



Osaamista  
ja oivallusta  
tulevaisuuden  
tekemiseen

Tuomas Soininen

# LoRaWAN-verkon peittoaluelaskennan optimointi

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Tieto- ja viestintätekniikka

Insinöörityö

29.3.2019

Tekijä Otsikko	Tuomas Soininen LoRaWAN-verkon peittoaluelaskennan optimointi
Sivumäärä Aika	38 sivua 29.3.2019
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Tieto- ja viestintätekniikka
Ammatillinen pääaine	Tietoverkot
Ohjaajat	Kehityspäällikkö Matti Jokisalo Lehtori Jukka Louhelainen
<p>Insinööritöössä selvitettiin paras etenemismalli LoRaWAN-verkon peittoaluelaskentaan sekä tutkittiin mittaamalla, kuinka paljon signaali vaimenee syvän sisäpeiton kohteissa, esimerkiksi kellareissa ja kaivoissa.</p> <p>Kenttämittauksiin valittiin soveltuvat mittalaitteet ja niiden ominaisuudet sekä toiminta testattiin. Kenttämittaukset jakautuivat peittoaluemittauksiin ja syvän sisäpeiton mittauksiin. Syvän sisäpeiton mittaukset suoritettiin useissa todellisissa kohteissa, joihin oli asennettu LoRaWAN-tekniikkaa käyttävät päätelaitteet. Peittoaluemittauksia suoritettiin ajaen autolla useilla kaupunki- ja haja-asutusalueilla eri puolilla Suomea.</p> <p>Syvän sisäpeiton mittausdataa analysoitiin ja tulosten perusteella määriteltiin 35 dB:n vaimenemisvara, joka otetaan huomioon syvien sisätilojen peittoaluesuunnitelmia tehtäessä.</p> <p>Peittoaluelaskelmien tekemiseen valittiin kaksi determinististä ja kaksi tilastollista etenemismallia, jotka ominaisuuksiensa puolesta vaikuttivat sopivilta LoRaWAN-verkon peittoaluelaskentaan. Valituilla etenemismalleilla tehtiin peittoaluelaskelmia useille kaupunki- ja haja-asutusalueella sijaitsevalle tukiasemalle. Peittoaluemittauksissa saatuja mittaustuloksia verrattiin eri peittoaluelaskelmiin useilla eri tavoilla. Tuloksia analysoimalla valittiin sopivin etenemismalli, jota käytetään jatkossa peittoaluesuunnittelussa.</p> <p>Mittadataa kerätään jatkossa vielä laajemmin ja peittoaluesuunnitteluun valitun etenemismallin optimointia jatketaan tulevaisuudessa säätämällä etenemismallissa käytettäviä parametreja ja tekemällä vertailua insinööritöössä kerättyyn sekä uuteen mittadataan.</p>	
Avainsanat	IoT, LoRa, LoRaWAN, Verkkosuunnittelu

Author Title	Tuomas Soininen Optimization of LoRaWAN network coverage predictions
Number of Pages Date	38 pages 29 March 2019
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Information Technology
Professional Major	Communication Networks
Instructors	Matti Jokisalo, Development Manager Jukka Louhelainen, Senior Lecturer
<p>In this final year project, field measurements were compared with network coverage calculations in order to determine which propagation model is best suited for network planning. LoRa signal attenuation was also studied when entering so called deep indoor locations like underground basements and wells.</p> <p>Proper measurement equipment was chosen, and their features and suitability were tested. Field measurements were executed in many different urban, suburban and rural locations in Finland. Deep indoor measurements were conducted in many real locations where LoRaWAN end devices were installed.</p> <p>The deep indoor measurements showed that taking an additional 35 dB signal attenuation factor into account when deep indoor coverage is calculated, approximates these situations well.</p> <p>Measurement data was imported to a coverage calculation software, and it was compared to coverage results calculated with different propagation models. Semi-empirical and empirical propagation models were selected for evaluation based on how suitable their characteristics are for LoRaWAN network coverage calculation. A suitable propagation model for LoRaWAN network coverage calculation was selected after performing comprehensive analyses of many different sites in rural, suburban and urban areas.</p> <p>In the future, when more measurement data is collected, propagation model parameters will be adjusted so that network coverage simulations correspond even better to the measurement data collected.</p>	
Keywords	IoT, LoRa, LoRaWAN, network planning

## Sisällys

### Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	LoRaWAN-tekniikka	2
2.1	Yleiskatsaus LoRAWAN-tekniikkaan	2
2.2	LoRa:n linkkibudjetti	7
3	Radioaaltojen eteneminen	8
3.1	Signaalin vaimeneminen vapaassa tilassa	9
3.2	Fresnelin alue	10
3.3	Etenemismallit	12
4	Kenttämittaukset	13
4.1	Mittalaitteet	13
4.2	Peittoaluemittaukset	20
4.3	Syvän sisäpeiton mittaukset	23
5	Mittaustulosten vertailu peittoaluelaskelmiin	26
6	Yhteenveto	34
	Lähteet	37

## Lyhenteet

ESP	Estimated Signal Power. Laskennallinen signaalin voimakkuus, joka lasketaan RSSI- ja SNR-arvoista.
FSK	Frequency Shifting Keying. Langattomissa viestintäverkoissa perinteisesti käytetty taajuusmodulointimenetelmä.
FTD	Adeunis Field Test Device. Adeuniksen valmistama LoRa-WAN-verkon mittaamiseen tarkoitettu mittalaite.
Hero N1	Coheros Hero N1. Coheroksen kehittämä LoRaWAN-verkon mittalaite.
LoRa	Long Range. LoraWAN-verkon fyysinen kerros.
LoRaWAN	Long Range Wide Area Network. Pitkän kantaman laajaverkko. Yksi LPWAN-teknologioista.
LPWAN	Low-Power Wide- Area Network. Langaton vähän virtaa kuluttava laajaverkko.
IoT	Internet of Things. Esineiden internet.
RSSI	Received signal strength indication. Koko kaistanleveydeltä mitattu signaalinvoimakkuusarvo.
SF	Spreading Factor. Parametri, jolla voi muokata LoRa-modulaatiota.
SNR	Signal to noise ratio. Signaali-kohinasuhde.

## 1 Johdanto

Erilaiset esineiden internetiin (IoT) käytettävät verkkoteknologiat ovat kehittyneet viime aikoina ja tuoneet samalla yrityksille uusia mahdollisuuksia lukea ja ohjata laitteita pitkien matkojen päästä. Monissa tapauksissa on tärkeää, että laitteet toimivat pienellä virran kulutuksella ja pystyvät lähettämään dataa pitkälle kantavan langattoman verkon yli. Tämän mahdollistaa Low Power Wide Area Network (LPWAN). Esineiden internetiin (IoT) odotetaan miljardeja päätelaitteita ja LPWAN-verkkojen ennustetaan tukevan niistä suurinta osaa [1, s. 3].

LoRa Allianssin kehittämä ja hallinnoima Long Range Wide Area Network (LoRaWAN), on yksi uusimmista LPWAN-teknologioista. LoRa Allianssin [2] mukaan se on voittoa tavoittelematon yhdistys, johon kuuluu maailmanlaajuisesti yli 500 yritystä, jotka ovat sitoutuneet mahdollistamaan laajamittaisen LPWAN-teknologiaa käyttävien IoT-verkkojen käyttöönoton sekä edistämään avointa LoRaWAN-standardia.

Suomessa kaupallisesta LoRaWAN-verkosta vastaa Digita Oy. Digita on suomalainen viestintäverkkoyhtiö, joka vastaa Suomen suurimmista radio- ja televisioverkoista. Digitan antenni-tv-verkko tavoittaa yli 99,9 prosenttia Manner-Suomen väestöstä. Radio- ja tv-verkkojen lisäksi Digitan palveluvalikoimaan kuuluvat jatkuvasti kasvavat IoT- ja DataCenter-palvelut. [3.]

Insinööriyön tarkoituksena on selvittää, mikä on paras mahdollinen etenemismalli Digitan LoRaWAN-tekniikkaa käyttävän IoT-verkon peittoalueiden laskemisessa. Tämän lisäksi on tarkoitus tutkia, kuinka paljon signaalin vaimenemista tapahtuu kohteissa, joissa IoT-verkon päätelaitteet on sijoitettu niin sanottuihin syviin sisätiloihin. Tällaisia kohteita ovat esimerkiksi maanpinnan tason alapuolella sijaitsevat kellaritilat sekä lämpökaivot.

Tavoitteena on parantaa verkkosuunnittelussa tehtyjen peittoalue-laskelmien tarkkuutta, jotta pystytään takaamaan LoRaWAN-verkon kuuluvuus asiakkaille vaativissakin kohteissa. Monet vesiyhtiöt ja kaukolämpöyhtiöt ovat alkaneet käyttää Digitan LoRaWAN-verkkoa kerätäkseen lämpötila-, vedenkulutus- ja muita vastaavia tietoja etänä ilman, että heidän pitää käydä paikan päällä kohteessa. Digitan LoRaWAN-verkkoa tiedonsiir-

toon käyttävät päätelaitteet on usein sijoitettu kuuluvuuden puolesta haastaviin paikkoihin. Sensoreita on asennettu paksujen betoniseinien taakse, maanalaisiin kaivoihin ja kellareihin. Tämä lisää huomattavasti signaalin vaimenemista ja tuo haasteita verkkosuunnitteluun, jotta kuuluvuus voidaan taata näissä niin sanotuissa syvän sisäpeiton kohteissa.

## 2 LoRaWAN-tekniikka

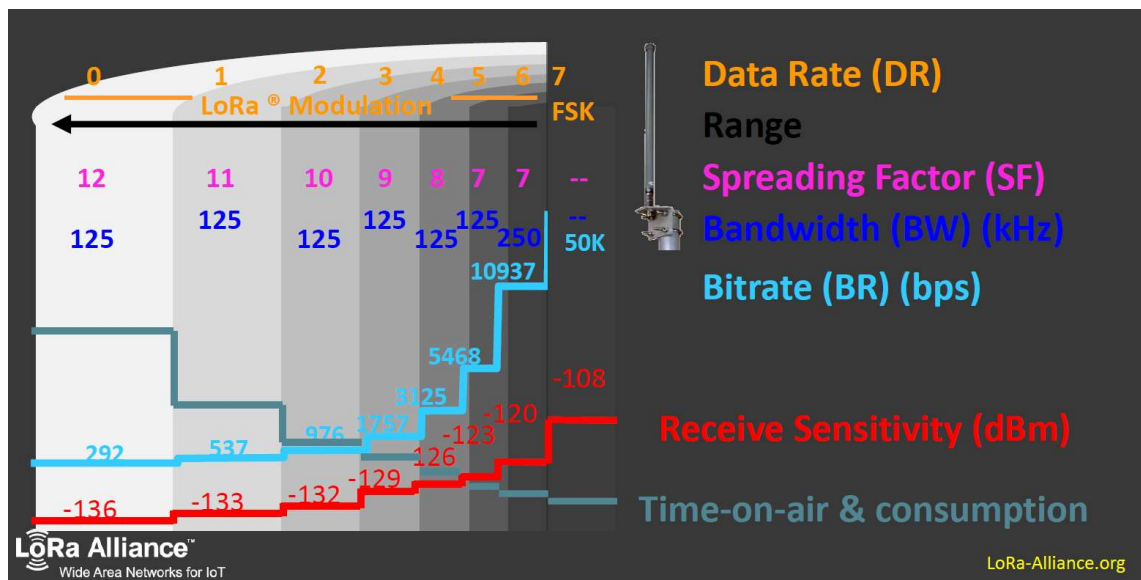
### 2.1 Yleiskatsaus LoRAWAN-tekniikkaan

Yksi uusimpia LPWAN-tekniikoita on LoRaWAN, joka perustuu LoRa-teknologiaan. Se on LoRa Allianssin esineiden internetiä varten kehittämä ja hallinnoima teknologia. LoRaWAN on avoin standardi tietoturvalliseen LPWAN-yhteyteen. LoRaWAN-standardi määrittelee verkon arkkitehtuurin, kun LoRa taas on verkon fyysinen kerros, missä hoidetaan modulaatio, signaalin käsittely ja mahdollistetaan pitkän kantaman radiolinkki. [1, s. 7; 4, s. 1.]

Frequency shifting keying (FSK) modulaatiota on käytetty perinteisesti langattomissa viestintäverkoissa, koska sillä saa aikaan tehokkaan modulaation ja saavutetaan alhainen virrankulutus. Myös LoRassa on säilytetty nämä ominaisuudet, mutta sillä saavutetaan huomattavasti pitemmälle kantava kuuluvuus kuin käyttämällä FSK modulaatiota. LoRa käyttää yhdysvaltalaisen Semtech-nimisen yrityksen kehittämää Spread Spectrum -teknologiaa, joka perustuu vuosikausia sotilas- ja avaruuskäytössä olleeseen Chirp Spread Spectrum Modulaatioon (CSS Modulaatio). Se mahdollistaa häiriö vapaan kommunikoinnin myös pitkien matkojen päähän. [1, s. 4.]

Tukiasemalla pitää olla todella korkea kapasiteetti tai sen pitää pystyä vastaanottamaan suuria määriä viestejä, jotta pitkän kantaman tähtiverkosta saadaan kannattava. Tämä on toteutettu LoRaWAN-verkossa hyödyntäen mukautuvaa tiedonsiirtonopeutta sekä käyttämällä tukiasemassa monikanavaista yhdistelmäradio-osaa, jolla pystytään vastaanottamaan samanaikaisesti useita viestejä käyttäen useita eri kanavia. Tärkeimmät kapasiteettiin vaikuttavat tekijät ovat samanaikaisesti käytettävien kanavien määrä, hyötykuorman pituus, tiedonsiirtonopeus ja kuinka usein päätelaitteet lähettävät viestejä.

LoRa-modulaatiota voi muokata käyttämällä eri Spreading Factoreita (SF). Koska LoRa käyttää hyödykseen Spread Spectrum -teknologiaa, ovat signaalit käytännössä ortogonaalisia toisiinsa nähden, kun käytössä on eri SF. Tämän avulla tukiasema pystyy vastaanottamaan useita eri tiedonsiirtonopeuksia samanaikaisesti samalla kanavalla. Kun SF muuttuu, niin myös tiedonsiirtonopeus ja vastaanottoherkkyys muuttuvat. [1, s. 9; 5, s. 5.]



Kuva 1. Tiedonsiirtonopeus ja vastaanottoherkkyys käyttäen eri Spreading Factoreita. [6, s. 6]

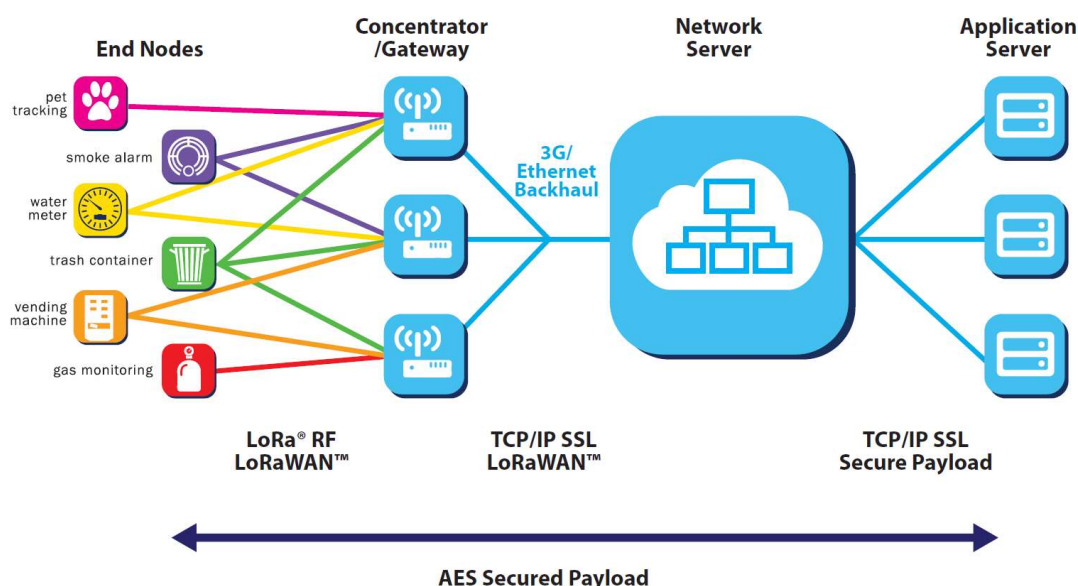
Päätelaite voi käyttää korkeampaa tiedonsiirtonopeutta, jos sillä on hyvä yhteys tukiasemaan. Tällöin se käyttää taajuuskaistaa mahdollisimman vähän aikaa jättäen sen vapaaksi muille sitä mahdollisesti tarvitseville laitteille. Mukautuva tiedonsiirtonopeus auttaa säästämään myös päätelaitteen akkua. Nousevan ja laskevan siirtotien pitää olla symmetriset, sekä laskevan siirtotien kapasiteetin riittävä, jotta mukautuva tiedonsiirtonopeus saadaan toimimaan. Nämä LoRaWAN-verkon ominaisuudet tekevät siitä skaalautuvan ja mahdollistavat korkean kapasiteetin. LoRaWAN-verkon voi aloittaa pienellä määrällä tukiasemia ja lisätä niitä tarpeen mukaan, kun tarvitaan lisää kapasiteettia. Muilla LPWAN-tekniikoilla ei pystytä toteuttamaan yhtä skaalautuvaa verkkoa johtuen teknologioissa tehdyistä kompromisseista, jotka rajoittavat laskevan siirtotien kapasiteettia tai niiden nousevat ja laskevat siirtotiet ovat epäsymmetriset toisiinsa nähden. [1, s. 10.]



Euroopassa LoRa käyttää tiedonsiirtoon lisenssivapaata 868MHz:n taajuuskaistaa. Liikenne- ja viestintäviraston määräys 15 luvasta vapaiden radiolähettimien yhteistaajuuksista ja käytöstä (15 AO/2019 M) [7, s. 8] määrittelee tälle taajuuskaistalle rajoituksia, joiden mukaan efektiivinen säteilyteho saa olla korkeintaan 25 mW ERP ja toimintasuhteen tulee pysyä alle 1 prosentissa. Osalla kanavista toimintasuhde on rajoitettu alle 0,1 prosenttiin. Poikkeuksena tähän on yksi G3-kanava, jolla sallittu efektiivinen säteilyteho saa olla korkeintaan 500 mW ERP, eikä toimintasuhde saa mennä yli 10 prosentin. [1, s. 13.]

LoRaWAN-standardi määrittelee kymmenen kanavaa, joista kahdeksalla tiedonsiirtonopeus vaihtelee 250 bitistä sekunnissa 5,5 kilobittiin sekunnissa. Näiden kahdeksan lisäksi on yksi suuren tiedonsiirtonopeuden LoRa-kanava, joka mahdollistaa siirron nopeudella 11 kilobittiä sekunnissa, sekä yksittäinen FSK-kanava nopeudella 50 kilobittiä sekunnissa. Kanavista kolme (868,10 MHz, 868,30 MHz ja 868,50 MHz) ovat pakollisia, ja kaikkien LoRaWAN-tukiasemien sekä -laitteiden pitää aina tukea ja kuunnella näitä kanavia. [6, s. 8; 1, s. 13.]

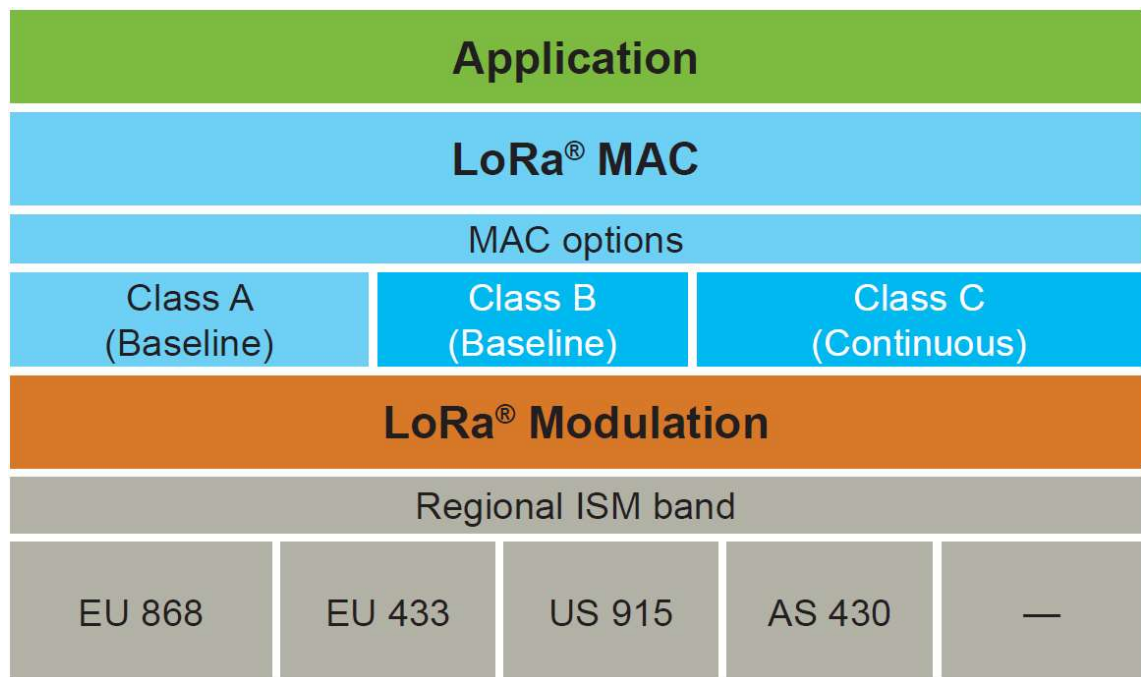
LoRaWAN-standardin määrittelyssä [8, s. 8] kerrotaan verkkojen olevan suunniteltu tyyppillisesti tähtien tähti -topologiaan, missä päätelaitteelta lähetetty viesti menee tukiaseman kautta keskitetylle verkkopalvelimelle. Verkkopalvelin puolestaan välittää kunkin verkossa olevan päätelaitteen lähettämät viestit kyseiselle päätelaitteelle kohdennettuun sovelluspalvelimeen. Kuvassa 1 on esitelty LoRaWAN-verkon topologia.



Kuva 2. LoRaWAN-verkon topologia. [4, s. 8]

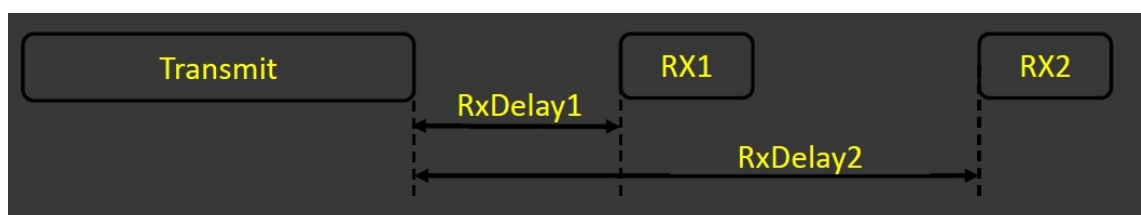
LoRaWAN-liikenne on kaksisuuntaista. Päätelaitte lähettää viestin nousevan siirtotien suuntaan kaikille tukiasemille, jotka kuulevat sen. Kuten edellä kerrottiin, niin tukiasemat välittävät puolestaan viestit verkkopalvelimen kautta sovelluspalvelimelle. Kun sovelluspalvelimelta lähetetään viesti päätelaitteelle, niin verkkopalvelin määrittää edellisen nousevan siirtotien suuntaan kulkeneen viestin perusteella parhaan tukiaseman, jonka kautta viesti välitetään päätelaitteelle. Laskevan siirtotien suuntaan viesti kulkee vain yhden tukiaseman kautta, kun taas nousevan siirtotien suuntaan käytetään kaikkia tukiasemia, jotka kuulevat viestin. [8, s. 12; 6, s. 26–31.]

LoRaWAN-verkon päätelaitteita käytetään moniin erilaisiin tarkoituksiin ja sen takia niillä on myös erilaisia vaatimustasoja. Jotta päätelaitteet palvelisivat mahdollisimman hyvin kaikkia näitä käyttötarkoituksia, on LoRaWAN-standardissa jaettu päätelaitteet kolmeen eri luokkaan (kuva 3) niiden ominaisuuksien mukaan. [1, s. 10.] Kaikkien laitteiden tulee täyttää ainakin luokan A (Class A) määritelmä, mutta laitteilla voi olla lisäksi valinnaisia ominaisuuksia luokkien B (Class B) ja C (Class C) mukaisesti [9].



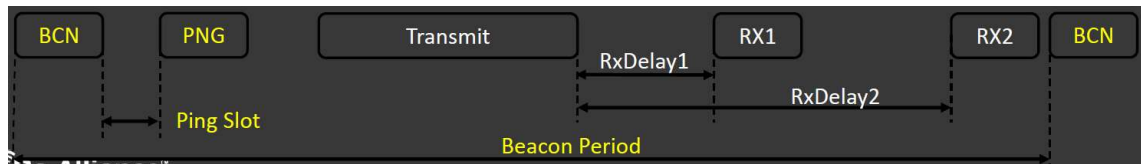
Kuva 3. LoRaWAN-luokat. [1, s. 7]

Luokan A päätelaitteet sallivat kaksisuuntaisen liikenteen aina sen jälkeen, kun päätelaite on lähettänyt viestin nousevan siirtotien suuntaan. Kuten kuvasta 4 näkyy, niin päätelaitteen lähettämää viestiä seuraa kaksi lyhyttä laskevan siirtotien viestiä varten tarkoitettua vastaanottoikkunaa, jolloin päätelaite kuuntelee palvelimelta mahdollisesti tulevaa vastausta. Tämän jälkeen palvelimella on seuraavan kerran mahdollisuus lähettää viesti päätelaitteelle vasta silloin, kun se vastaanottaa seuraavan kerran päätelaitteen lähettämän viestin. Tämä luokan A käyttämä toimintatapa on kaikista energiatehokkain ja säästää päätelaitteen akkua. [8, s. 10.]



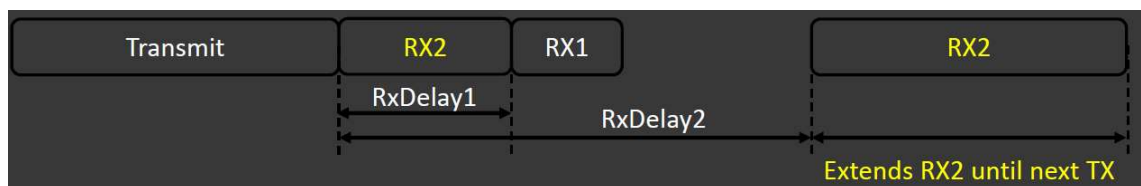
Kuva 4. Luokan A siirtoa seuraavat vastaanottoikkunat. [6, s. 15]

Luokan B päätelaitteet sallivat enemmän vastaanottoikkunoita, ja ne avaavat ylimääräisen aikataulutetun vastaanottoikkunan luokan A päätelaitteissakin olevien vastaanottoikkunoiden lisäksi. Päätelaite vastaanottaa synkronoidun beacon-signaalin tukiasemalta (kuva 5), jotta se osaa avata vastaanottoikkunan oikea-aikaisesti. [8, s. 10.]



Kuva 5. Luokan B jaksoittaiset beacon-signaalit. [6, s. 16]

Kuten kuvasta 6 ilmenee, niin luokan C päätelaitteilla on vastaanottoikkuna auki lähes jatkuvasti. Vastaanottoikkuna on suljettuna vain silloin, kun päätelaiteella on lähetys käynnissä. Luokan C laitteen kuluttavat kaikista eniten virtaa, mutta ne tarjoavat pienemmän viiveen palvelimen ja päätelaitteen väliseen kommunikointiin. [8, s. 10.]



Kuva 6. Luokan C vastaanottoikkunat. [6, s. 17]

## 2.2 LoRa:n linkkibudjetti

Radioyhteyden linkkibudjetin laskemisella tarkoitetaan vastaanotetun signaalitehon laskemista. Jotta linkkibudjetti voidaan laskea, täytyy tietää lähettimen antama signaaliteho sekä matkalla tapahtuvat vahvistukset ja vaimennukset. Tarkastellaan tilannetta, missä LoRaWAN-tukiasema ja päätelaite ovat ennalta määrätyissä paikoissa. Tällöin emme voi vaikuttaa yhteysvälivaimennukseen, joka muodostuu esimerkiksi etäisyydestä, taajuudesta, radiotiellä olevista esteistä ja sään vaikutuksesta. Koska LoRa:n käyttämällä taajuusalueella efektiivinen säteilyteho on rajoitettu, niin lähetykseen antennista lähtevä teho ei saa ylittää 25 mW. Koska lähetykseen antennista lähtevä teho on rajoitettu ja radiotiellä tapahtuvaan vaimenemiseen ei voida vaikuttaa, niin ratkaisevassa asemassa

linkkibudjetin kannalta on vastaanottopäässä tapahtuvat vahvistukset ja vaimenemiset. Näitä ovat vastaanottoantennin vahvistus sekä antennin ja vastaanottimen välinen kaapelivaimennus. Tästä syystä LoRaWAN-tukiasemat on sijoitettu mahdollisimman lähellä antennia, jotta nousevan siirtotien suuntaan ei tulisi merkittävää kaapelivaimennusta antennin ja tukiaseman välillä. Vastaanottoantenni onkin ratkaisevassa asemassa, jos LoRa:n kuuluvuutta halutaan parantaa.

RSSI (Received Signal Strength Indicator) on koko kaistanleveydeltä mitattu signaalinvoimakkuusarvo, joka ilmaisee radiolaitteen vastaanottamaa tehotasoa. Vaikka lähtökohtaisesti voi sanoa, että mitä korkeampi RSSI, niin sitä vahvempi signaali, se ei kuitenkaan suoraan kerro vastaanotettua signaalinvoimakkuutta. Toinen tarvittavan signaalin voimakkuuteen merkittävästi vaikuttava tekijä on SNR (Signal to Noise Ratio). SNR on signaali-kohinasuhde, jolla tarkoitetaan hyötysignaalin ja kohinasignaalin tehojen suhdetta. RSSI- ja SNR-arvoista saadaan laskettua ESP (Estimated Signal Power), joka on laskennallinen signaalinvoimakkuusarvo. ESP lasketaan kaavalla:

$$ESP = RSSI - 10 \log(1 + 10^{\left(-\frac{SNR}{10}\right)}) \quad (1)$$

ESP vastaan parhaiten todellista LoRa:n vastaanotettua signaalinvoimakkuutta ja sen avulla pystytään vertaamaan mittaustuloksia peittoaluelaskelmiin.

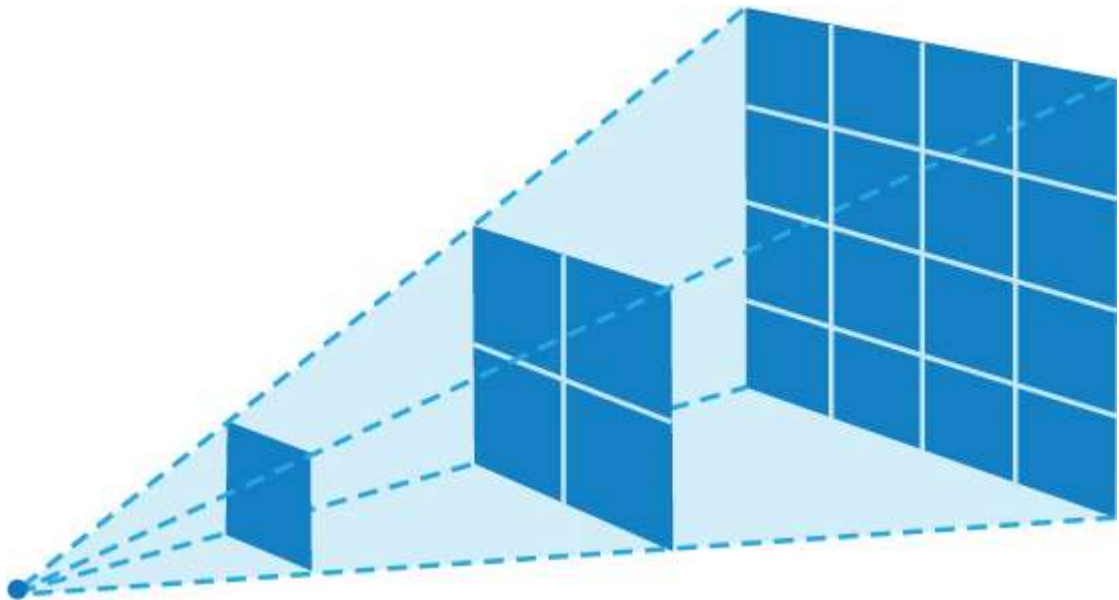
### 3 Radioaaltojen eteneminen

Eri taajuuskaistoilla radioaallot käyttävät erilaisia etenemismuotoja. Näitä ovat maanpinta-aalto, ionosfääriaalto ja vapaan tilan aalto. Maanpinta-aalto seuraa maapallon pintaa, jolloin kommunikointi on mahdollista myös horisontin yli. Ionosfääriaallot heijastuvat ionosfääriin ja maanpinnan välillä mahdollistaen kaukoviestinnän. Viestinnän laatu ei kuitenkaan pysy vakaana, johtuen ionosfääriin vaihtelevista ominaisuuksista. Moderneissa kommunikaatiojärjestelmissä käytetään yli 100 MHz:n radiotaajuuksia, jolloin etenemismuotona on vapaan tilan aalto. Vapaan tilan aaltoa etenemismuotoa käytettäessä yleisenä vaatimuksena on, että lähetys- ja vastaanottoantennin välillä on suora näköyhteys. Korkean taajuuden radioaallot kuitenkin heijastuvat esteistä ja taipuvat niiden taakse,

jolloin kommunikointi on mahdollista ilman suoraa näköyhteyttä, vaikka etenemismuotona onkin vapaan tilan aalto.

### 3.1 Signaalin vaimeneminen vapaassa tilassa

Signaalin teho pienenee, mitä pidemmälle se etenee. Signaalin vaimeneminen näköyhteysreitillä johtuu sen pallon muotoisesta hajaantumisesta. Tätä kutsutaan vapaan tilan vaimenemiseksi. Koska signaali hajaantuu tasaisesti joka suuntaan, on sen tehon heikkeneminen suoraan verrannollinen etäisyyden neliöön, kuten kuvassa 7 havainnollistetaan.



Kuva 7. Tehon heikkeneminen vapaassa tilassa on suoraan verrannollinen etäisyyden neliöön. [10]

Vapaan tilan vaimennusta  $L$  kuvataan yleisesti desibeleinä ja se lasketaan kaavalla:

$$L(\text{dB}) = 20 \log_{10} \left( \frac{4\pi df}{c} \right) \quad (2)$$

jossa  $d$  on etäisyys,  $f$  on signaalin taajuus ja  $c$  on valonnopeuden vakio tyhjiössä.

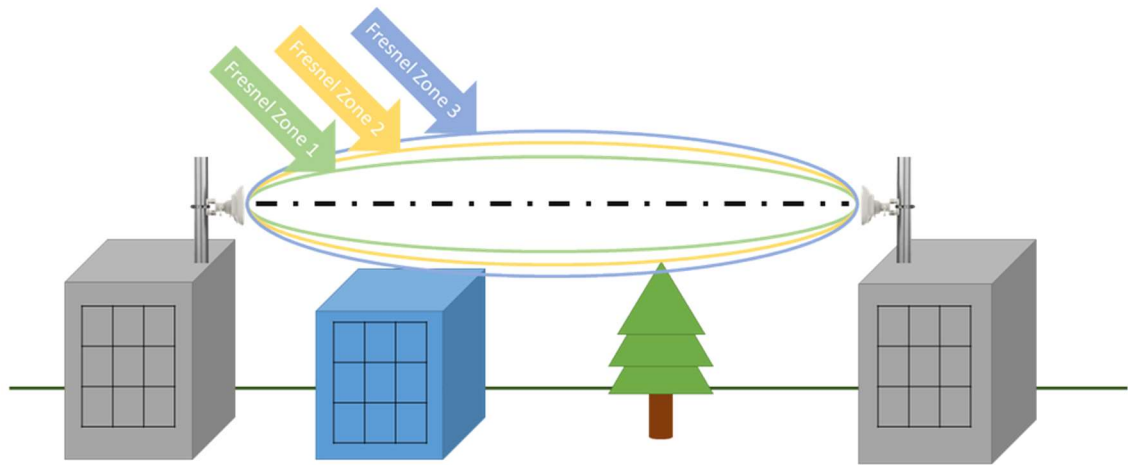
Jos ilmaistaan taajuus  $f$  gigahertseinä ja etäisyys  $d$  kilometreinä, voidaan kaava 2 muuttaa muotoon:

$$L(dB) = 92.45 + 20 \log_{10}(f) + 20 \log_{10}(d) \quad (3)$$

Kaavaa 3 käyttämällä voidaan laskea Lora-signaalin teoreettinen etenemismatka vapaassa tilassa. LoRan käyttämä taajuus on noin 868 MHz, suurin sallittu lähetysteho on 14 dBm ja kuvan 1 mukaan vastaanottoherkkyys on  $-136$  dBm, kun käytetään SF12:ta. Näillä arvoilla laskettuna saadaan LoRa-signaalin teoreettiseksi kantamaksi vapaassa tilassa noin 869 kilometriä. Tällaista kantamaa ei voida kuitenkaan saavuttaa operatiivisissa verkoissa, vaan tämä on teoreettinen ideaalitilanne, joka edellyttäisi ihanteellisen vapaan tilan sekä häiriöttömät olosuhteet.

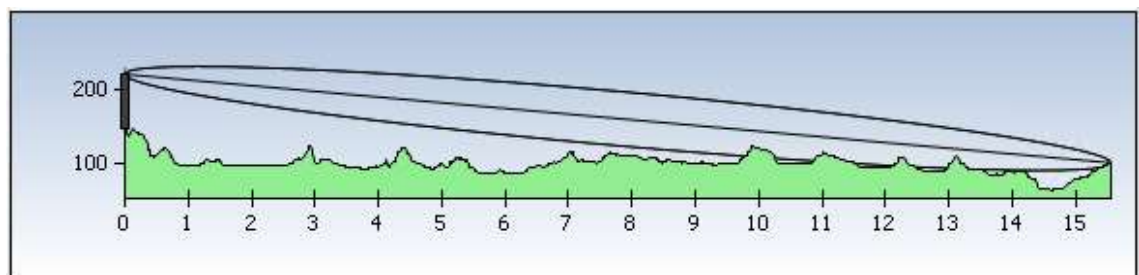
### 3.2 Fresnelin alue

Signaalin vaimenemiseen vaikuttaa myös moni muu asia kuin vapaan tilan vaimeneminen. Yksi merkittävimmistä asioista signaalin vaimenemisessa on lähetys- ja vastaanottoantennin väliin jäävä ellipsoidin muotoinen alue, jota kutsutaan Fresnelin alueeksi. On olemassa lukuisia Fresnelin alueita, mutta vain kolmella ensimmäisellä niistä on merkittäviä vaikutuksia signaalin voimakkuuteen. Kuvassa 8 on näkyvissä kolme ensimmäistä Fresnelin aluetta.



Kuva 8. Fresnelin kolme ensimmäistä aluetta, joille tulevat esteet heikentävät alkuperäistä signaalia. [11]

Ensimmäinen Fresnelin alue on kuitenkin kaikista merkityksellisin signaalin vaimenemisessa. Kuvassa 9 näkyvällä Fresnelin ensimmäisellä alueella olevat maastoesteet vaimentavat alkuperäistä signaalia. Fresnelin ensimmäisestä alueesta täytyy olla ainakin 60 % esteistä vapaata, mutta ideaalitulanteessa esteistä vapaata aluetta tulisi olla yli 80 %.



Kuva 9. Lähety- ja vastaanottoantennin välille tehty maastoprofiilikuva, johon on piirretty Fresnelin ensimmäinen alue.

Lähety- ja vastaanottoantennin puolivälissä sijaitseva Fresnelin alueen laajin säde voidaan laskea kaavalla:



$$F_1 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{cD}{f}} \quad (4)$$

Jossa  $f$  on signaalin taajuus,  $c$  on valonnopeuden vakio ja  $D$  on antennien välinen etäisyys. Kun korvataan  $c$  numeerisella arvolla ja muunnetaan yksiköitä, saadaan kaava 4 muotoon:

$$F_1[\text{m}] = 8,656 \sqrt{\frac{D[\text{km}]}{f[\text{GHz}]}} \quad (5)$$

Kaavalla 5 voidaan laskea kuvassa 9 näkyvän Fresnelin alueen suurin säde. Jos käytettävä taajuus on 868 MHz ja antennien välinen etäisyys on 15,5 km, saadaan suurimmaksi säteeksi noin 36,6 metriä.

### 3.3 Etenemismallit

Vapaan tilan etenemisellä saadaan selville signaalin tehon vaimeneminen teoreettisissa olosuhteissa. Yksinkertaiset teoreettiset etenemismallit, kuten vapaan tilan eteneminen, eivät sovellu hyvin todellisiin olosuhteisiin. Kun ennustetaan signaalin etenemistä todellisissa olosuhteissa maanpinnan läheisyydessä, niin pitää huomioida myös monia muita asioita, jotka saattavat vaikuttaa signaalin etenemiseen sen reitillä. Näitä asioita ovat muun muassa maanpinnan muotojen vaihtelut, peitteellisyys ja rakennukset. Tämän takia on kehitetty useita eri laskentamalleja, joilla signaalin etenemistä voidaan ennustaa. Etenemismallin soveltuvuuteen vaikuttaa muun muassa käytetty taajuus, millaiseen ympäristöön ennustetta lasketaan, miten laajalle alueelle ennustetta lasketaan sekä miltä korkeudelta signaali lähetetään ja vastaanotetaan.

Radioverkkojen suunnittelussa käytettävät etenemismallit voidaan jakaa tilastollisiin ja deterministisiin. Tilastolliset etenemismallit perustuvat suureen määrään mittaustuloksia. Tilastollisen etenemismallin soveltuvuus riippuu siitä, millaisessa ympäristössä ja kuinka laajalla alueella mittauksia on tehty. Myös mittauksissa käytetyt taajuudet, lähetys- ja vastaanottoantennien korkeudet sekä muut signaalin etenemiseen vaikuttavat tekijät määrittävät, minkä tyyppisiin peittoaluelaskelmiin etenemismalli soveltuu. Deterministi-

sissä etenemismalleissa lasketaan yhteysvälien teoreettisia etenemismekanismeja. Diffraktion laskenta on usein merkittävässä osassa. Usein käytössä on myös vapaan tilan eteneminen sekä aikavaihteluun vaikuttavina troposfäärinen sironta ja kanavoituminen.

## 4 Kenttämittaukset

### 4.1 Mittalaitteet

LoRa-teknologia on sen verran uutta, että mittalaitteissa ei ole vielä kovin paljon vaihtoehtoja. Mittauksissa käytettiin Coheros Hero N1- ja Adeunis Field Test Device (FTD) -mittalaitteita. Ne ovat keskenään erilaisia ja soveltuvat hieman erityyppisiin mittauksiin.

#### Coheros Hero N1

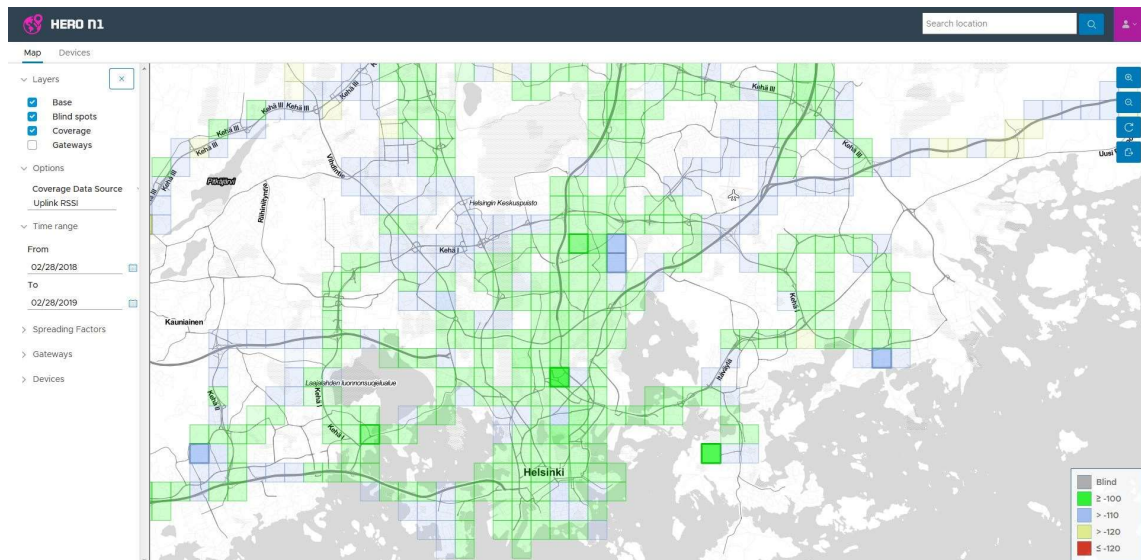
Kuvassa 10 näkyvä Coheros Hero N1 on LoRa-verkon mittaamista varten kehitetty mittalaite [12]. Laitteessa on vain yksi painike, josta laitteeseen kytketään virta. Painikkeen takana on erivärisiä ledivaloja, jotka ilmoittavat laitteen tilasta. Kun virta on kytketty, niin laite lataa ensin palvelimelta konfiguraation ja aloittaa sen jälkeen mittaamisen automaattisesti. Konfiguraatiossa määritellään haluttu SF, jota Hero N1 käyttää. Konfiguraatioon on mahdollista tehdä muutoksia verkkosovelluksen kautta. Hero N1:n pakettien lähetysväli riippuu konfiguraatioon määritellystä SF:sta, ja mittalaite määrittelee lähetysvälin automaattisesti niin, että taajuuskaistalle määritelty toimitusuhde ei ylitä. Hero N1 -mittalaitteita voi kytkeä myös ryhmään, jolloin samalla SF:lla toimiville mittalaitteille muodostetaan ryhmä verkkosovelluksen kautta. Ryhmän laitteet siirtävät paketteja vuorotellen tasaisin väliajoin, ja näin saadaan pakettien siirtoväli lyhemmäksi ylittämättä sallittua toimitusuhdetta. Mitä useampia laitteita ryhmässä on, niin sitä tiheämmin laitteet siirtävät dataa. Tämä on hyödyllinen ominaisuus, kun tehdään mittauksia liikkuvalla autolla ja se mahdollistaa tarkemman mittadatan saamisen nopeammin. Yksittäistä laitetta käyttäessä mittapisteiden välille voi jäädä pitkä välimatka kovalla vauhdilla ajettaessa.



Kuva 10. Coheros Hero N1 -mittalaite [12]

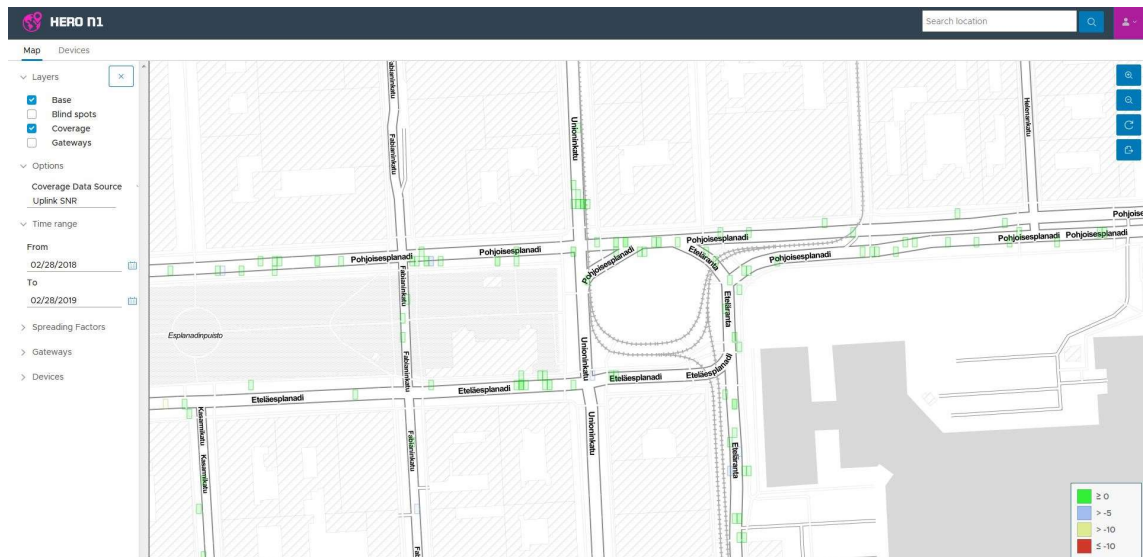
Hero N1 -mittalaitteessa on liittimet GPS- ja LoRa-antennille, joten siihen on mahdollista liittää erityyppisiä antenneja. GPS-antennin saa liitettyä SMA-urosliittimellä ja LoRa-antennin käänteisellä SMA-naarasliittimellä. Mahdollisuus käyttää erilaisia antenneja on hyödyllinen ominaisuus, kun tehdään mittauksia autolla, koska mittalaitteeseen saa kytettyä auton katolle kiinnitettävät antennit. Radiolaitteen lähetysteho on 25 mW, joka on korkein mahdollinen, mikä laitteen käyttämällä 868 MHz:n taajuusalueella on sallittu.

Coheroksen mukaan [12] mittalaite on suunniteltu käytettäväksi kenttätyöntekijöiden autoissa, jossa se kerää mittadataa automaattisesti samalla, kun työntekijät ajavat autolla hoitamassa työtehtäviään. Näin saadaan hyödyllistä mittadataa tekemättä erillisiä mittauksia. Mittadata tallentuu palvelimelle analysointia varten. Kuten kuvassa 11 näkyy, niin Hero N1 -mittalaitetta varten on tehty myös sovellus, jossa verkon peittoalueeseen liittyvät parametrit on tuotu karttanäkymälle.



Kuva 11. Coheros Hero N1 -mittalaitteen mittaustuloksia karttanäkymässä. Kartalla on Digitan LoRaWAN-verkon Uplink RSSI -arvot Helsingin ympäristössä.

Mittaustuloksista voi valita, mitä parametreja kartalla halutaan nähdä. Tällä hetkellä vaihtoehtoina ovat Uplink RSSI, Uplink SNR, Downlink RSSI, Downlink SNR ja GW Diversity. Lisäksi näkymää saa rajattua päivien, eri mittalaitteiden tai käytetyn SF:n mukaan. Karttanäkymälle saa mittaustulosten lisäksi näkymään myös tukiasemat ja mittaustuloksista voi valita näkyviin vain haluttujen tukiasemien kautta kulkenut liikenne. Karttanäkymä on skaalautuva, ja mittaustulokset pystytään näkemään hyvinkin tarkasti, kun karttaa zoomaa lähemmäksi. Kuvassa 12 on esimerkki lähemmäksi zoomatusta näkymästä Espaanadilta, Helsingin keskustan alueelta, jossa näkyy Digitan LoRaWAN-verkon Uplink SNR -arvot.



Kuva 12. Coheros Hero N1 -mittalaitteen mittaustuloksia karttanäkymässä. Kartalla on Digitan LoRaWAN-verkon Uplink SNR arvot Esplanadiilla, Helsingin keskustassa.

Mittadatan saa haettua myös tekstimuodossa, jolloin sitä pystyy itse muokkaamaan ja valitsemaan ne arvot, joita itse haluaa käyttää.

#### Adeunis Field Test Device (FTD)

FTD on Adeunin kehittämä mittalaite ja siitä on omat versiot LoRaWAN- ja Sigfox-verkkojen mittaamiseen. Myös LoRaWAN-verkon mittaamiseen tarkoitetuista laitteista on useita versioita riippuen siitä, minne päin maailmaa se soveltuu. Aasiassa, Australiassa, Euroopassa ja Yhdysvalloissa on käytössä erilaiset LoRaWAN-taajuuskaistat, joten jokaista varten on tehty oma versio mittalaitteesta. Kuvassa 13 näkyvässä FTD:ssä on 2 nappia ja näyttöruutu. Lisäksi siitä on ON/OFF -kytkin laitteen käynnistämistä ja sammuttamista varten.



Kuva 13. Adeunis Fieltest Device [13]

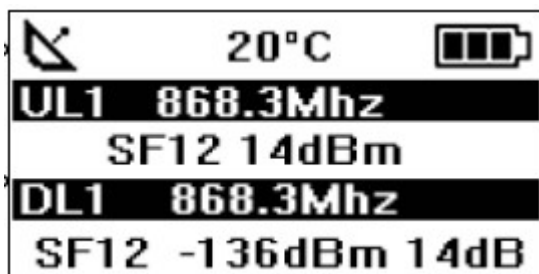
FTD:ssa on kiinteä antenni, joten se ei sovellu hyvin autolla tehtyihin mittauksiin, vaan on parhaimmillaan paikallaan tehdyissä mittauksissa. Perusasetuksilla FTD aloittaa mitaamisen käynnistytyn jälkeen, ja lähettää viestejä konfiguraatioon määritellyn lähetysvälin mukaisesti. Viestin voi lähettää myös manuaalisesti painamalla mittalaitteen isompaa painiketta. Automaattinen lähetys on myös mahdollista poistaa käytöstä, jolloin FTD lähettää viestejä vain silloin, kun se tehdään manuaalisesti. Konfiguraatiossa voi muuttaa lähetysvälin lisäksi myös monia muita asetuksia. Näistä tekemieni mittausten kannalta tärkein on Adaptive Data Rate (ADR), joka FTD:ssa on perusasetuksilla käytössä. ADR muuttaa käytössä olevia parametreja verkkopalvelimelta saadun viestin perusteella. [14]. Näin esimerkiksi lähetysteho ja käytetty SF muuttuvat sen mukaan, kuinka hyvä kuuluvuus mittapisteessä on.

Taulukossa 1 on kerrottu FTD:n radiolaitteen tekniset tiedot. Maksimilähetysteho on taajuusalueen rajoitusten sallima 25 mW. Suurin vastaanottoherkkyys on  $-140$  dBm, kun käytössä on SF12.

Radio	
Communication	LoRaWAN protocol & LoRa Modulation
LoRaWan Specification compliant	V1.0.1
Radio Rate	Variable (SF12/125kHz (~183 bps) to FSK (~50kbps)
Frequency	ISM band 865-870MHz
RF Power	14dBm (25mW)
Sensitivity	down to -140 dBm in SF12/CR4
Range (Open)	Up to 15km
Standards met	EN 300-220, EN 301-489, EN 60950
Network area	EU863-870

Taulukko 1. FTD:n radiolaitteen tekniset tiedot. [14, s. 37.]

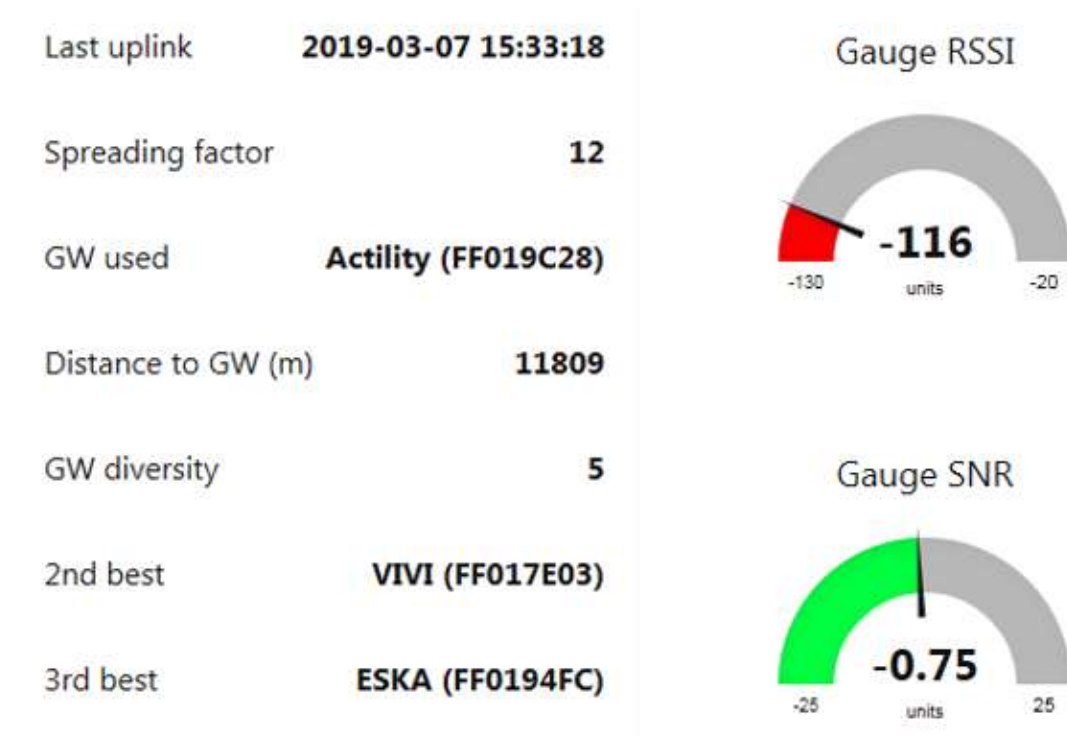
FTD-käyttöoppaassa [14, s. 39] kerrotaan erilaisista valittavissa olevista näkymistä, joita ovat Start-, Join-, Uplink/Downlink-, GPS-, PER- ja Downlink Frame -näkyvä. Näkymistä tärkein tätä insinööriyötä varten tehdyissä mittauksissa on kuvassa 14 esitetty Uplink/Downlink-näkyvä. Siitä näkee, milloin FTD lähettää pakettia nousevan siirtotien suuntaan, mitä kanavaa FTD käyttää paketin lähettämiseen, monesko siirtoyritys on menossa, mikä SF on käytössä ja mikä on käytetty lähetysteho. Myös laskevan siirtotien suuntaan näkee käytetyn kanavan, kumpi vastaanottoikkuna FTD:ssa on auki, käytetty SF laskevan siirtotien suuntaan sekä mikä oli vastaanotetun signaalin RSSI ja SNR.



Kuva 14. FTD:n Uplink/Downlink-näkyvä [14]

Uplink/Downlink-näkymästä on helppo katsoa, milloin paketti on mennyt läpi ja siihen on saatu vastaus. Tällöin kuvassa 14 näkyvään alalaidan valkoiselle alueelle tulee vastaanotetun signaalin arvot. Jos laskevan siirtotien paketti ei tule perille, niin FTD:sta ei näe suoraan, onko nousevan siirtotien paketti mennyt perille. Digitan IoT Palvelut -yksikössä työskentelevät Nicolas Le Bail ja Tuomo Hörkkö ovat tehneet tätä varten IBM Cloud -pilvipalvelussa toimivaa Node-RED -instanssia apuna käyttäen visualisointisovelluksen,

jossa on näkymä jokaiselle sinne konfiguroidulle mittalaitteelle. Kuten kuvassa 15 havainnollistetaan, niin sovelluksesta näkyy RSSI- ja SNR-arvot nousevan siirtotien suuntaan.



Kuva 15. Kuvankaappaus visualisointisovelluksesta, jossa näkyy tietoja nousevan siirtotien suuntaan lähetetystä viestistä.

Visualisointisovelluksesta näkyy RSSI- ja SNR-arvojen lisäksi myös, milloin viimeisin nousevan siirtotien viesti on vastaanotettu, käytetty SF, montako tukiasemaa on kuullut viestin, verkkopalvelimen määrittelemä paras tukiasema ja sen etäisyys mittalaitteesta, sekä myös toiseksi ja kolmanneksi parhaat tukiasemat.

FTD:lla tehtyjen mittausten tulokset tallennetaan myös palvelimelle ja niitä voidaan tarkastella myöhemmin Actilityn ThingPark-alustalla tehtyjen Wireless Logger- ja Network Survey -verkkosovellusten avulla. Network Survey -verkkosovelluksessa mittaustulokset saadaan karttanäkymälle ja Wireless Loggerissa dataa voidaan katsoa tekstinä. Sieltä on myös mahdollista tuoda dataa esimerkiksi Excel-tiedostoon, jossa sitä voidaan muokata omia tarpeita vastaavaksi.



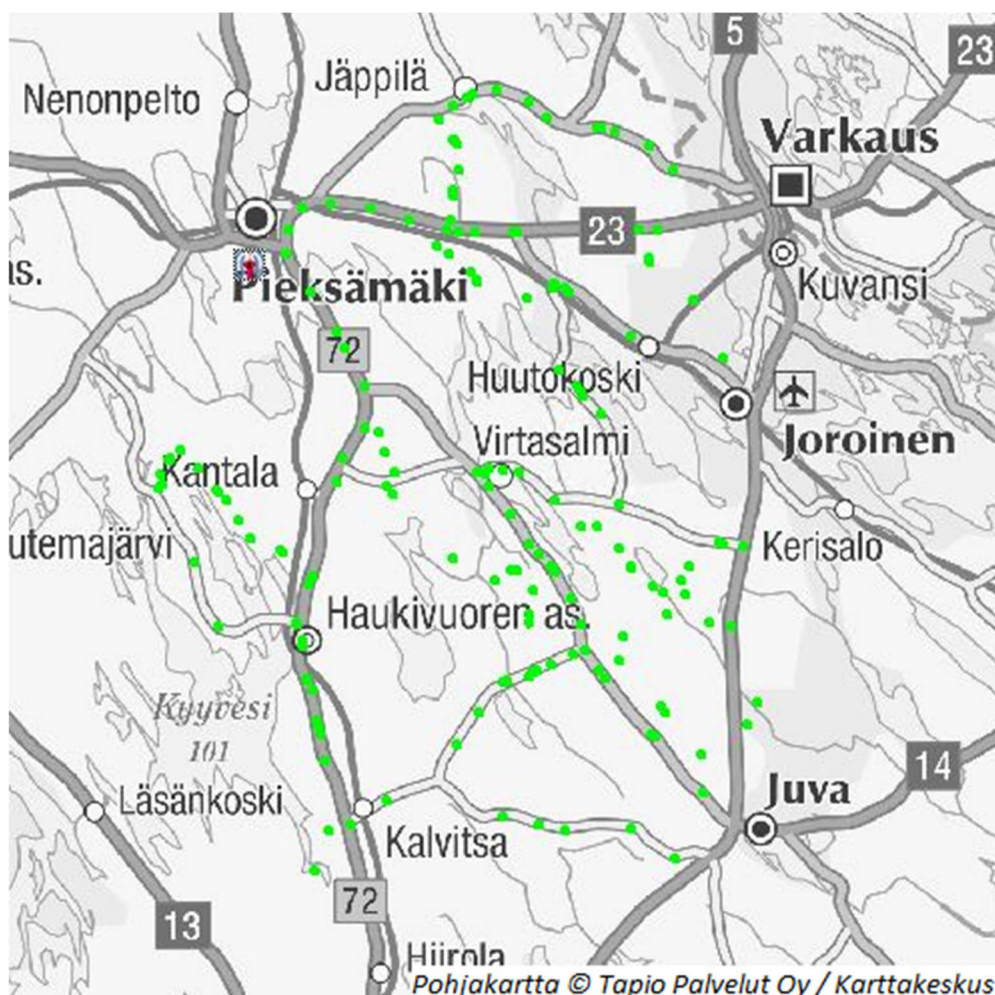
## 4.2 Peittoaluemittaukset

Peittoaluemittaukset aloitettiin testimittauksilla Helsingin ja Nurmijärven välisellä alueella vuoden 2018 kesällä. Mittalaitteina käytettiin Coheroksen Hero N1- ja Adeuniksen Field Test Device (FTD) -mittalaitteita. Mittalaitteet ja niiden antennit oli sijoitettu auton sisälle. Hero N1 -mittalaitteesta oli tässä vaiheessa käytössä prototyyppi ja sen toimintaan tuli vielä myöhemmin parannuksia. Testimittauksissa kokeiltiin mittalaitteiden toimivuutta ja käyttäytymistä laajemmissa mittauksissa. Testimittausten aikana huomattiin, että mittausalueella on niin hyvä LoRaWAN-verkko, että sillä ei pääse tukiaseman kantaman laidoille, vaan ennen kuuluvuuden heikkenemistä joku toinen tukiasema alkaa palvella eikä näin päästä mittaamaan, miten kauas tukiaseman lähettämä signaali todellisuudessa kantaa.

Petäjärven työryhmän vuonna 2015 Oulun seudulla tekemissä mittauksissa [15] tukiasemaan nähden kaukaisimmat paikat, joista oli mitattu kuuluvuutta, oli mantereella noin 15 kilometrin päästä tukiasemasta ja merellä noin 30 kilometrin päästä tukiasemasta. Sanchez-Iborran työryhmän Murcian alueella tekemissä mittauksissa [16] tukiasemaan nähden kaukaisin paikka, josta mitattiin kuuluvuutta, oli noin 19 kilometrin päässä tukiasemasta. Jo testimittauksissa huomattiin, että tukiasemat kuulevat ainakin yksittäiset mittalaitteiden lähettämät viestit huomattavasti pidemmän matkan päästä kuin Petäjärven ja Sanchez-Iborran työryhmien aiemmin tekemissä mittauksissa. Nurmijärven alueelta oli mennyt viesti Fiskarsissa sijaitsevaan tukiasemaan, joka on noin 75 kilometrin päässä mittapisteestä. Pitempään kantamaan vaikuttaa varmasti se, että Digitan korkeat radio-mastot mahdollistavat antennien sijoittamisen huomattavasti korkeammalle kuin muiden tekemissä testimittauksissa.

Kun mittalaitteiden toimivuus oli saatu testattua, aloitettiin varsinaiset mittaukset. Ensimmäiseksi mittakohteeksi valittiin Pieksämäen, Mikkelin ja Varkauden välinen alue, jossa mitattiin Digitan Pieksämäellä sijaitsevaan mastoon asennetun LoRaWAN-tukiaseman kuuluvuutta. Valitulla mittausalueella oli vielä kesällä 2018 mahdollisuus päästä testaamaan, mihin asti peittoalue todellisuudessa kantaa, koska tuolloin Pieksämäen itä- ja kaakkoispuolella lähimpänä oleva tukiasema sijaitsi Savonlinnassa noin 100 kilometrin päässä. Mittauksissa käytettiin FTD- ja Hero N1 -mittalaitteita. Hero N1:lla mitattiin liik-

kuvalla autolla, jota ajettiin nopeusrajoitusten mukaan. Nopeus vaihteli 30–100 km/h välillä. Käytössä oli yksi Hero N1 -mittalaite, koska mittalaiteryhmien muodostaminen ei ollut vielä tuolloin mahdollista. Hero N1 -mittalaite konfiguroitiin käyttämään SF12:tä, koska mittauksen tarkoituksena oli selvittää, kuinka kauas tukiaseman kuuluvuusalue ulottuu. FTD:lla mittaukset suoritettiin paikallaan niin, että jokaisessa mittapisteessä tehtiin 5–10 mittausta. Kuvassa 16 on Pieksämäen masto ja alueella tehtyjen mittauksen mittapisteet merkattuna kartalle.



Kuva 16. Kuvassa näkyy Pieksämäen alueella tehtyjen peittoaluemittausten mittapisteet kartalle piirrettynä sekä Pieksämäen tukiaseman sijainti.

Kaukaisimmat mittapisteet, joista nousevan siirtotien suuntaan lähetetty viesti meni perille Pieksämäen tukiasemaan, sijaitsivat noin 53 kilometrin päässä. Kun oltiin tätä lähempänä, niin viestien lähetys Pieksämäen tukiasemaan pääsääntöisesti onnistui. Las-

kevan siirtotien suuntaan pisin mitattu etäisyys saatiin noin 45 kilometrin päässä Pieksämäen tukiasemasta ja sitä lähempänä tukiasemaa viestien lähetys pääsääntöisesti onnistui. Mittauksissa huomattiin myös, että yksittäiset viestit kuuluvat todella pitkälle tukiasemasta. Jyväskylän tukiasemaan meni mittausten aikana useampia viestejä mittauspisteiden etäisyyden tukiasemaan ollessa 84 ja 98 kilometrin välillä.

Peittoaluemittauksia suoritettiin myös syvän sisäpeiton mittauksien yhteydessä muun muassa Haminassa ja Raisiossa. Laajimmat peittoaluemittaukset tehtiin kuitenkin alkuvuodesta 2019 Helsingin ja Nurmijärven alueella. FTD:lla tehtiin mittauksia paikallaan ennalta valituissa mittapisteissä. Samoissa mittapisteistä suoritettiin mittauksia useina eri kertoina. Jokaisella kerralla tehtiin useampia mittauksia jokaisesta mittapisteestä. Hero N1 -mittalaitteilla tehtiin mittauksia liikkuvassa autossa. Autolla ajettiin nopeusrajoitusten mukaisesti ajonopeuden ollessa 30–100 km/h. Mittauksissa käytettiin kuutta Hero N1 -mittalaitetta ja niistä muodostettiin kaksi ryhmää, joista toisella oli käytössä SF10 ja toisella SF12. SF10-ryhmässä oli kaksi mittalaitetta ja SF12-ryhmässä neljä mittalaitetta. Hero N1 -mittalaitteisiin kytkettiin auton ulkopuolelle asennettavat GPS- ja LoRa-antennit. Kuvassa 17 näkyvät auton katolle asennetut antennit.



Kuva 17. Antennit on asennettu auton katolle. Lora-antennit on asennettu eri puolille kattoa tasaisin välein, jotta antenneilla olisi riittävä erotus.

Mittauksia suoritettiin useina eri kertoina ja erilaisissa sääolosuhteissa. Näin pyrittiin ottamaan huomioon myös erilaisten olosuhteiden vaikutukset signaalin etenemisessä.

#### 4.3 Syvän sisäpeiton mittaukset

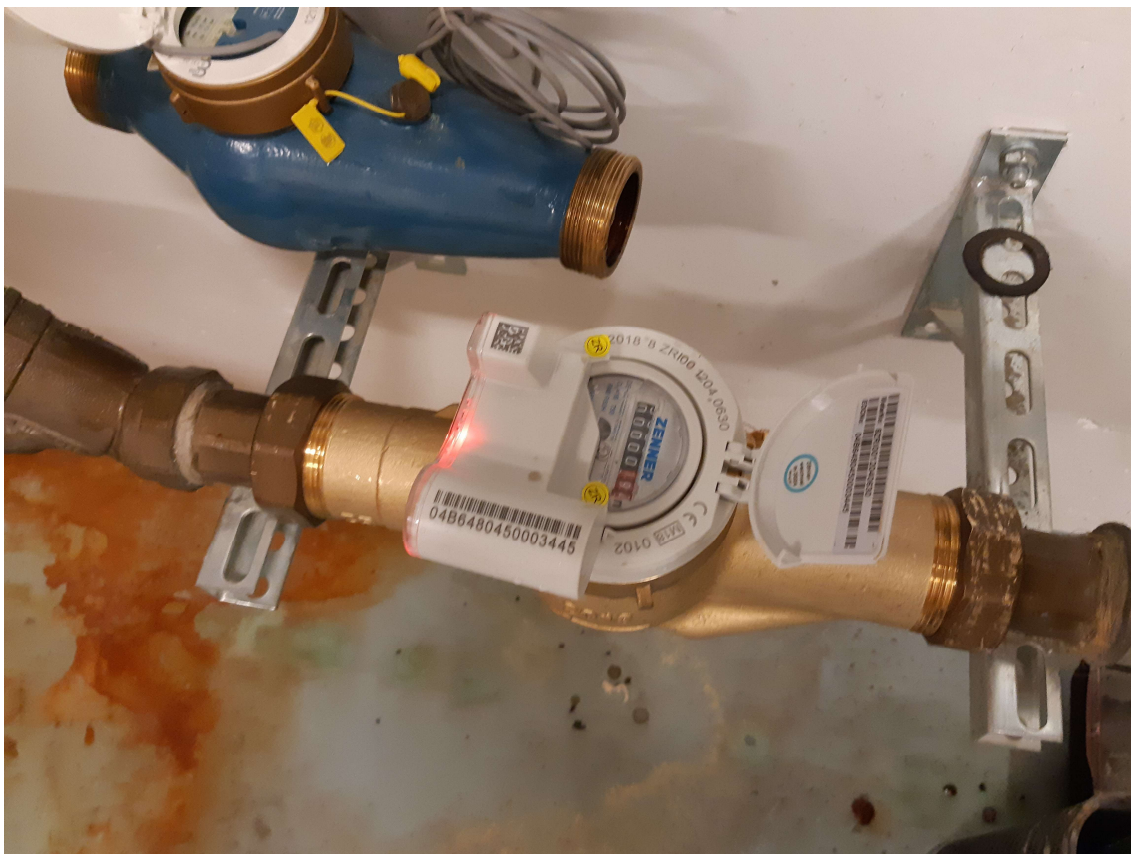
Joissakin tapauksissa päätelaitteet joudutaan sijoittamaan kuuluvuuden kannalta haastaviin paikkoihin. Digitan LoRaWAN-verkkoa käyttävät muun muassa monet kaukolämpö- ja vesiyhtiöt, joiden etäluettavat mittarit on joissakin tapauksissa asennettu maanalaisiin kaivoihin tai syvällä maan alla sijaitseviin kellaritiloihin. Kuvassa 18 näkyy valurautakantiseen kaukolämpökaivoon, jossa on noin kaksi metriä maanpinnan alapuolelle asennettu LoRaWAN-päätelaite, joka valvoo kaivon olosuhteita.





Kuva 18. LoRaWAN-päätelaite kaukolämpökaivossa

Nämä niin sanotut syvän sisäpeiton kohteet ovat vielä keskenään hyvin erilaisia. Kaivojen syvyydet vaihtelevat keskenään. Joissakin kaivoissa on muoviset seinät ja muovikansi, kun taas toisissa seinä on betonia ja muovikannen päällä on vielä paksu valurautakansi. Kellaritiloissa vaihtelua on vielä enemmän. Joissakin kellaritiloissa saattaa olla pieni ikkuna tai tuuletusaukko, minkä kautta signaali pääsee kulkemaan, kun taas toisissa on umpinaiset betoniseinät. Tila, johon mittari on asennettu, saattaa sijaita keskellä rakennusta, jolloin signaalin tielle tulee enemmän betonirakenteita kuin silloin, jos se olisi rakennuksen reunalla. Näiden mittausten tarkoitus oli selvittää, kuinka paljon signaalin vaimenemista tapahtuu näissä niin sanotuissa syvän sisäpeiton kohteissa. Mittauksia suoritettiin useissa todellisissa kohteissa, joihin oli asennettu tai oltiin asentamassa LoRaWAN-tekniikkaa käyttävät päätelaitteet, kuten kuvassa 19 näkyvä LoRaWAN-tekniikkaa käyttävä etäluettava vesimittari.



Kuva 19. Etäluettava vesimittari on vaihdettu vanhan tilalle.

Mittaukset suoritettiin FTD-mittalaitteella. Ensin mitattiin signaalinvoimakkuus kymmenen kertaa ulkona. Mittaukset suoritettiin 1,5 metrin korkeudelta, koska tämä on se korkeus, mihin vastaanottopiste määritellään LoRaWAN-verkon peittoaluelaskelmaa tehdessä. Seuraavaksi mitattiin signaalinvoimakkuus kymmenen kertaa syvällä sisätilassa sijaitsevan päätelaitteen vierestä. Mittauksia tehtiin useaan kertaan, jotta saatiin karsittua pois mahdollisten poikkeamien vaikutus mittaustulokseen. Saaduista mittaustuloksista laskettiin keskiarvot ja ulkona tehtyjen mittausten keskiarvoa verrattiin sisällä päätelaitteen vieressä tehtyjen mittausten keskiarvoon. Näin saatiin selville, kuinka paljon signaali vaimenee kyseisessä kohteessa ulkokuuluvuuteen verrattuna. Taulukossa 2 on esitetty eri kohteista mitattuja signaalinvoimakkuuksia sekä niiden perusteella laskettu signaalin vaimeneminen kyseisessä kohteessa.

Taulukko 2. Kohteista mitattuja signaalinvoimakkuuksia sekä niistä laskettuja vaimennuksia.

Mittakohde	ESP ulkona (dB)	ESP sisällä (dB)	Signaalin vaimeneminen (dB)
Kellari 1	-91,4	-124,8	33,4
Kellari 2	-96,2	-123,1	26,9
Kellari 3	-114,9	-135,7	20,8
Kaivo 1	-108,2	-128,3	20,1
Kaivo 2	-106,6	-118,2	11,6
Kaivo 3	-110,1	-117,5	7,4

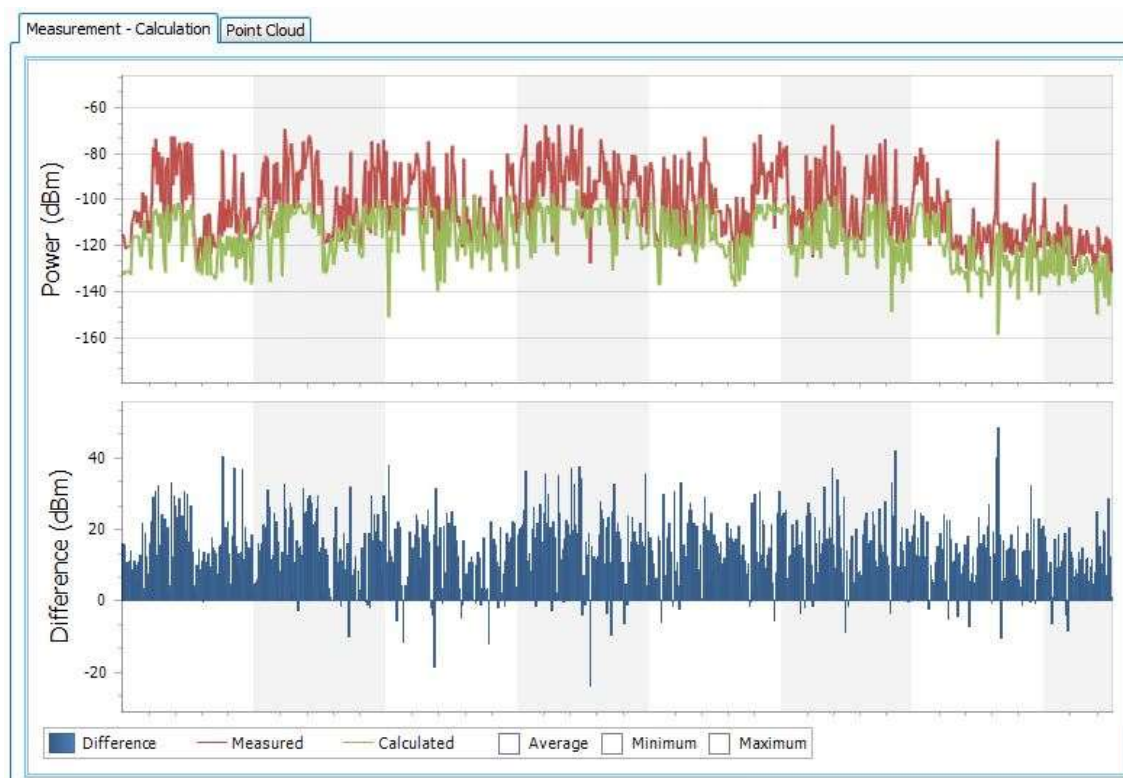
Kuten taulukosta 2 huomataan, niin signaalin vaimenemisessa eri kohteiden välillä on todella suuria eroja. Vaikka kaikissa taulukossa 2 olevissa kohteissa oletettiin vaimenemisen olevan poikkeuksellisen suurta verrattuna maan pinnan yläpuolella sijaitseviin sisätiloihin, niin silti kaivossa numero 3 signaalin vaimeneminen oli vain 7,4 dB. Toisaalta taas kellarissa numero 1 signaalin vaimeneminen oli jopa 33,4 dB.

## 5 Mittaustulosten vertailu peittoaluelaskelmiin

Peittoaluemittauksissa kerättyä mittadataa täytyi muokata ja siitä täytyi kerätä dataa sopiviksi kokonaisuuksiksi. Data jaoteltiin tukiasemakohtaisesti omiin tiedostoihin, jotta vertailu kyseisen tukiaseman peittoalue-ennusteen kanssa oli mahdollista. Mittadatatista poistettiin myös selkeästi havaittavissa olevia tuloksia vääristäviä poikkeamia. Muokattu mittadata ladattiin peittoaluelaskentaohjelmaan, jolla tehtiin mittadatan vertailu peittoaluelaskelmiin.

Peittoaluelaskelmissa käytettäviksi etenemismalleiksi valittiin kaksi tilastollista ja kaksi determinististä etenemismallia. Valinta tehtiin sen perusteella, miten hyvin etenemismallien ominaisuuden sopivat LoRaWAN-verkon peittoaluelaskentaan. Tähän vaikutti muun muassa se, mille taajuuksille, antennikorkeuksille ja etäisyyksille etenemismallien käyttöä oli suositeltu. Käytettäviä etenemismalleja kutsutaan tässä insinööriyössä nimillä: etenemismalli 1, etenemismalli 2, etenemismalli 3 ja etenemismalli 4. Peittoaluelaskelmia tehtäessä oli käytössä maastomalli ja laskelmia tehtiin sekä peitteellisyysaineiston kanssa että ilman sitä. Etenemismallien parametrit säädettiin sopiviksi laskentaa varten.

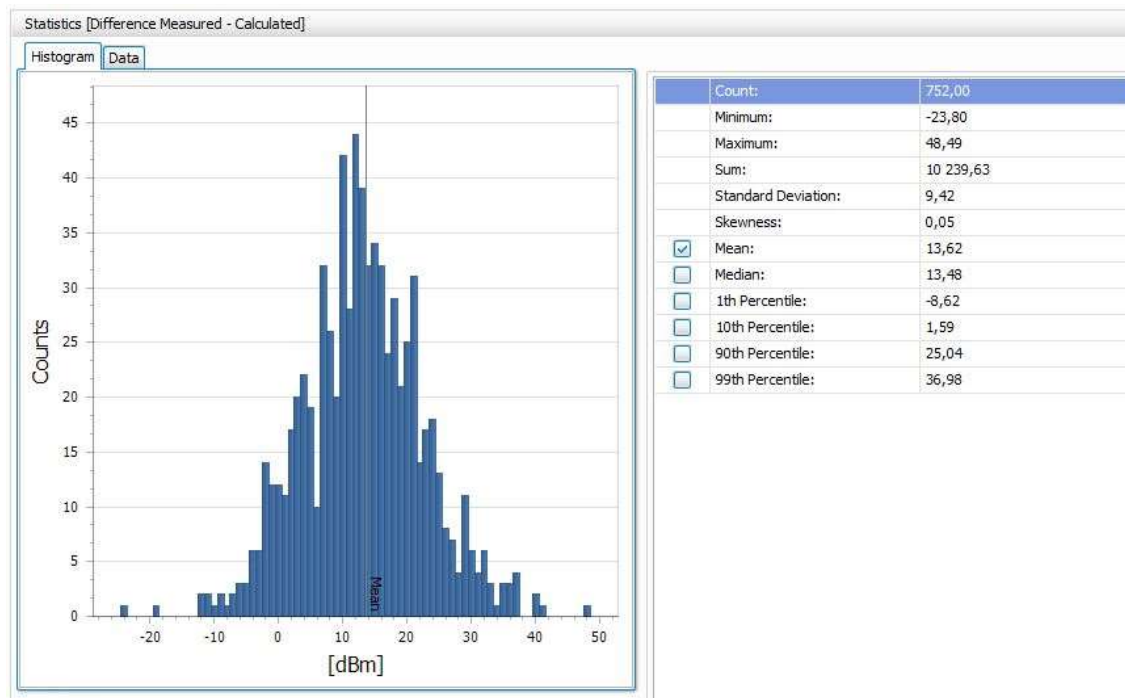
Peittoaluelaskelmia tehtiin kaikilla valituilla etenemismalleilla useille eri tukiasemille. Tukiasemia sijaitsi sekä kaupunki- että haja-asutusalueella. Kuvassa 20 esitetään mittaus-tuloksen vertailusta etenemismallilla 1 tehdyn peittoaluelaskelman kanssa.



Kuva 20. Kuvassa esitetään haja-asutusalueella sijaitsevalle tukiasemalle etenemismallilla 1 tehdyn peittoaluelaskelman vertailu mittaus-tuloksiin. Punainen käyrä kuvaa mitattuja tuloksia ja vihreä käyrä laskettua arvoja. Siniset palkit kertovat, kuinka paljon mitattu arvo ja laskettu arvo poikkeavat toisistaan.

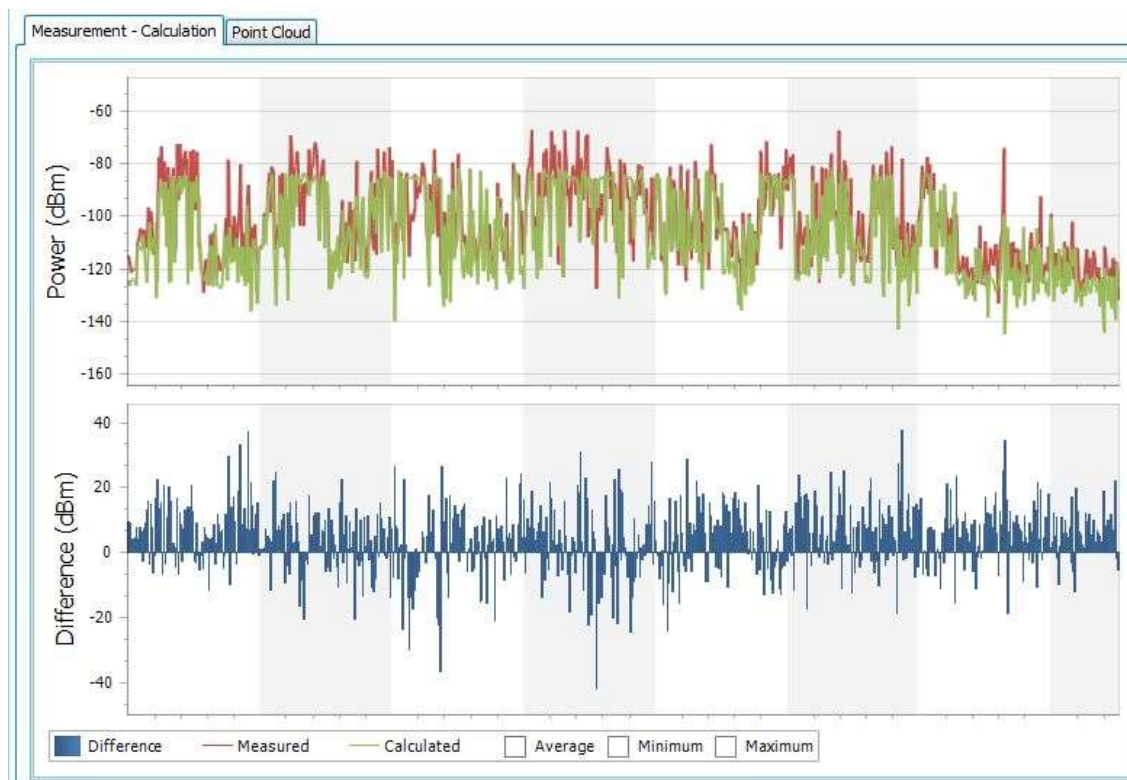


Kuten kuvasta 20 voidaan havaita, niin etenemismalli 1 antaa liian pessimistisen tuloksen verrattuna peittoaluemittauksiin. Kuvassa 21 näytetään статистиikkaa samasta vertailusta.



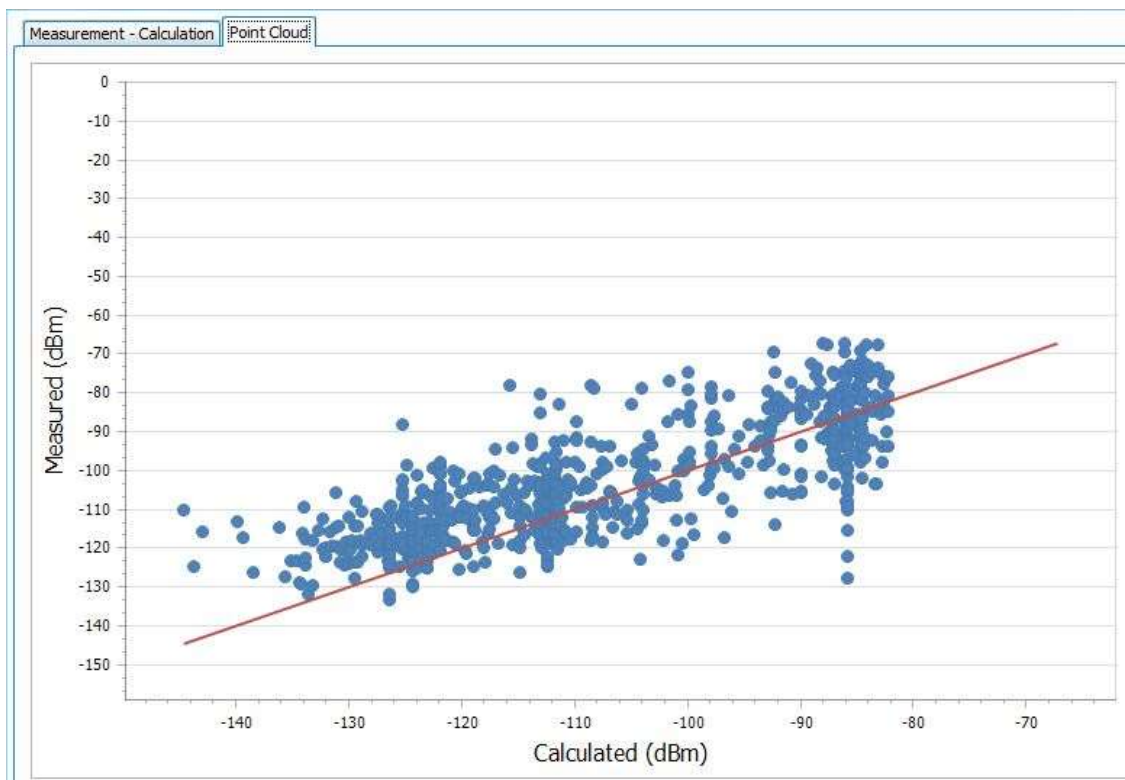
Kuva 21. Kuvassa esitetään статистиikkaa mittaustulosten vertailusta etenemismallilla 1 laskettuun haja-asutusalueella sijaitsevan tukiaseman peittoalueelaskelmaan. Kuvasta voidaan havaita, että keskihajonta (Standard Deviation) on 9,42 ja keskiarvo (Mean) on 13,62.

Kuvassa 22 esitetään mittaustuloksen vertailusta etenemismallilla 2 tehdyn peittoalueelaskelman kanssa.



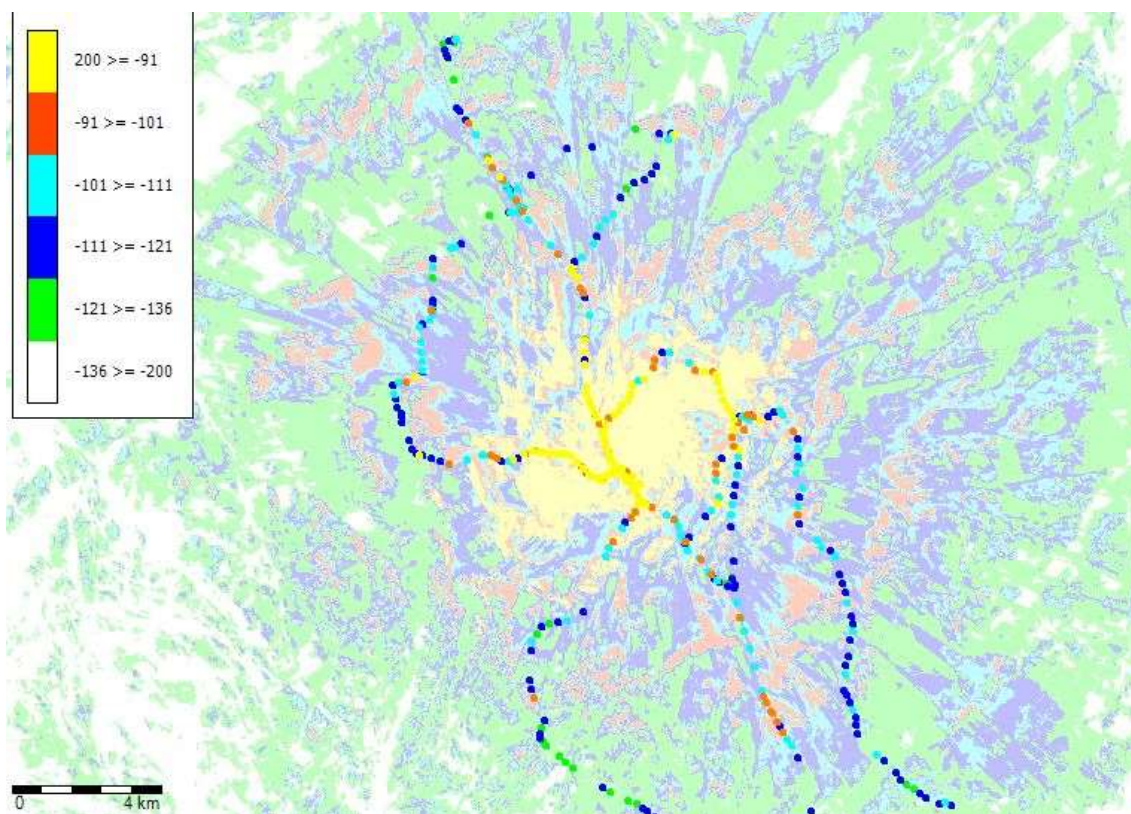
Kuva 22. Kuvassa esitetään haja-asutusalueella sijaitsevalle tukiasemalle etenemismallilla 2 tehdyn peittoaluelaskelman vertailu mittaustuloksiin. Punainen käyrä kuvaa mitattuja tuloksia ja vihreä käyrä laskettua arvoja. Siniset palkit kertovat, kuinka paljon mitattu arvo ja laskettu arvo poikkeavat toisistaan.

Kuvassa 22 esitetyn etenemismallilla 2 tehdyn peittoaluelaskelman tulokset ovat jo huomattavasti lähempänä mitattuja arvoja verrattuna kuvassa 20 näytettyyn etenemismallilla 1 tehtyyn peittoaluelaskelmaan. Kuvassa 23 näytetään pisteavaruudessa samat tiedot kuin kuvan 22 käyrissä.



Kuva 23. Kuvassa esitetään haja-asutusalueella sijaitsevalle tukiasemalle etenemismallilla 2 tehdyn peittoaluelaskelman vertailu mittaustuloksiin pisteavaruudessa. Siniset pisteet ovat mitattuja arvoja ja punainen viiva laskettu ennuste.

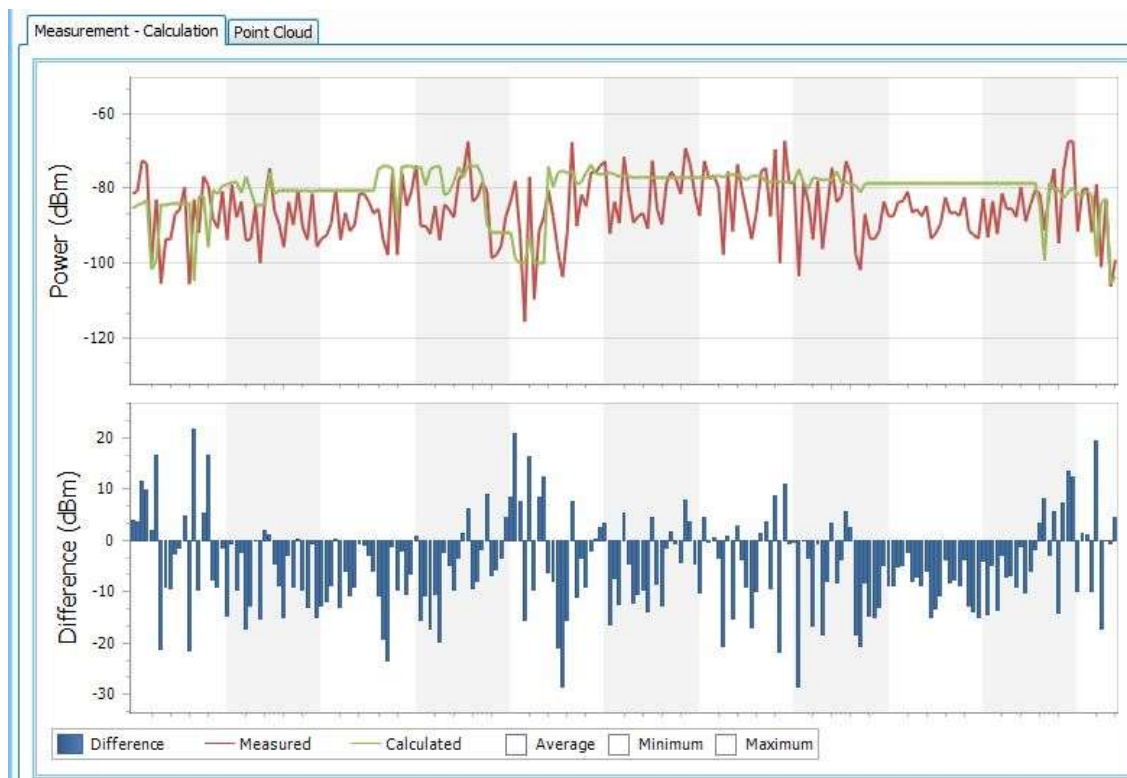
Mittadataa jaoteltiin ryhmiin vastaanotetun signaalinvoimakkuuden mukaan. Jokainen ryhmä värjättiin omalla värillään ja mittapisteet laitettiin samaan näkymään peittoaluelaskelman kanssa. Kuvassa 24 näytetään etenemismallilla 3 lasketun peittoaluekuvan päälle laitettut mittatulokset jaoteltuna signaalinvoimakkuuden mukaan.



Kuva 24. Kuvassa on signaalinvoimakkuuden mukaan värjätyt mittaustulokset esitettynä haja-asutusalueella sijaitsevalle tukiasemalle etenemismallilla 3 lasketun peittoaluelaskelman päällä.

Kuvassa 24 esitetyn näkymän avulla voidaan havainnoida, kuinka hyvin peittoaluelaskelma vastaa mittaustuloksia eri alueilla ja etäisyyksillä tukiasemasta.

Mittadataa jaoteltiin myös sen mukaan, kuinka kaukana se sijaitsee tukiasemasta. Jaoteltua dataa verrattiin taas ennusteeseen. Kuvassa 25 on esitetty alle 2 kilometrin etäisyydellä tukiasemasta mitattua dataa verrattuna etenemismallilla 3 tehtyyn peittoaluelaskelmaan.

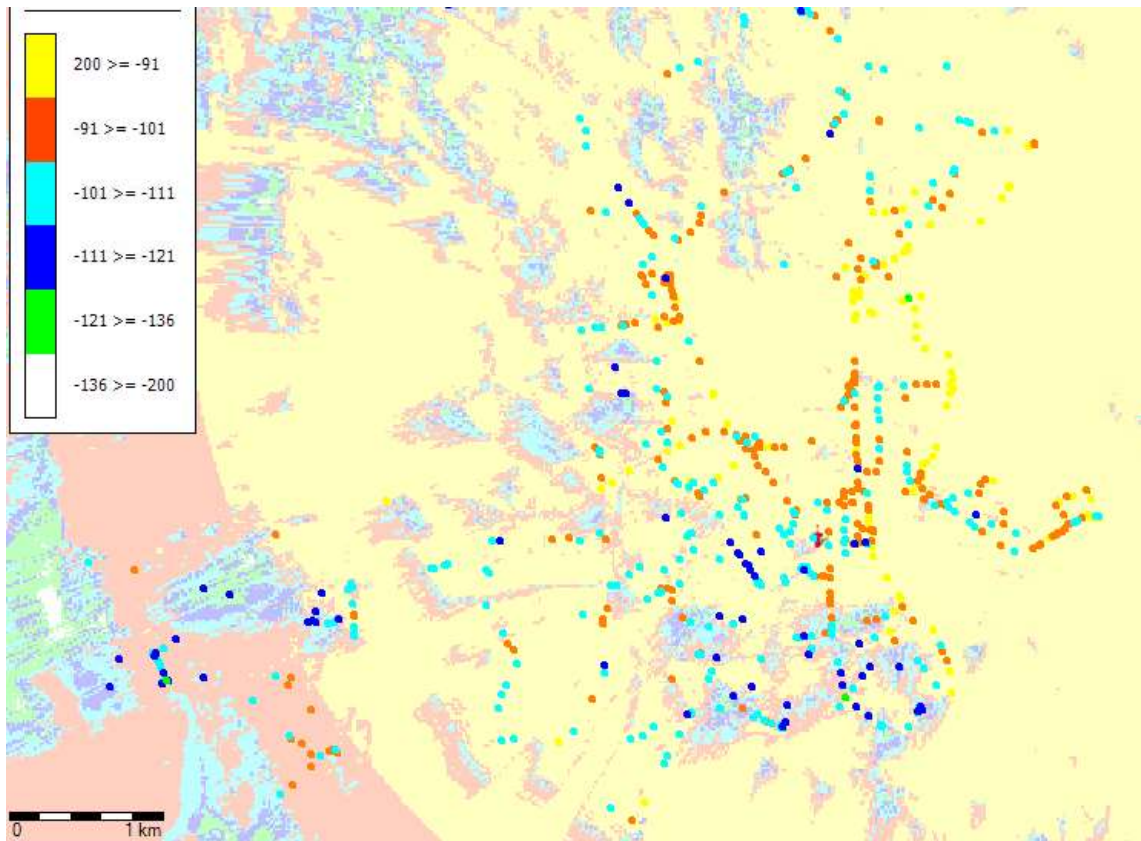


Kuva 25. Kuvassa esitetään haja-asutusalueella sijaitsevalle tukiasemalle etenemismallilla 3 tehdyn peittoaluelaskelman vertailu alle 2 kilometrin päässä tukiasemasta mitattuihin mitaustuloksiin. Punainen käyrä kuvaa mitattuja tuloksia ja vihreä käyrä laskettua arvoja. Siniset palkit kertovat, kuinka paljon mitattu arvo ja laskettu arvo poikkeavat toisistaan.

Kuvan 25 perusteella voidaan havaita, että etenemismallilla 3 tehdyn peittoaluelaskelman tulokset alle 2 kilometrin etäisyydellä tukiasemasta ovat liian optimistisia vaikka kuvan 24 perusteella ei tällaista havaittukaan.

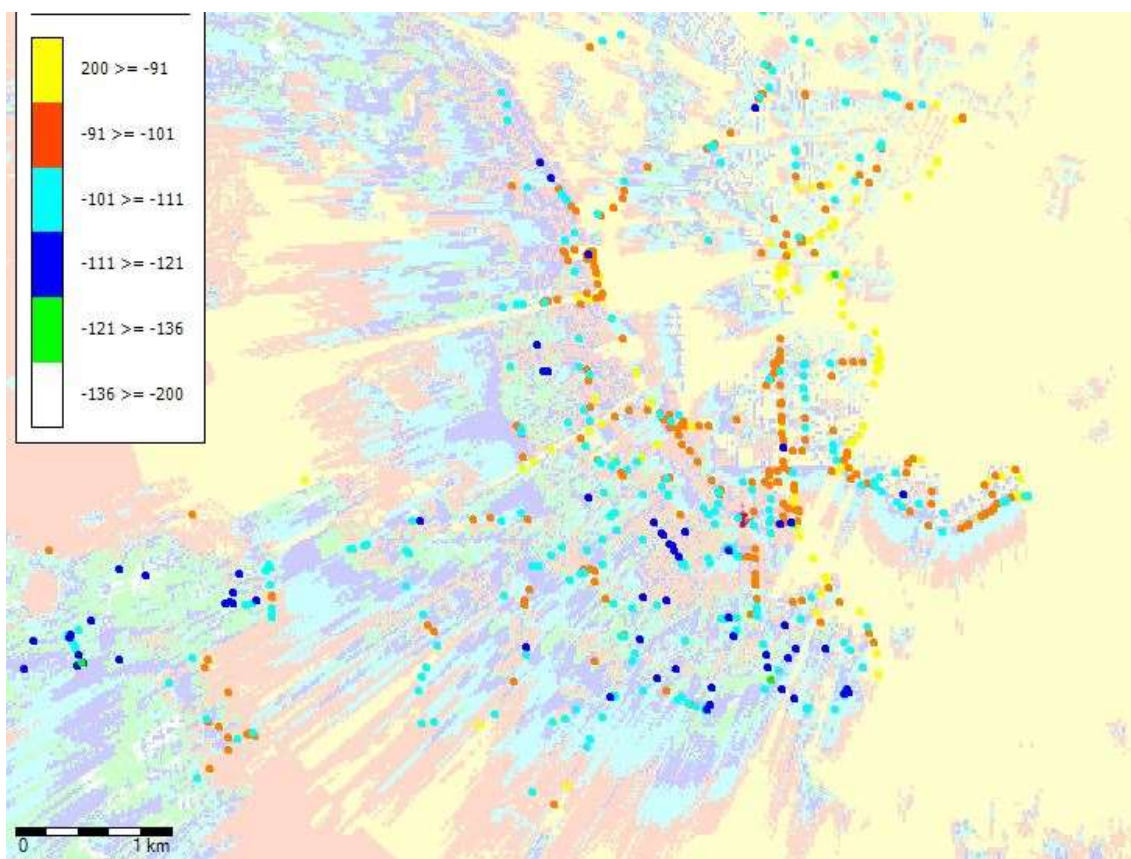
Vastaavia analyysejä tehtiin myös muille haja-asutusalueella sijaitseville tukiasemille sekä useille kaupunkialueella sijaitsevalle tukiasemalle. Kuvassa 26 esitetään kaupunkialueella sijaitsevan tukiaseman mittaustuloksia vertailtuna etenemismallilla 4 tehtyyn peittoaluelaskelmaan.





Kuva 26. Kuvassa on signaalinvoimakkuuden mukaan värjätyt mittaustulokset esitettynä kaupunkialueella sijaitsevalle tukiasemalle etenemismallilla 4 lasketun peittoaluelaskelman päällä.

Kuvassa 27 esitetään kaupunkialueella sijaitsevan tukiaseman mittaustuloksia vertailtuna etenemismallilla 4 tehtyyn peittoaluelaskelmaan. Tällä kertaa peitteellisyys on huomioitu peittoalue-ennustetta laskettaessa.



Kuva 27. Kuvassa on signaalinvoimakkuuden mukaan värjätyt mittaustulokset esitettynä kaupunkialueella sijaitsevalle tukiasemalle etenemismallilla 4 lasketun peittoalue-laskelman päällä. Peitteellisyys on huomioitu peittoalue-laskennassa.

Kuvista 26 ja 27 huomataan, miten peitteellisyys vaikuttaa tulokseen kaupunkialueella etenemismallia 4 käytettäessä. Kuvasta 26 nähdään, että peittoalue-ennuste ja mittaustulokset eivät ole lähelläkään toisiaan, kun taas kuvasta 27 nähdään, että mittaustulokset ja peittoalue-ennuste vastaavat huomattavasti paremmin toisiaan.

## 6 Yhteenveto

Insinööriyössä tutkittiin, mikä on sopivin etenemismalli käytettäväksi Digitan LoRaWAN-verkon peittoaluesuunnittelussa. Lisäksi selvitettiin, kuinka paljon LoRaWAN-verkon signaalit vaimenevat syvän sisäpeiton kohteissa, esimerkiksi kellareissa ja kaivoissa.

Ensimmäiseksi tutustuttiin LoRAWAN-tekнологiaan, jotta ymmärretään sen erityispiirteet ja kuinka ne vaikuttavat selvitystyön tekemiseen. Samalla selvitettiin, millaisia tutkimuksia ja mittauksia LoRaWAN-tekнологiaa käyttäville laitteille on aiemmin tehty. Tämän jälkeen suunniteltiin, millaisia mittauksia täytyi suorittaa, jotta niiden avulla pystyi selvittämään sopivan etenemismallin peittoaluelaskentaan sekä vaimenemisen syvän sisäpeiton kohteissa. Mittausten suunnittelun yhteydessä selvitettiin myös, millaisia mittalaitteita LoRaWAN-verkon mittaamiseen oli saatavilla ja miten ne soveltuivat suunniteltuihin mittauksiin. Coheroksen Hero N1 ja Adeuniksen Field Test Device valikoituivat kenttämittauksissa käytettäväiksi mittalaitteiksi.

Kenttämittaukset alkoivat tutustumalla valittuihin mittalaitteisiin, jotta niiden ominaisuudet tulivat tutuksi. Tämän jälkeen tehtiin testimittaukset, joilla selvitettiin, miten ne käyttäytyivät laajemmissa mittauksissa. Varsinaiset kenttämittaukset jakautuivat peittoaluemittauksiin ja syvän sisäpeiton mittauksiin. Peittoaluemittauksia suoritettiin laajoilla alueilla eri puolella Suomea. Mittaukset tehtiin eri vuodenaikoina ja erilaisissa sääolosuhteissa, jotta erilaisten olosuhteiden vaikutus mittaustuloksiin tulisi huomioiduksi. Peittoaluemittauksissa havaittiin, että Digitan korkeisiin mastoihin asennettujen LoRaWAN-tukiasemien kuuluvuus ulottuu maalla jopa 98 kilometrin päähän, joka on huomattavasti enemmän kuin aikaisemmista samantapaisissa tutkimuksissa mitatut 15 ja 19 kilometrin kuuluvuudet. Syvän sisäpeiton mittauksia suoritettiin useissa todellisissa käyttökohteissa, joihin oli asennettu LoRAWAN-tekniikkaa käyttävät päätelaitteet.

Syvän sisäpeiton mittauksia analysoimalla saatiin selville, että eri kohteiden välillä on suuria eroja vaimenemisessa. Alin mitattu vaimeneminen oli 7,4 dB, kun taas suurin oli 33,4 dB. Kohteiden erilaisuuden takia oli oletettuakin että vaihtelua esiintyy, mutta näin suuret erot yllättivät hieman. Mittaustulosten perusteella päätettiin ottaa huomioon mahdollinen 35 dB vaimeneminen syvän sisäpeiton kohteissa, kun tehdään peittoaluesuunnittelua.

Erilaisten etenemismallien ominaisuuksia ja niiden soveltuvuutta LoRaWAN-verkon peittoaluelaskentaan selvitettiin ennen peittoaluemittauksien analysointia. Selvitysten perusteella valittiin kaksi determinististä ja kaksi tilastollista etenemismallia, joita käytettiin peittoaluelaskelmien tekemiseen. Monista eri tukiasemista tehtyjä peittoaluelaskelmia ja mittaustuloksia vertailtiin monilla erilaisilla tavoilla. Saatuja tuloksia analysoitiin, jotta saatiin



selville mikä on sopivin etenemismalli LoRAWAN-verkon peittoaluelaskentaan. Selvitystyön jälkeen yksi etenemismalli osoittautui parhaaksi vaihtoehdoksi, ja se soveltuu käytettäväksi hyvin niin kaupungissa kuin haja-asutusalueella. Tämä etenemismalli valittiin käytettäväksi LoRaWAN-verkon peittoaluesuunnittelussa.

Digita aikoo asentaa Coheroksen Hero N1 -mittalaitteet kaikkien kenttätyöntekijöiden autoihin, jotta tulevaisuudessa saadaan hyödyllistä mittadataa ympäri Suomea ilman, että sitä varten tarvitsee tehdä erillisiä mittauksia. Tämän avulla löydetään myös mahdollisesti paikkoja, joissa LoRaWAN-verkkoa pitää vahvistaa. Peittoaluesuunnittelussa käytettävän etenemismallin optimointia jatketaan säätämällä peittoaluelaskennassa käytettäviä parametreja ja vertailemalla laskelmia myös uuteen ympäri Suomea kerättyyn mit-tadataan.

## Lähteet

- 1 Lora alliance Technical Marketing Workgroup. 2015. LORAWAN What is it?, Verkkoaineisto. <<https://lora-alliance.org/sites/default/files/2018-04/what-is-lorawan.pdf>> Luettu 4.9.2018.
- 2 LoRa Alliance. Verkkoaineisto. LoRa Alliance. <<https://lora-alliance.org/>> Luettu 3.9.2018.
- 3 Digita Oy. Verkkoaineisto. <<https://www.digita.fi>> Luettu 3.9.2018
- 4 What is LoRa?. 2018. Verkkoaineisto. Semtech Corporation. <<https://www.semtech.com/lora/what-is-lora>> Luettu 4.9.2018.
- 5 Augustin, A.; Yi, J.; Clausen, T.; Townsley, W.M. 2016. Study of LoRa: Long Range & Low Power Networks for the Internet of Things. Verkkoaineisto. Sensors. <<https://doi.org/10.3390/s16091466>> Luettu 7.9.2018.
- 6 LoRa Alliance. 2017. LoRaWAN 101 A Technical Introduction. Verkkoaineisto. LoRa Alliance. <<https://eleven-x.com/wp-content/uploads/2018/04/LoRaWAN-101-A-Technical-Introduction.pdf>> Luettu 4.9.2018.
- 7 Liikenne -ja viestintävirasto. 2019. Määräys luvasta vapaiden radiolähettimien yhteistajuuksista ja käytöstä (DNro: 15 AO/2019 M). Helsinki: Liikenne- ja viestintävirasto. <<https://www.finlex.fi/fi/viranomaiset/normi/480001/44836>> Luettu 24.1.2019.
- 8 LoRa Alliance. 2017. LoRaWAN 1.1 Specification. Verkkoaineisto. LoRa Alliance. <[https://lora-alliance.org/sites/default/files/2018-04/lorawantm\\_specification\\_v1.1.pdf](https://lora-alliance.org/sites/default/files/2018-04/lorawantm_specification_v1.1.pdf)> Luettu 5.9.2018.
- 9 LoRaWAN Overview. 2016. Verkkoaineisto. The Things Network. <<https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/>> Luettu 6.9.2018.
- 10 Path Loss, Link Budget & System Operating Margins. 2019. Verkkoaineisto. 4Gon Solutions. <[https://www.4gon.co.uk/solutions/technical\\_path\\_loss\\_link\\_budget\\_som.php](https://www.4gon.co.uk/solutions/technical_path_loss_link_budget_som.php)> Luettu 24.1.2019.
- 11 Fresnel Zone Recommendations. 2018. Verkkoaineisto. Gambium Networks Community. <<https://community.cambiumnetworks.com/t5/ePMP-Installation/Fresnel-Zone-Recommendations/td-p/83088>> Luettu 24.1.2019.

- 12 Hero N1. 2019. Verkkoaineisto. Coheros. <<https://www.coheros.com/products/hero-n1/>> Luettu 5.2.2019.
- 13 Field Test Device. 2019. Verkkoaineisto. Adeunis. <<https://www.adeunis.com/en/produit/ftd-868-915-2/>> Luettu 5.2.2019.
- 14 Field Test Device LoRaWAN™ EU863-870: User Guide. 2017. Verkkoaineisto. Adeunis. <[https://www.adeunis.com/wp-content/uploads/2017/08/FTD\\_LoRa-WAN\\_EU863-870\\_UG\\_FR\\_GB\\_V1.2.2.pdf](https://www.adeunis.com/wp-content/uploads/2017/08/FTD_LoRa-WAN_EU863-870_UG_FR_GB_V1.2.2.pdf)> Luettu 5.2.2019.
- 15 Juha Petäjäjärvi, Konstantin Mikhaylov, Antti Roivainen, Tuomo Hänninen. 2015. On the Coverage of LPWANs: Range Evaluation and Channel Attenuation Model for LoRa Technology. Verkkoaineisto. ResearchGate. <[https://www.researchgate.net/publication/287210281\\_On\\_the\\_Coverage\\_of\\_LPWANs\\_Range\\_Evaluation\\_and\\_Channel\\_Attenuation\\_Model\\_for\\_LoRa\\_Technology](https://www.researchgate.net/publication/287210281_On_the_Coverage_of_LPWANs_Range_Evaluation_and_Channel_Attenuation_Model_for_LoRa_Technology)> Luettu 20.5.2018.
- 16 Ramon Sanchez-Iborra, Jesus Sanchez-Gomez, Juan Ballesta-Viñas, Maria-Dolores Cano, Antonio F. Skarmeta. 2017. Performance Evaluation of LoRa Considering Scenario Conditions. Verkkoaineisto. Sensors. <[https://www.researchgate.net/publication/323546396\\_Performance\\_Evaluation\\_of\\_LoRa\\_Considering\\_Scenario\\_Conditions](https://www.researchgate.net/publication/323546396_Performance_Evaluation_of_LoRa_Considering_Scenario_Conditions)> Luettu 9.8.2018.