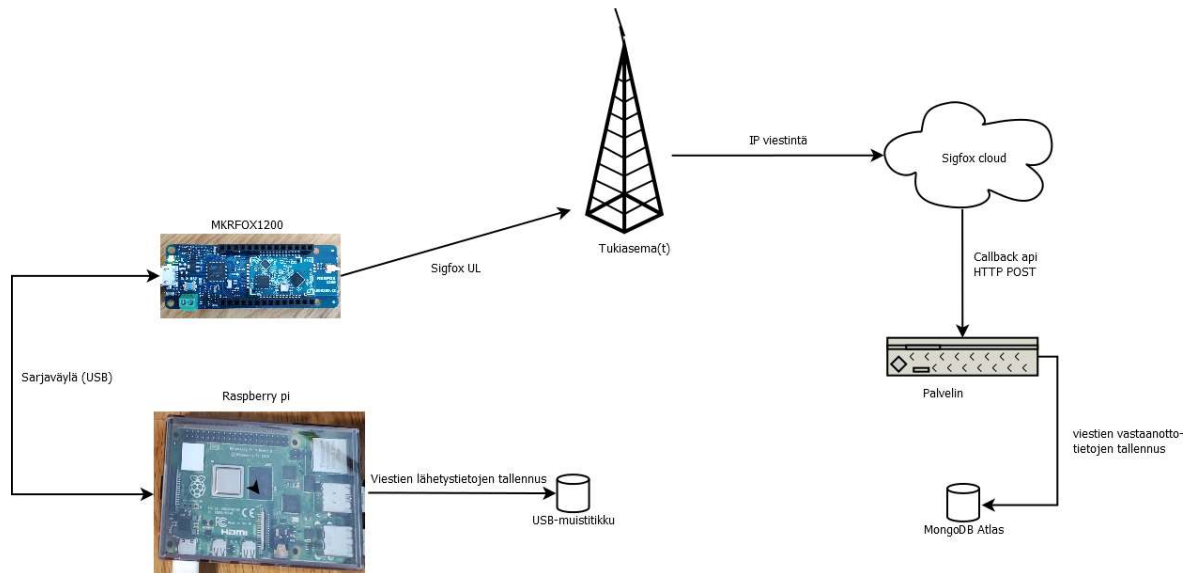
Koejärjestelyillä pyritään kokonaisuutena vastaamaan aiemmin luvussa 1.1 esitettyihin tutkimuskysymyksiin Sigfox verkon käytettävyyteen liittyen. Koejärjestelyn suunnittelussa voidaan lisäksi käyttää apukysymyksenä kysymystä: *Miten Sigfox verkon käytettävyyden parametreja voidaan arvioida?*

Kulkuajan arvioimiseksi viestien lähetys- ja vastaanottoajat pitää tallentaa. Viestit täytyy olla mahdollista yksilöidä, jotta viestien lähetysvarmuutta voidaan arvioida ja viestien lähetksen sijainti voidaan määrittää liikkuvissa mittauksissa.

3.1.1 Päätelaite

Sigfox viestejä lähettävänä päätelaitteena käytetään Arduino MKR FOX 1200 Sigfox-lähetintä ja Raspberry pi -tietokonetta. Päätelaitteelle voidaan kirjoittaa ohjelmia esimerkiksi Arduino IDE kehitysympäristössä. MKR FOX 1200 voidaan ohjelmoida lähettämään viestejä itsenäisesti esimerkiksi mitattujen sensoriarvojen perusteella. Koejärjestelyn toteuttamiseksi tarvitaan kuitenkin tieto viestien lähetysajasta, jotta viestien kulku-aikaa voidaan arvioida. Viestin lähetysajan tallentamiseksi Raspberry pi ja MKR FOX 1200 yhdistettiin USB

(Universal Serial Bus) yhteydellä, jolloin ne voivat kommunikoida keskenään sarjaväylää pitkin. Tällä tavoin aikaleiman tallennus voidaan hoitaa Raspberry pi:llä. Viestin vastaanottoaika tallennetaan vastaavasti palvelimella. Järjestelmän toiminta on esitetty alla kuvassa 2.



Kuva 2. Koejärjestelyssä käytetty järjestelmä

Eri viestikoot toteutetaan siten, että viestinumeroit valitaan eri numeroväleiltä. Raspberry kirjoittaa sarjaväylään esimerkiksi luvun 1001, minkä jälkeen viesti lähetetään MKR-FOX1200:lla merkkijonona '1001'. Tällöin viestin koko on 4 tavua, sillä yhden merkin koko on yksi tavu.

MKR FOX 1200:lle tehtiin ohjelma (liite 1), joka ensin alustaa sarjaväylän ja Sigfox kirjaston. Sarjaväylän baudinopeutena (engl. baudrate) käytetään 115 200 bps:ää, sillä se oli Raspberry pi:llä käytetyn USB portin baudinopeuden oletusasetus. Kommunikaation onnistumiseksi baudinopeudet täytyy asettaa samoiksi molemmilla laitteilla. Seuraavana ohjelmassa on loop()-aliohjelma, jota ajetaan Arduino koodissa jatkuvasti. Aliohjelmassa luetaan sarjaväylästä Raspberyllä lähetetty merkkijono, joka alkaa aina merkillä ':' ja päättyy merkkiin 'x'. Alku ja loppu merkin avulla varmistutaan siitä, että viestissä lähetetään varmasti vain haluttu merkkijono. Kun loppumerkki on luettu, kutsuu ohjelma sendString()-aliohjelmaa, jossa viesti lähetetään Sigfox-verkkoon. Lähetysten jälkeen sarjaväylään kirjoitetaan paluuarvoksi endPacket()-komennon palauttama arvo, joka on joko 0 (lähetysten onnistuessa) tai 1 (lähetys ei onnistunut).

Raspberry pi:lle tehtiin skripti (liite 2), joka tallentaa ensin aikaleiman ja lähettää sitten viestin numeron sarjaväylää pitkin USB yhteyden kautta MKR FOX 1200:lle. Skriptin käyttämät

viestinumeron ylä- ja alarajat päätettiin syöttää skriptiin komentorivin kautta, jolloin voidaan helposti lähettää viestejä eri numeroväleiltä. Skripti tulostaa viestinumeron, lähetystä edeltävän aikaleiman, lähetysajan millisekunneissa, T_delay ajan (lähetystä edeltävän aikaleiman ja sen jälkeisen aikaleiman erotus millisekunneissa) ja MKRFOX1200 palauttaman endPacket arvon. Skriptin tulostus ohjattiin tiedostoon, jolloin tulostetut tiedot saatiin talteen myöhempää analyysia varten. Tulostuksen ohjaus tehtiin tee-komennolla, jonka avulla tulostus tapahtuu sekä haluttuun tiedostoon että komentoriville. Tällä tavoin skriptin tulostusta voidaan seurata komentoriviltä, jolloin voidaan varmistua sen toiminnasta. Skriptin tulostus tallennettiin CSV-tiedostoon (Comma Separated Values), jolloin tiedosto voitiin myöhemmin avata taulukkolaskentaohjelmassa. Esimerkki skriptin tulostuksesta tallennetusta tiedostosta on esitetty kuvassa 3 alla.

msg_nr	Timestamp_rx	Trx	T_delay	endPacket
1000	2022-02-27T09:33:43+0000	1.64595E+12	6403	0
1001	2022-02-27T09:43:50+0000	1.64596E+12	6268	0
1002	2022-02-27T09:53:56+0000	1.64596E+12	6267	0
1003	2022-02-27T10:04:02+0000	1.64596E+12	6265	0
1004	2022-02-27T10:14:09+0000	1.64596E+12	6267	0
1005	2022-02-27T10:24:15+0000	1.64596E+12	6267	0
1006	2022-02-27T10:34:21+0000	1.64596E+12	6267	0
1007	2022-02-27T10:44:28+0000	1.64596E+12	6266	0
1008	2022-02-27T10:54:34+0000	1.64596E+12	6267	0

Kuva 3. Skriptin tulostuksesta tallennetut tiedot

3.1.2 Palvelin

Sigfox-viestit vastaanottava palvelin toteutettiin Node.js palvelimena. Palvelin vastaanottaa Sigfox backend -palvelusta lähetettyjä callback-viestejä. Callback-viestien sisältö ja vastaanottoaika tallennetaan MongoDB tietokantaan. Palvelimen ohjelmakoodi on esitetty liitteessä 3. Palvelin toteutettiin ensin ilmaiselle Heroku alustalle. Herokussa toteutetun palvelimen avulla tehtyjen mittauksien välillä havaittiin merkittäviä eroja samankokoisten viestien kulkuajoissa, minkä johdosta palvelin siirrettiin Tieteen tietotekniikan keskuksen cPouta-alustalle.

Heroku

Palvelin päätettiin ensin toteuttaa Heroku alustalla, sillä sen käyttäminen mahdollistaa nopeat muutokset palvelimen ohjelmakoodiin, mikä on sovelluskehittäjän näkökulmasta erittäin hyvä ominaisuus. Herokun huonona puolena on, että resurssien säästämiseksi palvelin asetetaan lepotilaan 30 minuutin toimittomuuden jälkeen [26]. Sigfox viestejä voidaan lähettää 10 minuutin välein, joten palvelimen lepotilaan siirtymisen ei pitäisi muodostua ongelmaksi. Ennen viestien lähettämisen aloittamista palvelin voidaan herättää avaamalla sen nettisivu selaimessa, jolloin ensimmäisen lähetetyn viestin kulku-aikaan ei aiheudu ylimääräistä viivettä palvelimen mahdollisen lepotilassa olemisen takia.

MongoDB tietokantana käytettiin MongoDB Atlas palvelun tarjoamaa ilmaista pilvipohjaista tietokantaa. Tietokanta sijaitsee siis eri alustalla kuin itse palvelin. Tämä todennäköisesti aiheuttaa tietojen tallentamiseen lisäviivettä, mikä ei kuitenkaan vaikuta viestien kulku-aikojen arviointiin, sillä kulkuajan arvioimiseen käytetty viestin vastaanoton aikaleima tallennetaan muuttujaan ennen tietojen tallennusta tietokantaan.

cPouta

Palvelin toteutettiin cPoudassa virtuaalisella Ubuntu 20.04 instanssilla. Palvelin toteutettiin käyttäen samaa Node.js ohjelmakoodia, kuin Herokulla toteutetussa palvelimessa. Tietokantana käytettiin samaa MongoDB Atlas -tietokantaa.

Palvelimen sijaintia arvioitiin Windowsin tracert-komennolla. Komennon antaman tulosteen (kuva 4) perusteella arvioitiin palvelimen sijaitsevan Kajaanissa.

```
Tracing route to vm4461.kaj.pouta.csc.fi [128.214.255.150]
over a maximum of 30 hops:
  1  <1 ms    <1 ms    <1 ms    86.50.36.1
  2  <1 ms    <1 ms    <1 ms    risuaita-rtr1.lnet.fi [86.50.48.57]
  3  <1 ms    <1 ms    <1 ms    funet-rtr.lnet.fi [86.50.48.61]
  4  17 ms    8 ms     7 ms     lappeenranta2.ip.funet.fi [86.50.255.179]
  5  7 ms     7 ms     7 ms     mikkeli1.ip.funet.fi [86.50.255.177]
  6  7 ms     7 ms     7 ms     joensuu1.ip.funet.fi [86.50.255.157]
  7  6 ms     7 ms     6 ms     joensuu2.ip.funet.fi [86.50.255.193]
  8  6 ms     6 ms     7 ms     kajaani2.ip.funet.fi [86.50.255.155]
  9  6 ms     6 ms     6 ms     rr3-et-1-1-0-2.ip.csc.fi [193.166.255.51]
 10  9 ms     7 ms     7 ms     vm4461.kaj.pouta.csc.fi [128.214.255.150]
 11  8 ms     7 ms     7 ms     vm4461.kaj.pouta.csc.fi [128.214.255.150]

Trace complete.
```

Kuva 4. Palvelimen sijainnin arviointi

Palvelimen viivettä arvioitiin ping-komennolla. Komennolla saadun tulosteen (kuva 5) perusteella palvelin vaikutti toimivan luotettavasti.

```
Ping statistics for 128.214.255.150:  
Packets: Sent = 200, Received = 200, Lost = 0 (0% loss),  
Approximate round trip times in milli-seconds:  
Minimum = 7ms, Maximum = 35ms, Average = 10ms
```

Kuva 5. Ping-komennon tuloste

3.2 Koejärjestelyt

Koejärjestelyjä toteutetaan sekä staattisena että liikkuvana. Seuraavissa alaluvuissa esitellään koejärjestelyjen suunnittelua ja toteutusta.

3.2.1 Staattinen koejärjestely

Staattisessa koejärjestelyssä lähetetään eri kokoisia viestejä. Luvussa 2.1.1 esitettiin Sigfox viestien lähetyskoot. Lähetyskokoina käytetään 1, 4, 8 ja 12 tavua. 1 tavun viestejä lähetettäessä viestin sisältönä ei voida käyttää viestinumeroa merkkijonona, sillä 1 tavun kokoiseen viestiin mahtuisi merkkijonona vain numerot 0–9. 1 tavun viestejä lähetettäessä kirjoitetaan viestien sisällöksi binaarinen numero, jolloin saadaan hyödynnettyä numeroita 0–255.

Viestejä lähetetään aiemmin luvussa 3.1.1 esitetyllä päätelaitteella. Päätelaite sijoitetaan sisätiloihin ikkunan lähelle. Päätelaitteen sijainti pyritään pitämään samana eri mittausten välillä. Mittauksien toteutus sisätiloissa todennäköisesti heikentää yhteyden laatua jonkin verran rakennuksen aiheuttaman signaalin heikentymisen vuoksi. Eri mittauksien välillä olosuhteet ovat kuitenkin samat, joten mittausten tuloksia voidaan verrata keskenään.

Mittauksissa kerätään tietoa viestien kulkuajasta ja mahdollisista menetetyistä viesteistä toteutetun järjestelmän avulla. Menetetyt viestit voidaan tunnistaa vertaamalla lähetettyjen viestien viestinumeroita vastaanotettujen viestien viestinumeroihin, jolloin puuttuvat viestit on helppo huomata. Sigfoxin backend -palvelusta voidaan lisäksi ladata viesteihin liittyvää lisätietoa, jota ei saada lähetettyä callback-viesteillä omalle palvelimelle. Ladattavana lisätietona on saatavilla muun muassa viestien RSSI arvot eri vastaanottoasemille. Lisätietojen perusteella voidaan arvioida viestien keskimääräistä yhteyden laatua RSSI arvojen ja viestin vastaanottaneiden tukiasemien lukumäärän perusteella. Sigfox tarjoaa myös oman LQI eli

Link quality indicator arvon, joka määritetään vastaanotetun viestin RSSI arvon ja viestin vastaanottaneiden tukiasemien lukumäärän perusteella [27]. Taulukossa 3 alla on esitetty LQI arvon määrittämisen perusteet.

Taulukko 3. LQI arvon määrittämisen perusteet [27]

RSSI	Tukiasemien lukumäärä	LQI
RSSI > -122 dBm	3	EXCELLENT
-135 dBm < RSSI <= -122 dBm	3	GOOD
RSSI > -122 dBm	1 tai 2	GOOD
-135 dBm < RSSI <= -122 dBm	1 tai 2	AVERAGE
RSSI <= -135 dBm	-	LIMIT

3.2.2 Liikkuva koejärjestely

Liikkuvassa koejärjestelyllä on tarkoituksena kerätä tietoa päätelaitteen liikkuvuuden vaikutuksesta viestien kulkuajoihin, yhteyden laatuun ja lähetyssvarmuuteen. Tarkoituksena on verrata liikkuvassa koejärjestelyssä saatuja tuloksia staattisen koejärjestelyn tuloksiin, jolloin voidaan arvioida mitattujen parametrien eroja koejärjestelyjen välillä.

Liikkuvia mittauksia varten suunnitellaan ajettava reitti. Päätelaite sijoitetaan mittauksissa ajoneuvon sisälle. Mittauksen aikana ajoneuvon sijaintitietoa tallennetaan puhelimella Geo Tracker -applikaatiolla [28] yhden sekunnin välein, jolloin viestin lähetyssijainti pystytään määrittämään viestin aikaleiman perusteella. Lähetyssijainnin perusteella voidaan arvioida ajoneuvon nopeutta lähetyshetkellä. Nopeus on luvun 2.2 aikaisempien tutkimusten perusteella yksi merkittävimmistä viestin lähetyssvarmuuteen vaikuttavista tekijöistä päätelaitteen liikkuaessa.

Kerätty sijaintitieto ladataan Qgis-karttaohjelmaan [29], jossa voidaan merkitä viestien lähetyssijainnit karttaan lähetyksien aikaleimojen perusteella. Aikaleimat tallennetaan päätelaitteella, joten myös epäonnistuneiden lähetyksien lähetyssijainti saadaan arvioitua. Lähetyssijaintia ympäröivien sijaintitietopisteiden avulla voidaan arvioida ajoneuvon nopeutta lähetyshetkellä laskemalla pisteiden välinen keskinopeus esimerkiksi 5 sekunnin aikaväliltä lähetyssijaintien kohdalla.

Liikkuvassa mittauksissa rajoittavaksi tekijäksi muodostuu mittauksen kesto. Viestejä voidaan lähettää Sigfox verkossa 10 minuutin välein, joten esimerkiksi tunnin mittauksen

aikana voidaan lähettää vain kuusi viestiä. Lähetettyjen viestien määrä on otettava huomioon tuloksien merkittävyyttä arvioitaessa.

4. Tulokset

Tässä luvussa esitellään mittauksissa saatuja tuloksia. Ensin esitellään staattisista mittauksista saatuja tuloksia, minkä jälkeen esitellään liikkuvien mittausten tuloksia.

4.1 Staattiset mittaukset

Viestejä lähetettiin staattisesti 1, 4, 8 ja 12 tavun kokoisina. Viestien kulkuajoista ja yhteyden laadusta saatuja tuloksia esitellään seuraavissa alaluvuissa. Lähetysvarmuutta ei käsitellä omassa alaluvussaan, sillä staattisissa mittauksissa kaikki lähetetyt viestit vastaanotettiin onnistuneesti.

Kulkuajan arvioimiseksi käytettiin vain cPoudassa toteutetulle palvelimelle lähetettyjä viestejä. Herokussa toteutetulle palvelimelle lähetetyt viestit huomioitiin yhteyden laatua arviotaessa. Viestien määrät eri kokoisille viesteille on esitetty alla taulukossa 4.

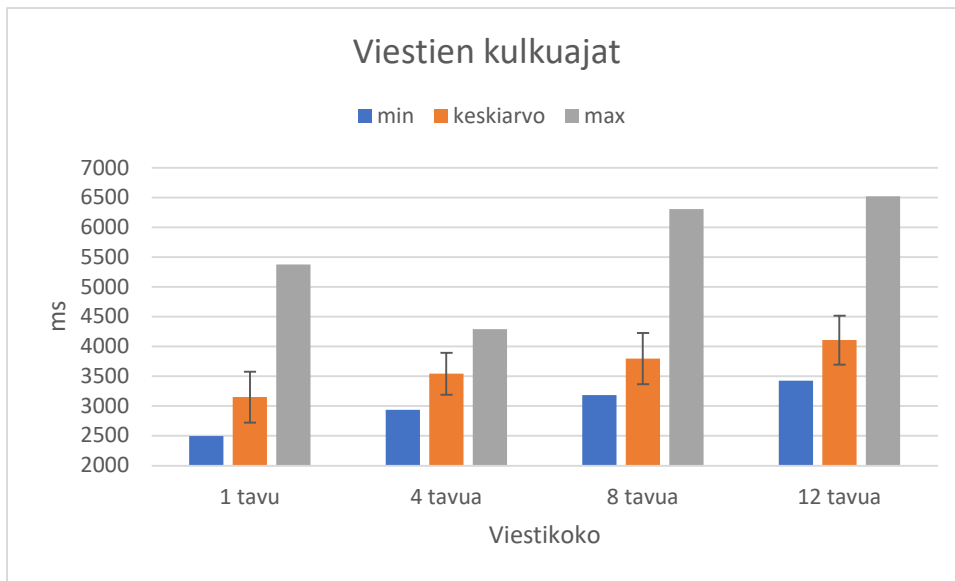
Taulukko 4. Eri kokoisten viestien lukumäärät

Viestikoko	Viestien lukumäärä [Heroku]
1 tavu	282 [140]
4 tavua	208 [81]
8 tavua	197 [64]
12 tavua	200 [40]
Yhteensä	887 [325]

Kaikkien lähetettyjen viestien yhteyden laatua arviotaessa huomioitiin myös lähetetyt testi-viestit, joita lähetettiin 40 kappaletta. Viestejä lähetettiin Lappeenrannan lisäksi Vihdissä 132 kappaletta. Vihdissä lähetettiin 4, 8 ja 12 tavun viestejä. Kaikkia viestikokoja ei lähetetty Vihdissä, joten näiden viestien osalta arvioidaan eroja yhteyden laadussa.

4.1.1 Viestien kulku-aika

Viestien kulku-aikaa arvioitiin päätelaitteen ja palvelimen tallentamien aikaleimojen perusteella. Arvioitujen kulku-aikojen perusteella viestin koko vaikuttaa kulku-aikaan. Kuvassa 6 alla on esitetty kuvaaja eri kokoisten viestien kulkuajoista.



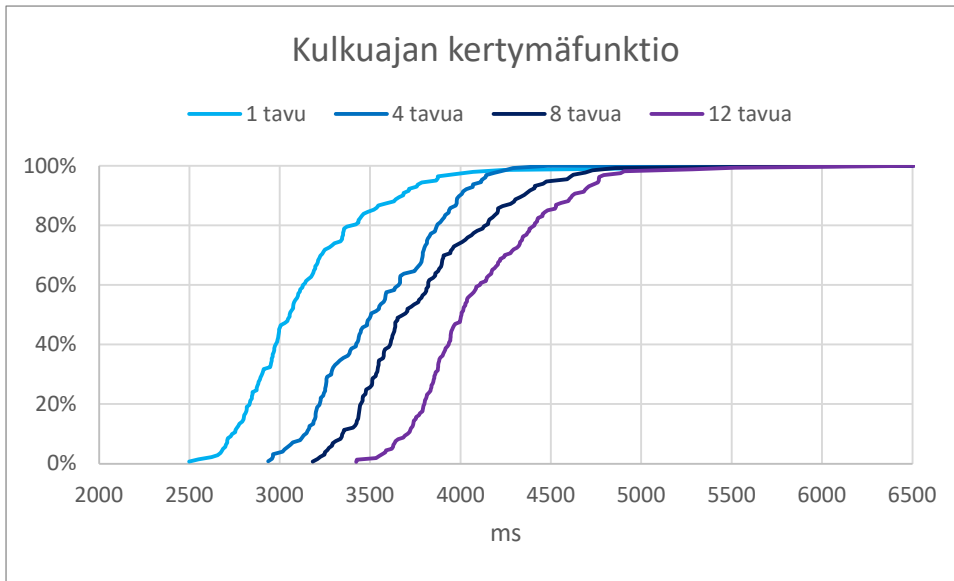
Kuva 6. Viestien kulkuajat

Kuvasta 6 nähdään, että kulkuajan keskiarvo kasvaa viestikoon kasvaessa. Kuvassa keskiarvon pylväisiin on merkitty lasketun keskihajonnan mukainen vaihteluväli. Mittauksista lasketut keskihajonnat vaihtelivat välillä 354–432 ms. Mittauksissa suurin osa havaituista kulkuajoista sijoittui korkeintaan yhden keskihajonnan etäisyydelle lasketusta keskiarvosta. Taulukossa 5 alla on esitetty eri kokoisten viestien kulkuajan jakautuminen.

Taulukko 5. Viestien kulkuajojen jakautuminen

Viestikoko	Keskimääräinen kulku aika	Keskihajonta	Osuus viesteistä yhden keskihajonnan etäisyydellä keskiarvosta
1 tavu	3150 ms	427 ms	78 %
4 tavua	3543 ms	354 ms	67 %
8 tavua	3798 ms	432 ms	74 %
12 tavua	4108 ms	410 ms	76 %

Viestien kulkuajojen jakautumista eri kokoisilla viesteillä voidaan havainnollistaa myös kertymäfunktion avulla. Alla kuvassa 7 on esitetty kulkuajojen kertymäfunktiot eri kokoisille viesteille. Kertymäfunktio on piirretty havaittujen kulkuajojen perusteella.



Kuva 7. Viestien kulkuajojen kertymäfunktiot

Kuvan 7 kuvaajasta voidaan havaita eri kokoisten viestien kertymät tiettyyn kulkuuikaan mennessä. Kuvaajasta voidaan havaita esimerkiksi, että 3 sekunnin kulkuuikaan mennessä noin 40 % 1 tavun viesteistä oli saapunut perille. Kuvaajasta havaitaan selkeästi viestikoon vaikuttavan viestin kulkuuikaan. Kuvaajan ja taulukon 5 tietojen perusteella voidaan arvioida eron 1 tavun viestien ja 12 tavun viestien kulkuajassa olevan noin 1 sekunti.

4.1.2 Yhteyden laatu

Yhteyden laatua arvioitiin Sigfox cloudista ladattujen viestitietojen perusteella. Tiedoista laskettiin vastaanottavien tukiasemien lukumäärän keskiarvot eri kokoisille viesteille, sekä eri tukiasemien RSSI arvojen keskiarvo ja parhaan havaitun RSSI arvon keskiarvo. Lisäksi laskettiin eri LQI-arvoja saaneiden viestien lukumäärät, sekä viestien jakautuminen vastaanottavien tukiasemien lukumäärän mukaan. Viestitietojen perusteella viestin koko ei vaikuta yhteyden laatuun. Alla taulukossa 6 on esitettynä tukiasemien lukumäärät ja RSSI-arvot eri kokoisille viesteille.

Taulukko 6. Tukiasemien lukumäärät ja RSSI eri kokoisille viesteille

Viestikoko	Lappeenranta			Vihti		
	Tukiasemia	RSSI paras (dBm)	RSSI keskiarvo (dBm)	Tukiasemia	RSSI paras (dBm)	RSSI keskiarvo (dBm)
1 tavu	3,07	-113,72	-124,52	-	-	-
4 tavua	3,01	-113,45	-124,77	3,48	-119,04	-132,92
8 tavua	3,12	-114,64	-125,346	3,87	-121,11	-133,89
12 tavua	2,96	-115,10	-124,96	3,64	-120,28	-132,53
Kaikki	3,04	-114,07	-124,82	3,75	-120,56	-133,45

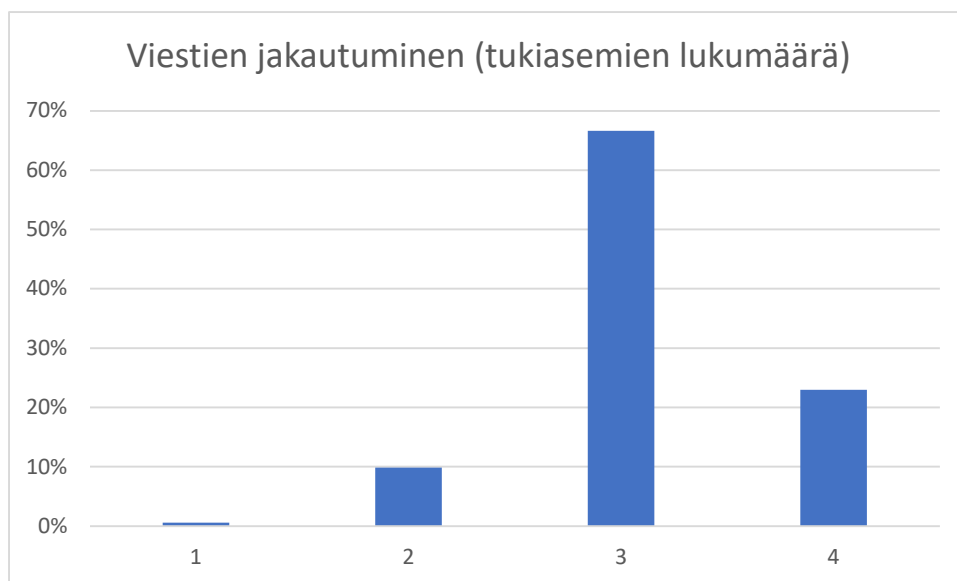
Lappeenrannassa lähetettyjen viestien perusteella viestin koolla ei näyttäisi olevan merkitystä yhteyden laatuun. Taulukosta huomataan myös, että keskimääräisesti Vihdissä useampi tukiasema vastaanotti lähetetyn viestin, mutta viestien vastaanottoteho on ollut matalampi. Tukiasemia on mahdollisesti ollut enemmän Vihdissä sijainneen lähetyspaikan läheisyydessä. Heikompi vastaanottoteho saattaa johtua lähetyssijainnin korkeuseroista, sillä lähetyssijainti oli harjun lähellä.

Kaikkien lähetettyjen viestien osalta havaitut LQI-arvot on esitetty alla taulukossa 7. LQI-arvot ovat itse laskettujen tukiasemien lukumäärien ja RSSI-arvojen mukaisia. Taulukon 6 mukaisesti keskimäärin viestin vastaanotti kolme tukiasemaa ja tukiasemien RSSI-arvojen keskiarvo oli -124.82 dBm. Lasketut keskiarvot vastaavat taulukon 3 mukaisesti LQI-arvoa 'Good'.

Taulukko 7. Havaitut LQI arvot

LQI	Kpl
Limit	2
Average	63
Good	1002

Vastaanotettujen viestien jakautuminen tukiasemien lukumäärän mukaan on esitetty alla kuvassa 8. Viesteistä 89,6 % vastaanotettiin vähintään kolmella tukiasemalla. Vastaanottaneiden tukiasemien lukumäärän ja havaittujen RSSI arvojen perusteella voidaan todeta, että mittauspisteissä yhteyden laatu ja tukiasemien kuuluvuus on ollut tyypillisesti hyvä.



Kuva 8. Viestien jakautuminen tukiasemien lukumäärän mukaan

4.2 Liikkuvat mittaukset

Liikkuvia mittauksia toteutettiin 4 kappaletta. Ensimmäisenä toteutettiin testimittaus Lappeenrannan alueella. Toinen mittaus toteutettiin välillä Lappeenranta–Vihti. Kolmas ja neljäs mittaus toteutettiin välillä Vihti–Turku. Seuraavissa alaluvuissa esitellään suoritettavat liikkuvat mittaukset. Mittauksien esittelyn jälkeen käydään läpi kolmen viimeisen mittauksen perusteella havaittuja tuloksia. Tarkasteluun valitaan kolme viimeistä mittausta, sillä ne tehtiin kaupunkialueen ulkopuolella ja niissä ajoneuvon keskinopeus oli samankaltainen.

Viestikokona mittauksissa käytettiin 8 tavua, sillä kahdeksan tavun viestikoko mahdollistaisi esimerkiksi päätelaitteen sijainnin lisäämisen viestiin. Sijaintitiedon tarkkuudesta riippuen viestiin mahtuisi lisäksi myös muuta dataa. [10]

Viestien määrä mittauksissa on pieni, joten mittauksien analysoinnissa keskitytään pääasiassa viestien lähetysoikeuteen. Kulkuajan tai yhteyden laadun keskiarvojen tarkastelu ei ole mielekästä vastaanotettujen viestien pienen määrän vuoksi.

Liikkuvissa mittauksissa päätelaite sijoitettiin auton sisäpuolelle kojelaudalle. Esimerkki päätelaitteen sijoittelusta on esitetty kuvassa 9.



Kuva 9. Päätelaitteen sijainti autossa

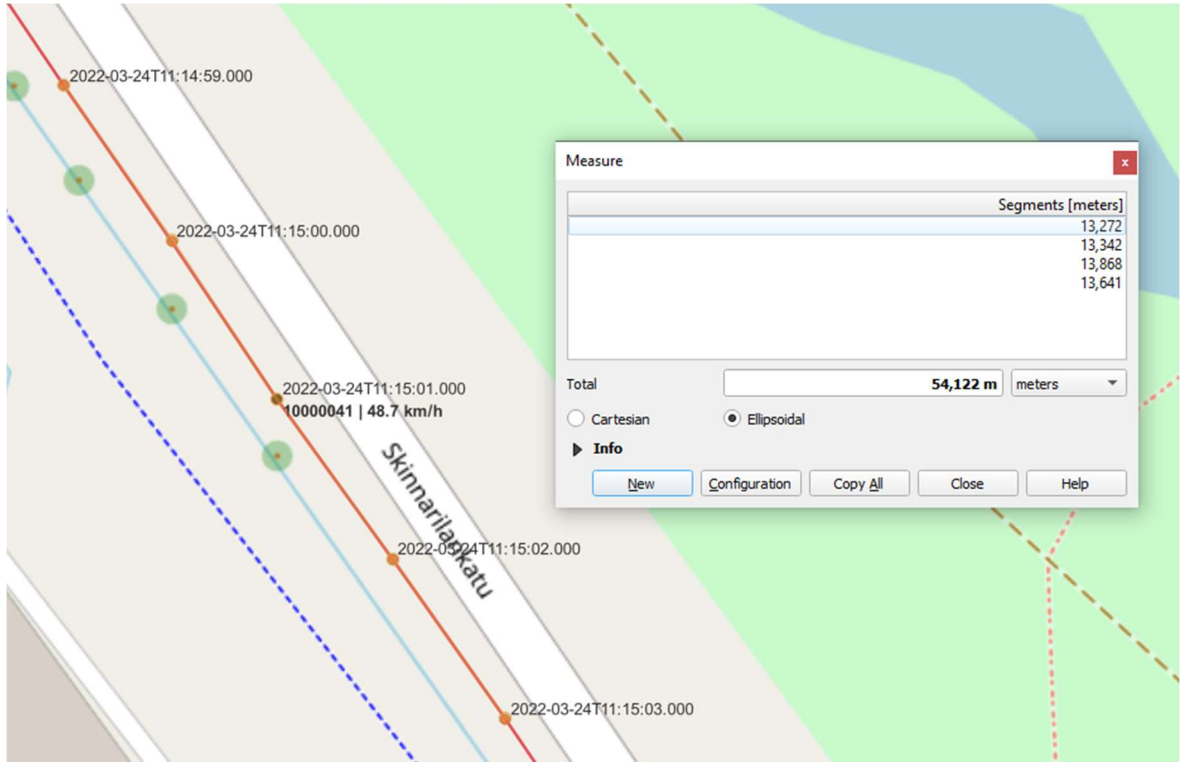
4.2.1 Liikkuva mittaus Lappeenrannassa

Ensimmäisenä liikkuvana mittauksena toteutettiin alla kuvassa 10 esitetyn reitin mukainen mittaus. Kuvassa viestien arvioidut lähetysijainnit on merkitty pisteillä. Vihreä piste kuvastaa onnistuneesti vastaanotettua viestiä ja musta viestiä, jota ei vastaanotettu. Lähetysijainnit valittiin viestin lähetyssaikaleiman perusteella kerätyistä sijaintipisteistä. Lähetyspisteen viereen on merkitty viestin numero, sekä ajoneuvon arvioitu nopeus lähetyshetkellä.



Kuva 10. Ensimmäinen liikkuva mittaus Lappeenrannan alueella (karttapohja: © OpenStreetMapin tekijät [30])

Ajoneuvon nopeutta lähetyshetkellä arvioitiin Qgis-karttasovelluksessa mittaamalla kuvan 11 mukaisesti lähetyssijaintia ympäröivien neljän lähimmän pisteen välinen etäisyys.



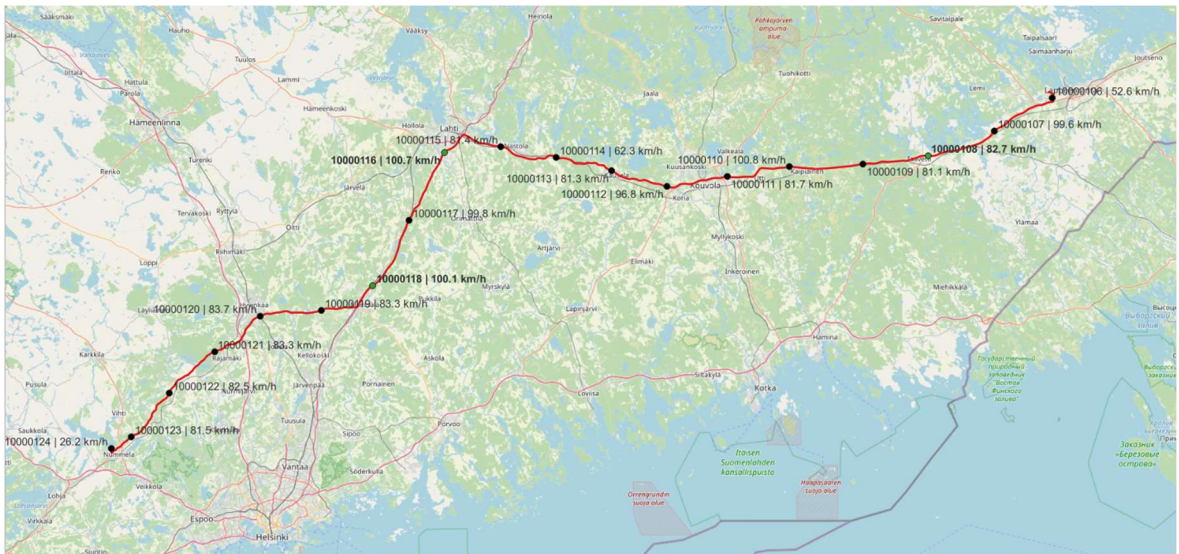
Kuva 11. Esimerkki ajoneuvon nopeuden arvioinnista (karttapohja: © OpenStreetMapin tekijät [30])

Kuvassa 11 lasketun etäisyyden avulla saadaan laskettua ajoneuvon arvioitu nopeus lähetyshetkellä: $V = \frac{54,122 \text{ m}}{4 \text{ s}} * 3,6 = 48,7 \text{ km/h}$. Ajoneuvon nopeutta arvioitiin vastaavasti kaikille lähetyssijainneille.

Ensimmäisessä mittauksessa lähetetyistä viesteistä yhtäkään ei vastaanotettu onnistuneesti, joten viestien kuluaikoja tai yhteyden laatua ei voida arvioida. Myöskään viestien lähetyssijainnevarmuutta ei ole mielekästä arvioida tämän mittauksen perusteella.

4.2.2 Liikkuva mittaus Lappeenranta–Vihti

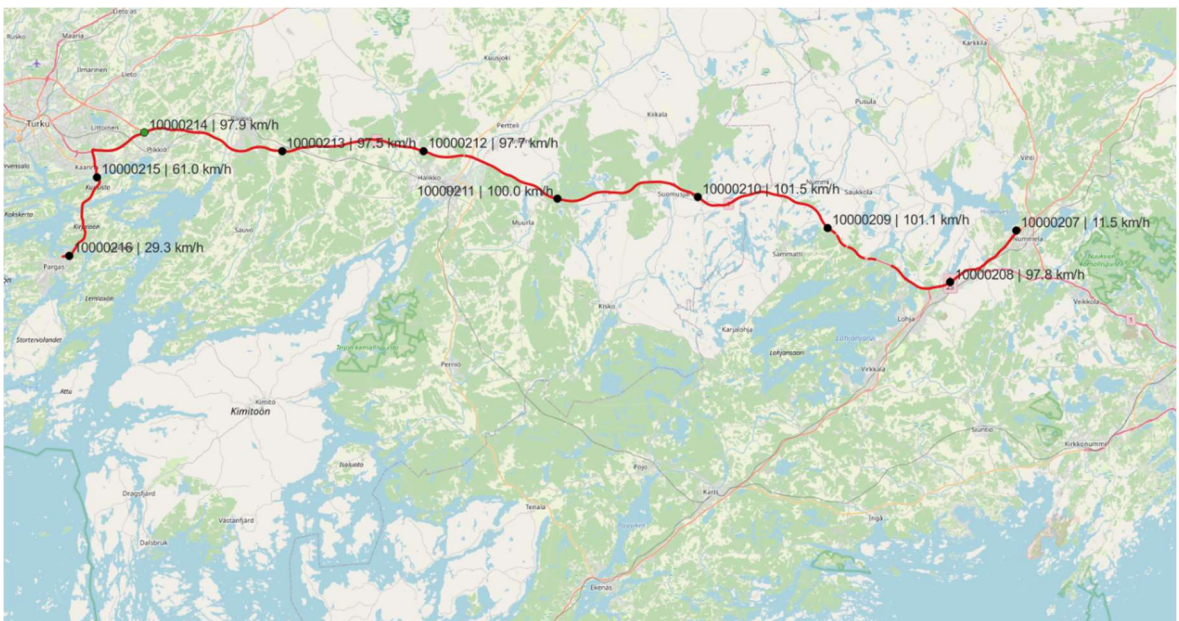
Toinen liikkuva mittaus suoritettiin välillä Lappeenranta–Vihti. Mittauksen kesto oli 3 tuntia 10 minuuttia. Mittauksen aikana ajettiin 260 km keskinopeudella 82 km/h. Mittauksen aikana lähetettiin 19 viestiä, joista 3 vastaanotettiin onnistuneesti. Mittauksen reitti ja lähetettyjen viestien sijainnit on esitetty alla kuvassa 12.



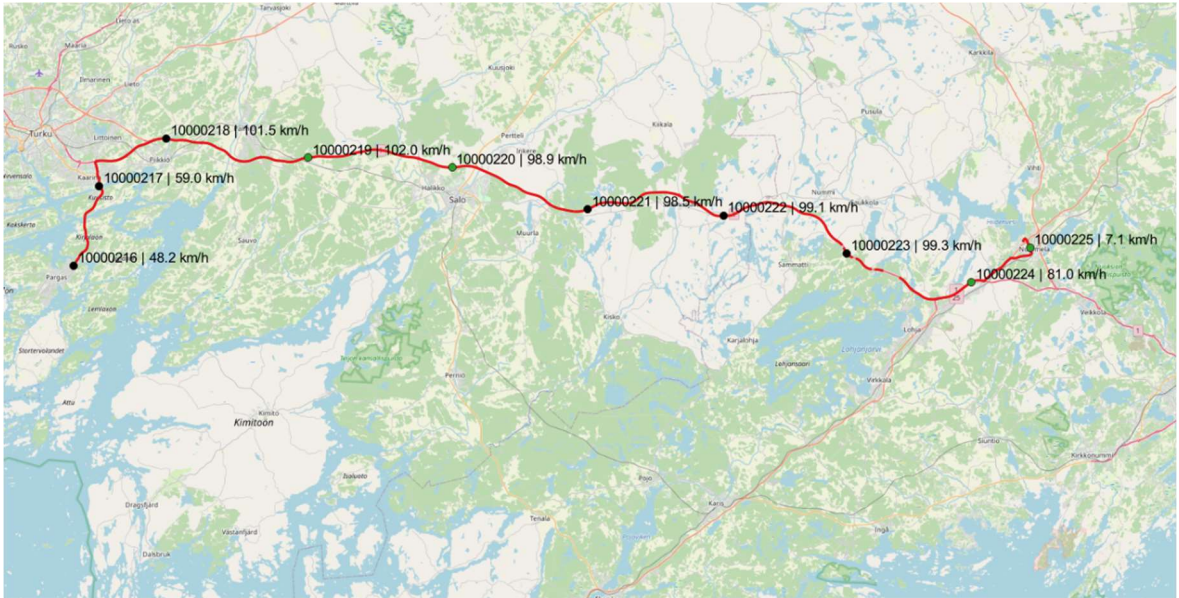
Kuva 12. Liikkuva mittaus Lappeenranta–Vihti (karttapoljja: © OpenStreetMapin tekijät [30])

4.2.3 Liikkuvat mittaukset Vihti–Turku

Kolmas ja neljäs liikkuva mittaus suoritettiin välillä Vihti–Turku. Mittauksien kesto oli 3 tuntia 13 minuuttia. Mittauksien aikana ajettiin 258 km keskinopeudella 79,5 km/h. Mittauksien aikana lähetettiin 20 viestiä, joista 5 vastaanotettiin onnistuneesti. Mittauksien reitit ja lähetettyjen viestien sijainnit on esitetty alla kuvissa 13 ja 14.



Kuva 13. Liikkuva mittaus Vihti–Turku (karttapoljja: © OpenStreetMapin tekijät [30])



Kuva 14. Liikkuva mittaus Turku–Vihti (karttapohja: © OpenStreetMapin tekijät [30])

4.2.4 Yhteenveto liikkuvista mittauksista

Kolmen viimeisen mittauksen kesto oli yhteensä 6 tuntia ja 23 minuuttia. Mittauksien aikana ajettiin 518 km keskinopeudella 80,3 km/h. Mittauksissa lähetettiin yhteensä 39 viestiä, joista 8 vastaanotettiin onnistuneesti. Mittauksissa siis 20,5 % lähetetyistä viesteistä vastaanotettiin onnistuneesti.

Kolmella kahdeksasta vastaanotetusta viestistä havaittiin huomattavasti pidempi kulku-aika, kuin keskimäärin staattisissa mittauksissa samalla viestikoollla. Tämän arvioitiin johtuvan siitä, että viestin vastaanotto ei onnistunut ensimmäisellä kolmesta Sigfox-protokollan mukaisesta lähetysyrityksestä. Sigfox-cloudista ladattujen viestitietojen perusteella havaittiin myös, että huomattavasti pidemmän kulkuajan viestit vastaanotettiin vain yhdellä tukiasemalla. Viestitietojen perusteella päätelaitteen liikkuvuus ei vaikuttanut yhteyden laatuun. Kulkuajan ja yhteyden laadun luotettava tarkempi arviointi vaatisi kuitenkin huomattavasti suuremman määrän vastaanotettuja viestejä.

Saatujen tuloksien perusteella todetaan, että liikkuvuudella on suuri vaikutus viestien toimitusvarmuuteen Sigfox-verkossa. Noin 80 km/h keskinopeudella liikkuvan päätelaitteen lähettämän viestin ei voida olettaa pääsevän perille, mikä tulee huomioida järjestelmiä suunniteltaessa.

5. Tulosten arviointi

Tässä luvussa arvioidaan saatujen tuloksien merkittävyyttä. Lisäksi pohditaan mahdollisia tuloksien luotettavuuteen vaikuttavia tekijöitä ja miten tutkimusta voitaisiin kehittää. Ensin arvioidaan staattisista mittauksista saatuja tuloksia, minkä jälkeen arvioidaan liikkuvien mittausten tuloksia.

5.1 Staattiset mittaukset

Staattisissa mittauksien perusteella haluttiin selvittää viestien tyypillinen kulku-aika ja yhteyden laatu Suomessa. Mittauksien perusteella havaittiin tyypillisen kulkuajan vaihtelevan viestin koon mukaan välillä 3,1–4,1 sekuntia. Yhteyden laadun todettiin olevan hyvä mitauspisteissä ja eri viestikokojen välillä ei havaittu merkittäviä eroja yhteydenlaadussa.

Kulkuajan osalta tulosten luotettavuuteen vaikuttaa erityisesti lähetettyjen viestien lukumäärä. Tässä kandidaatintyössä viestejä lähetettiin 127–160 kappaletta eri kokoisilla viesteillä. Tulosten varmistamiseksi voisi eri kokoisia viestejä lähettää enemmän.

Yhteyden laadun osalta tuloksena voidaan todeta, että kahdessa Etelä-Suomessa sijainneessa mitauspisteessä yhteyden laatu oli hyvä. Jatkotutkimuksena mittauksia voitaisiin tehdä useammassa mitauspisteessä eri puolilla Suomea. Laajemmilla mittauksilla saataisiin kattavampi kuva Sigfox-verkon yhteyden laadusta Suomessa.

5.2 Liikkuvat mittaukset

Liikkuvien mittausten avulla haluttiin selvittää liikkuvuuden vaikutus viestien kulku-aikaan ja yhteyden laatuun. Lähetettyjen viestien lukumäärän (39) ja matalan vastaanotto-prosentin (20 %) takia liikkuvuuden vaikutusta kulku-aikaan ja yhteyden laatuun ei voitu arvioida. Vaikutuksen arvioimiseksi täytyisi vastaanotettuja viestejä olla enemmän.

Kahdessa luvussa 2.2 esitellyistä artikkeleista tehtiin liikkuvia mittauksia kaupunkialueen ulkopuolella, kuten tässä kandidaatintyössä. Ribeiron et al. [22] artikkelissa esiteltiin liikkuva mittaus, joka tehtiin moottoritiellä ajoneuvon keskinopeuden ollessa 57,4 km/h. Mittauksessa 32 % viesteistä vastaanotettiin onnistuneesti. Wangin et al. [23] artikkelissa

esiteltiin liikkuva mittaus, joka tehtiin moottoritiellä ajoneuvon keskinopeuden ollessa noin 70 km/h. Mittauksessa 27 % viesteistä vastaanotettiin onnistuneesti. Tässä kandidaatintyössä tehdyissä mittauksissa ajoneuvon keskinopeus oli suurempi (80,3 km/h), mikä selittää osaltaan matalampaa vastaanottoprosenttia. On huomioitava myös, että Wangin et al. ja Ribeiron et al. mittaukset tehtiin Taiwanissa ja Brasiliassa. Taiwanissa on käytössä Sigfoxin RC4-konfiguraatio [15]. Brasiliassa Sigfox käyttää RC2-konfiguraatiota [15]. Molemmissa konfiguraatioissa on käytössä uplink-viesteille nopeampi 600 bps lähetysnopeus ja sallittu lähetysteho on korkeampi 24 dBm [15].

Päätelaitteen antennin sijoittaminen ajoneuvon sisälle on todennäköisesti vaikuttanut lähetyksvarmuuteen. Antennin sijoittaminen ajoneuvon ulkopuolelle, sekä mittausten tekeminen kaupunkialueella matalammilla nopeuksilla todennäköisesti johtaisi parempaan lähetyksvarmuuteen. Jatkotutkimuksena liikkuvia mittauksia voitaisiin tehdä matalammilla nopeuksilla kaupunkialueella. Mittauksia pitäisi myös tehdä enemmän, mikäli liikkuvuuden vaikutusta kulkuaikaan haluttaisiin arvioida tarkemmin.

6. Yhteenveto

Työn tavoitteena oli arvioida Sigfox-verkon käytettävyyttä sovelluskehittäjän näkökulmasta, sekä analysoida viestikoon ja liikkuvuuden vaikutusta viestien kulkuajoihin ja yhteyden laatuun. Työssä esiteltiin Sigfox-teknologia ja aikaisempia LPWAN-teknologioihin liittyviä tutkimuksia. Liikkuvuuteen liittyen löydettiin useita aikaisempia tutkimuksia, mutta kulkuajan osalta Sigfox-verkossa tehtyjä aikaisempia tutkimuksia ei löydetty.

Työssä toteutettiin koejärjestely viestien kulkuajojen mittaamiseksi. Mittauksia tehtiin staattisina, sekä päätelaitteen liikkuesssa. Staattisissa mittauksissa päätelaite sijoitettiin rakennuksen sisälle ja liikkuvissa mittauksissa autoon. Mittauksien perusteella arvioitiin viestien kulkuajaa päätelaitteelta vastaanottavalle palvelimelle. Lisäksi arvioitiin yhteyden laatua.

Staattisista mittauksista saatujen tuloksien perusteella todettiin viestin koon vaikuttavan kulkuajaan. Havaitut muutokset kulkuajassa olivat välillä 3,1–4,1 s. Yhteydenlaadun todettiin olevan hyvä valituissa mittauspisteissä.

Liikkuvissa mittauksissa viesteistä vain 20,5 % vastaanotettiin onnistuneesti. Todettiin, että noin 80 km/h keskinopeudella liikkuvan päätelaitteen lähettämän viestin ei voida olettaa pääsevän perille, mikä tulee huomioida järjestelmiä suunniteltaessa. Liikkuvuuden arvioitiin vaikuttavan viestien kulkuajaan, mutta vastaanotettujen viestien pienen lukumäärän vuoksi eroa staattisiin mittauksiin ei voitu määrittää. Kulkuajan ja yhteyden laadun tarkempi arviointi vaatisi suuremman määrän vastaanotettuja viestejä.

Lähteet

- [1] R. Jain ja S. Tata, ”Cloud to Edge: Distributed Deployment of Process-Aware IoT Applications”, teoksessa *2017 IEEE International Conference on Edge Computing (EDGE)*, Honolulu, HI, USA, kesä 2017, ss. 182–189. doi: 10.1109/IEEE.EDGE.2017.32.
- [2] K. Mekki, E. Bajic, F. Chaxel, ja F. Meyer, ”A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment”, *ICT Express*, vsk. 5, nro 1, ss. 1–7, maaliskuu 2019, doi: 10.1016/j.icte.2017.12.005.
- [3] U. Raza, P. Kulkarni, ja M. Sooriyabandara, ”Low Power Wide Area Networks: An Overview”, *IEEE Commun. Surv. Tutor.*, vsk. 19, nro 2, ss. 855–873, 2017, doi: 10.1109/COMST.2017.2652320.
- [4] ”IoT connected devices worldwide 2019-2030”, *Statista*. <https://www.statista.com/statistics/1183457/iot-connected-devices-worldwide/> (viitattu 8. helmikuuta 2022).
- [5] B. S. Chaudhari, M. Zennaro, ja S. Borkar, ”LPWAN Technologies: Emerging Application Characteristics, Requirements, and Design Considerations”, *Future Internet*, vsk. 12, nro 3, s. 46, maaliskuu 2020, doi: 10.3390/fi12030046.
- [6] K. Peffers, T. Tuunanen, M. A. Rothenberger, ja S. Chatterjee, ”A Design Science Research Methodology for Information Systems Research”, *J. Manag. Inf. Syst.*, vsk. 24, nro 3, ss. 45–77, joulukuu 2007, doi: 10.2753/MIS0742-1222240302.
- [7] ”SIGFOX.COM”. <https://www.sigfox.com/en> (viitattu 15. helmikuuta 2022).
- [8] ”Sigfox connected objects: Radio specifications”. Sigfox, helmikuuta 2020. Viitattu: 16. helmikuuta 2022. [Verkossa]. Saatavissa: <https://storage.googleapis.com/public-assets-xd-sigfox-production-338901379285/abaedf62-56de-402e-93c3-3a9c10a1cb49.pdf>
- [9] A. Lavric, A. I. Petrariu, ja V. Popa, ”SigFox Communication Protocol: The New Era of IoT?”, teoksessa *2019 International Conference on Sensing and Instrumentation in IoT Era (ISSI)*, Lisbon, Portugal, elokuu 2019, ss. 1–4. doi: 10.1109/ISSI47111.2019.9043727.
- [10] ”Payload | Sigfox build”. <https://build.sigfox.com> (viitattu 23. helmikuuta 2022).

- [11] F. C. de Oliveira, J. J. P. C. Rodrigues, R. A. L. Rabelo, ja S. Mumtaz, ”Performance Delay Comparison in Random Access Procedure for NB-IoT, LoRa, and SigFox IoT Protocols”, teoksessa *2019 IEEE 1st Sustainable Cities Latin America Conference (SCLA)*, Arequipa, Peru, elo 2019, ss. 1–6. doi: 10.1109/SCLA.2019.8905443.
- [12] ”Sigfox Cloud Integration | Sigfox build”. <https://build.sigfox.com> (viitattu 19. helmikuuta 2022).
- [13] M. Stusek *ym.*, ”Accuracy Assessment and Cross-Validation of LPWAN Propagation Models in Urban Scenarios”, *IEEE Access*, vsk. 8, ss. 154625–154636, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3016042.
- [14] K. Mekki, E. Bajic, F. Chaxel, ja F. Meyer, ”A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment”, *ICT Express*, vsk. 5, nro 1, ss. 1–7, maaliskuu 2019, doi: 10.1016/j.icte.2017.12.005.
- [15] ”Radio Configurations | Sigfox build”. <https://build.sigfox.com> (viitattu 11. huhtikuuta 2022).
- [16] B. Buurman, J. Kamruzzaman, G. Karmakar, ja S. Islam, ”Low-Power Wide-Area Networks: Design Goals, Architecture, Suitability to Use Cases and Research Challenges”, *IEEE Access*, vsk. 8, ss. 17179–17220, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2968057.
- [17] R. Brotzu, P. Aru, M. Fadda, ja D. Giusto, ”Urban SigFox-based Mobility System”, teoksessa *2021 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB)*, Chengdu, China, elo 2021, ss. 1–4. doi: 10.1109/BMSB53066.2021.9547120.
- [18] J. S. E, A. Sikora, M. Schappacher, ja Z. Amjad, ”Test and Measurement of LPWAN and Cellular IoT Networks in a Unified Testbed”, teoksessa *2019 IEEE 17th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, Helsinki, Finland, heinäkuu 2019, ss. 1521–1527. doi: 10.1109/INDIN41052.2019.8972256.
- [19] D. Katusic, P. Skocir, M. Kusek, ja I. Cavrak, ”Survey on Low Power Wide Area Networks in IoT”, teoksessa *2020 International Conference on Smart Systems and Technologies (SST)*, Osijek, Croatia, loka 2020, ss. 231–237. doi: 10.1109/SST49455.2020.9264085.

- [20] K. Mikhaylov *ym.*, ”Communication Performance of a Real-Life Wide-Area Low-Power Network Based on Sigfox Technology”, teoksessa *ICC 2020 - 2020 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Dublin, Ireland, kesä 2020, ss. 1–6. doi: 10.1109/ICC40277.2020.9148645.
- [21] L. Oliveira, J. J. P. C. Rodrigues, S. A. Kozlov, R. A. L. Rabêlo, ja V. Furtado, ”Performance assessment of long-range and Sigfox protocols with mobility support”, *Int. J. Commun. Syst.*, vsk. 32, nro 13, s. e3956, syys 2019, doi: 10.1002/dac.3956.
- [22] G. G. L. Ribeiro, L. F. de Lima, L. Oliveira, J. J. P. C. Rodrigues, C. N. M. Marins, ja G. A. B. Marcondes, ”An Outdoor Localization System Based on SigFox”, teoksessa *2018 IEEE 87th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, Porto, Portugal, kesä 2018, ss. 1–5. doi: 10.1109/VTCspring.2018.8417853.
- [23] S.-Y. Wang, J.-E. Chang, H. Fan, ja Y.-H. Sun, ”Performance Comparisons of NB-IoT, LTE Cat-M1, Sigfox, and LoRa Moving at High Speeds in the Air”, teoksessa *2020 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)*, Rennes, France, heinä 2020, ss. 1–6. doi: 10.1109/ISCC50000.2020.9219557.
- [24] ”First Configuration with MKR FOX 1200 | Arduino Documentation”. <https://docs.arduino.cc/tutorials/mkr-fox-1200/sigfox-first-configuration> (viitattu 12. maaliskuuta 2022).
- [25] *sigfox/sigfox-nodejs-callbacks*. sigfox, 2020. Viitattu: 12. maaliskuuta 2022. [Verkossa]. Saatavissa: <https://github.com/sigfox/sigfox-nodejs-callbacks>
- [26] ”Free Dyno Hours | Heroku Dev Center”. <https://devcenter.heroku.com/articles/free-dyno-hours> (viitattu 12. maaliskuuta 2022).
- [27] ”Link Quality: general knowledge | Sigfox Resources”. <https://support.sigfox.com/docs/link-quality:-general-knowledge> (viitattu 14. maaliskuuta 2022).
- [28] ”Geo Tracker - GPS tracker - Apps on Google Play”. <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.ilyabogdanovich.geotracker&hl=en&gl=US> (viitattu 24. maaliskuuta 2022).
- [29] ”Welcome to the QGIS project!” <https://www.qgis.org/en/site/> (viitattu 24. maaliskuuta 2022).

[30] ”OpenStreetMap”, *OpenStreetMap*. <https://www.openstreetmap.org/> (viitattu 31. toukokuuta 2022).

Liite 1. Sigfox-lähettimellä käytetty ohjelmakoodi

```

void loop()
{
  while (!Serial.available());

  String message;
  char inchar;
  bool start = false;
  bool endchar = false;

  while (Serial.available() && !start) {
    inchar = (char)Serial.read();

    if (inchar == ':') {
      start = true;
    }
  }

  while (Serial.available() && !endchar) {
    inchar = (char)Serial.read();

    if (inchar == 'x') {
      endchar = true;
    } else {
      message += inchar;
    }
  }

  message.trim();

  if (start && endchar){
    //sendByte(message);
    sendString(message);
  }
}

void sendString(String str) {
  // Start the module

  SigFox.begin();

  // Wait at least 30mS after first configuration (100mS before)
  delay(100);

  // Clears all pending interrupts

  SigFox.status();

  delay(1);

  SigFox.beginPacket();

  SigFox.print(str);

  int ret = SigFox.endPacket(); // send buffer to SIGFOX network

  Serial.println(ret);

  SigFox.end();
}

```

```
void sendByte(String charNum) {  
    //convert string to unsigned integer  
    uint8_t intNum[] = {charNum.toInt()};  
  
    // Start the module  
  
    SigFox.begin();  
  
    // Wait at least 30mS after first configuration (100mS before)  
  
    delay(100);  
  
    // Clears all pending interrupts  
  
    SigFox.status();  
  
    delay(1);  
  
    //Serial.println(intNum[0]);  
  
    SigFox.beginPacket();  
  
    SigFox.write(intNum, 1);  
  
    int ret = SigFox.endPacket(false); // send buffer to SIGFOX network  
  
    Serial.println(ret);  
  
    SigFox.end();  
}
```

Liite 2. Raspberry Pi:llä käytetty skripti

```
#!/usr/bin/bash
if [ $# -eq 2 ]
then
#getting loop boundaries as input args
lower_boundary=$1
upper_boundary=$2
else
echo invalid amount of args, expected 2
exit -1
fi

if [ $lower_boundary -gt $upper_boundary ]
then
    echo "invalid args, upper boundary < lower boundary"
    exit -1
fi

if [ -c /dev/ttyACM0 ]
then
    echo "msg_nr, Timestamp_rx, Trx, T_delay, endPacket"
    for (( i=$lower_boundary; i<=$upper_boundary; i++ ))
    do
        D=`date -u +%FT%T%z`;
        A=`date -u +%s%3N`; #milliseconds epoch time UTC
        printf ':%dx' $i >> /dev/ttyACM0 &

        read answer < /dev/ttyACM0
        B=`date +%s%3N`;

        C=$(( B - A ));
        echo "$i,$D,$A,$C,$answer" ;
        sleep 600
    done
else
    echo "No device /dev/ttyACM0";
fi
```

Liite 3. Sigfox viestien vastaanotto ja tallennus

```
router.post("/sigfox", async (req, res) => {
  let rTime = new Date().getTime();
  const client = new MongoClient(uri, { useUnifiedTopology: true });

  //data to ascii
  let hexData = req.body.data;
  let data = Buffer.from(hexData, "hex");
  let asciiData = data.toString();

  try {
    await client.connect();

    const database = client.db('data_sigfox');
    const collection = database.collection('sigfox_messages');

    const doc = {
      device: req.body.device,
      cTime: req.body.cTime,
      rTime: rTime,
      data: asciiData,
      hex: req.body.data
    };
    const result = await collection.insertOne(doc);
    res.json({message: "ok"});
  } catch(err) {
    console.log(err);
  }
  finally {
    await client.close();
  }
})
})
```