

Tuulivoimaloiden vaikutus matkaviestin- ja TV-verkkoihin

Loppuraportti

Kirjoittajat: Markku Sipilä, Seppo Horsmanheimo, Lotta Tuomimäki, Johan Stén, Niwas Maskey

Luottamuksellisuus: Julkinen

Raportin nimi		
Tuulivoimaloiden vaikutus matkaviestin- ja TV-verkkoihin. Loppuraportti.		
Asiakkaan nimi, yhteyshenkilö ja yhteystiedot		Asiakkaan viite
Viestintävirasto, Ritva Suurnäkki (sopimusasioissa), Heidi Himmanen (tutkimusasioissa), PL 313, Itämerenkatu 3 A, 00180 HELSINKI		
Projektin nimi		Projektin numero/lyhytnimi
Matkaviestin ja TV-verkot		88741
Raportin laatija(t)		Sivujen/liitesivujen lukumäärä
Markku Sipilä, Seppo Horsmanheimo, Lotta Tuomimäki, Johan Stén, Niwas Maskey		108
Avainsanat		Raportin numero
Tuulivoima, matkaviestintä, televisio		VTT-R-00332-15
Tiivistelmä		
<p>Tuulivoimaloiden lisääntyminen 2000-luvulla ja niiden koon jatkuva kasvu on pakottanut kiinnittämään huomiota niiden vaikutuksiin yhteiskunnan muihin toimintoihin. Tämä selvitys koostuu kahdesta osasta, joista yksi käsittelee tuulivoimaloiden vaikutuksia matkaviestin-verkkoihin, toinen osa käsittelee vaikutuksia televisiolähetteisiin.</p> <p>Matkaviestinverkon osalta tarkasteltiin vaikutuksia signaalin voimakkuuden, signaalihäiriösuhteen ja Doppler-taajuussiirtymän osalta. Tavoitteena oli mittaustulosten sekä sähkömagnetiikka- ja tietoliikenneteorian avulla luoda laskentamallit, joiden avulla tuulivoimapuiston oleelliset haittavaikutustekijät ja niiden vaikuttavuus ovat arvioitavissa. Televisioverkon osalta häiriöitä ja niiden syntyä tarkasteltiin tutkimalla sähkömagneettisen teorian perusteella tuulivoimaloiden sirontaa. Tarkasteltiin Peittoon alueella suoritettujen mittausten tuloksia pyrkien löytämään oleelliset vaikutukset. Vaikutusten syntymekanismit pyrittiin tunnistamaan ja löytämään kvantitatiiviset arviot ja laskentamenetelmät häiriöiden suuruudelle. Lopuksi tarkasteltiin sitä, mille alueille erityyppiset häiriöt kohdistuvat. Erikseen tarkasteltiin lyhyesti DVB-T2-standardin mukaisia lähetyksiä UHF- ja VHF-alueilla.</p> <p>Tutkimuksessa hyödynnettiin VTT:n aikaisempaa osaamista tuulivoimaloiden tutkivaikutuksista ja matkaviestinverkkojen mittauksista ja analysoinneista. Tavoitteena oli luoda edellytykset arvioida yksittäisen olemassa tai suunnitteilla olevan tuulivoimahankkeen vaikutuksia TV- ja matkaviestinverkkojen toimivuuteen ja tarjota suosituksia häiriövaikutusten pienentämiseen.</p>		
Luottamuksellisuus	Julkinen	
Espoo 25.1.2015 Laatija	Tarkastaja	Hyväksyjä
VTT:n yhteystiedot	VTT, Markku Sipilä, PL 1000, 02044 VTT, puh. 040 500 3463, markku.sipila@vtt.fi	
Jakelu (asiakkaat ja VTT)		
Viestintävirasto		
<i>VTT:n nimen käyttäminen mainonnassa tai tämän raportin osittainen julkaiseminen on sallittu vain VTT:ltä saadun kirjallisen luvan perusteella.</i>		

Alkusanat

Tämä selvitys perustuu Viestintäviraston ja Teknologian tutkimuskeskus VTT:n 12.9.2014 solmimaan tutkimussopimukseen ”Tuulivoimaloiden vaikutus matkaviestin- ja TV-verkkoihin” (1021/809/2014). VTT kiittää Viestintävirastoa ja sen edustajia, erityisesti Heidi Himmasta, Ritva Suurnäkkiä, Kalle Pikkaraista, Yrjö Hämäläistä, Markus Mettälää, Jukka Pihosta ja muita, hyvästä yhteistyöstä ja avusta tutkimuksen aikana. Kiitämme myös Digita Oy:tä televisiomittaustuloksista ja Elisa Oyj:tä matkapuhelinverkkoa sekä TuuliWatti Oy:tä tuuli-voimapuistoa koskevista tiedoista.

Espoossa 25.1.2015

Markku Sipilä
Professori
Projektin päällikkö

Seppo Horsmanheimo
Johtava tutkija

Lotta Tuomimäki
Erikoistutkija

Johan Stén
Tutkija

Niwas Maskey
Tutkimusharjoittelija

Sisällysluettelo

1. Johdanto.....	5
2. Tavoite.....	6
3. Vaikutukset matkaviestinverkkoon	6
3.1 Kohteen kuvaus ja rajaukset.....	6
3.1.1 Mittausjärjestelmä.....	7
3.1.2 Häiriöskenaariot.....	9
3.2 Mobiiliverkkomittaukset.....	10
3.2.1 Ajomittaus.....	10
3.2.2 Paikkamittaus	13
3.3 Tulokset.....	15
3.3.1 Mitattavat parametrit	15
3.3.2 Ajomittaukset ilman liikennettä	18
3.3.2.1 Reitti I: Tuulivoimapuiston sisällä	18
3.3.2.2 Reitti II: Tuulivoimapuiston eteläpuolella	27
3.3.2.3 Reitti III: Tuulivoimapuiston pohjoispuolella.....	34
3.3.3 Ajomittaukset puhe- ja datayhteyksillä	41
3.3.3.1 Reitti I: Tuulivoimapuiston sisällä	42
3.3.3.2 Reitti II: Tuulivoimapuiston eteläpuolella	45
3.3.3.3 Reitti III: Tuulivoimapuiston pohjoispuolella.....	48
3.3.4 Paikkamittaukset ilman liikennettä	54
3.3.4.1 Keskiarvo ja keskihajonta.....	55
3.3.4.2 Kumulatiivinen kertymäfunktio.....	56
3.3.4.3 Taajuustasotarkastelu	61
3.3.5 Paikkamittaukset puhe- ja datayhteyksillä.....	64
3.3.5.1 Puheyhteys GSM- ja UMTS-verkoissa	64
3.3.5.2 Datayhteys UMTS- ja LTE-verkoissa.....	67
3.3.5.3 Tilastollinen tarkastelu.....	71
3.4 Johtopäätökset	74
4. Televisiovaikutukset.....	80
4.1 Kohteen kuvaus ja rajaukset.....	80
4.2 Tuulivoimaloiden sirona	80
4.2.1 Lapojen takaisinsirona	80
4.2.2 Eteenpäinsirona.....	84
4.2.3 Tuulivoimalan tornin sirona	88
4.3 Peittoon alueen mittaukset.....	90
4.3.1 Alustavia havaintoja	92
4.3.2 Esimerkkejä mittauksista.....	92
4.4 Häiriöiden syntymekanismit	93
4.4.1 Alustavia päätelmiä häiriöiden syistä.....	93
4.4.2 Voimaloiden vaikutus signaalin voimakkuuteen	94
4.4.3 Doppler-siirtymän vaikutus.....	94
4.4.4 Tornien eteenpäinsirona	96
4.5 Häiriöalueet	99

4.5.1 Takaisinsironnan aiheuttamat häiriöt.....	99
4.5.2 Eteenpäinsironnan aiheuttamat häiriöt.....	100
4.5.3 Vähähäiriöinen alue	101
4.5.4 Häiriöt näkyvyyden reuna-alueella	102
4.6 Arvio vaikutuksista UHF-alueen DVB-T2-lähetyksiin.....	103
4.7 Vertailu UHF- ja VHF-alueen vaikutusten välillä (DVB-T2).....	104
4.8 Johtopäätökset	105
5. Yhteenveto ja suositukset	105
Lähdeviitteet.....	107

1. Johdanto

Tuulivoimaloiden lisääntyminen 2000-luvulla ja niiden koon jatkuva kasvu on pakottanut kiinnittämään huomiota niiden vaikutuksiin yhteiskunnan muihin toimintoihin. Tuulienergiaa laajalti hyödyntävissä maissa tuulivoimalat ovat kokonsa ja lukumääränsä puolesta peitto- ja huomiovaikutukseltaan merkittävin ihmisen aikaansaama korkea rakennelma varsinkin taajamien ulkopuolella. Olisi sangen hämmästyttävää, jos niillä ei olisi havaittavia vaikutuksia myös radiotoimintaan kuten matkaviestintään ja yleisradiolähetyksiin.

Tämä selvitys koostuu kahdesta osasta, joista yksi käsittelee vaikutuksia matkaviestinverkkoihin VTT:n suorittamien mittausten ja niiden analyysin pohjalta. Toinen osa käsittelee vaikutuksia televisiolähetteen, se pohjautuu Digita Oy:n mittaustuloksiin ja VTT:n teoreettisiin tarkasteluihin ja laskelmiin.

2. Tavoite

Projektin tavoitteena oli selvittää tuulivoimaloiden vaikutukset matkaviestin- ja TV-verkkoihin. Se keskittyi häiriövaikutusten tunnistamiseen ja vaikuttavuuden arviointiin mittausten avulla sekä matemaattisten mallien kehittämiseen.

Tarkastelu jakautui kahteen osaan: matkaviestin- ja TV-verkon analysointiin. Matkaviestin-verkon osalta pyrittiin tarkastelemaan vaikutuksia signaalin voimakkuuden (tuulivoimaloiden varjostus), signaalihäiriösuhteen (monitie-eteneminen tuulivoimalan rungosta, pyörivistä lavoista ja konehuoneesta) ja taajuussiirtymän (pyörivät lavat aiheuttavat Doppler-siirtymän signaaliin) osalta. Tavoitteena oli mittaustulosten sekä sähkömagnetiikka- ja tietoliikenteen teorian avulla luoda laskentamallit, joiden avulla tuulivoimapuiston oleelliset haittavaikutustekijät ja niiden vaikuttavuus ovat arvioitavissa. Taustalähteenä käytettiin Espanjassa ja Ranskassa tehtyä tutkimusta tuulipuistojen vaikutuksista tutkiin [1], TV-signaaliin sekä matkapuhelinverkkoihin [2][3].

Tutkimuksessa hyödynnettiin VTT:n aikaisemmin tekemän selvitystyön ”Tuulivoimaloiden vaikutus valvontasensoreihin” [4] tuloksena syntyneitä osaamista, laskentamenetelmiä ja -työkaluja sekä VTT:llä olemassa olevaa osaamista 2G/3G/4G-mobiiliverkkojen mittauksista ja analysoinneista. Tarkoitus oli luoda edellytykset arvioida yksittäisen olemassa tai suunnitteilla olevan tuulivoimahankkeen vaikutuksia alueella olevien TV- ja matkaviestinverkkojen toimivuuteen ja tarjota suosituksia häiriövaikutusten pienentämiseen.

3. Vaikutukset matkaviestinverkkoon

3.1 Kohteen kuvaus ja rajaukset

Tarkastelussa keskityttiin Porin Peittoon tuulivoimapuistoon, jonka lähialueelta operaattorit ovat saaneet asiakasvalituksia TV- ja matkaviestinverkoista. Mittausdataa matkapuhelinverkoista ennen tuulivoimapuistoa ei ollut saatavilla eikä myöskään asiakasvalituksista yksityiskohtaisempaa erittelyä paikasta, mobiiliverkosta tai operaattorista.

Tarkastelulla pyrittiin löytämään vastauksia seuraaviin kysymyksiin:

- Aiheuttaako tuulipuisto häiriötä mobiiliyhteyksille?
- Ovatko häiriöt niin suuria, että ne aiheuttavat katkenneita puheluja ja datayhteyksiä?
- Onko eri järjestelmien välillä eroja?

Tarkastelussa pyrittiin kartoittamaan tuulipuiston vaikutusalueen koko. Erityistä huomiota kiinnitettiin alueisiin, joilla on pysyvää asutusta ja näin ollen haittavaikutukset olisivat asukkaille ympärivuotisia. Tarkastelua haittasi se, että tilastollinen tarkastelu vaatisi pitkäkestoisia mittauksia, joita tässä projektissa ei ollut mahdollista tehdä. Tuulivoimaloiden lapojen pyörimisnopeudet ja suunnat vaihtelevat tuuliolosuhteiden mukaan vaikeuttaen mittausten vertailua.

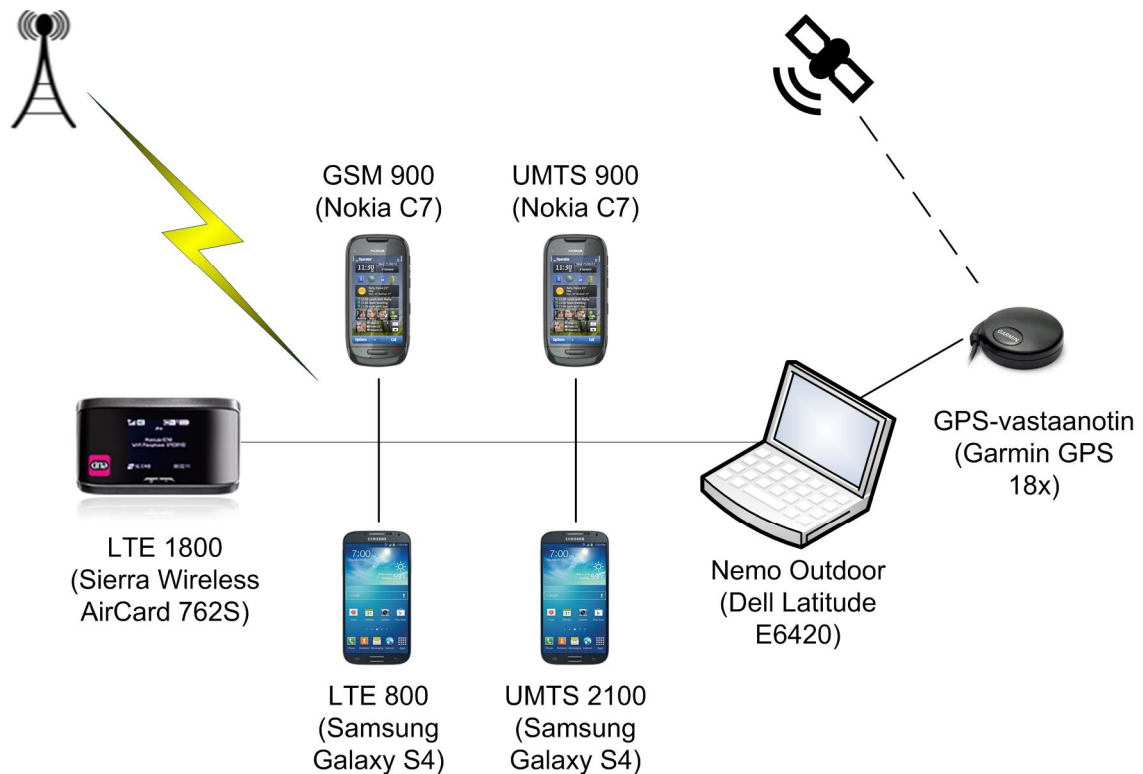
Häiriötarkastelua mobiiliverkoissa voidaan tehdä usealla eri tavalla ja parametreilla. Tässä selvityksessä rajoituttiin tarkastelemaan katkenneiden puhelujen määrään (Dropped call rate, DCR) vaikuttavia tekijöitä [12]. Puhelun katkeaminen voi johtua kolmesta syystä:

- *Aukot peittoalueessa*: matala signaalitaso puhelun aikana aiheuttaa yhteyden katkeamisen.
- *Solunvaihtojen epäonnistuminen*: Ei-optimaaliset solunvaihtoparametrit tai häiriöt synkronointisignaaliin aiheuttavat solunvaihtojen tai solun uudelleenalinnan epäonnistumisen.
- *Interferenssi*: Muut solut / käyttäjät, suuret maastonmuodot ja rakennukset ml. tuulivoimalat aiheuttavat signaalille häiriötä, jotka johtavat yhteyden katkeamiseen.

Tarkastelun apuna käytettiin sekä ajo- että paikkamittauksia, joiden avulla saatiin yksityiskohtaisempi arvio mahdollisten häiriöiden muutoksista paikan ja ajan suhteen.

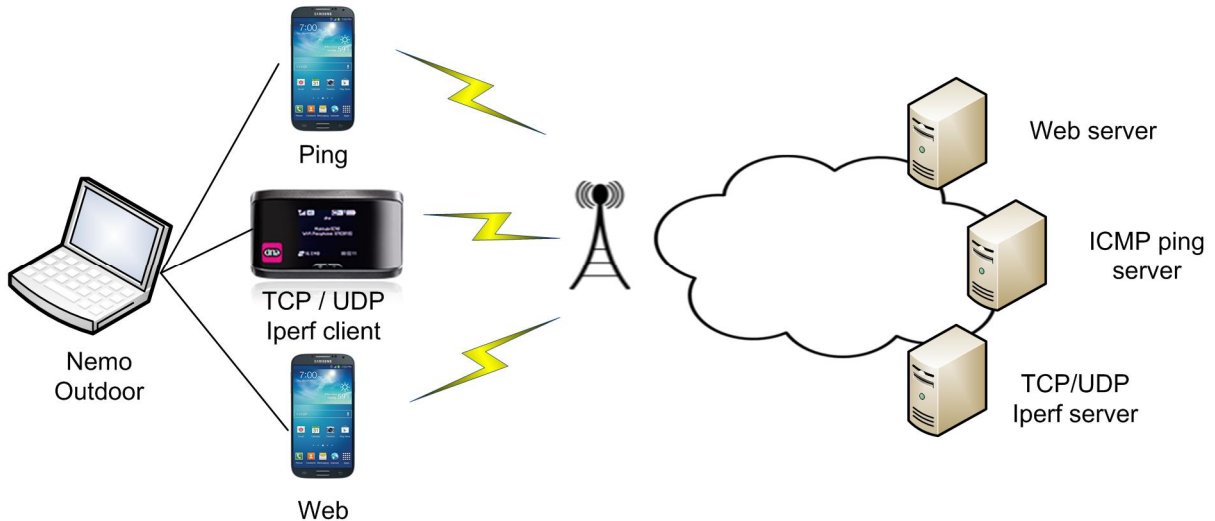
3.1.1 Mittausjärjestelmä

Mittauksissa käytettiin Nemo Outdoor -järjestelmää, johon voidaan kytkeä samanaikaisesti useita mobiililaitteita USB-porttien kautta. Järjestelmä kerää puhelimesta tietoa eri OSI-kerroksilta ja tallentaa ne mittaustiedostoihin. Järjestelmän avulla puhelimet voidaan lukita käyttämään tiettyä matkapuhelinteknologiaa (GSM, UMTS, LTE), taajuuskaistaa (800/900/1800/2100 MHz) ja tukiasemaa. Mittaukset tehtiin ilman liikennettä ja liikenteen kanssa. Käyttämällä viittä puhelinta ja GPS-vastaanotinta voitiin GSM-900-, UMTS-900-, UMTS-2100-, LTE-800- ja LTE-1800-verkot mitata samanaikaisesti.



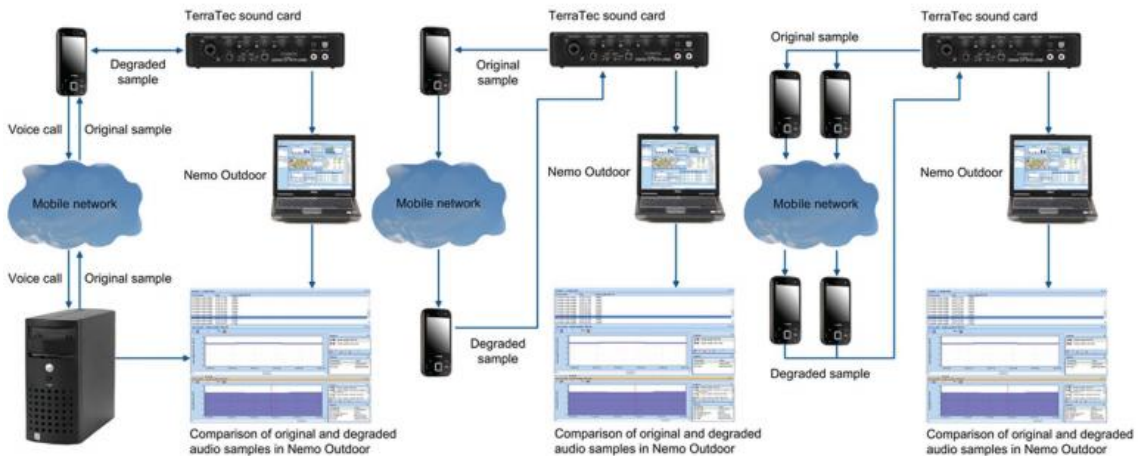
Kuva 1. Mittausjärjestelmä ilman liikennettä.

UMTS- ja LTE-verkoissa datayhteyksien mittauksessa käytettiin Samsung Galaxy S4 (GT-I9506) puhelimia ping- ja web-liikenteen välityksessä. Ping-liikenteen avulla mitattiin viiveitä ja web-liikenteen avulla latausaikoja. TCP/UDP-liikenne generoitiin Nemo-kannettavassa ja välitettiin morkkulan (Sierra Wireless AirCard 762S) kautta.



Kuva 2. Mittausjärjestelmä dataliikenteen kanssa.

GSM- ja UMTS-puheyhteyksien mittauksissa käytettiin Nokia C5 -puhelimia. Puheyhteyden laatua tarkasteltiin MOS-mittauksilla (Mean Opinion Score) GSM- ja UMTS-verkoissa. MOS-parametriä voidaan käyttää myös videokuvan laadun arviointiin datayhteyden yli. Nemossa mittaus tapahtuu lähettämällä tallennettu ääninäyte tai videopätkä verkon yli ja vertaamalla sitä alkuperäisen tallenteen laatuun. MOS-arvon laskenta tehdään PESQ-algoritmilla (Perceptual Evaluation of Speech Quality) ja arvoväli on 1–5, jossa 1 on huonoin ja 5 paras. MOS-arvot ovat desimaalilukuja. Esimerkiksi arvot 4,0–4,5 vastaavat kiinteän puhelinverkon laatua. Alle 3,5 arvoja pidetään usein riittämättöminä mobiiliverkkojen puheyhteyksiin. MOS-arvo 4 vastaa hyvää mobiiliyhteyden laatua ja arvon putoaminen yhdellä numerolla koetaan käyttäjän kannalta jo häiritsevänä.



Kuva 3. Nemo Outdoor -mittauksessa käytettävät MOS-laitekonfiguraatiot (http://www.livingston-products.com/products/pdf/151606_1_en.pdf).

Taulukko 1. MOS-kriteerit ja kuvaukset.

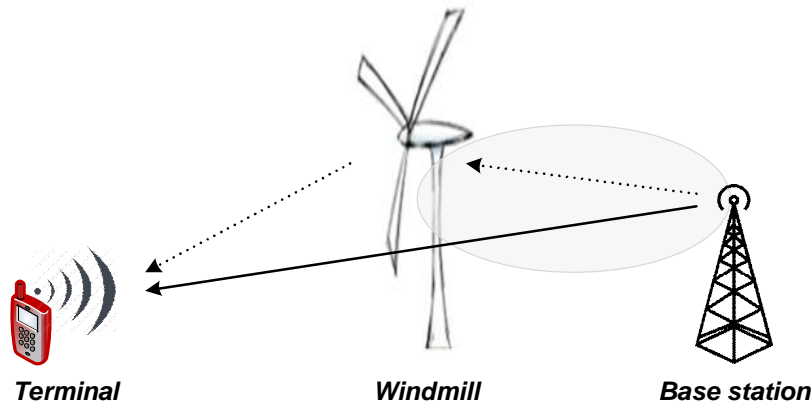
Arvo	Kuvaus
5 - Perfect	Vastaa keskustelua kasvotusten tai hyvälaatusta radiovastaanottoa.
4 - Fair	Epätäydellisyyksiä voidaan havaita, mutta puhe on selvä. Tämä on yleensä matkapuhelimien tarjoama laatu.

3 - Annoying	Virheet häiritsevät puhetta selvästi.
2 - Very annoying	Kommunikointi lähes mahdotonta.
1 - Impossible to communicate	Mahdotonta kommunikoida.

3.1.2 Häiriöskenaariot

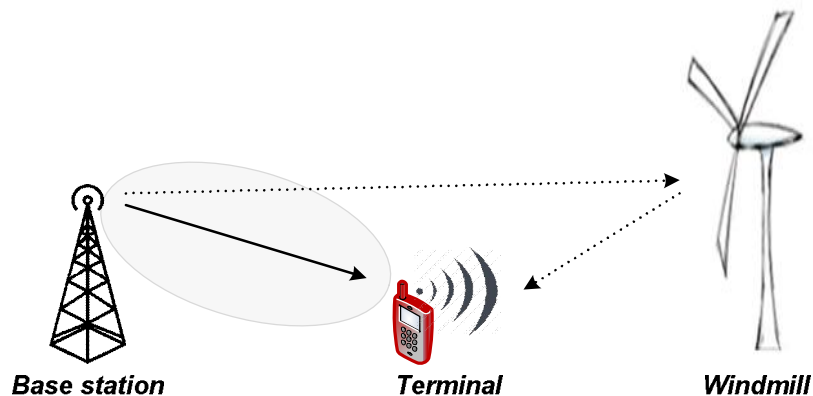
Tarkastelussa keskityttiin kolmeen eri skenaarioon. Tarkastelussa datan siirto tapahtuu DL-suuntaan, jossa tukiasema lähettää dataa päätelaitteelle. DL-suunta on käytännöllisempi mittausten kannalta, koska mittaukset tehtiin terminaali-päässä.

Ensimmäinen skenaario on pahin: tuulivoimala on tukiaseman ja terminaalin välissä (T-W-B) aiheuttaen sekä vääristyneen signaalin sekä mahdollisen varjostuksen ja diffraktiovaikutuksen.



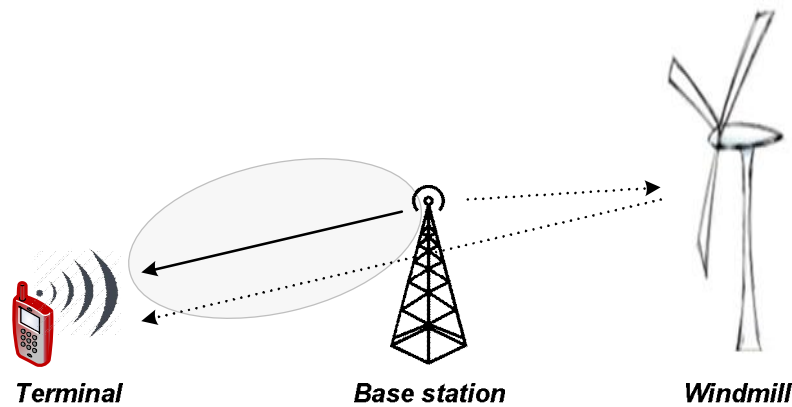
Kuva 4. T-W-B-tapaus.

Toisessa skenaariossa terminaali on tukiaseman ja tuulivoimalan välissä (B-T-W). Tukiaseman pääkeila osoittaa tuulivoimalan suuntaan, joten tuulivoimalan kautta heijastuva signaali voi aiheuttaa häiriötä. Häiriö on kuitenkin pienempi kuin ensimmäisessä skenaariossa.



Kuva 5. B-T-W-tapaus.

Kolmas skenaario, jossa tuulivoimala on tukiaseman takakeilassa, on heikoin. Tukiaseman antennin päikeila osoittaa terminaalin suuntaan. Tällä ei oleteta olevan juurikaan vaikutusta vastaanottoon.



Kuva 6. T-B-W-tapaus.

Häiriöskenaariota voidaan tarkastella myös UL-suuntaan kääntämällä nuolet esitetyissä skenaarioissa ja huomioimalla, että päätelaitteen antennikuviot ovat ympärisäteileviä. Yhteyden laatua voidaan arvioida laskemalla linkkibudjetit UL- ja DL-suuntiin. UL-suunta on tyypillisesti rajoittuneempi, koska terminaalin lähetysteho on alhaisempi ja antennivahvistus pienempi. Tukiaseman vastaanottoherkkyys on suurempi, joten se tasoittaa tilannetta hiukan.

3.2 Mobiiliverkkomittaukset

Matkapuhelinmittauksissa keskityttiin Elisa Oyj:n matkapuhelinverkkoihin. Valinta tehtiin vertaamalla eri operaattoreiden kuuluvuuskarttoja ja valitsemalla niistä operaattori, jolla oli kattavin kuuluvuus eri järjestelmissä. Kuuluvuuskarttatietojen pohjalta mitattaviksi mobiilijärjestelmiksi valittiin GSM-900, UMTS-900, UMTS-2100, LTE-800 ja LTE-1800. Puheyhteyksien osalta tarkasteltiin GSM- ja UMTS-verkkoja ja datayhteyksien osalta UMTS- ja LTE-verkkoja. LTE-päätelaitteiden yleistyessä yhä suurempi osa dataliikenteestä tulee kulkemaan LTE-verkon kautta. Viestintävirastolta ja Elisalta saatiin apua mittausreitit suunnitteluun ja laskentamallin luontiin. Ajomittaukset suunniteltiin etukäteen käyttämällä tuulivoimaloiden ja niistä 15 km säteellä sijaitsevien tukiasemien paikkatietoja. Alueelta löytyi kaikkiaan 136 GSM-, 246 UMTS- ja 80 LTE-tukiasemaa. Tuulivoimaloiden sijainti- ja geometriatiedot saatiin TuuliWatti Oy:ltä ja 3D-malliin tarvittavat ympäristön korkeustiedot Maanmittauslaitoksen avoimien aineistojen latauspalvelusta.

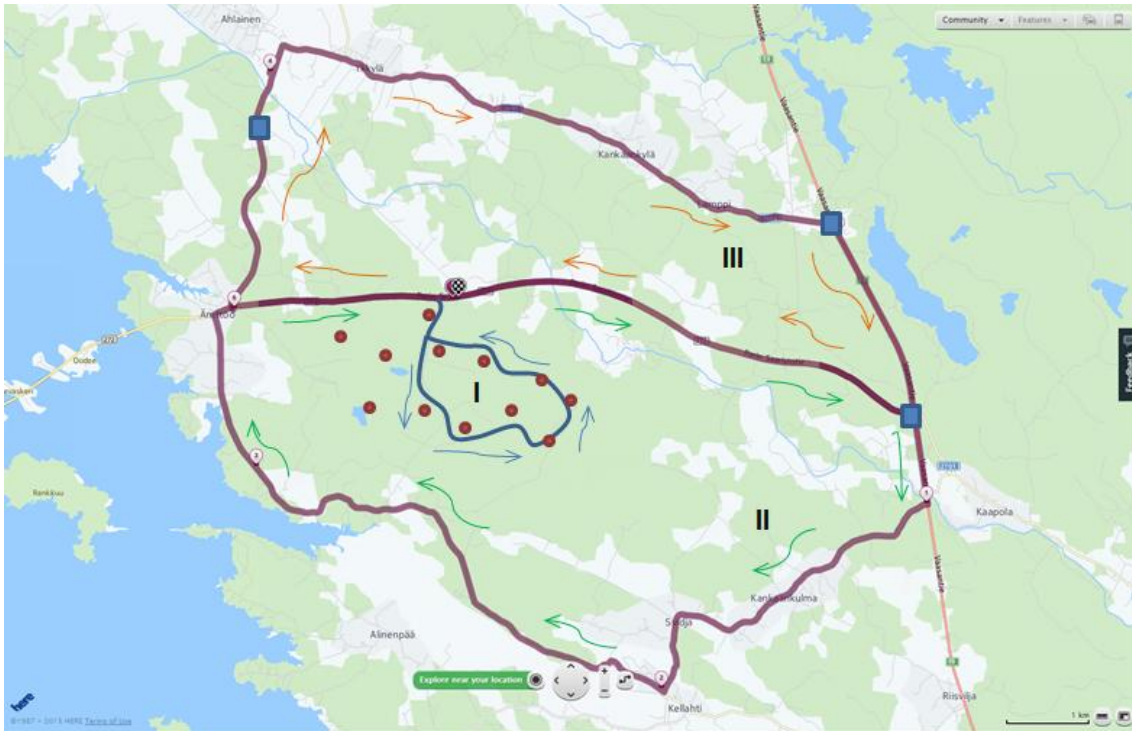
3.2.1 Ajomittaus

Ajomittauksilla kartoitettiin tuulipuiston häiriövaikutusalueita. Mittausreitit suunniteltiin siten, että ne sisälsivät lähellä ja kaukana tukiasemasta, tuulivoimalasta ja asutuksesta olevia paikkoja.

- *Reitti I* kulkee tuulipuiston sisällä.
- *Reitti II* kiertää tuulipuiston eteläpuolelta, missä tukiasematiheys kasvaa siirryttäessä kohti Poria.
- *Reitti III* kulkee tuulipuiston pohjoispuolella, missä tukiasematiheys harvenee asutuksen harvetessa. Reitti kulkee Ahlaisten kautta.

Reitit ja ajosuunnat on esitetty kuvassa (Kuva 7). Kuvan keskellä oleva seututie 272 (Pohjoinen satamatie eli Porin saaristotie; kumpakin nimeä käytetään) ajettiin molempiin suuntiin, jotta saatiin tietoa myös ajosuuntariippuvista solunvaihdosta. Kuvassa sinisillä

neliöillä on esitetty lähimmät tukiasemamastot. Yhdessä mastossa on useita eri järjestelmien tukiasemia.

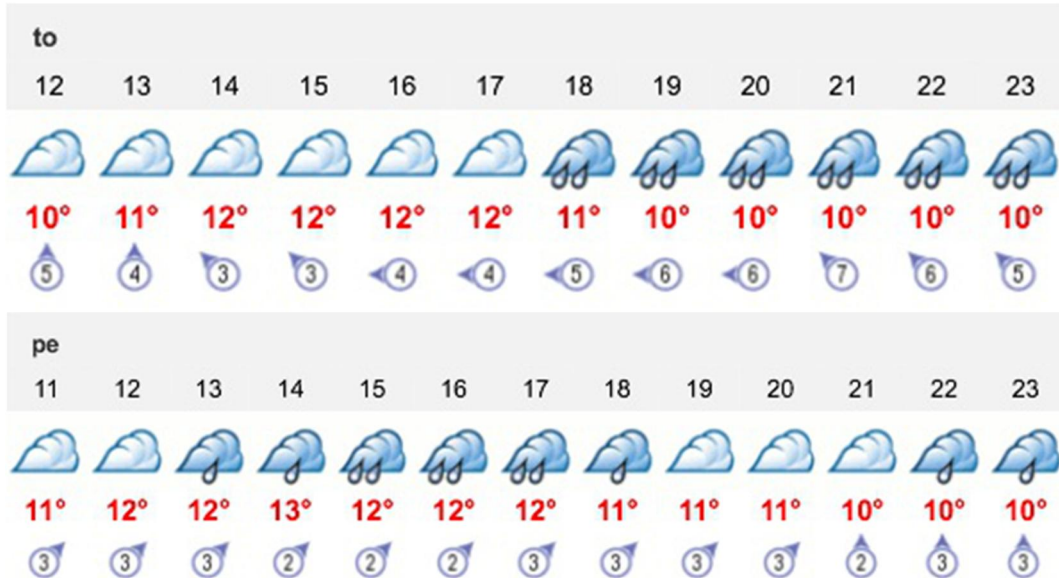


Kuva 7. Ajomittausten reitit ja ajosuunnat.

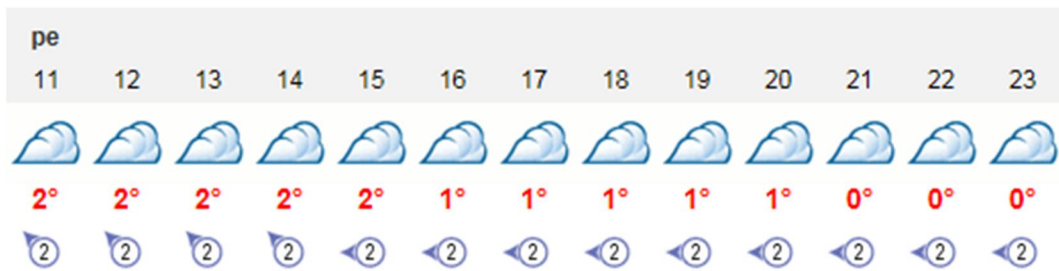
Ajomittausten avulla kerättiin ensisijaisesti signaalin voimakkuus - ja signaalihäiriösuhdetietoa. Lisäksi oltiin kiinnostuneita katkenneiden data- ja puhelinyhteyksien määrästä sekä epäonnistuneiden solunvaihtojen määrästä ja sijainneista. Mittausnäytteiden aika- ja paikkatiedot saatiin Nemo Outdoorin GPS-vastaanottimesta. Tiedot kerättiin sekä palvelevista että naapuritukiasemista. Mittauksissa taltioitiin kaikki Nemo Outdoor -järjestelmän mittaamat parametrit. Tietojen avulla pyrittiin ensisijaisesti kartoittamaan tuulipuiston vaikutusalue sekä valitsemaan sopivat paikat paikkamittauksille.

Tuuliolosuhteet mittausten aikana olivat varsin maltilliset. Tuulen suunta ja nopeus olivat ennusteiden mukaisia (Kuva 8) vaihdellen ensimmäisen päivän aikana etelästä itään ja tuulen nopeus oli 3–7 m/s. Toisena mittauspäivänä tuuli tyyntyi hiukan ja suunta vaihteli lounaasta etelään ja tuulen nopeus oli 2–3 m/s.

Datamittaukset UMTS- ja LTE-verkoissa tehtiin muutama viikko myöhemmin, jolloin tuulen suunta vaihteli idästä kaakkoon (Kuva 9). Tuulen nopeus oli noin 2 m/s. Tuulivoimaloiden roottoreiden kiertoaika vaihteli välillä 5–10 s tuulen nopeudesta riippuen. Kahdestatoista tuulivoimalasta kolme oli poissa käytöstä ensimmäisenä mittauspäivänä, toisena kaksi ja kolmantena yksi johtuen huoltotoimenpiteistä. Poissa käytössä olleet tuulivoimalat kirjattiin ylös ja ne on esitetty tuloksissa.



Kuva 8. Tuulen suunta ensimmäisenä ja toisena mittauspäivänä.




Kuva 9. Tuulen suunta kolmantena mittauspäivänä.

Peittoon tuulipuiston käsittämät kaksitoista voimalaa on esitetty kuvassa (Kuva 7) punaisilla ympyröillä. Tuulivoimaloiden tarkat paikat ja korkeudet merenpinnasta on esitetty taulukossa (Taulukko 2). Tuulivoimaloiden tornin korkeus on 142 m, roottorin halkaisija 128 m (lapa 62,5 m), joten tuulivoimalan lakikorkeus maasta on 206 m. Lapojen sieppauspinta-ala on 12868 m² (πr^2) ja materiaali on lasi- tai hiilikuitu. Roottorin maksimipyörimisnopeus on 12 rpm. Tornin alahalkaisija maanpinnassa on 10,5 m ja ylähalkaisija lähellä konehuonetta 3,8 m. Tuulivoimala poikkeaa suuresta rakennuksesta siten, että staattisen varjostuksen lisäksi tuulivoimalan lavat aiheuttavat pyöriessään dynaamisen häiriövaikutuksen.

Taulukko 2. Tuulivoimaloiden sijainnit ja korkeudet merenpinnasta.

Voimala	KKJ3-tasokoordinaatit		Korkeus merenpinnasta (m)
	I / lon	N / lat	
1	3216821,05	6848441,84	11,04
2	3216246,29	6848662,35	9,46
3	3217224,99	6847595,28	17,01
4	3216644,98	6847803,53	8,98
5	3218232,38	6847574,33	16,31
6	3218557,90	6848096,16	16,06
7	3218659,20	6847175,64	14,03
8	3219005,19	6847630,58	20,73

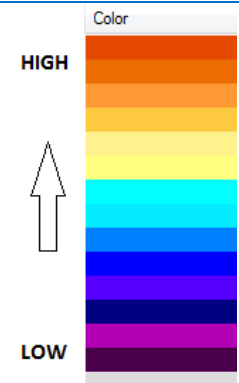


9	3218054,98	6848385,79	20,22
10	3217181,49	6848815,02	13,79
11	3217858,39	6847137,39	15,76
12	3217514,52	6848415,94	14,02

3.2.2 Paikkamittaus

Paikkamittausten avulla haettiin yksityiskohtaisempaa tietoa tuulivoimaloiden lapojen aiheuttamasta mahdollisesta signaalin huojumisesta sekä yhteyden laadun heikkenemisestä. Sijainnit paikkamittauksille valittiin ajomittausten perusteella. Paikkojen valintaan vaikuttivat signaalin voimakkuus- sekä signaalihäiriösuhteet, asutuksen määrä sekä peitteisyys. Järjestelmät priorisoitiin järjestyksessä UMTS, GSM ja LTE. Päätelaitteiden vastaanottoherkkyydet vaihtelevat, joten tulokset jaettiin kolmeen kategoriaan: hyvä, keskinkertainen ja heikko. Signaalin voimakkuudelle ja signaalihäiriösuhteelle asetettiin kynnyсарvot kirjallisuuskatsausten [5],[6],[7], Nemo-järjestelmässä käytettyjen arvojen sekä aikaisempien mittaushavaintojen pohjalta (Taulukko 3). Värisävyt myöhemmin esitettävissä kuvissa noudattavat taulukossa esitettyä värikarttaa. Kuvissa ei erikseen ilmoiteta tarkkoja voimakkuuksia, koska ne ovat päätelaiteriippuvia.

Taulukko 3. Eri mobiilijärjestelmille asetetut raja-arvot, joiden mukaan verkon suorituskyky jaetaan hyvään, keskinkertaiseen ja heikkoon.

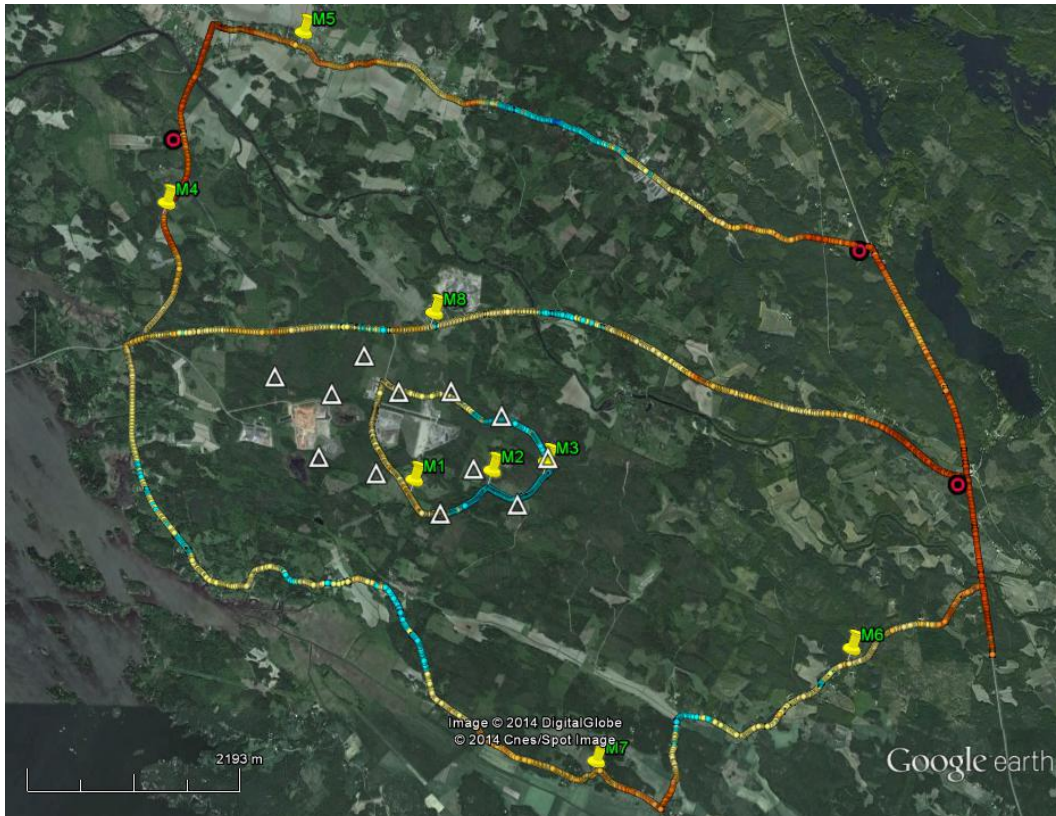
	Peitto / Signaalin voimakkuus			Häiriö			Color
	parametri	alaraja	yläraja	parametri	alaraja	yläraja	
GSM	RxLev	-100 dBm	-75 dBm	C/I	7 dB	15 dB	HIGH  LOW
UMTS	RSCP	-110 dBm	-75 dBm	Ec/No	-15 dB	-7 dB	
LTE	RSRP	-120 dBm	-85 dBm	RSRQ	-15 dB	-7 dB	

Kuvassa (Kuva 10) on esitetty kaksi paikkamittauspistettä tuulipuiston sisältä. Kuvasta näkyy, että tuulipuistoalue on varsin tasainen ja pääosin nuorta havumetsää.



Kuva 10. Paikkamittauspisteitä tuulipuiston sisältä.

Kuvassa (Kuva 11) on esitetty keltaisilla symboleilla valitut paikkamittauspisteet. Paikoista kolme (M1–M3) sijaitsee tuulivoimapuiston sisällä, kaksi (M4 ja M5) reitillä III lähellä tukiasemaa ja kyläaluetta ja kaksi (M6 ja M7) reitillä II katveessa asutuksen ulkopuolella ja aukealla lähellä asutusta. Viimeinen piste M8 sijaitsee tuulivoimapuiston läheisyydessä reittien II ja III yhteisellä osuudella. Tuulivoimalat on merkitty valkoisilla kolmioilla. Kuvassa näkyvät myös UMTS-900-verkossa mitatut signaalin voimakkuudet reittien varrelta. Lämpimät värit osoittavat kohtia, joissa signaalin voimakkuus on korkea ja kylmät kohdat katvealueita. Tukiasemat (punaiset symbolit) sijaitsevat valtatie 8:lla sekä Ämttööntien varrella. Tässä tapauksessa tuulivoimapuisto jää näiden kolmen tukiaseman väliin.



Kuva 11. Kahdeksan (M1–M8) paikkamittauspistettä ja UMTS-900-verkossa mitatut signaalin voimakkuudet (RSCP) reittien varrelta.

Paikkamittauspaikkojen tarkat sijainnit on esitetty alla olevassa taulukossa (Taulukko 4) sekä valintakriteerit signaalin voimakkuuden ja signaalihäiriösuhteen perusteella. Viimeinen sarake ilmaisee skenaarion päätelaitteen, tuulivoimalan ja palvelevan tukiaseman osalta.

Taulukko 4. Valittujen paikkamittausten sijainnit ja valintakriteerit (S = signaalin voimakkuus ja H = signaalihäiriösuhte).

Mittauspiste	Paikka WGS84	GSM		UMTS		LTE		Tyyppi
		S	H	S	H	S	H	
M1	P 61.629408° I 21.666744°	Keskim	Hyvä	Hyvä	Hyvä	Hyvä	Hyvä	T-W-B (avoin)
M2	P 61.630356° I 21.681896°	Keskim	Hyvä	Heikko	Keskim	Heikko	Keskim	T-W-B (katve)
M3	P 61.631237° I 21.692526°	Keskim	Hyvä	Heikko	Heikko	Heikko	Heikko	T-W-B (katve)

M4	P 61.654736° I 21.617567°	Hyvä	Hyvä	Hyvä	Hyvä	Hyvä	Hyvä	B-T-W (avoin)
M5	P 61.670761° I 21.643759°	Hyvä	Hyvä	Hyvä	Hyvä	Keskim	Hyvä	T-B-W (avoin)
M6	P 61.614395° I 21.752216°	Keskim	Hyvä	Keskim	Hyvä	Keskim	Hyvä	T-B-W (katve)
M7	P 61.603649° I 21.702887°	Hyvä	Hyvä	Hyvä	Hyvä	Keskim	Hyvä	T-B-W (avoin)
M8	P 61.644875° I 21.670176°	Heikko	Hyvä	Heikko	Heikko	Keskim	Hyvä	B-T-W (katve)

Paikkamittauksissa keskityttiin tarkastelemaan puhelu yhteyden laatua MOS-arvojen (Mean Opinion Score) ajan funktiona. Ensiksi suoritettiin GSM- ja UMTS-verkossa 4 min kestävä puhelu, jonka aikana mitattiin MOS-tasojen vaihtelua. Mittaus toistettiin 3 kertaa, joten kokonaiskesto oli noin 15 min. Mittauksen aikana kerättiin tietoa myös GSM-, UMTS- ja LTE-verkon alemman OSI-kerroksen parametreista mm. signaalin voimakkuudesta ja signaali-häiriösuhteesta.

Tämän jälkeen mitattiin puheyhteyksien laatua suorittamalla sarja lyhytkestoisia puheluita erikseen GSM- ja UMTS-verkoissa. Puhelun kestoksi asetettiin 5 s. Mittauksella selvitettiin yhteyden luonnin kestoa (Call Attempt and Call Setup Procedure) sekä onnistumisprosenttia. Tyypillisesti UMTS-verkossa puhelun muodostus kestää 6–8 sekuntia ja GSM-verkossa 7–10 sekuntia.

Kolmantena mittauspäivänä keskityttiin LTE- ja UMTS-datayhteyksiin. Datayhteysmittaukset tehtiin kahdessa mittauspisteessä tuulipuiston sisällä (M2 ja M3) ja kolmessa puiston ulkopuolella (M5, M7 ja M8) LTE-800- ja UMTS-900-verkoissa. Mittauksen kesto oli 15 min, jonka aikana mitattiin HTTP-, UDP- ja TCP/IP-yhteyksien toimivuutta UL-suuntaan. HTTP-mittauksessa mitattiin google.com-sivun latausaikaa. Ping-mittauksella mitattiin viiveiden muutoksia datayhteyksissä mittauksen aikana. UDP-liikennettä generoitiin päätelaitteella lperf-liikennegeneraattorilla 5 sekunnin ajan. UDP-mittauksen aikana tallennettiin seuraavat tiedot: datayhteyden luonnin onnistumisten määrät, kadotettujen pakettien osuudet sekä jitter. Vastaavasti TCP-yhteyttä testattiin lperf-liikennegeneraattorilla luomalla TCP/IP-liikennettä 5 sekunnin ajan. Mittauksissa tallennettiin samat tiedot kuin UDP-mittauksen tapauksessa.

Mittauksen aikana tuulivoimaloiden suunnat ja lapojen pyörimisnopeudet kirjattiin ylös. Siirryttäessä mittauspisteestä toiseen kirjattiin ylös myös poissa käytöstä olevat tuulivoimalat.

3.3 Tulokset

3.3.1 Mitattavat parametrit

GSM-, UMTS- ja LTE-verkoissa on omat parametrit, joiden avulla voidaan arvioida verkon peittoa, keskinäishäiriöitä sekä yhteyden laatua [8][9]. Alla on kuvattu mittauksen kannalta oleelliset parametrit ja niiden väliset riippuvuudet.

GSM

RxLev (Signal Strength) ilmaisee vastaanotettua tehoa päätelaitteessa. Arvot esitetään tyypillisesti joko dBm-arvoina tai kokonaislukuna välillä 0–63.

RxLev	dBm
0	< -110 dBm
1	-110 ... -109
2	-109 ... -108
...	...
62	-49 ... -48
63	> -48

RxQual kuvaa vastaanotetun signaalin laatua. Arvo vaihtelee välillä 0–7 siten, että 0 on paras. Arvo lasketaan keskiarvoistetuista BER-arvoista (bit error rate) ennen virheenkorjausta. BER-prosentti kertoo, kuinka monta bittiä on muuttunut radiokanavassa siirron aikana.

RxQual	BER
0	< 0,1 %
1	0,26 % ... 0,3 %
2	0,51 % ... 0,64 %
3	1,0 % ... 1,3 %
4	1,9 % ... 2,7 %
5	3,8 % ... 5,4 %
6	7,6 % ... 11,0 %
7	>15 %

Carrier-to-Interference ratio (C/I) ilmoittaa signaalin suhteen saman kanavan häiriöön. Arvon tulisi olla suurempi kuin 9 dB. Parametri rinnastetaan usein laajakaistaisen UMTS:in E_c/N_0 -parametriin.

UMTS

RSCP (Received Signal Code Power) kuvaa päätelaitteelta kontrollikanavasta (CPICH, Common pilot channel) mitattua tehoa. CPICH lähettää jatkuvasti esimäriteltyä bittijonoa. Parametriin ei vaikuta verkon kuormitus, joten sitä voidaan käyttää peittoalueen ja etenemisvaimennuksen arviointiin. Arvo esitetään dBm-muodossa.

RSSI (Received Signal Strength Indicator) kuvaa vastaanotettua kokonaistehoa koko taajuuskaistain yli. Se sisältää vastaanotetut tehot palvelevasta ja naapuritukiasemista. Parametrin arvoon vaikuttaa verkon kuormitus. Yksikkönä on dBm. Liikenteen kasvaessa RSSI-arvo kasvaa.

E_c/N_0 (Received energy per chip of PICH channel divided by total noise power density) kuvaa palvelevan solun CPICH-kanavan ja koko taajuuskaistan yli yhteenlasketun tehon suhdetta. Parametria käytetään kuvaamaan signaalin laatua. Suhdeluku esitetään desibeleinä ja se lasketaan päätelaitteessa RSCP- ja RSSI-arvoista. Kuormituksen kasvaessa RSSI kasvaa ja E_c/N_0 vastaavasti pienenee. Tästä syystä E_c/N_0 -arvoa voidaan käyttää häiriön arviointiin vain silloin, kun puhe- tai datayhteys ei ole päällä. Päätelaite lähettää parametrin tukiasemalle avustamaan mm. solunvaihdossa tai solun uudelleenvalinnassa.

$$E_c/N_0[dB] = RSCP[dBm] - RSSI[dBm]$$

CQI (Channel Quality Indicator) on parametri, jolla päätelaite ilmoittaa tukiaseman skedulerille, mitä datanopeuksia päätelaite voi vastaanottaa. CQI lasketaan käyttämällä signaalin suhdetta häiriöihin ja kohinaan (SINR) seuraavalla kaavalla

$$CQI = \begin{cases} 0, SINR \leq -3.5 \\ SINR[dB] + 3.5, -3.5 < SINR < 26.5 \\ 30, SINR \geq 26.5 \end{cases}$$

Kaavaa voidaan käyttää silloin, kun BLER (Block Error Rate) on pienempi kuin 10 %. SINR:ää ei ole määritelty 3GPP:n vaatimuksissa, joten päätelaitteen ei tarvitse raportoida sitä verkkoon ja laitevalmistajilla on omat määritelmät SINR-arvolle. Tästä syystä arvoja tulisi tarkastella yhdessä E_c/N_0 -arvojen kanssa.

LTE

LTE:lle on määritelty vastaavia parametreja, joista tärkeimmät ovat RSRP, RSRQ, CQI ja SINR.

RSRP (Reference Signal Received Power) on keskimääräinen referenssisignaalin (RS) teho yhdessä resurssielementin teho koko taajuuskaistan yli. Parametri kertoo toivotun signaalin voimakkuudesta, muttei anna tietoa sen laadusta. Arvot vaihtelevat välillä -130...-44 dBm.

RSSI (Received Signal Strength Indicator) kuvaa vastaanotetun kokonaistehon koko taajuuskaistan yli. UMTS:in tapaan RSSI määritellään seuraavasti:

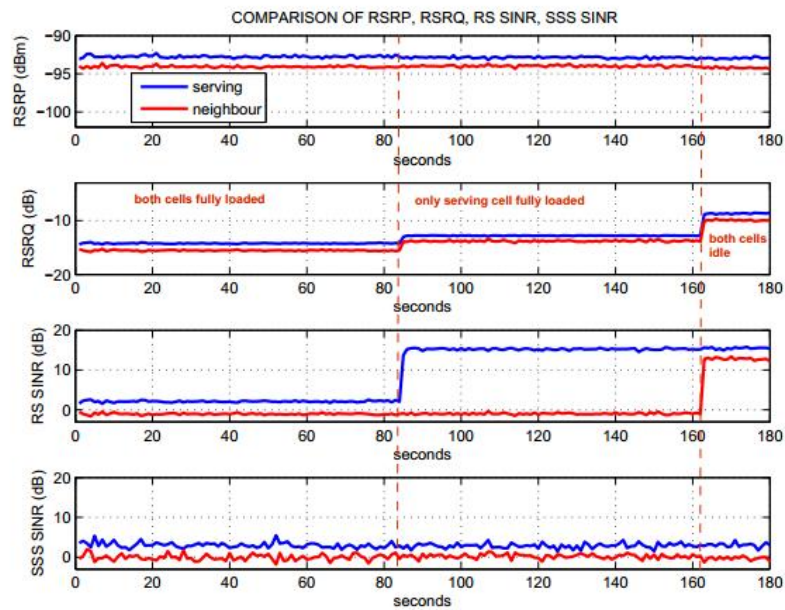
$$RSSI = \text{Noise} + \text{serving cell power} + \text{interference power}$$

RSRQ (Reference Signal Received Quality) on johdettu mitatuista RSRP- ja RSSI-arvoista. Kaava eroaa UMTS:ista siten, että yhtälössä huomioidaan resurssiblokkien määrä taajuuskaistalla (kaavassa esitetty N-termillä).

$$RSRQ = \frac{N \times RSRP}{RSSI}$$

RSRQ on tärkeä parametri, kun verkko tekee päätöstä solunvaihdosta. RSRQ on mitattavissa, kun puhe- tai datayhteys on päällä. Parametri riippuu lähetetystä datasta ja verkon kuormituksesta.

SINR (Signal-to-Interference ratio) on muuttuja, jota käytetään myös LTE:ssä CQI-arvon laskentaan. LTE:ssä CQI arvot määritellään välillä 1–15.



Kuva 12. Parametrien välisiä riippuvuuksia [10].

Kuvassa (Kuva 12) on esitetty parametrien välisiä riippuvuuksia, kun palvelevan ja naapurisolun kuormitusta muutetaan. Molempien solujen RSRP-arvot eivät muutu kuormasta. RSRQ on riippuvainen kuormasta ja sen arvo nousee kokonaisliikennemäärän pienentyessä. SINR riippuu vain solun omasta kuormituksesta, joten muutos näkyy ensiksi palvelevassa solussa ja myöhemmin naapurisolussa, jonka kuormitusta muutetaan myöhemmin.

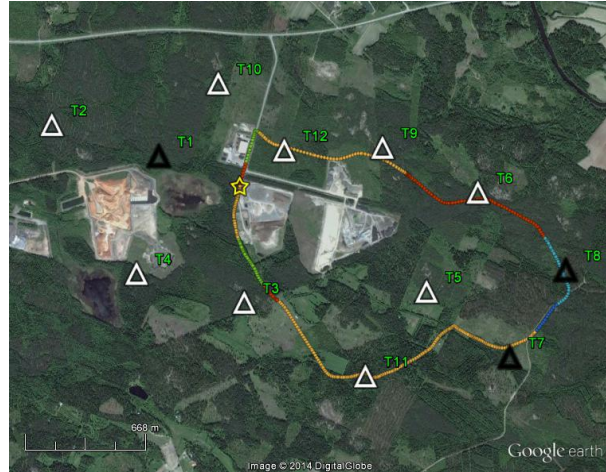
3.3.2 Ajomittaukset ilman liikennettä

Ajomittausten tavoitteena oli kartoittaa tuulivoimapuiston vaikutusaluetta mobiiliverkkoihin sekä löytää sopivat mittauspaikat yksityiskohtaisempia paikkamittauksia varten. Ajomittaukset suoritettiin kolmea reittiä pitkin, jotka mitattiin useaan kertaan ensimmäisen mittauspäivän aikana. Mittaukset suoritettiin ensiksi ilman liikennettä. Mittauksen aikana kerättiin tietoa signaalin voimakkuuksista, signaalihäiriösuhteista sekä solunvaihtokohdista. Samanaikaisesti mitatut verkot olivat GSM-900, UMTS-900, UMTS-2100, LTE-800 ja LTE-1800.

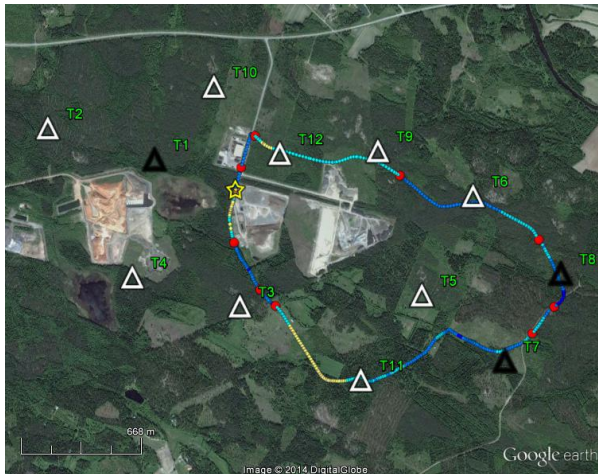
3.3.2.1 Reitti I: Tuulivoimapuiston sisällä

Ensimmäisen reitin aloituspiste sijaitsi tuulipuiston keskellä lähellä teollisuuden sivuvirtojen varastointi- ja läjitysalueita. Kuvassa aloituskohta on merkitty keltaisella tähdellä. Mittausreitti kierrettiin vastapäivään. Palvelevia tukiasemia on kaikkiaan viisi, jotka kattavat koko mittausreitit. Alla olevassa taulukossa on esitetty palvelevien tukiasemien koodit sekä mastojen etäisyydet ja suunnat tuulipuistosta. Reittikuvassa mittauspisteen väri ilmaisee palvelevan tukiaseman kyseisessä pisteessä. Kuvassa tuulivoimalat on esitetty kolmioilla: valkoiset olivat toiminnassa ja mustat olivat poissa käytössä mittauksen aikana.

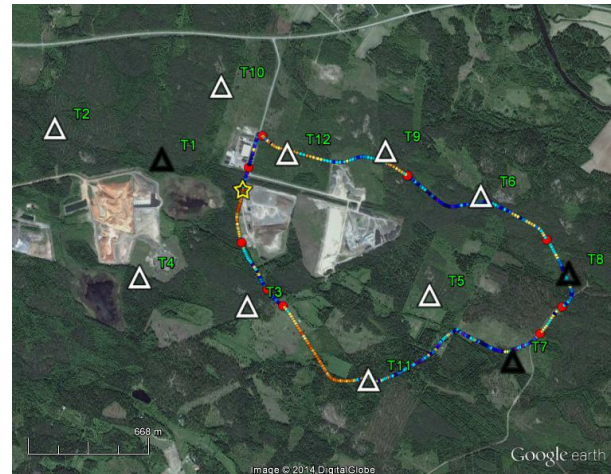
Tukiasema-ID	Etäisyys ja suunta
1117	8,7 km lounaaseen
2153	7,7 km pohjoiseen
25216	4,6 km etelään
41029	7,7 km pohjoiseen
5544	3,4 km luoteeseen



Kuvissa (Kuva 13 ja Kuva 14) on esitetty mitatut signaalin voimakkuudet (RxLev) ja signaalihäiriösuhteet (C/I). Signaalin voimakkuudet vaihtelevat tuulipuiston sisällä varsin paljon ja katvealueita näkyy etenkin tuulivoimaloiden läheisyydessä. Kuvissa solunvaihtokohtat on esitetty punaisilla ympyröillä. Solunvaihtokohtia on varsin paljon ja ne sijoittuvat tuulivoimaloiden lähietäisyyteen, missä mitatut RxLev- ja C/I-tasot olivat alhaisia.



Kuva 13. GSM-900 (RxLev).



Kuva 14. GSM-900 (C/I).

Signaalin voimakkuus pysyy selvästi asetetun RxLev-alarajan yläpuolella, mutta tasovaihtelut ovat merkittäviä ottaen huomioon alueen tasaisuuden (Kuva 15). C/I:n alaraja alittuu hetkellisesti useassa kohdassa (Kuva 16). Huomioitavaa on C/I-tasojen nopeat vaihtelut etenkin kaakkoiskulmassa. Tarkasteltaessa luoteessa olevaa tukiasemaa (keltainen viiva) havaitaan, että mitä enemmän tuulivoimaloita jää tukiaseman ja päätelaitteen väliin, sitä voimakkaampaa tasovaihtelua näkyy C/I-tasoissa. Merkittävää on myös se, että pohjoisessa oleva tukiasema toimii palvelevana lähellä reitin ensimmäistä tuulivoimalaa, vaikka lounaassa oleva tukiasema on lähempänä. Tämä johtunee tuulivoimalan aiheuttamasta katveesta.



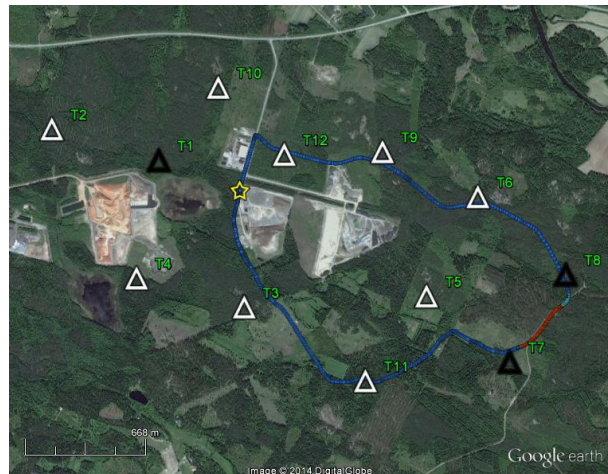
Kuva 15. GSM-900 (RxLev).



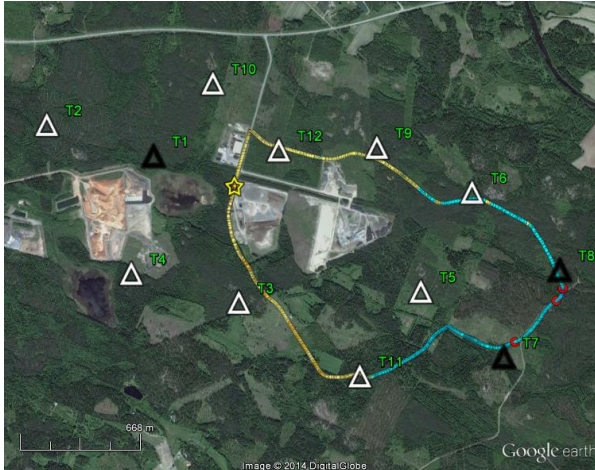
Kuva 16. GSM-900 (C/I).

UMTS-900 peitto ulottuu koko reitille. Palvelevia tukiasemia on kolme. Luoteessa 3,4 km päässä oleva tukiasema palvelee lähes koko reitin ajan. Solunvaihdot keskittyvät reitin itäosaan.

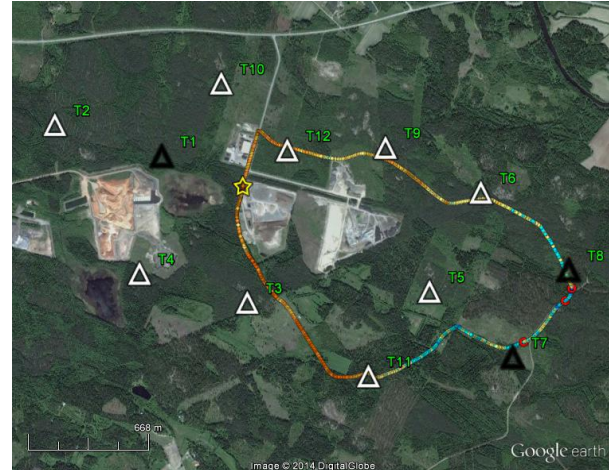
Tukiasema-ID	Etäisyys ja suunta
49492	3,4 km luoteeseen
49510	4,6 km etelään
5159	3,7 km kaakkoon



Signaalin voimakkuudet (RSCP) ovat korkeat reitin länsireunalla (Kuva 17). Itään päin siirryttäessä RSCP- ja Ec/No-arvot heikkenevät. Ec/No-arvot putoavat hetkittäin raja-arvon alle (tummansiniset pisteet).

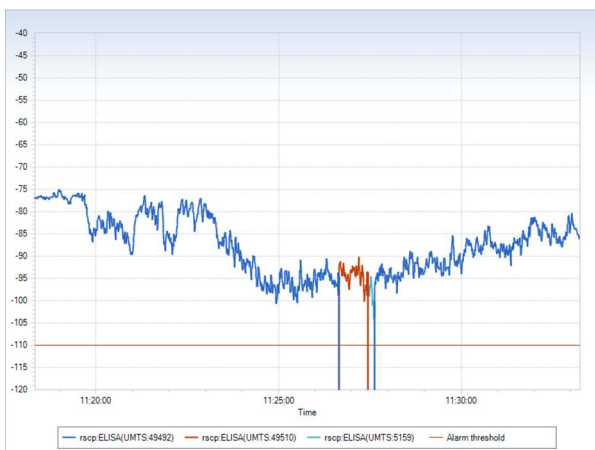


Kuva 17. UMTS-900 (RSCP).

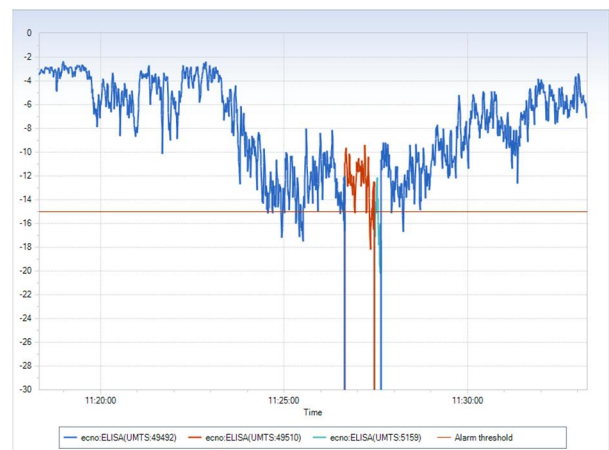


Kuva 18. UMTS-900 (Ec/No).

RSCP-arvoissa (Kuva 19) näkyy syviä kuoppia lähellä tuulivoimaloita. Ec/No-arvoissa (Kuva 20) näkyy enemmän tasovaihteluja tapauksissa, joissa päätelaitteen ja tukiaseman väliin jää useampia tukiasemia (reitit keskivaiheella). Näissä kohdissa Ec/No-arvot putoavat hetkittäin alarajan alle.



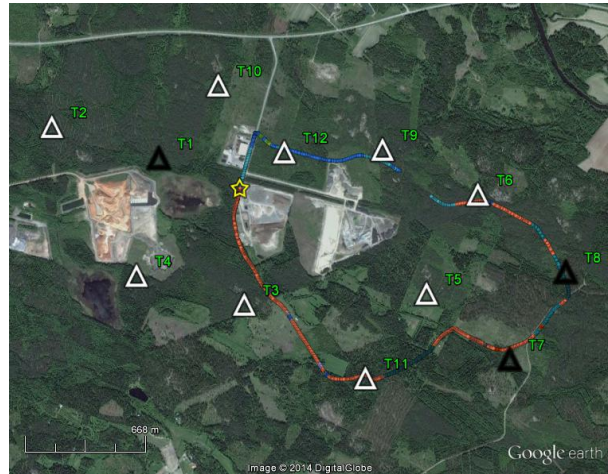
Kuva 19. UMTS-900 (RSCP).



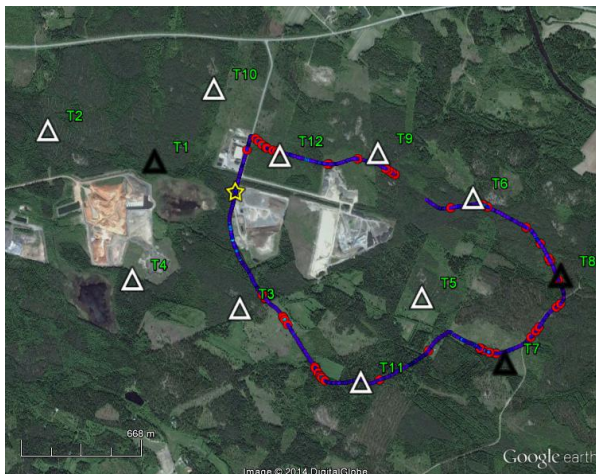
Kuva 20. UMTS-900 (Ec/No).

Reitillä I UMTS-2100-peitto oli heikko. Palvelevia soluja oli kaikkiaan yksitoista, jotka sijaitsevat kaikki yli 8 km:n päässä. Tuulivoimaloiden T6 ja T9 välillä on peittoalueessa reikä, joka näkyy katkoksenä alla olevassa kuvassa. Häätöpuhelujen mahdollistamiseksi päätelaite siirtyi tässä kohdassa mittaamaan muiden operaattoreiden verkkoa, kun Elisan UMTS-2100-peitto ei ollut riittävä.

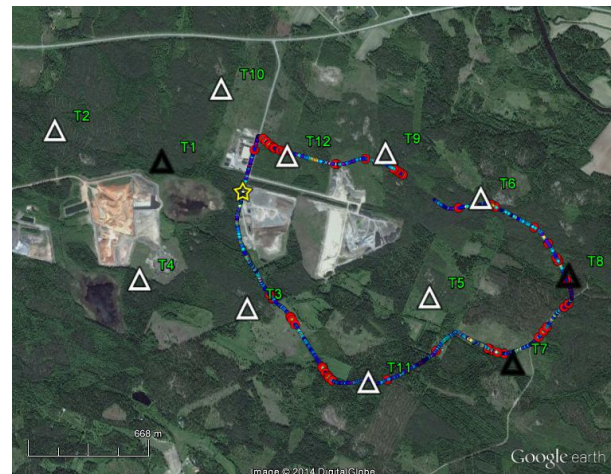
Tukiasema-ID	Etäisyys ja suunta
17808	8,7 km lounaaseen
21615	17,3 km kaakkoon
27634	12,8 km etelään
27665	8,7 km lounaaseen
30616	9,1 km lounaaseen
47187	9,1 km lounaaseen
47207	8,7 km lounaaseen
47219	12,8 km etelään
49540	11,3 km kaakkoon
61532	10,5 km itään
61535	10,5 km itään



RSCP-arvot (Kuva 21) jäävät hyvin alhaisiksi (tummansininen) ja alaraja ylittyy vain hetkittäin (Kuva 23). Ec/No-arvot ovat alhaisia ja vaihtelut suuria (Kuva 22). Solunvaihtoja tapahtuu tiheästi etenkin reitin pohjois- ja itäreunalla.

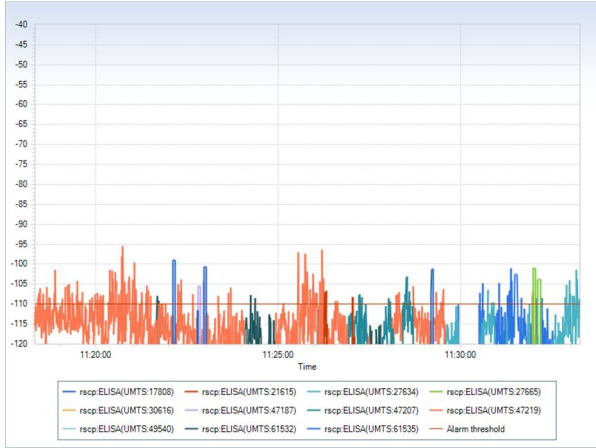


Kuva 21. UMTS-2100 (RSCP).

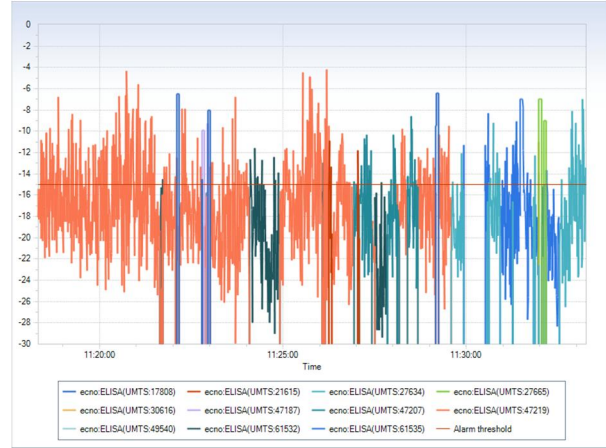


Kuva 22. UMTS-2100 (Ec/No).

Ec/No-arvot sahaavat kynnysarvon molemmin puolin hyvin voimakkaasti (Kuva 24). Tasoheilahtelut ovat voimakkaita etenkin tuulivoimaloiden läheisyydessä. Peiton häviäminen näkyy reitin loppuosassa katkoksenä.



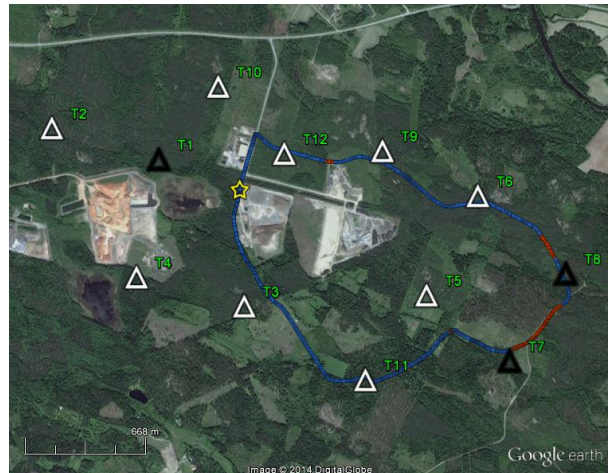
Kuva 23. UMTS-2100 (RSCP).



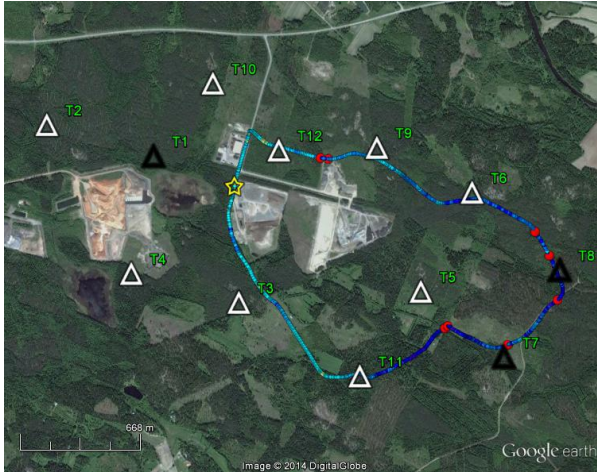
Kuva 24. UMTS-2100 (Ec/No).

LTE-800-verkon peitto kattaa myös koko alueen. Reitillä I tuulipuistosta 3,4 km luoteeseen oleva tukiasema toimii pääosin palvelevana. Reitiltä löytyy kohtia, joissa useita tuulivoimaloita jää päätelaitteen ja tukiaseman väliin. Reitin kaakkoisreunalla palvelevaksi tukiasemaksi vaihtuu lyhyeksi ajaksi 4,3 km etelään oleva tukiasema.

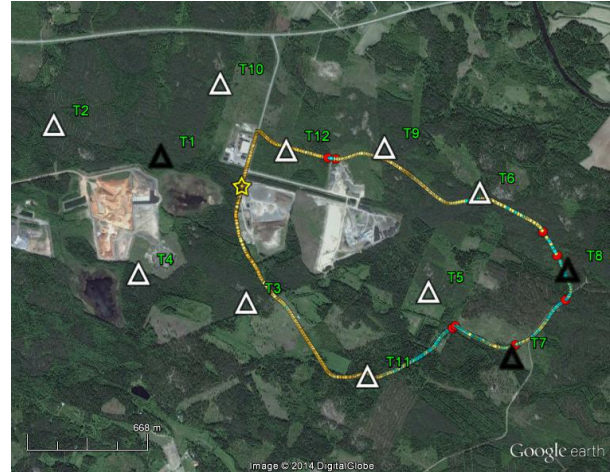
Tukiasema-ID	Etäisyys ja suunta
744450	3,4 km luoteeseen
872195	4,3 km etelään



RSRP- ja RSRQ-arvot ovat korkeita reitin länsiosassa (Kuva 25 ja Kuva 26). Arvot heikkenevät siirryttäessä itään, jossa myös pääosa solunvaihdosta tapahtuu.

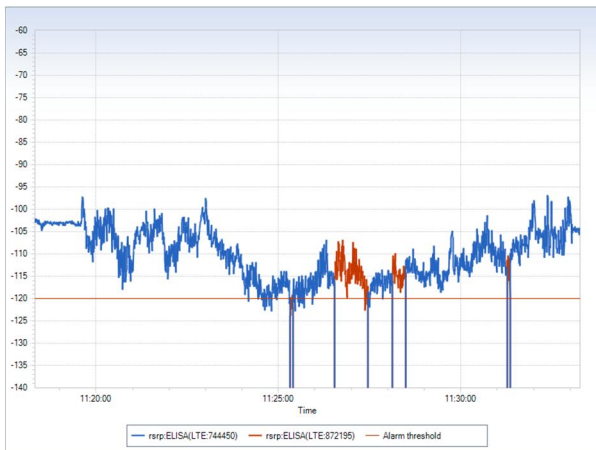


Kuva 25. LTE-800 (RSRP).

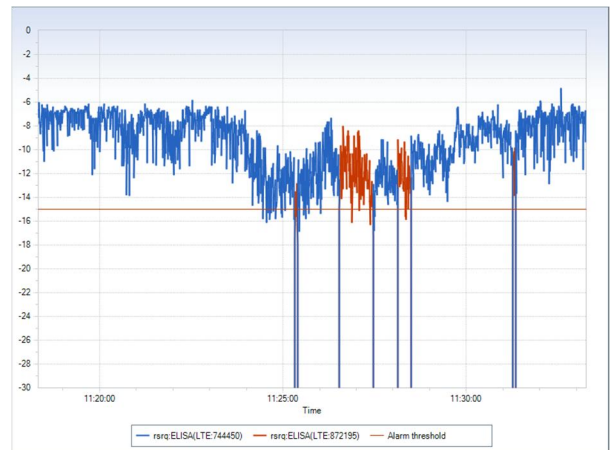


Kuva 26. LTE-800 (RSRQ).

RSRP-arvot (Kuva 27) putoavat alle alarajan hetkellisesti vain kaakkoiskulmassa. RSRQ-tasot pysyvät alarajan yläpuolella (Kuva 28). Tasovaihtelut kasvavat kohdissa, jossa RSRP-arvot ovat alhaisia tai ollaan lähellä tuulivoimaloita.



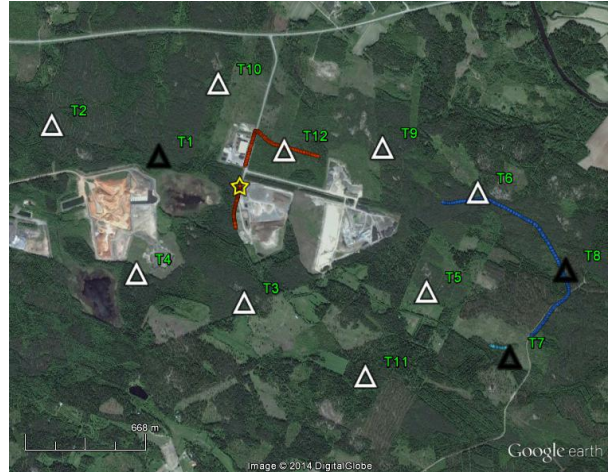
Kuva 27. LTE-800 (RSRP).



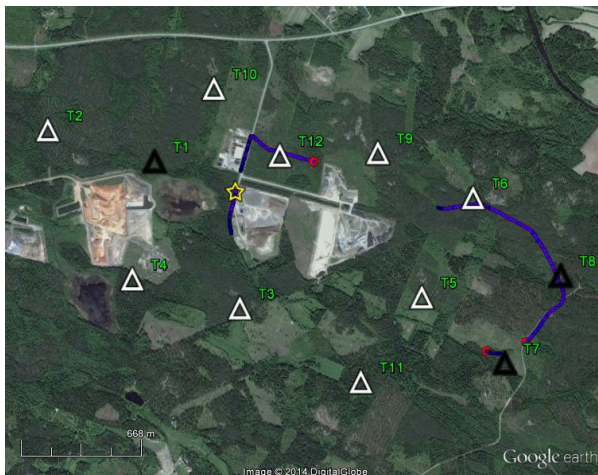
Kuva 28. LTE-800 (RSRQ).

LTE-1800-verkon peitto on heikko. Se kattaa noin 40 % koko reitistä. Pitkiä katkoksia on reitin etelä- ja pohjoisosissa. Näissä kohdissa päätelaite mittasi pääosin DNA:n LTE-1800-verkkoja. Palvelevia tukiasemia oli kaikkiaan kolme. Suurimman osan peitosta tarjosivat 8,7 km lounaaseen ja 10,2 km itään olevat tukiasemat.

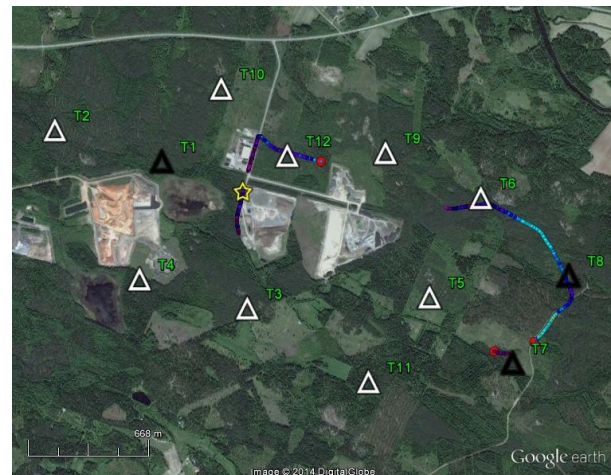
Tukiasema-ID	Etäisyys ja suunta
156673	8,7 km lounaaseen
370691	10,2 km itään
375299	12,5 km etelään



Peittoa ei ole ollenkaan reitin eteläosalla (Kuva 29 ja Kuva 30). Pohjois- ja itäosissa RSRP- ja RSRQ-arvot ovat matalia ja alaraja ylitty harvoin. RSRQ-arvot ovat korkeimmillaan reitin itäreunalla (vaaleansiniset arvot), jossa palvelevana tukiasemana on lounaassa oleva tukiasema. Mittauspisteet näkyvät tuulivoimaloiden lomasta.



Kuva 29. LTE-1800 (RSRP).

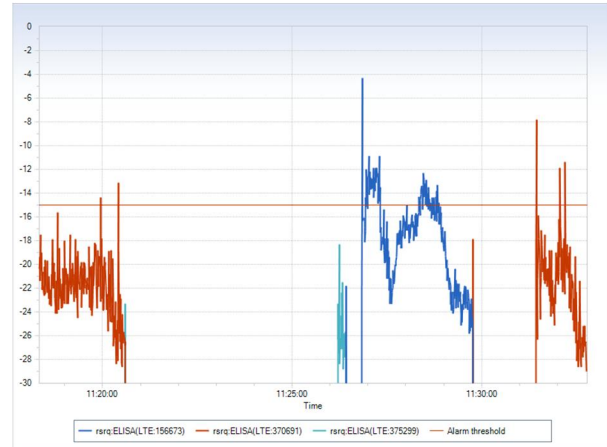


Kuva 30. LTE-1800 (RSRQ).

RSRP- ja RSRQ-arvot jäävät pääosin alarajojen alle (Kuva 31 ja Kuva 32). Syvät montut (sininen käyrä) esiintyvät tuulivoimaloiden kohdalla. Tasovaihtelut RSRQ-arvoissa toimivan tuulivoimalan läheisyydessä (mittauksen alussa ja lopussa) ovat suurempia kuin paikallaan olevien (mittauksen keskellä).



Kuva 31. LTE-1800 (RSRP).



Kuva 32. LTE-1800 (RSRQ).

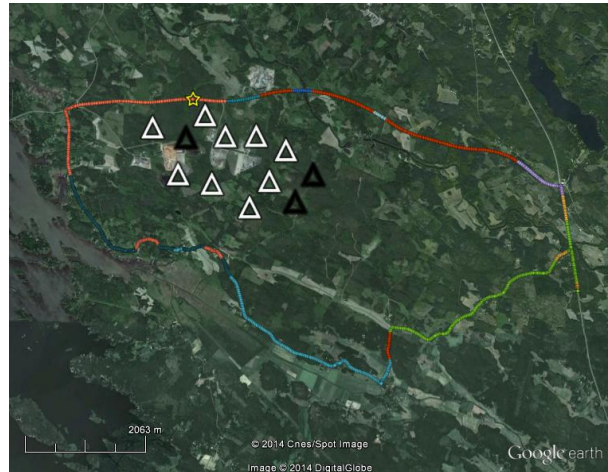
Tuulipuiston sisällä peitto pohjautuu Elisalla GSM-900-, UMTS-900- ja LTE-800-tukiasemien varaan. Mittaustuloksissa näkyvät tuulivoimaloiden katvevaikutus tuulivoimalan lähi-etäisyydellä.

3.3.2.2 Reitti II: Tuulivoimapuiston eteläpuolella

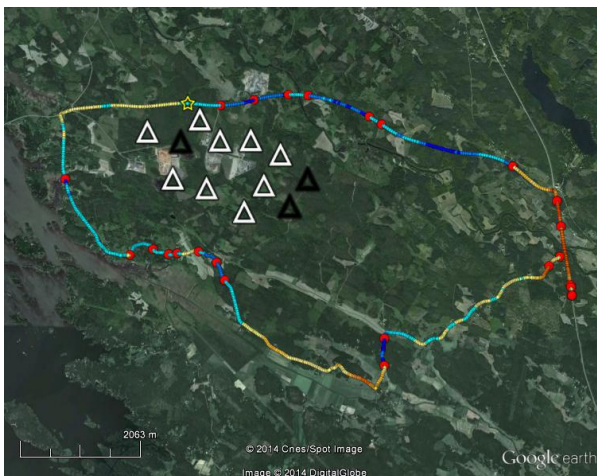
Toinen mittaus tehtiin tuulipuiston ulkopuolella. Reitti alkoi tuulipuiston pohjoispuolelta (keltainen tähti) ja kiersi sen ympäri myötäpäivään. Aloituspaiikka sijaitsi noin 300 m tuulivoimapuiston risteyksestä länteen.

Palvelevien tukiasemien koodit, etäisyydet ja suunnat on esitetty alla olevassa taulukossa. Reitillä palvelevat GSM-900-tukiasemat näkyvät kuvassa erivärisinä reittiosuuksina. Eniten solunvaihtoja tapahtuu tuulipuiston lähellä etelä- ja pohjoispuolella.

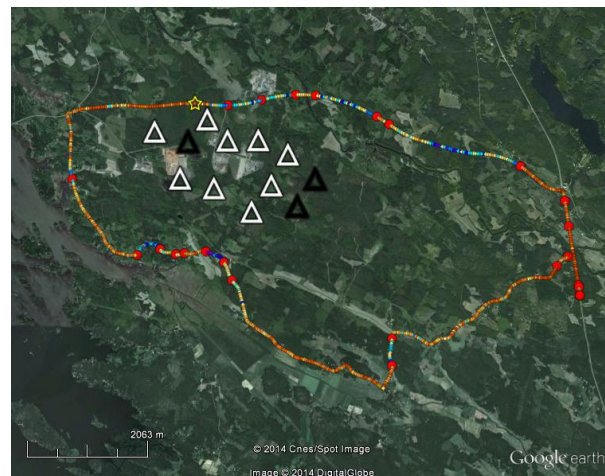
Tukiasema-ID	Etäisyys ja suunta
17352	4,7 km koilliseen
2153	7,7 km pohjoiseen
25216	4,6 km etelään
38264	4,2 km itään
38265	4,2 km itään
39813	4,2 km itään
41029	7,7 km pohjoiseen
5544	3,4 km luoteeseen
8049	3,4 km luoteeseen
9915	4,6 km etelään



RxLev-tasot (Kuva 33) olivat alhaalla mittauksen alussa (tuulipuiston pohjoispuolella). Solunvaihtojen määrä oli myös korkea. RxLev-arvot nousivat lähestyttäessä valtatieä 8 ja pysyivät korkeina aina kaakkoiskulmaan saakka. Poistuttaessa valtatieltä lounaaseen signaalin voimakkuus alkaa pudota ja päätelaite on hetken voimakkaassa katveessa (tummansininen osuus), jossa tapahtuu myös solunvaihdot. Kellahden kylän kohdalla arvot nousevat, kun palvelevaksi tukiasemaksi tulee reitin eteläpuolella oleva tukiasema. Toinen katvealue sijaitsee tuulivoimapuiston eteläpuolella, jossa tapahtuu myös paljon solunvaihtoja. Reitin itäosassa on myös solunvaihtoja, mutta ne tapahtuvat samassa mastossa olevien tukiasemasektoreiden välillä.



Kuva 33. GSM-900 (RxLev).

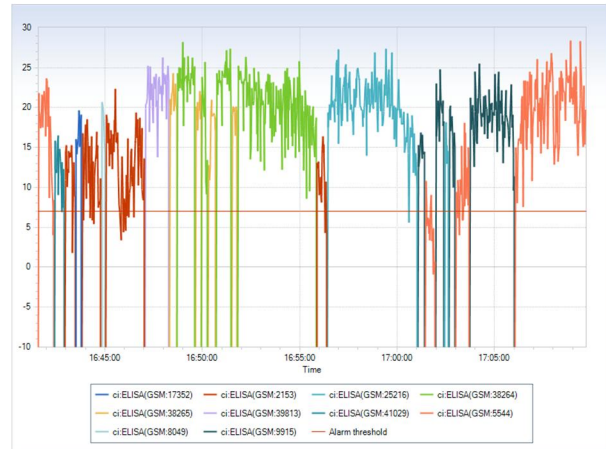


Kuva 34. GSM-900 (C/I).

Reitin alussa RxLev-arvot ovat alhaisia (Kuva 35). Lähellä tuulipuistoa esiintyy syviä, mutta lyhyitä kuoppia. RxLev-arvot putoavat lähelle alarajaa ja solunvaihtoja esiintyy. C/I-arvot vaihtelevat voimakkaasti lähellä puistoa ja putoavat hetkittäin alle alarajan (Kuva 36).



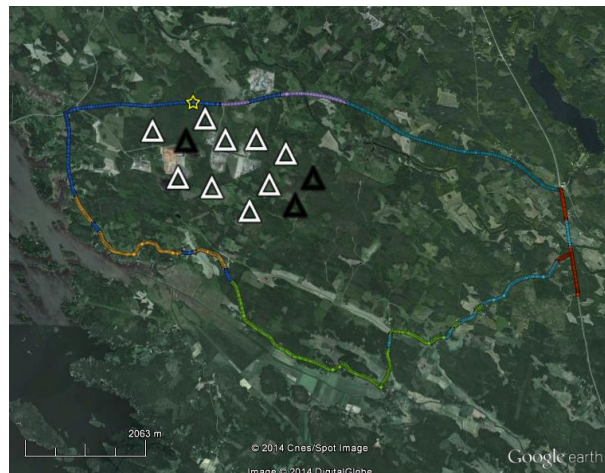
Kuva 35. GSM-900 (RxLev).



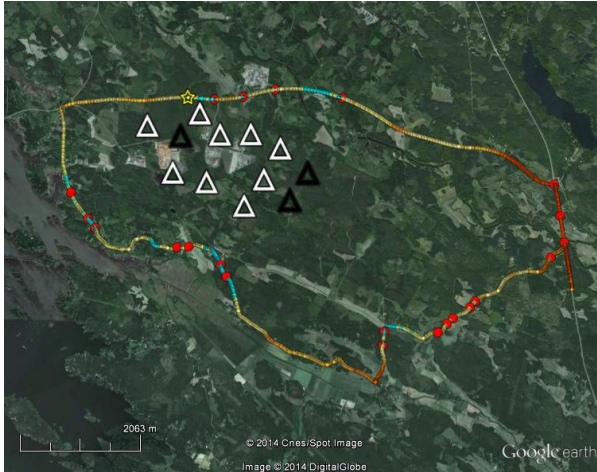
Kuva 36. GSM-900 (C/I).

UMTS-900-peitto kattaa koko mittausreitit. Palvelevia tukiasemia on seitsemän ja ne sijaitsevat viiden kilometrin säteellä tuulipuistosta eri ilmansuunnissa. Voimakkaat tukiasemat löytyvät idästä, etelästä ja luoteesta. Koska tukiasemat ovat eri ilmansuunnissa, korkeat RSCP- ja Ec/No-arvot selittyvät sillä, että tuulipuisto on harvoin päätelaitteen ja tukiaseman välissä.

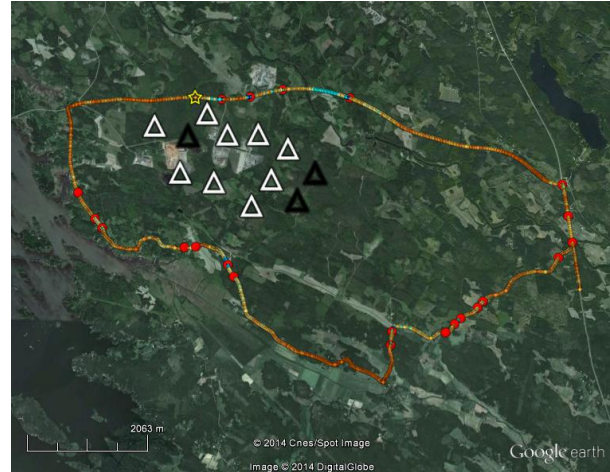
Tukiasema-ID	Etäisyys ja suunta
49492	3,4 km luoteeseen
49495	4,5 km itään
49496	4,5 km itään
49510	4,6 km etelään
49512	4,6 km etelään
5159	3,7 km kaakkoon
5508	4,5 km itään



RSCP-tasot pysyvät alarajan yläpuolella (Kuva 39). Alhaisempia tasoja mitattiin hetkellisesti tuulivoimalan pohjois- ja eteläpuolella (Kuva 37). Samoilla alueilla tapahtui myös pääosa solunvaihdosta. Idässä solunvaihdot tapahtuivat samaan mastoon kuuluvien tukiasemien välillä. Ec/No-arvot ovat korkeita, mutta lyhytkestoisia kuoppia esiintyy (vaaleansiniset alueet) reitin tuulipuiston pohjois- ja eteläpuolella sekä reitin kaakkoisreunalla (Kuva 38).

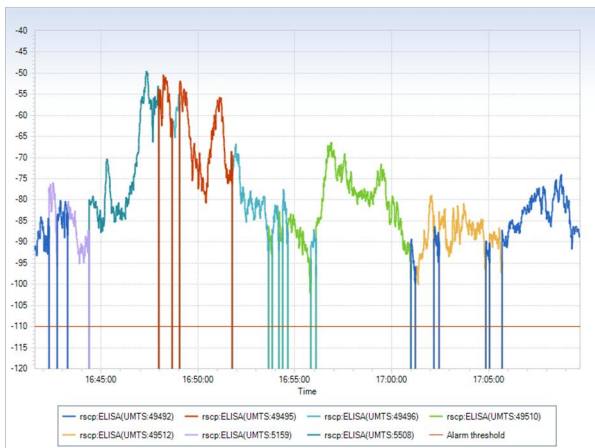


Kuva 37. UMTS-900 (RSCP).

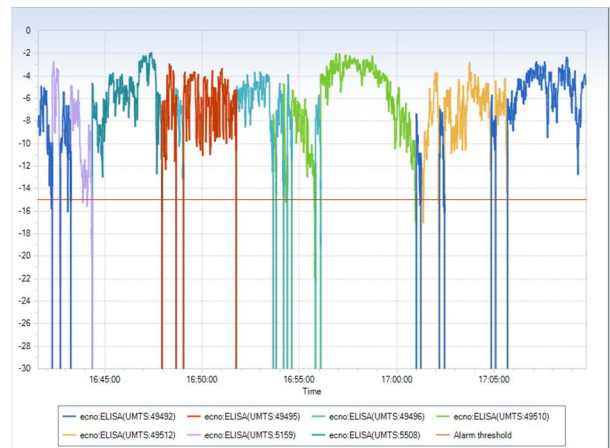


Kuva 38. UMTS-900 (Ec/No).

Tuulipuiston pohjois- ja eteläpuolella tapahtuu solunvaihtoja kohdissa, joissa RSCP-arvot ovat matalia. RSCP- ja RSRQ-arvoissa tapahtuu tasovaihtelua. Ne ovat varsin rajuja tuulipuiston etelä- ja pohjoispuolella. Palvelevien tukiasemien lähellä on myös voimakkaita muutoksia, mutta ne johtuvat päätelaitteen siirtymisestä pois tukiaseman pääkeilasta.



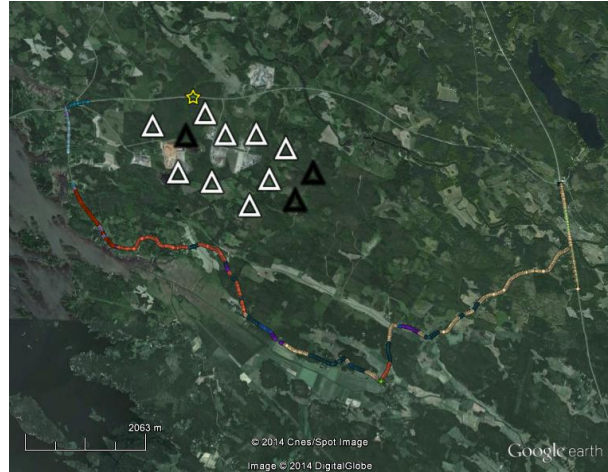
Kuva 39. UMTS-900 (RSCP).



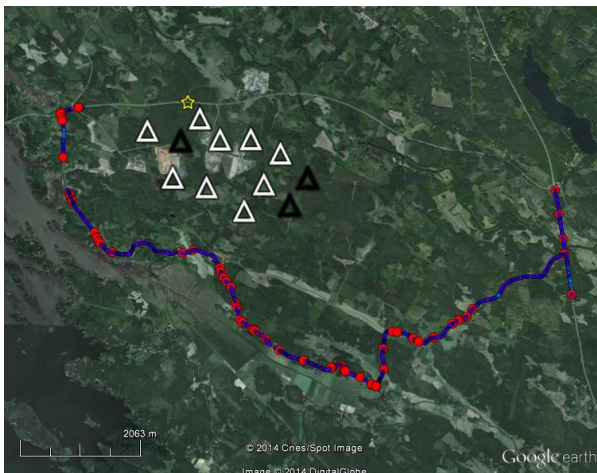
Kuva 40. UMTS-900 (Ec/No).

UMTS-2100-peitto on alueella heikko. Peitto-osuus reitistä oli noin 65 %. Reitän pohjoispuolella ei ole Elisan peittoa ja päätelaite mittasi muiden operaattoreiden verkkoja. Solunvaihtojen määrä on suuri etenkin reitin eteläpuolella. Palvelevat tukiasemat ovat varsin kaukana. Palvelevia UMTS-2100-tukiasemia oli reitillä kaikkiaan kuusitoista. Niiden etäisyydet ja suunnat tuulipuistosta on esitetty alla olevassa taulukossa. Tukiasemien etäisyys vaihteli välillä 8,7–17,3 km.

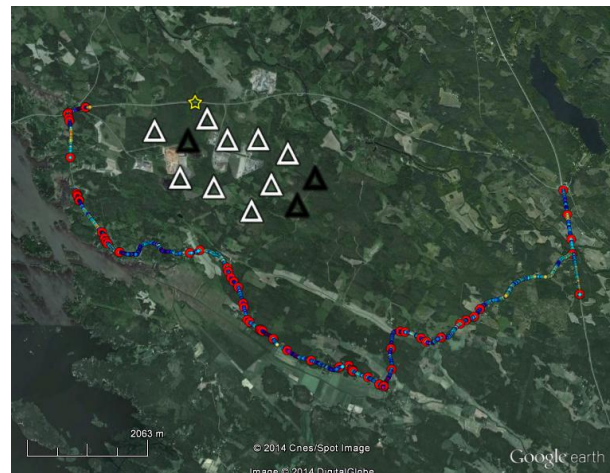
Tukiasema-ID	Etäisyys ja suunta
21615	17,3 km kaakkoon
27538	11,3 km kaakkoon
27597	10,5 km itään
27598	9 km länteen
27631	10,5 km etelään
27634	12,8 km etelään
30616	8,7 km lounaaseen
47207	8,7 km lounaaseen
47210	8,7 km lounaaseen
47219	8,7 km lounaaseen
49508	10,5 km itään
49538	11,3 km kaakkoon
49540	11,3 km kaakkoon
49594	14,1 km kaakkoon
61532	10,5 km itään
61535	10,5 km itään



RSCP-arvot (Kuva 41) ovat alhaisia ja solunvaihtoja tapahtui paljon etenkin reitin eteläosassa. Ec/No-arvot (Kuva 42) vaihtelivat suuresti koko reitin aikana.

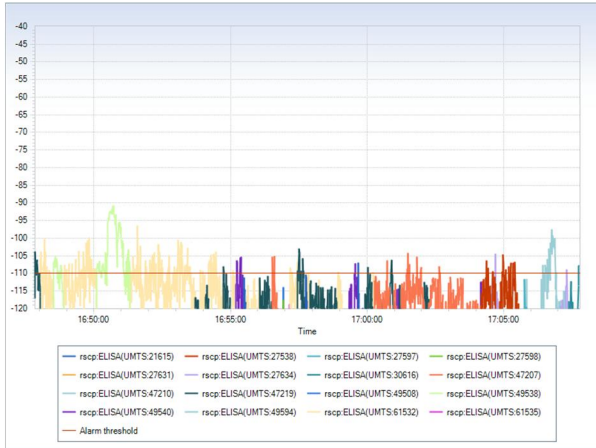


Kuva 41. UMTS-2100 (RSCP).

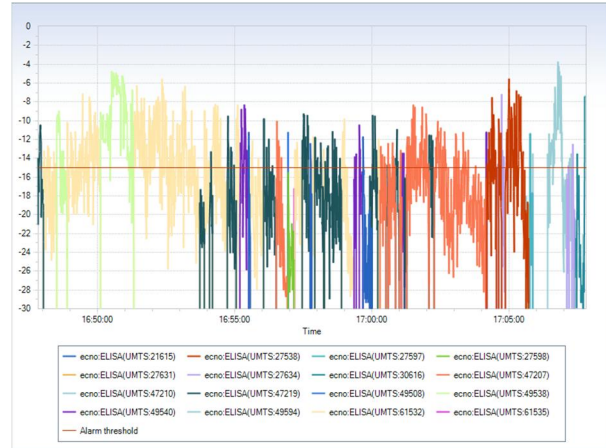


Kuva 42. UMTS-2100 (Ec/No).

RSCP-arvot ylittävät alarajan pääosin vain reitin itäosassa. Graafeissa (Kuva 43 ja Kuva 44) ei näy mittauksen alku- ja loppuosaa, josta ei saatu mittausnäytteitä. Ec/No-arvoista noin puolet on alarajan yläpuolella. Tasovaihtelut Ec/No-arvoissa ovat suuria ja tukiasemavaihtoja tapahtui tiheästi.



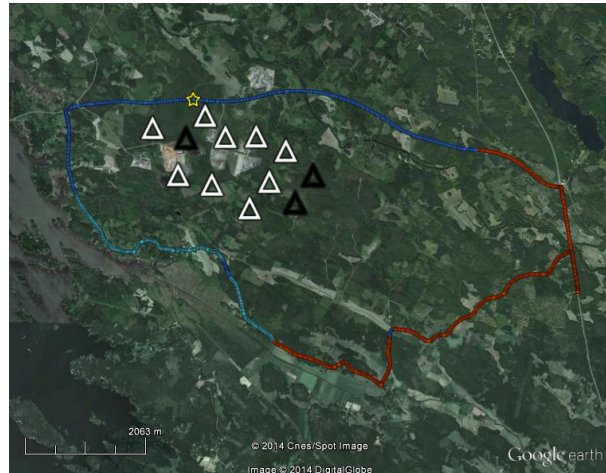
Kuva 43. UMTS-2100 (RSCP).



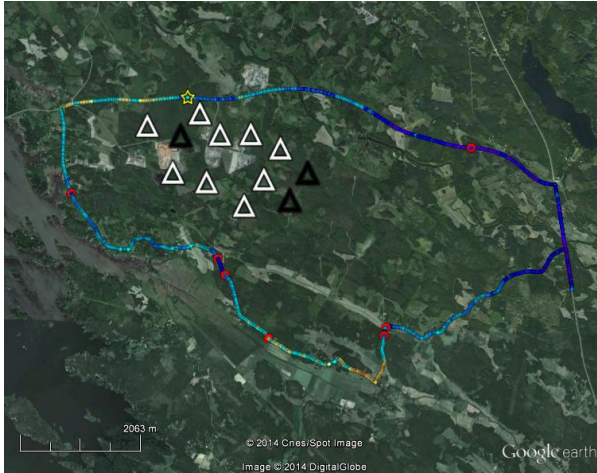
Kuva 44. UMTS-2100 (Ec/No).

LTE-800-verkko tarjosi peiton koko reitille kolmella tukiasemalla, jotka sijaitsevat alle 5 km:n säteellä tuulipuistosta luoteeseen ja etelään.

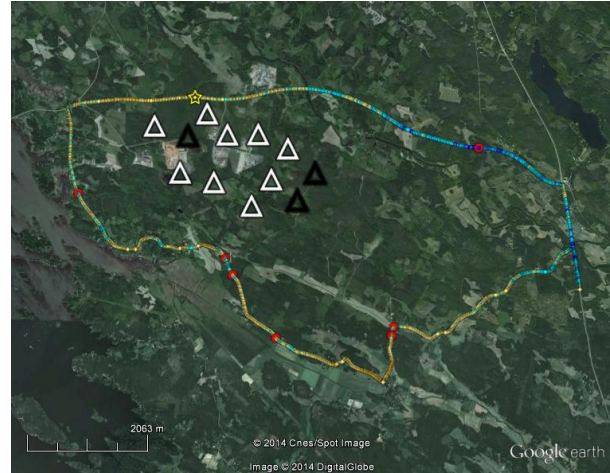
Tukiasema-ID	Etäisyys ja suunta
744450	3,4 km luoteeseen
872193	4,3 km etelään
872195	4,3 km etelään



RSRP-taso laskee siirryttäessä itään (Kuva 45). Eteläosassa RSRP-arvot taas kohoavat, kun etelässä sijaitseva tukiasema tulee palvelevaksi. Solunvaihtoja on varsin vähän ja ne tapahtuvat pääosin eteläosassa. Vain kaksi solunvaihtoa tapahtuu lähellä tuulipuistoa.

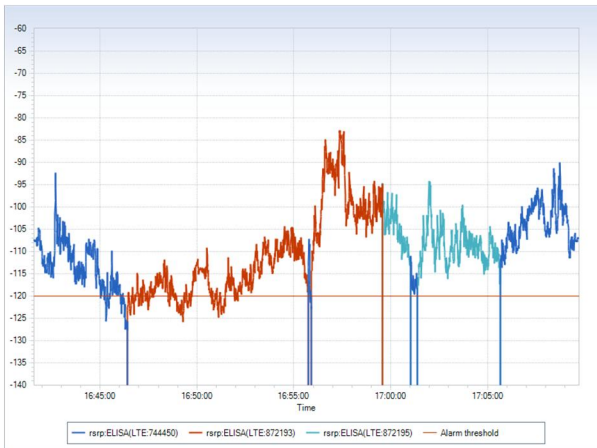


Kuva 45. LTE-800 (RSRP).

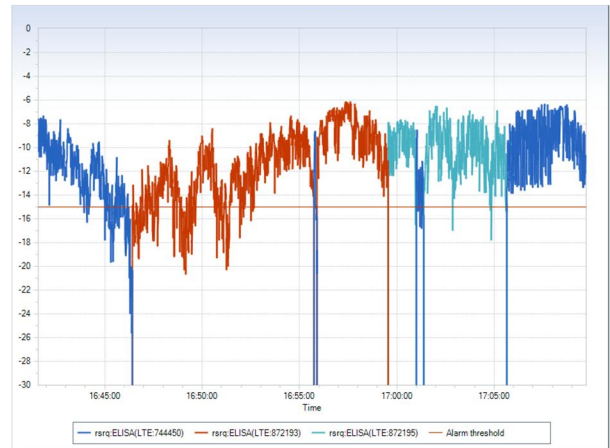


Kuva 46. LTE-800 (RSRQ).

RSRP-alaraja alittuu vain hetkittäin (Kuva 47). Näissä kohdissa päätelaite on kaukana tuulipuistosta eikä tuulipuisto ole syynä alhaisille RSRP- ja RSRQ-tasoille. RSRQ-arvot putoavat alle kynnsarvon pitkälti samoissa kohdissa kuin RSRP-arvot (Kuva 48). Reitin loppuosalla (luoteessa) näkyy enemmän tasovaihtelua RSRQ-arvoissa, kun lähestytään tuulipuistoa (mittauksen lopussa vaalean- ja tummansininen viiva). Tämä selittyy sillä, että etelässä tuulipuisto jää täysin palvelevan tukiaseman ja päätelaitteen taakse, kun taas luoteessa osa tuulivoimaloista jää osittain päätelaitteen ja tukiaseman väliin.



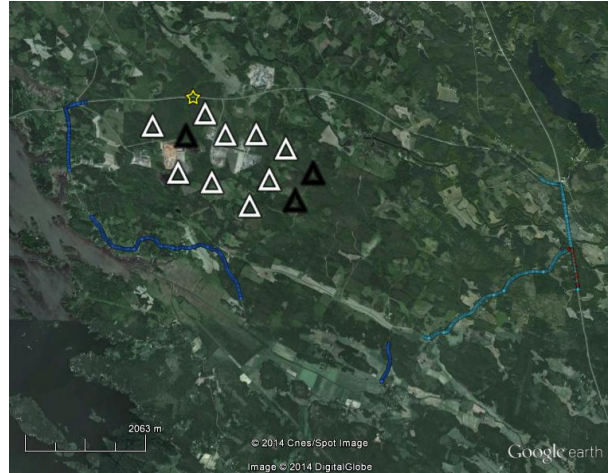
Kuva 47. LTE-800 (RSRP).



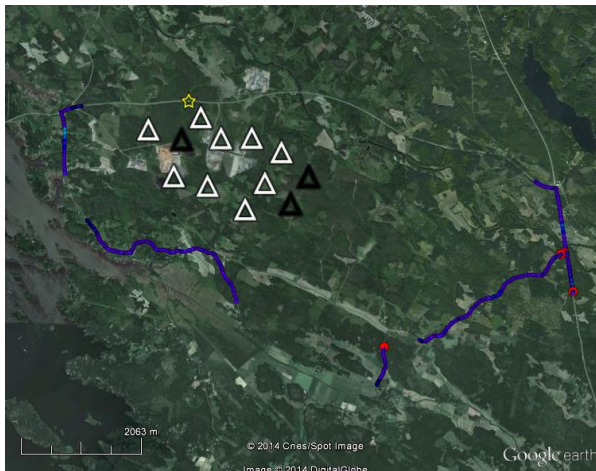
Kuva 48. LTE-800 (RSRQ).

LTE-1800-peitto on odotetusti heikko, Se kattoi noin 50 % koko reitistä. Reitin pohjois- ja eteläosiin syntyi laajoja katkosalueita. Tämän lisäksi pienempiä katkosalueita löytyi länsi- ja kaakkoisosista. Palvelevia tukiasemia oli kaikkiaan kolme, joista yhden sijainti ei ollut tiedossa.

Tukiasema-ID	Etäisyys ja suunta
156673	8,7 km lounaaseen
368385	11,8 km kaakkoon
370691	ei paikkatietoa



Signaalitasot (RSRP) ovat odotetusti matalia (Kuva 49). RSRQ-arvot ylittävät raja-arvon vain muutamassa kohdassa, jotka näkyvät kuvassa vaaleansinisinä alueina.



Kuva 49. LTE-1800 (RSRP).

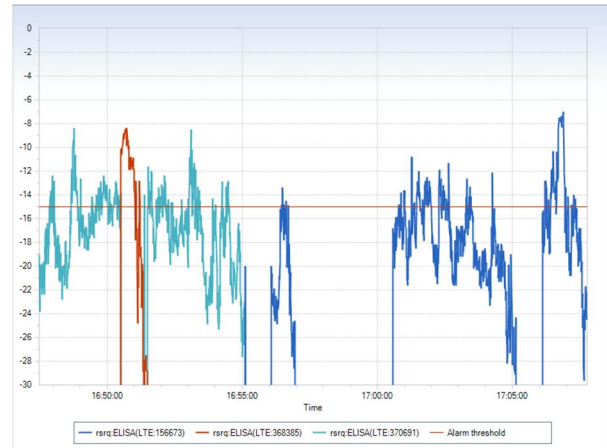


Kuva 50. LTE-1800 (RSRQ).

Signaalitasot (RSRP) ovat reilusti alle kynnysarvon muutamaa paikkaa lukuun ottamatta (Kuva 51). RSRQ-arvo ylittää alarajan useammin, mutta vaihtelut ovat suuria (Kuva 52). Peiton häviäminen näkyy graafeissa katkoksina. Mittauksen alussa ollut katkos ei näy graafeissa.



Kuva 51. LTE-1800 (RSRP).



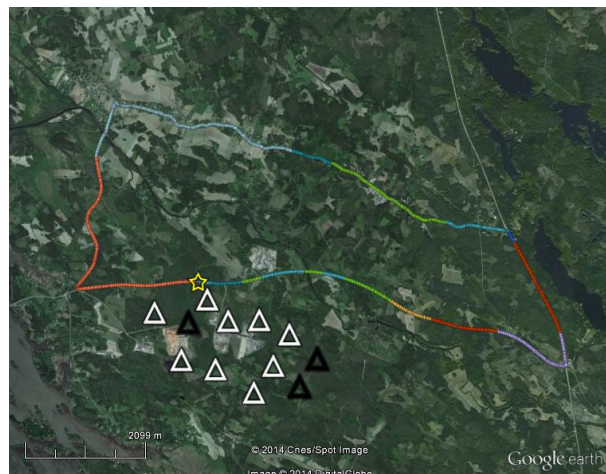
Kuva 52. LTE-1800 (RSRQ).

Reitin II osalta peitto pohjautuu GSM-900-, UMTS-900- ja LTE-800-verkkoihin. GSM-, UMTS- ja LTE-tukiasemaverkot ovat alueella tiheitä. Tästä syystä tuulipuisto jää harvoin päätelaitteen ja palvelevan tukiaseman väliin. Mahdollisia häiriövaikutuksia havaittiin vain lähellä tuulipuistoa etelä- ja pohjoispuolella. Vaikutukset olivat suhteellisen pieniä.

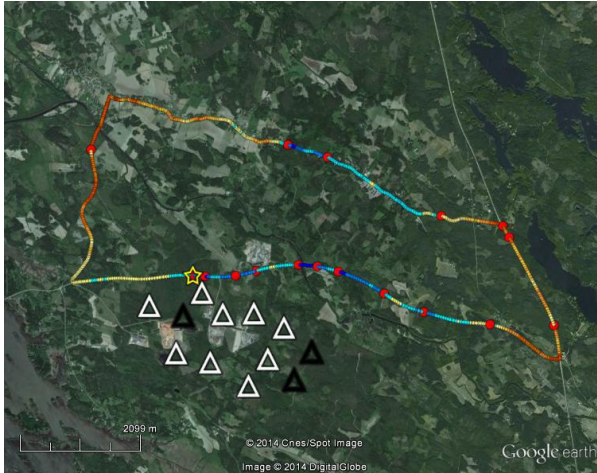
3.3.2.3 Reitti III: Tuulivoimapuiston pohjoispuolella

Kolmas mittaus tehtiin tuulipuiston ulkopuolella. Reitti kiersi kokonaisuudessaan puiston pohjoispuolella, missä tukiasematiheys pieneni asutuksen harventuessa. Aloituspäivä oli noin 400 m tuulivoimapuiston risteyksestä länteen (keltainen tähti) ja reitti kulki myötäpäivään. Reitillä oli kaikkiaan yhdeksän palvelevaa GSM-900 tukiasemaa, joiden koodit sekä etäisyydet ja suunnat tuulipuistosta on esitetty taulukossa.

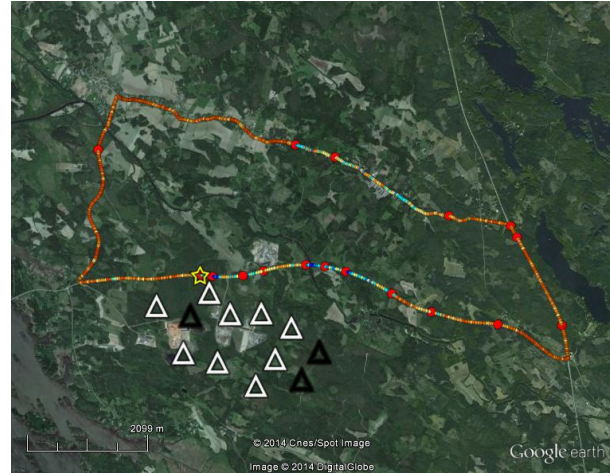
Tukiasema-ID	Etäisyys ja suunta
17350	4,7 km itään
17351	4,7 km itään
17352	4,7 km itään
2153	6,9 km koilliseen
38264	4,2 km itään
39813	4,2 km itään
41029	7,7 km pohjoiseen
5544	3,4 km luoteeseen
8049	3,4 km luoteeseen



Korkeita signaalin voimakkuuksia mitattiin reitin itä- ja länsireunoilla, missä ollaan lähellä tukiasemamastoja (Kuva 53). RxLev-tasot putoavat selvästi, kun siirrytään reitin keskiosiin. Heikkoja alueita esiintyy lähellä tuulipuistoa, jossa pääosa solunvaihtoista tapahtui. Toinen katvealue sijaitsi reitin pohjoisosassa Ylikylän ja valtatie 8:n välissä.



Kuva 53. GSM-900 (RxLev).



Kuva 54. GSM-900 (C/I).

RxLev-tasot pysyvät selvästi alarajan yläpuolella koko mittauksen ajan (Kuva 55). C/I-arvot ovat korkeita paitsi tuulipuiston ja Kankaankylän lähellä (Kuva 54 ja Kuva 56). Tasovaihtelut ovat suuria etenkin reitin loppuosalla, kun ajettiin tuulipuiston vierestä. RxLev- ja C/I-tasovaihtelut olivat kuitenkin pienempiä kuin reitillä I.



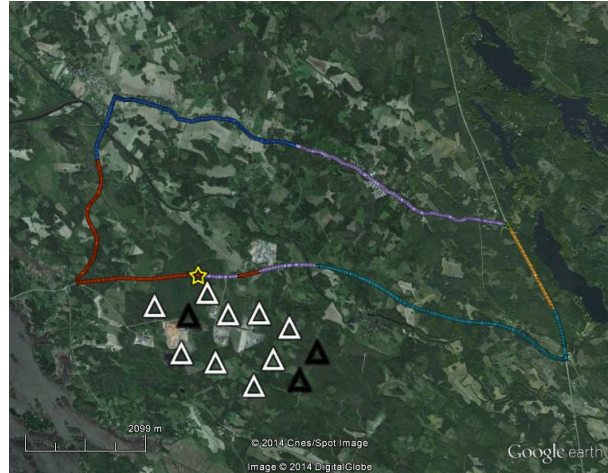
Kuva 55. GSM-900 (RxLev).



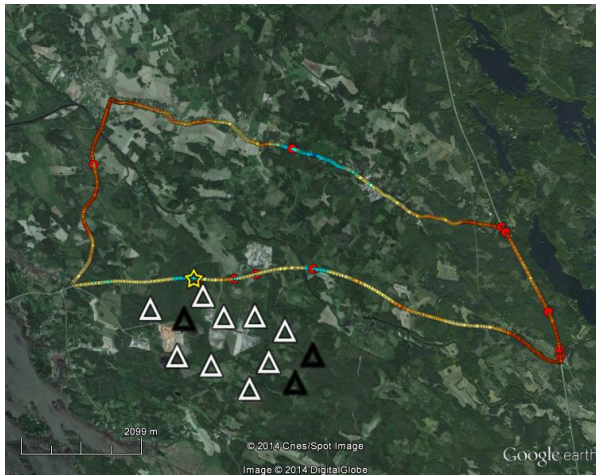
Kuva 56. GSM-900 (C/I).

UMTS-900-peitto on reitin III osalta hyvin samanlainen kuin GSM-900-peitto, koska palvelevat tukiasemat ovat samoissa mastoissa. Palvelevia tukiasemia on seitsemän ja ne sijaitsevat viiden kilometrin säteellä eri ilmansuunnissa.

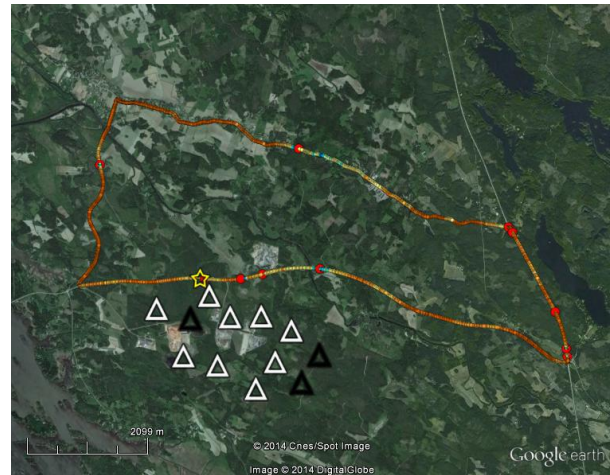
Tukiasema-ID	Etäisyys ja suunta
49491 (431)	3,4 km luoteeseen
49492 (439)	3,4 km luoteeseen
49494 (152)	4,5 km itään
5125 (112)	3,7 km kaakkoon
5158 (113)	3,7 km kaakkoon
5159 (114)	3,7 km kaakkoon
5508 (155)	4,5 km itään



Signaalin voimakkuudet ovat korkeita reitin itä- ja länsireunoilla (Kuva 57). RSCP-arvot putoavat selvästi siirryttäessä reitin keskiosaan etenkin reitin pohjoisella osiolla. Solunvaihdot keskittyvät tuulivoimapuiston pohjoispuolelle sekä reitin pohjoisosaan. Idässä solunvaihdot tapahtuvat samassa mastossa olevien tukiasemien kesken.

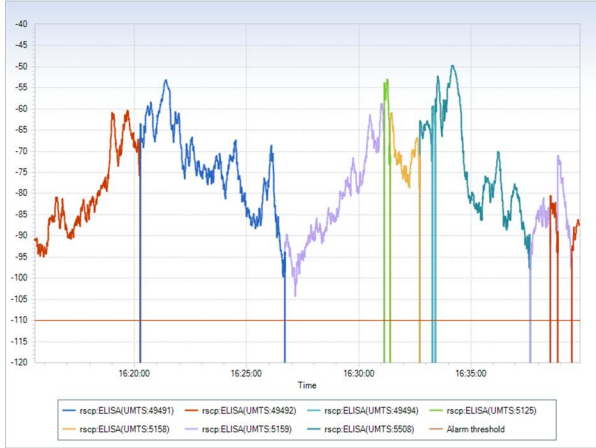


Kuva 57. UMTS-900 (RSCP).

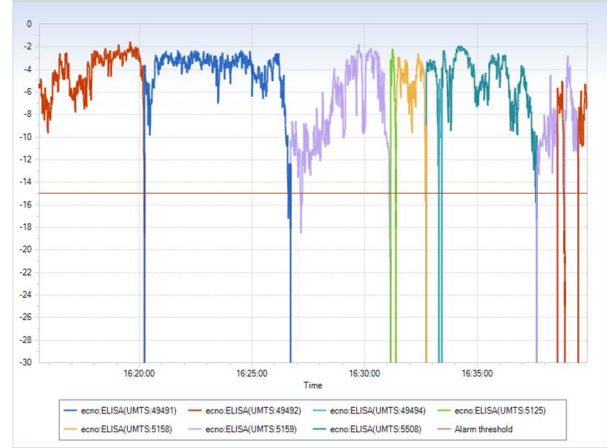


Kuva 58. UMTS-900 (Ec/No).

RSCP- ja Ec/No-arvot pysyvät alarajojen yläpuolella lähes koko mittauksen ajan (Kuva 59 ja Kuva 60). Tilanteita, jossa tuulipuisto on palvelevan tukiaseman ja päätelaitteen välissä ei juuri esiinny, koska UMTS-900-verkko on tiheä tuulipuiston ympärillä. Ec/No-arvoissa esiintyy vähemmän vaihtelua reitin alkuosalla kuin loppuosalla, kun ollaan lähellä tuulipuistoa.



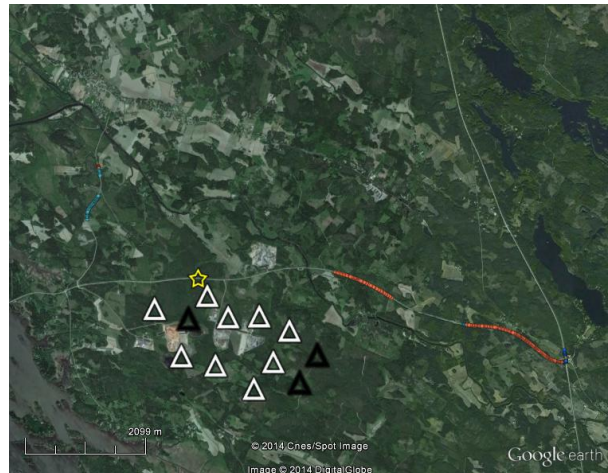
Kuva 59. UMTS-900 (RSCP).



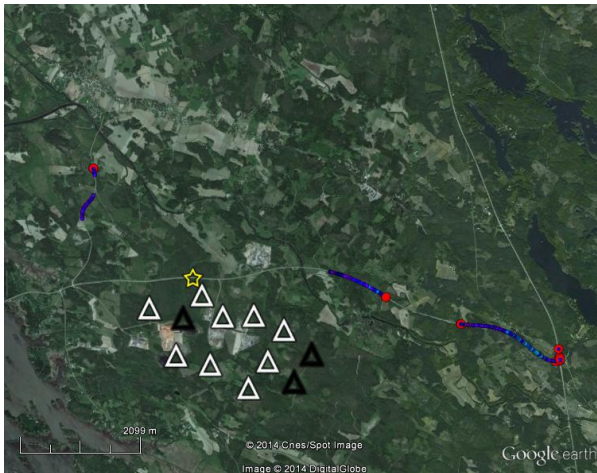
Kuva 60. UMTS-900 (Ec/No).

UMTS-2100-peitto oli odotetusti heikko. Peittoa oli vain noin 10 % reitistä eli käytännössä reitillä ei ollut UMTS-2100-peittoa, vaan peiton tarjosi UMTS-900-verkko. Päätelaite mittasi pääosin TeliaSoneran ja DNA:n UMTS-2100-verkkoja. Reitillä palveli kahdeksan eri tukiasemaa, jotka sijaittivat 8,7–12,8 km päässä tuulipuistosta.

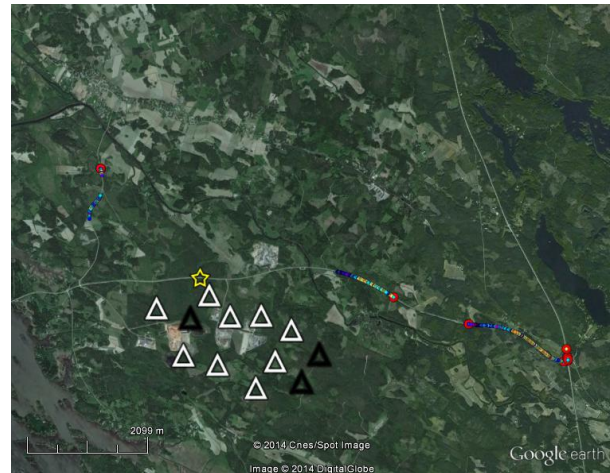
Tukiasema-ID	Etäisyys ja suunta
27536	11,3 km kaakkoon
27631	10,5 km etelään
27634	12,8 km etelään
27665	8,7 km lounaaseen
30616	9,1 km lounaaseen
47210	8,7 km lounaaseen
47219	12,8 km etelään
61532	10,5 km itään



Rajallinen UMTS-2100-peitto on tuulipuiston itäpuolella (Kuva 61). Mitatut signaalin voimakkuudet olivat hyvin alhaisia. Näissä kohdissa E_c/N_0 -arvot (Kuva 62) olivat suhteessa korkeampia kuin vastaavat RSCP-arvot eli tuulipuiston vaikutusta ei juuri näy. Peittoa ei ole tuulipuiston lähellä, joten puiston aiheuttama katve estää signaalin kuuluminen reitin lounaisosaan. Reitin pohjoispuolella ei myöskään ole peittoa. Se johtuu siitä, ettei pohjoisessa ole lähellä UMTS-tukiasemia.

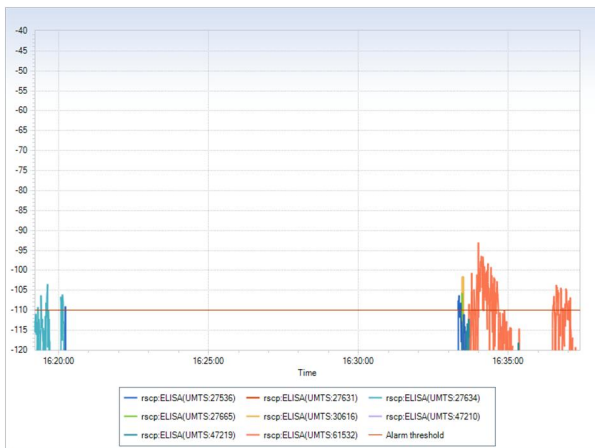


Kuva 61. UMTS-2100 (RSCP).



Kuva 62. UMTS-2100 (E_c/N_0).

RSCP-arvot ylittävät kynnyсарvot vain reitin itäreunalla lähellä valtatie 8:aa. E_c/N_0 -arvot ovat kapealla alueella raja-arvon yläpuolella, mutta sielläkin tasovaihtelut ovat suuria (Kuva 64). Vaihtelut eivät todennäköisesti johdu tuulipuistosta.



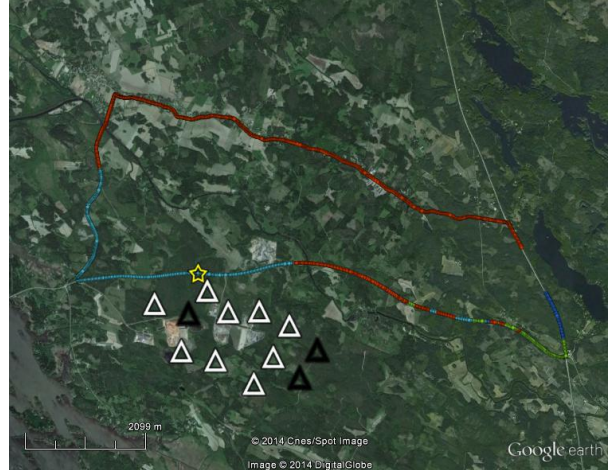
Kuva 63. UMTS-2100 (RSCP).



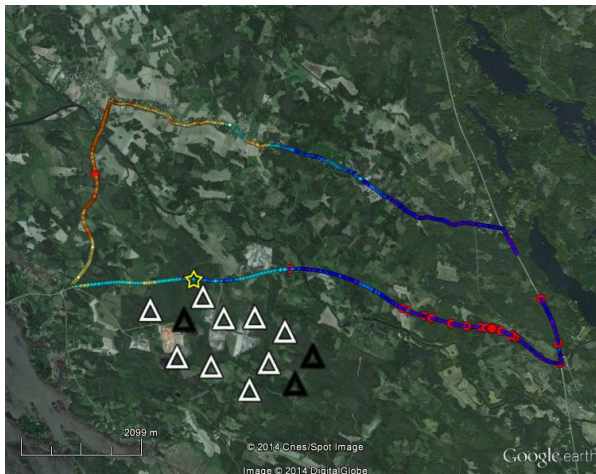
Kuva 64. UMTS-2100 (E_c/N_0).

LTE-800-peitto kattaa koko alueen. Palvelevia tukiasemia on neljä ja ne sijaitsevat varsin lähellä tuulivoimapuistoa eri ilmansuunnissa. Päätelaitte on pääosin kiinni 3,4 km luoteeseen olevassa tukiasemamastossa (punaiset ja turkoosinsiniset pisteet). Päätelaitte oli lyhyen aikaa kiinni DNA:n LTE-800-tukiasemassa reitin itäosassa, mikä näkyy alla olevassa kuvassa lyhyenä katkoksenä.

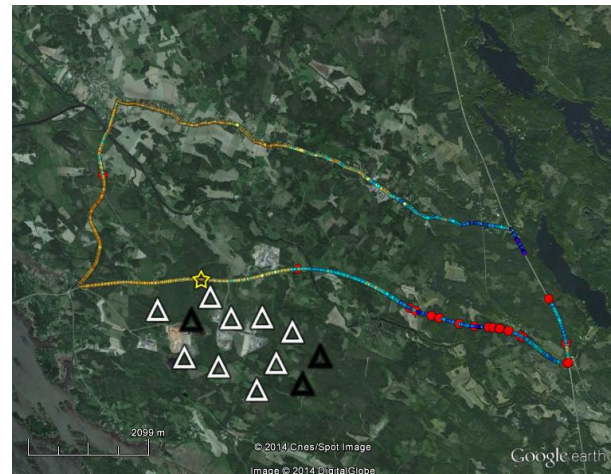
Tukiasema-ID	Etäisyys ja suunta
743683	9,2 km kaakkoon
744449	3,4 km luoteeseen
744450	3,4 km luoteeseen
872193	4,3 km etelään



Lähin LTE-800-tukiasemamasto sijaitsee mittausreitillä luoteispuolella. Signaalin voimakkuus (RSRP) sekä signaalikohinasuhde (RSRQ) on korkea siellä, mutta heikkenee siirryttäessä itää kohti (Kuva 65 ja Kuva 66). Reitillä kaakkoiskulmassa solunvaihtojen määrä on suurin. Samoissa paikoissa mitataan myös alhaisia RSRP- ja RSRQ-tasojia.



Kuva 65. LTE-800 (RSRP).

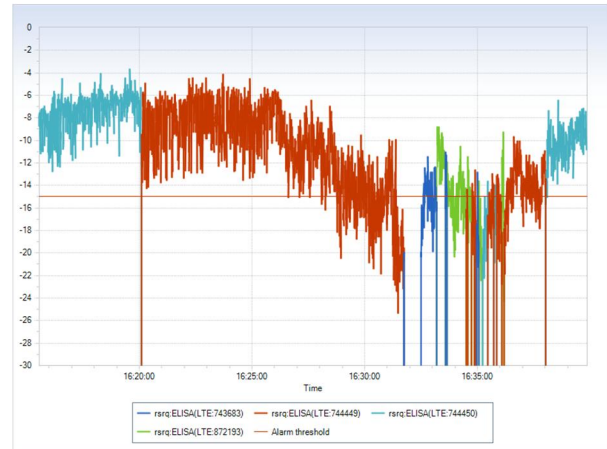


Kuva 66. LTE-800 (RSRQ).

RSRP-arvot (Kuva 67) putoavat alarajalle reitin loppuosalla (eteläosa), jossa lyhyitä katkoksia ja solunvaihtoja tapahtuu. RSRQ-arvot (Kuva 68) vaihtelevat varsin voimakkaasti mittausreitit keskivaiheilla (punainen viiva).



Kuva 67. LTE-800 (RSRP).



Kuva 68. LTE-800 (RSRQ).

LTE-1800-peitto on hyvin vähäistä eli noin 10 % luokkaa. Käytännössä reitillä ei ole LTE-1800-peittoa. Lyhyitä pätkiä löytyy vain reitin eteläosasta. Pisin osuus on lähellä valtatie 8:aa. Reitillä oli kaikkiaan kolme Elisan palvelevaa tukiasemaa. Ne sijaitsevat noin 10 km lounaaseen ja kaakkoon tuulipuistosta. Reitit eteläpuolella kuuluvaa tukiasemaa ei löydetty Elisan tukiasematiedoista, joten kyseessä on vasta-asennettu tukiasema.

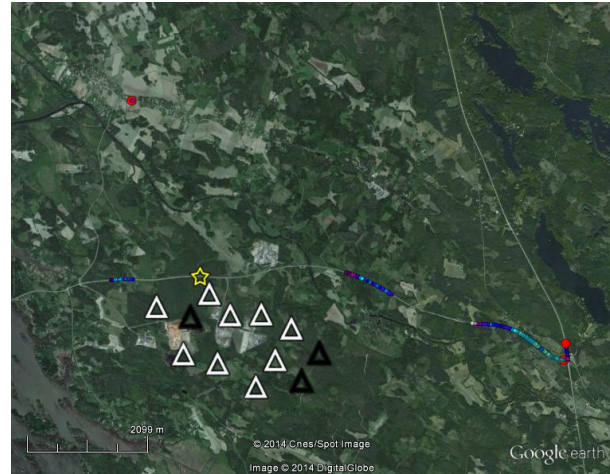
Tukiasema-ID	Etäisyys ja suunta
156673	8,7 km lounaaseen
368385	11,8 km kaakkoon
370691	ei paikkatietoa



RSRP- ja RSRQ-tasot ovat hyvin alhaisia. Raja-arvo ylittyi RSRQ:n osalta vain kaakkoisreunassa lähellä valtatie 8:aa.

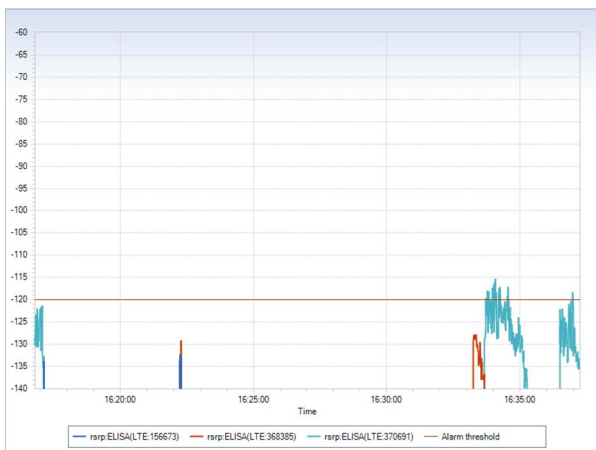


Kuva 69. LTE-1800 (RSRP).

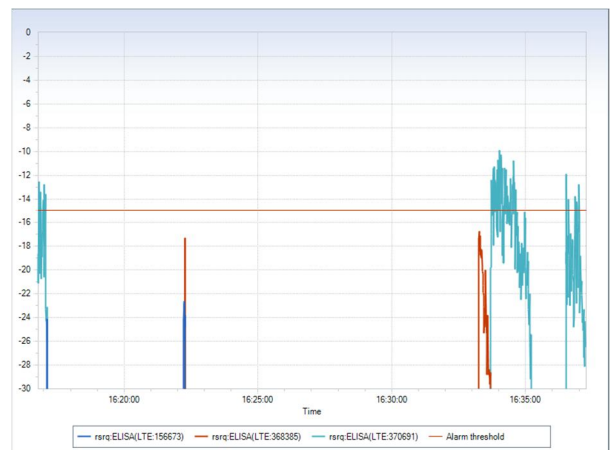


Kuva 70. LTE-1800 (RSRQ).

RSRP- ja RSRQ-arvot ovat alle alarajojen (Kuva 71 ja Kuva 72). RSRQ-tasot ylittävät alarajan hetkellisesti kaakkoisreunassa.



Kuva 71. LTE-1800 (RSRP).



Kuva 72. LTE-1800 (RSRQ).

3.3.3 Ajomittaukset puhe- ja datayhteyksillä

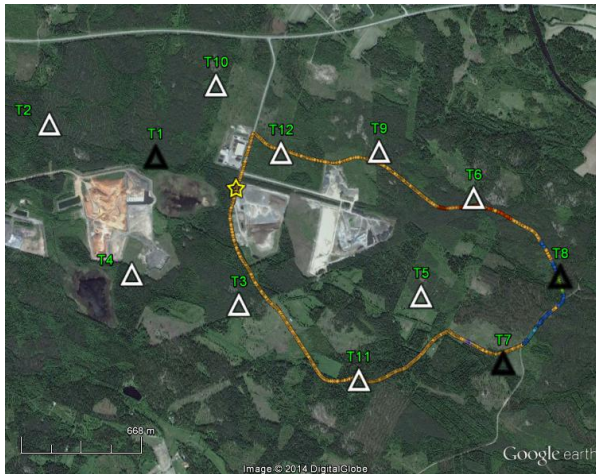
Puheyhteyksiä testattiin GSM- ja UMTS-verkoissa ja datayhteyksiä UMTS- ja LTE-verkoissa. Puheyhteyksien osalta mitattiin epäonnistuneiden puhelujen määrän lisäksi GSM-verkossa RxQ-, MOS- RxLev- ja C/I-arvoja ja UMTS-verkossa vastaavasti CQI-, MOS-, RSCP- ja Ec/No-arvoja. Datayhteyksiä mitattiin UMTS- ja LTE-verkoissa käyttäen ping-, UDP-, TCP/IP- ja HTTP-liikennettä vastaavalla tavalla kuin raportissa "Measuring mobile broadband performance in the UK 4G and 3G network performance" [11]. Mittauksessa keskityttiin tarkastelemaan epäonnistuneiden datayhteyksien määrän lisäksi UMTS-verkossa CQI-, viive-, RSCP- ja Ec/No-arvoja ja LTE-verkossa vastaavasti CQI-, viive-, RSRP- ja RSRQ-arvoja. Mittaukset tehtiin kaikilla kolmella reitillä. Puheyhteyksimittaukset GSM- ja UMTS-verkoissa tehtiin ensimmäisenä mittauspäivänä ja dataliikennemittaukset UMTS- ja LTE-verkoissa kolmantena mittauspäivänä.

Taulukko 5. Puhe- ja datamittauksessa käytetyt raja-arvot.

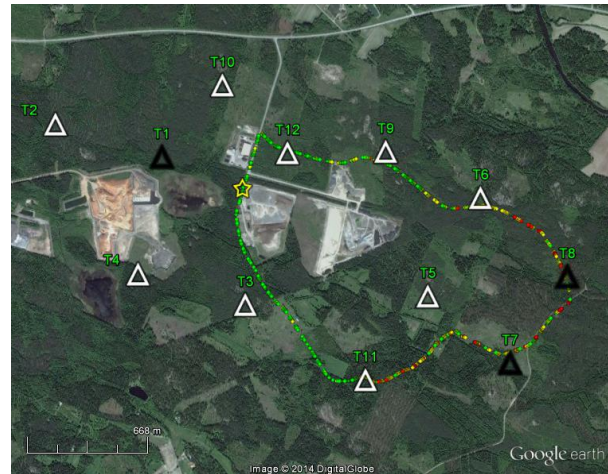
	GSM (RxQ)	UMTS (CQI)	LTE (CQI)
good	0–3	> 16	> 8
average	4–5	11–16	6–8
poor	6–7	0–10	0–5

3.3.3.1 Reitti I: Tuulivoimapuiston sisällä

Puheyhteyden tapauksessa palvelevana tukiasemana toimii pääosin lounaassa oleva tukiasema (Kuva 73). Päätelaitte tekee solunvaihdot kahteen muuhun tukiasemaan lähellä tuulivoimaloita. Reitin länsireunalla (alkupäässä) RxQ-arvot ovat korkeita (Kuva 74). Ne heikkenevät siirryttäessä itään päin. Alhaisempia RxQ-tasoja mitataan tuulivoimaloiden lähellä (punaiset arvot) etenkin tuulipuiston kaakkoisreunalla (punaiset pisteet).

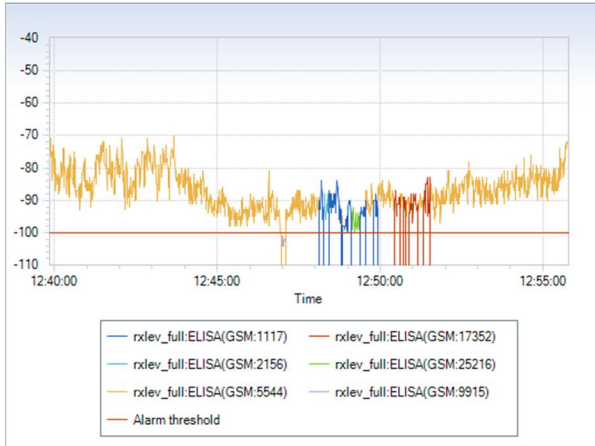


Kuva 73. GSM (Cell-Id).

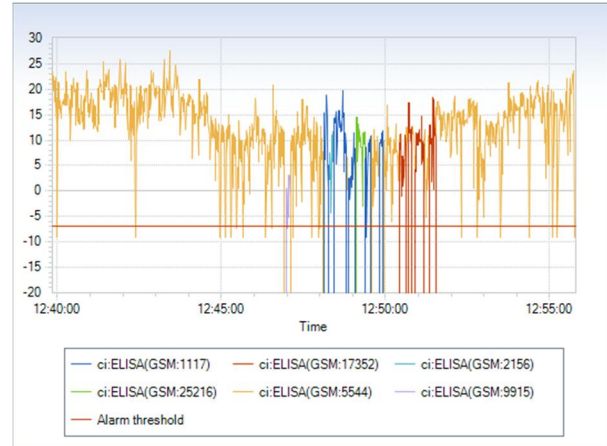


Kuva 74. GSM (RxQ).

Signaalin voimakkuudet vaihtelevat odotetusti (Kuva 75). Huomioitavaa ovat kuopat tuuli-voimaloiden läheisyydessä. Signaalikohinasuhde heikkenee siirryttäessä itään ja tasovaihtelut lisääntyvät. Tämä johtuu siitä, että useampi tuulivoimala on tukiaseman ja päätelaitteen välissä.



Kuva 75. GSM (RxLev).

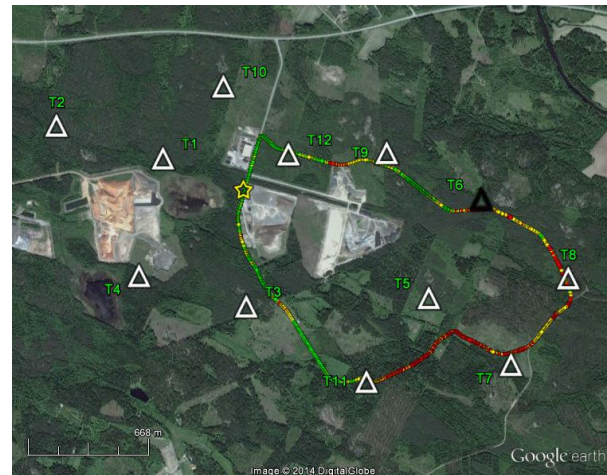


Kuva 76. GSM (C/I).

Seuraavassa kuvassa on esitetty datayhteyden laatu UMTS-verkossa (Kuva 78). Puheyhteyttä mitattiin myös, mutta datayhteys on kriittisempi. Kuten GSM-verkon tapauksessa, palveleva tukiasema sijaitsee luoteessa ja solunvaihtoja tapahtuu vain itä- ja kaakkoisreunalla. Siellä CQI-arvot ovat alhaisia (punainen). Tämä johtuu siitä, että lähestyttäessä kaakkoisreunaa yhä useampi tuulivoimala on tukiaseman ja päätelaitteen välissä ja varjostaa yhteyttä.

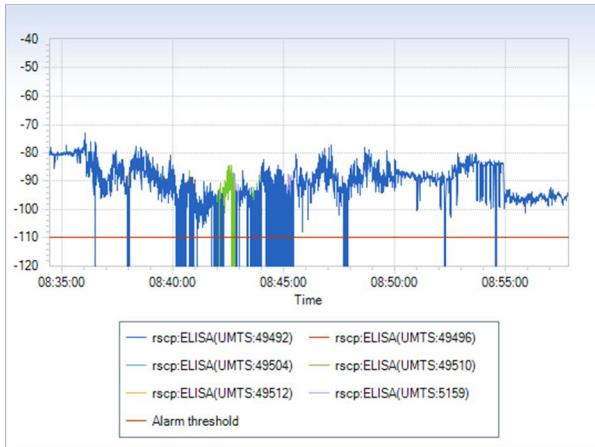


Kuva 77. UMTS (Cell-Id).

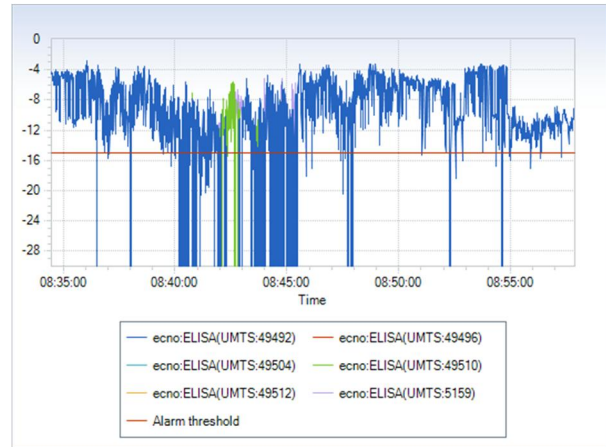


Kuva 78. UMTS (CQI).

RSCP-arvoissa näkyvät tuulivoimaloiden synnyttämät kuopat (Kuva 79). Signaalitaso putoaa selvästi tuulivoimalan T11 jälkeen. Vastaavasti Ec/No-arvot pienenevät ja vaihtelu lisääntyy RSCP-arvojen pudotessa (Kuva 80).



Kuva 79. UMTS (RSCP).



Kuva 80. UMTS (Ec/No).

LTE-verkossa mitattiin vain datayhteyttä. Palveleva solu on sama lähes koko reitin ajan (Kuva 81). Palveleva tukiasema on samassa mastossa kuin palvelevat GSM- ja UMTS-solut. CQI-arvot ovat alhaisia kaakkoisreunalla (Kuva 82). Syy on sama kuin GSM- ja UMTS-verkkojen tapauksessa eli useampi tuulivoimala varjostaa yhteyttä. Solunvaihdot toisiin tukiasemiin tapahtuvat tuulivoimaloiden T7 ja T8 sekä hetkellisesti T9 ja T12 välissä. Jälkimmäisessä kohdassa CQI-arvo ei ehdi muuttua punaiseksi.

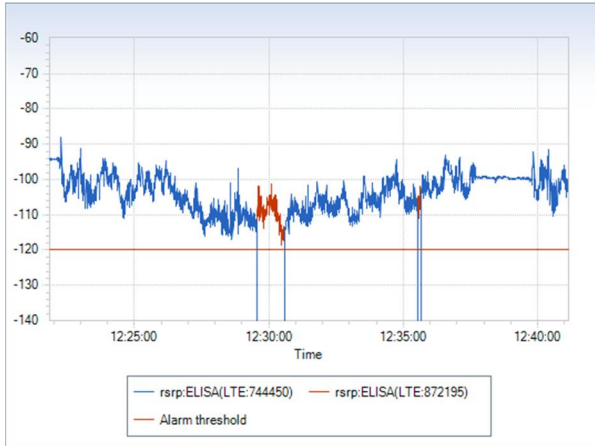


Kuva 81. LTE (Cell-Id).

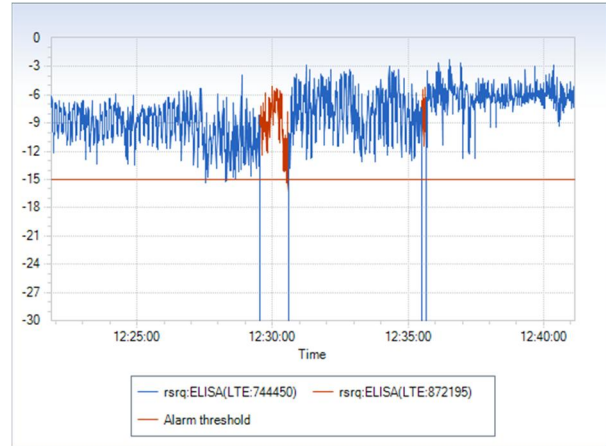


Kuva 82. LTE (CQI).

RSRP-arvojen muutokset noudattelevat GSM- ja UMTS-verkkojen mittaustuloksia (Kuva 83). RSRQ-arvoissa (Kuva 84) näkyy enemmän tasovaihtelua, kun ollaan tuulivoimaloiden T7 ja T8 välissä. Tämä johtaa solunvaihtoon. Reitin pohjoisosassa tasovaihtelut jatkuvat suurina ja lopulta lyhyt solunvaihto tapahtuu tuulivoimaloiden T12 ja T9 välissä.



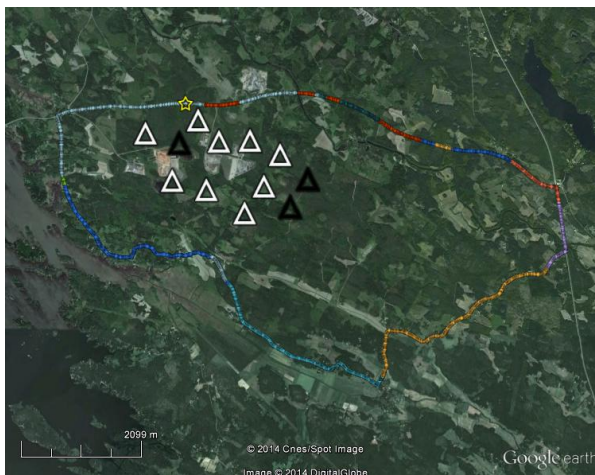
Kuva 83. LTE (RSRP).



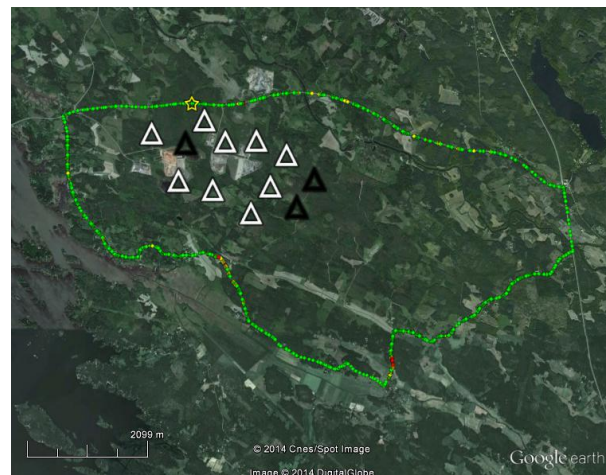
Kuva 84. LTE (RSRQ).

3.3.3.2 Reitti II: Tuulivoimapuiston eteläpuolella

Puheyhteyden mittauksen aikana tapahtui paljon solunvaihtoja mittauksen alussa (tuulipuiston pohjoispuolella). Siellä RxQ-arvot vaihtelivat voimakkaasti ja putosivat hetkittäin alarajan alle. Matalia hetkittäisiä RxQ-tasoja mitattiin myös tuulipuiston eteläpuolella sekä mittausreitit eteläreunalla (Kuva 86). Kohdat näkyvät punaisina kohtina. Muualla RxQ-arvot pysyivät korkeina.

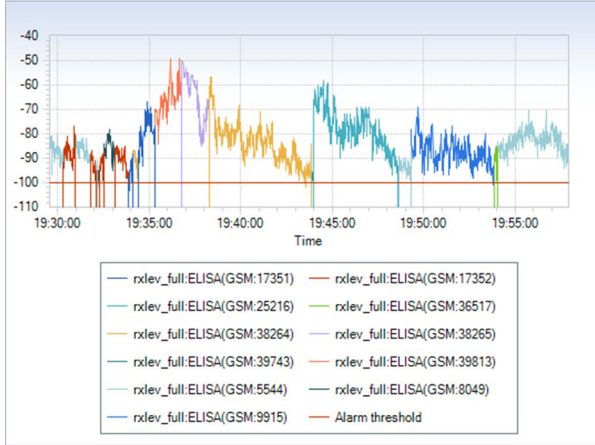


Kuva 85. GSM (Cell-Id).

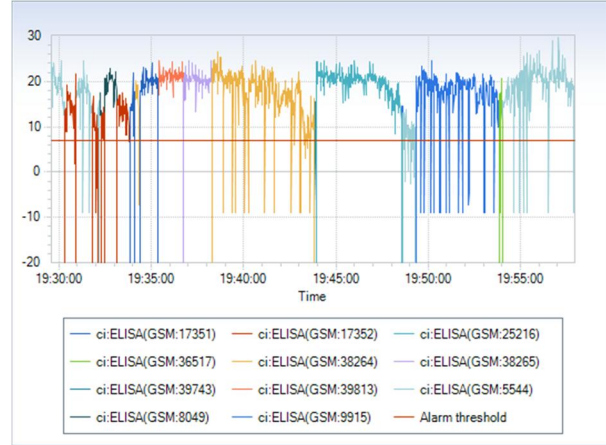


Kuva 86. GSM (RxQ).

Solunvaihtojen tiheys mittauksen alussa oli suuri, kun signaalin voimakkuus oli -85 dBm:n luokkaa (Kuva 87). Kuvasta näkyy hyvin se, kuinka päätelaite pyrkii pysymään mahdollisimman pitkään samassa tukiasemassa. Solunvaihdon jälkeen RxLev-arvot nousevat selvästi. C/I-tasot seuraavat hyvin RxLev-tasoa (Kuva 88). C/I-arvoissa havaitaan tavallista suurempaa vaihtelua kohdissa, joissa mitattiin matalia RxQ-tasoa.

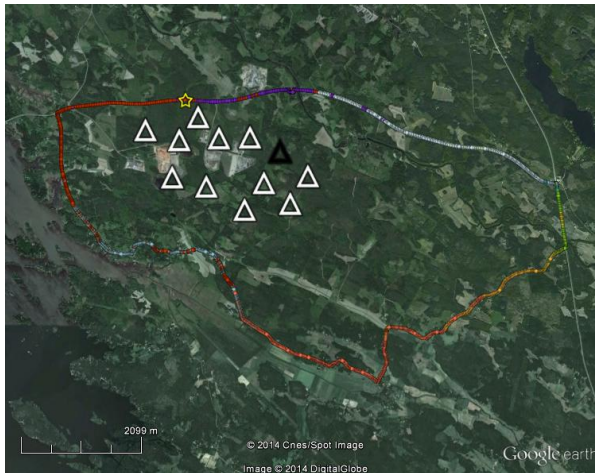


Kuva 87. GSM (RxLev).

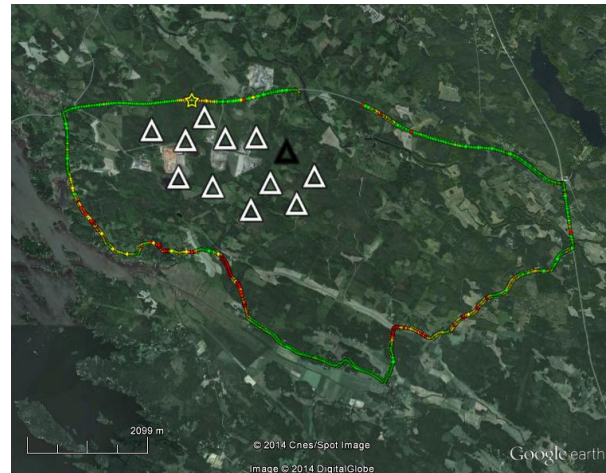


Kuva 88. GSM (C/I).

Datayhteyden aikana UMTS-verkossa tapahtui paljon lyhyitä solunvaihtoja monessa kohtaa reittiä. Alhaisia CQI-arvoja mitattiin kaikilla osuuksilla, mutta pahimmat alueet keskittyivät kaakkois- ja lounaisosiin (punaiset pisteet).

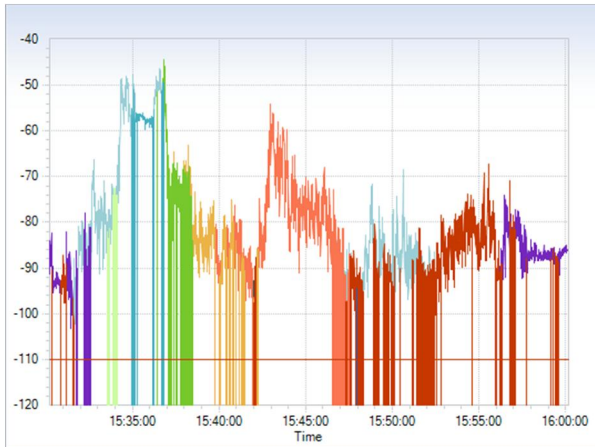


Kuva 89. UMTS (Cell-Id).

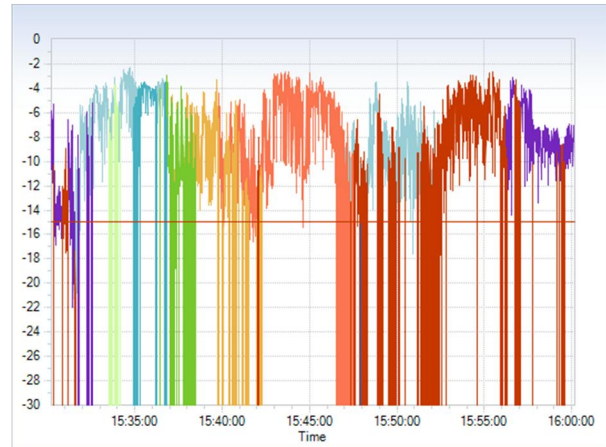


Kuva 90. UMTS (CQI).

RSCP- ja Ec/No-kuvissa näkyy suuri solunvaihtojen määrä (Kuva 91 ja Kuva 92). Solunvaihdot UMTS-verkossa eivät ole niin kriittisiä, mutta huomioitavaa on Ec/No-arvojen nopeat ja suuret vaihtelut. Solunvaihtoja esiintyy etenkin tuulipuiston pohjois- ja eteläpuolella.

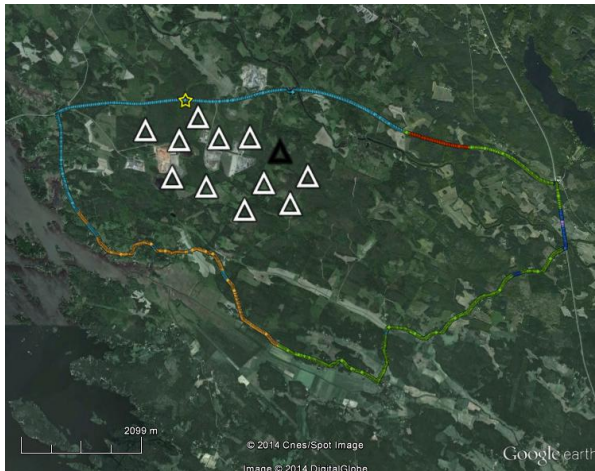


Kuva 91. UMTS (RSCP)¹.

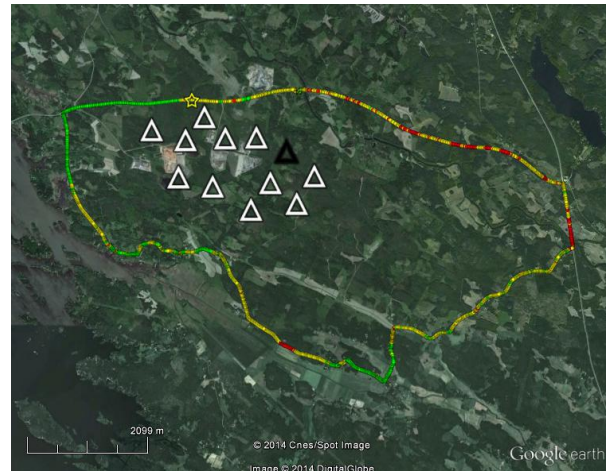


Kuva 92. UMTS (Ec/No)¹.

LTE-verkon osalta solunvaihtoja tapahtui vähemmän – tavallista enemmän ainoastaan tuulipuiston eteläpuolella. Matalia CQI-arvoja mitattiin reitin koillis- sekä eteläreunalla (Kuva 94). Huomioitavaa on se, ettei alhaisia arvoja mitattu tuulipuiston lähellä eikä solunvaihtoja tapahtunut niin paljon kuin GSM- tai UMTS-verkon tapauksissa tuulipuiston etelä- tai pohjoispuolella.



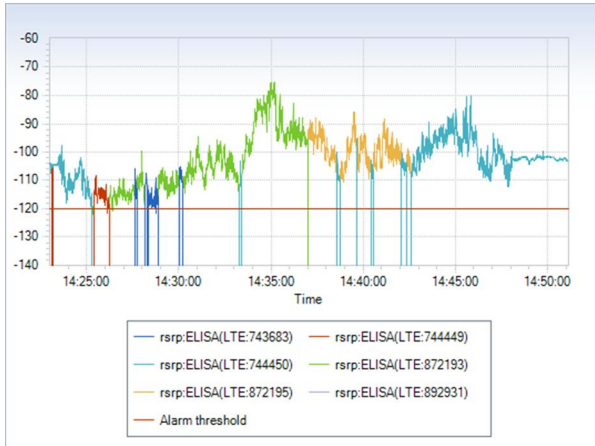
Kuva 93. LTE (Cell-Id).



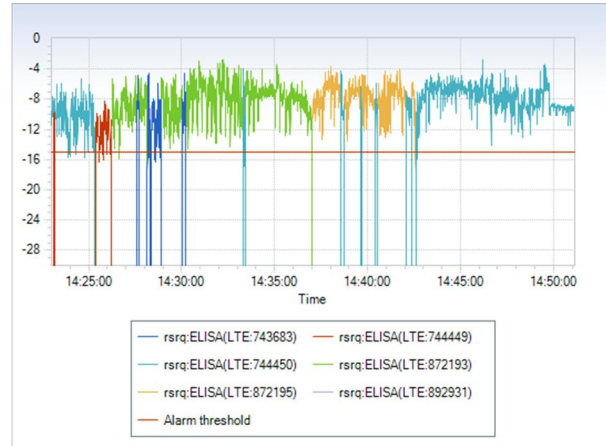
Kuva 94. LTE (CQI).

¹ UMTS-tukiasemien määrä suuri, ei tulosteta solutunnisteita.

RSRP- ja RSRQ-arvot vaihtelivat odotetulla tavalla (Kuva 95 ja Kuva 96). Tavallista enemmän tasovaihtelua esiintyy reitin itäosassa, jossa myös mitattiin alhaisia CQI-tasoja.



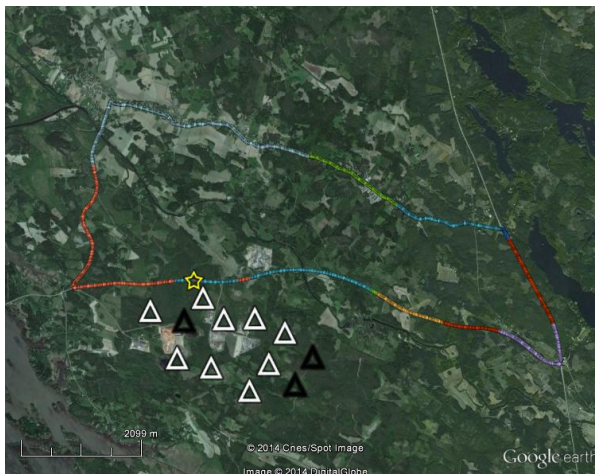
Kuva 95. LTE (RSRP).



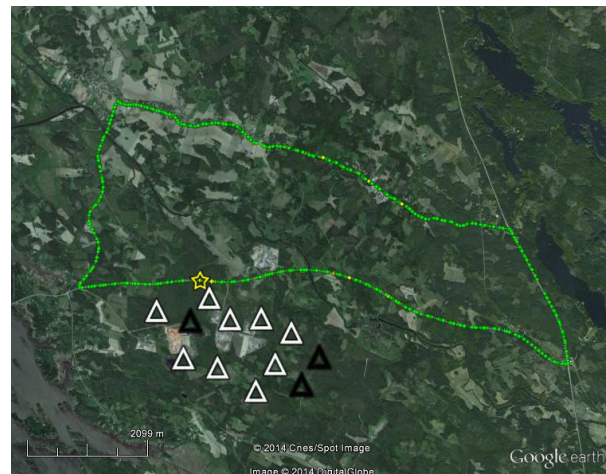
Kuva 96. LTE (RSRQ).

3.3.3.3 Reitti III: Tuulivoimapuiston pohjoispuolella

Puheyhteyden mittauksessa GSM-verkossa solunvaihdot tapahtuivat odotetulla tavalla. Muutama ylimääräinen solunvaihto tapahtui tuulipuiston pohjoispuolella (mittauksen alussa ja lopussa). RxQ-arvot pysyivät korkeina vaikkakin vaihtelua esiintyi enemmän tuulipuiston lähellä.

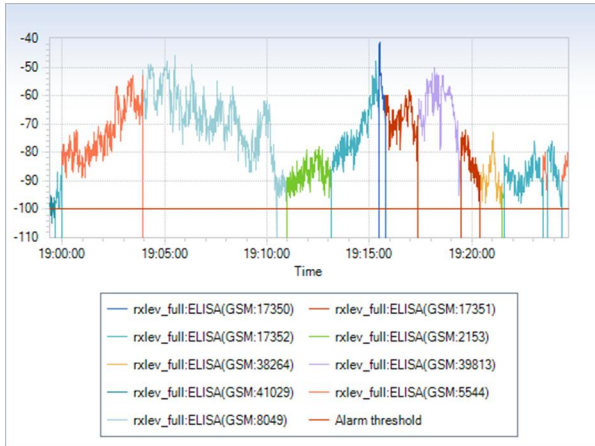


Kuva 97. GSM (Cell-Id).

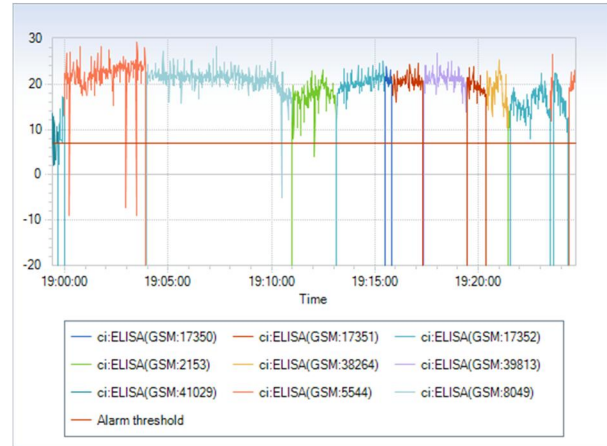


Kuva 98. GSM (RxQ).

RxLev- ja C/I-arvoissa esiintyy vaihtelua, mutta merkittävintä ovat solunvaihdot mittauksen alussa ja lopussa, jolloin ollaan lähellä tuulipuistoa (Kuva 99 ja Kuva 100).

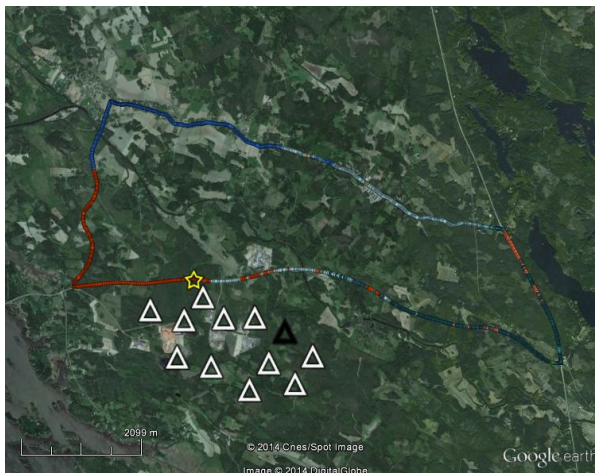


Kuva 99. GSM (RxLev).

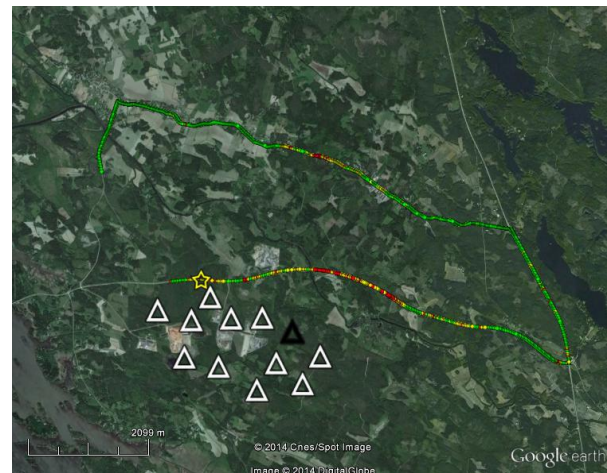


Kuva 100. GSM (C/I).

UMTS-verkon tapauksessa solunvaihtoja tapahtuu eniten reitin pohjoisosassa sekä tuulipuiston pohjoispuolella. Näissä kohdissa CQI-arvot ovat myös alhaisimmat.

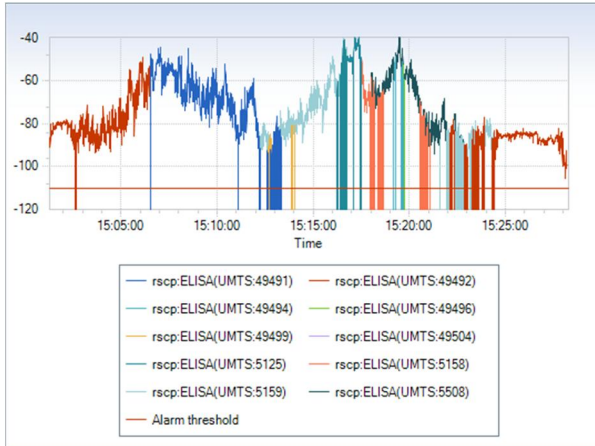


Kuva 101. UMTS (Cell-Id).

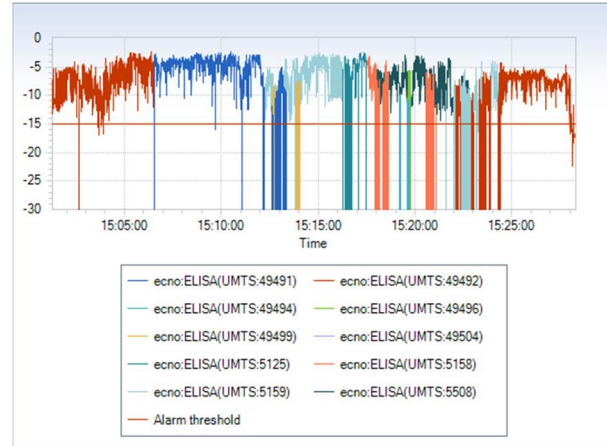


Kuva 102. UMTS (CQI).

Reitin alussa näkyy selvästi tukiasemasektorin vaihto (sininen ja punainen). Mittausreitin loppupuolella tapahtuu solunvaihtoja, kun lähestytään tuulipuistoa idästä. Toinen solunvaihtoalue esiintyy mittauksen puolivälissä, kun ollaan reitin pohjoisosuuden keskellä. Tässä kohdassa signaalin voimakkuus putoaa -90 dBm:n tasolle.

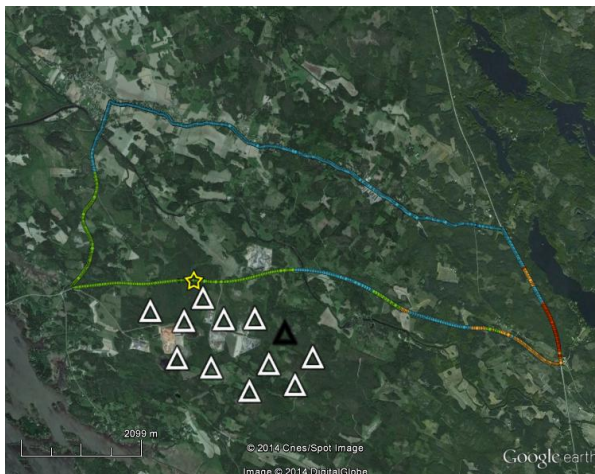


Kuva 103. UMTS (RSCP).

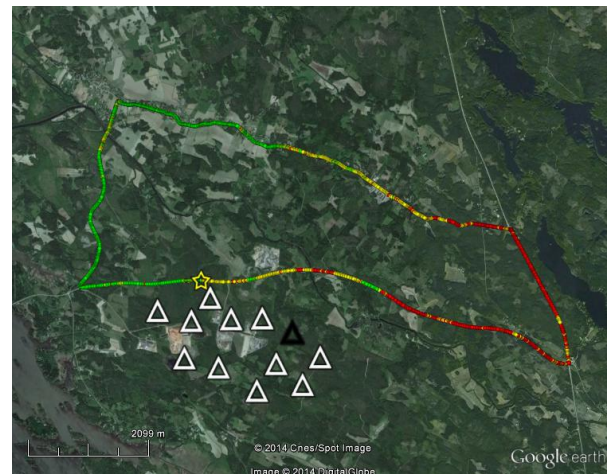


Kuva 104. UMTS (Ec/No).

LTE-verkon tapauksessa näkyy selvästi, että mittauksen alussa palvelevat tukiasemat sijaitsevat samassa mastossa (länsireuna). Lähellä tukiasemaa CQI-tasot ovat korkeita (Kuva 106). Siirryttäessä kohti itää CQI-arvot putoavat. Arvot säilyvät alhaisina aina tuulivoimapuiston reunalle saakka. Mittausreitit itäreunalla palvelevat tukiasemat sijaitsevat kauempana kuin länsireunalla.

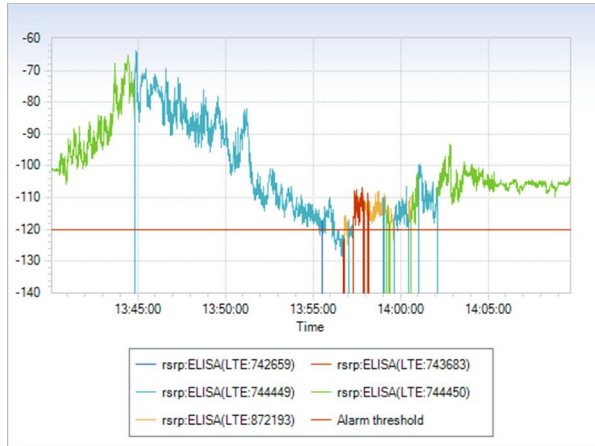


Kuva 105. LTE (Cell-Id).



Kuva 106. LTE (CQI).

Signaalin voimakkuus kasvaa lähestyttäessä palvelevaa tukiasemaa (Kuva 107). Mittauksen alussa RSRQ-arvot vaihtelevat suuresti (Kuva 108). Tasovaihtelut tasoittuvat tukiaseman vaihdon jälkeen. Kun saavutaan lähelle palvelevan tukiaseman reunaa, niin tasovaihtelut RSRQ-arvoissa lisääntyvät. Mittausreitit kaakkoisreunalla tapahtuu useita solunvaihtoja, mutta ne eivät todennäköisesti johdu tuulipuistosta. Lähellä tuulipuistoa RSRQ-arvoissa näkyy kasvanutta tasovaihtelua. Se pienenee selvästi, kun siirrytään tuulipuiston ohi.

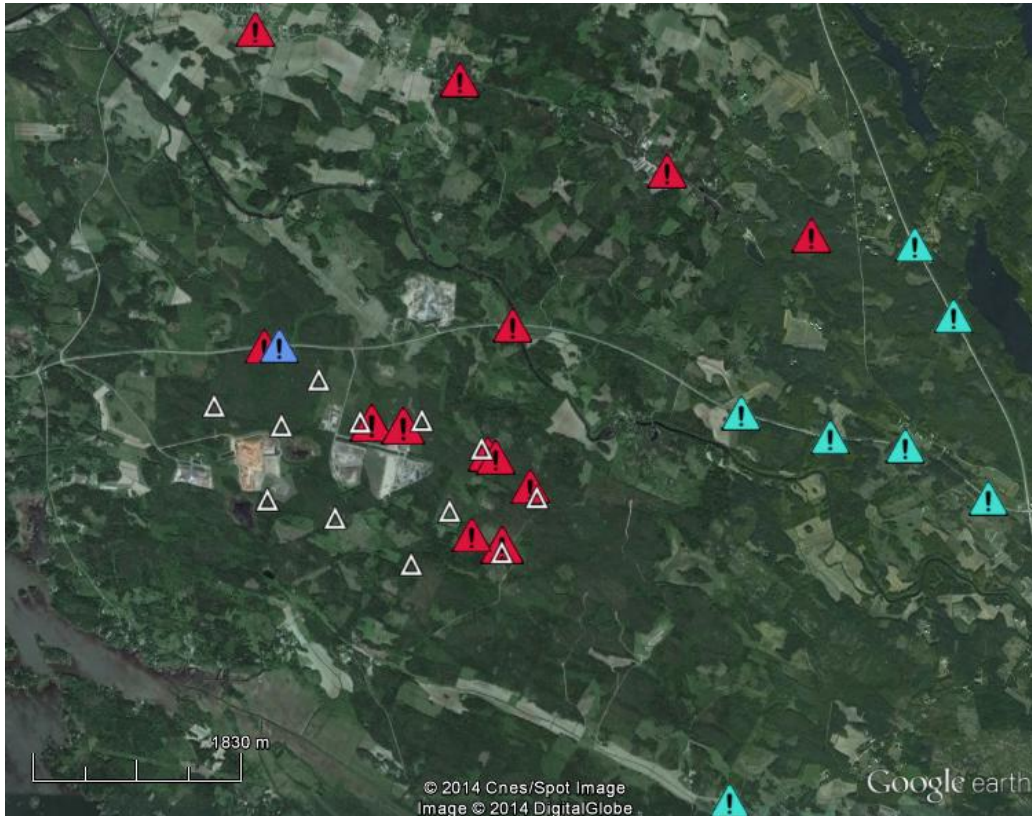


Kuva 107. LTE (RSRP).



Kuva 108. LTE (RSRQ).

Seuraavassa kuvassa on esitetty paikat, joissa data- tai puheyhteys katkesi mittausten aikana. Syynä oli puhelun tai datayhteyden luonnin epäonnistuminen tai yhteyden katkeaminen kesken. Kuvassa vaaleansinisellä on esitetty paikat, joissa GSM-puheyhteys katkesi. Yhteys katkesi vain kerran tuulipuiston pohjoispuolella. UMTS-mittauksissa käytettiin sekä puhe- että datayhteyksiä. Yhteyksien katkeamisia havaittiin eniten sekä tuulipuiston sisällä että sen läheisyydessä. Huomioitavaa on se, että yhteyksikatkoja esiintyi myös reitin III pohjoisella osuudella. LTE-verkossa yhteyden katkeamiset esiintyivät mittausreittien II ja III itäreunalla sekä reitin II eteläosassa, jossa LTE-peitto oli heikko. Tuulipuiston sisällä ei tapahtunut datayhteyksien katkeamisia LTE-verkossa.



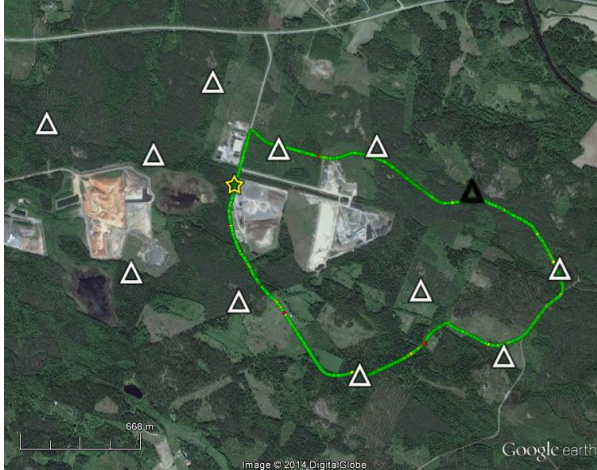
Kuva 109. Data- ja puheyhteyksien katkeamiskohdat.

Tiedonsiirtoon vaikuttavat viiveet. Viivetarkastelu on tehty karkealla tasolla luokittelemalla viiveet alhaiseen (good), keskimääräiseen (average) ja korkeaan (poor). Tarkastelu on tehty käyttäjälähtöisesti eli käytetään samoja raja-arvoja UMTS:in ja LTE:n osalta. Viive-tarkastelussa on huomioitava, että verkon sen hetkinen kuorma vaikuttaa viivearvoihin. Aikaisempien kokemusten perusteella vaikutus on merkittävästi suurempi UMTS-verkoissa.

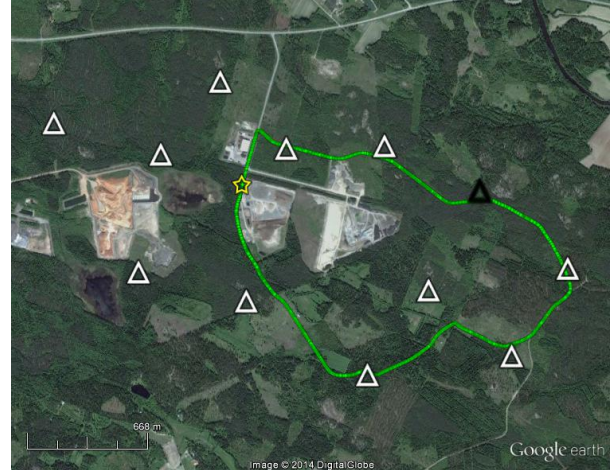
Taulukko 6. Edestakaiselle viiveelle (Round Trip Time, RTT) asetetut raja-arvot

RTT	Raja-arvot
good	0–150 ms
average	150–500 ms
poor	> 500 ms

Alla olevassa kuvassa on esitetty Ping-mittauksen aikana RTT-arvot (Round Trip Time) UMTS- ja LTE-verkossa. Tuulipuiston sisällä on kohtia (tuulivoimaloiden T12 ja T9 sekä T11 ja T15 välissä), joissa viiveet ovat yli puoli sekuntia. Korkeat viiveet esiintyvät kohdissa, joissa tapahtui paljon solunvaihtoja. LTE-verkossa viiveet pysyvät alle 150 ms ja solunvaihtoja oli vähän (Kuva 111).

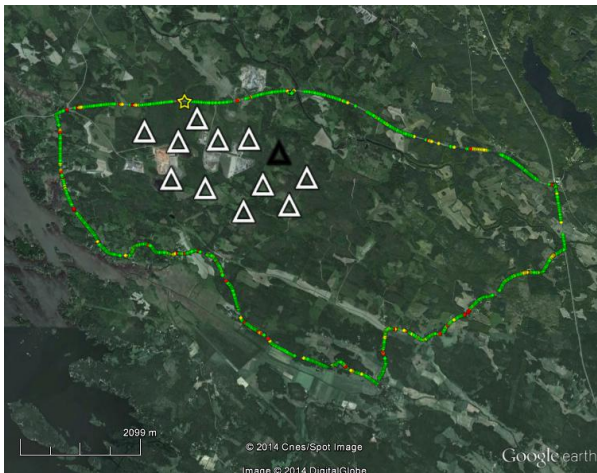


Kuva 110. UMTS (RTT ping).

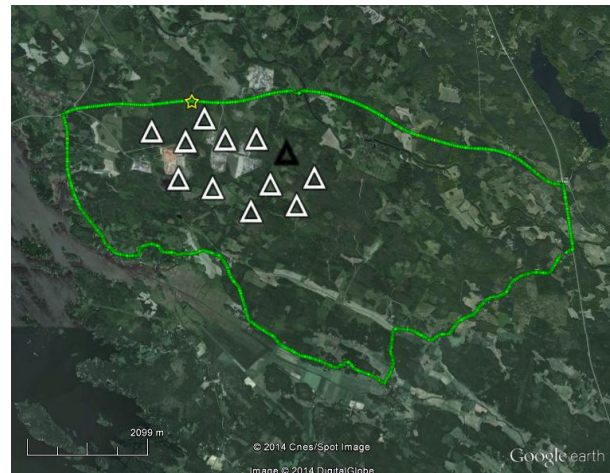


Kuva 111. LTE (RTT ping).

Reitillä II mitattiin yli puolen sekunnin viiveitä UMTS-verkossa reitin kaakkoisosista aina luoteisosiin (Kuva 112). Tuulen suunta oli etelä-kaakosta. Tuulipuiston lähietäisyydellä olevat ongelmakohdat voivat riippua tuulivoimalasta, mutta kaakkoisosien osalta ei ole selvää johtuvatko kasvaneet viiveet tuulipuistosta vai lähiympäristön katveesta. Tuulipuiston läheisyydessä solunvaihtojen määrä lisääntyi UMTS-verkossa. LTE-verkossa viiveet pysyvät alle 150 ms ja solunvaihtoja oli merkittävästi vähemmän (Kuva 113).

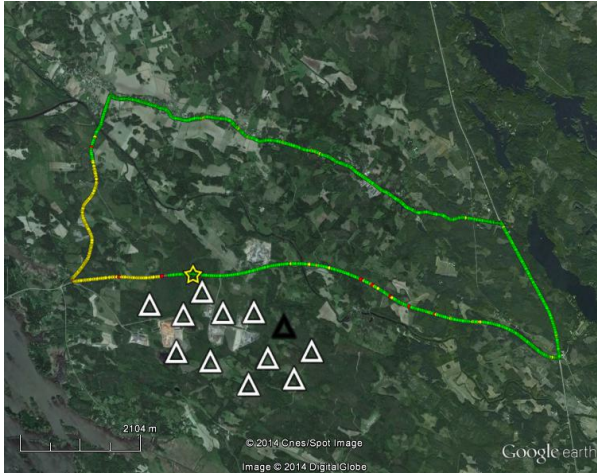


Kuva 112. UMTS (RTT ping).

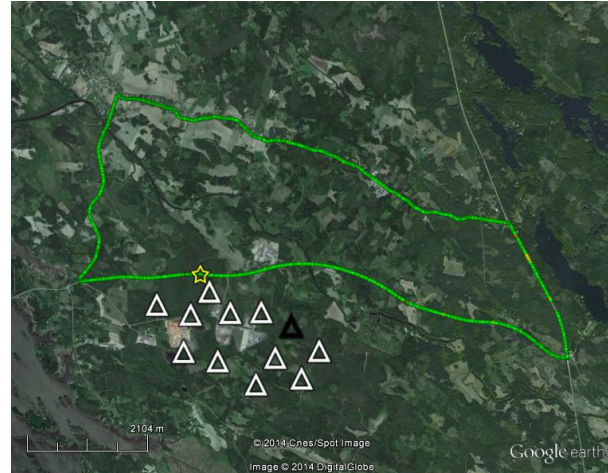


Kuva 113. LTE (RTT ping).

Reitillä III UMTS-verkossa mitattiin yli puolen sekunnin viiveitä reitin eteläosassa (Kuva 114). Idän puoleisissa kohdissa tapahtuu tukiaseman vaihtoja, kun taas länsiosassa ollaan saman (lähellä olevan) tukiaseman peittoalueella. Tukiasemasektorin vaihduttua viivearvot putoavat heti alle 150 ms. Syynä on joko tukiaseman kuormitustilanne tai häiriö päätelaitteen viivemittauksessa. LTE-verkossa viivearvot ovat alhaisia muualla paitsi reitin itäreunalla, jossa mitattiin hetkittäin yli 150 ms viiveitä (Kuva 115). Tällä alueella tapahtuu tavallista enemmän solunvaihtoja.



Kuva 114. UMTS (RTT ping).



Kuva 115. LTE (RTT ping).

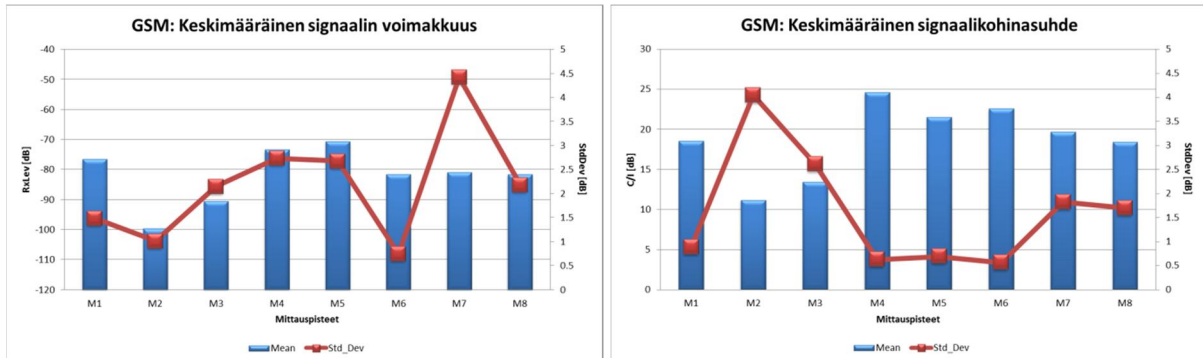
3.3.4 Paikkamittaukset ilman liikennettä

Reittimittausten perustella valittiin kahdeksan paikkamittauspistettä. Kolme niistä oli tuulipuiston sisällä, kaksi tuulipuiston eteläpuolella, kaksi pohjoispuolella ja yksi tuulipuiston läheisyydessä. Tarkastelussa keskityttiin GSM-900-, UMTS-900- ja LTE-800-verkkoihin.

Mittauspisteissä suoritettiin 15 min mittaus, josta otettiin 5 min otos jatkokäsittelyyn. Mittausten avulla pyrittiin selvittämään tuulipuiston aiheuttamia muutoksia radiokanavassa. Erityisesti oltiin kiinnostuneita periodisista muutoksista, jotka mahdollisesti aiheutuisivat tuulivoimaloiden lapojen liikkeistä. Tuulivoimaloiden pyörimisnopeus ja suunta vaihteli. Ilman liikennettä ja puheyhteyksimittausten aikana tuulen suunta oli lounaasta etelään ja tuulivoimaloiden lapojen pyörähdysaika oli välillä 5–10 s. Datayhteyksimittausten aikana tuulen suunta oli idästä kaakkoon ja tuulivoimaloiden lapojen pyörähdysaika 8–10 s.

3.3.4.1 Keskiarvo ja keskihajonta

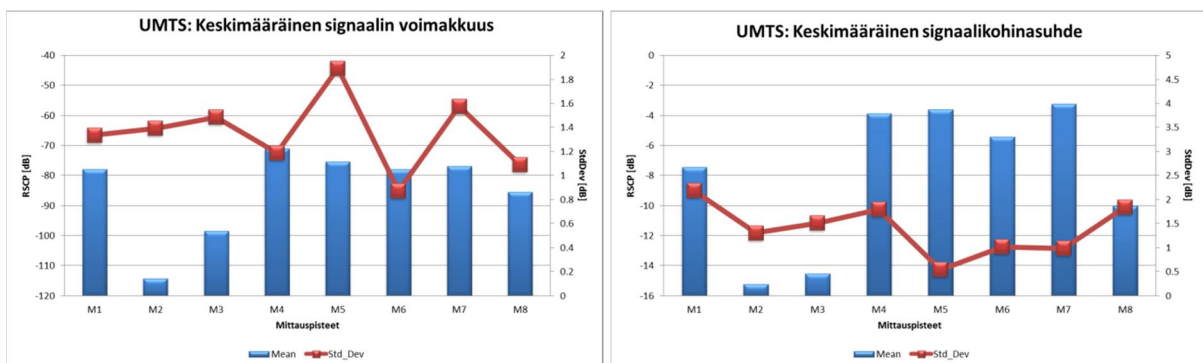
Keskimääräiset GSM-signaalin voimakkuudet ja keskihajonnat eri mittauspisteissä on esitetty alla (Kuva 116). Alhaisimmat RxLev-tasot mitattiin tuulipuiston sisällä pisteissä M2 ja M3 ja vastaavasti korkeimmat pisteissä M4 ja M5. Keskihajonta oli suurin pisteessä M7 ja pienin pisteessä M6. Keskihajonnat tuulipuiston sisällä olivat keskitasoa alhaisemmat. Signaali-kohinasuhde noudatteli RxLev-arvoja. Pisteissä M4 ja M6 arvot olivat aavistuksen muita mittauspisteitä korkeampia. Pienimmät keskimääräiset C/I-tasot mitattiin tuulipuiston sisällä pisteissä M2 ja M3, missä signaalin voimakkuus oli myös alhaisin. Tuulipuiston ulkopuolella signaali-kohinasuhde oli alhaisin pisteessä M8. Keskihajonta oli vastaavasti suurin pisteissä, missä signaalitasot olivat matalia eli kohinasignaali lisäsi C/I-arvojen hajontaa.



Kuva 116. GSM-verkon keskimääräinen signaalin voimakkuus, signaalikohinasuhde ja keskihajonnat eri paikkamittauspisteissä.

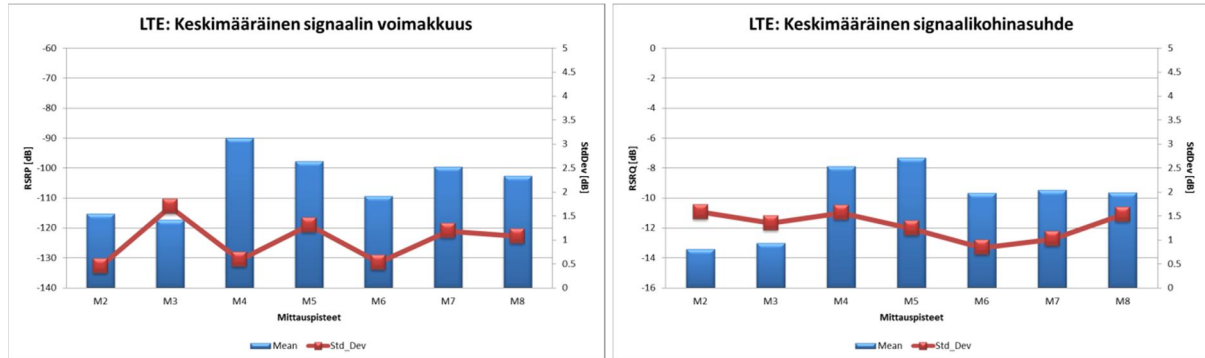
UMTS-verkossa alhaisin keskimääräinen signaalin voimakkuus mitattiin tuulipuiston sisällä pisteissä M2 ja M3 ja korkeimmat tuulipuiston ulkopuolella pisteissä M4 ja M5 (Kuva 117). Pisteessä M8 keskimääräinen signaalin voimakkuus oli muita tuulipuiston mittauspisteitä selvästi alhaisempi. Keskihajonta oli suurin pisteessä M5 ja M7. Keskihajonta pisteissä M2 ja M3 oli suuri suhteessa keskimääräisiin signaalin voimakkuuksiin.

Keskimääräinen signaalikohinasuhde seurasi mitattuja keskimääräisiä signaalitasoja. Alhaisimmat tasot mitattiin pisteissä M2 ja M3 ja puiston läheisyydessä pisteessä M8. Keskihajonnat olivat suurimmat pisteissä M1, M4 ja M8. Pisteissä M2 ja M3 keskimääräinen hajonta oli suuri suhteessa keskimääräisiin RSCP-tasoihin.



Kuva 117. UMTS-verkon keskimääräinen signaalin voimakkuus, signaalikohinasuhde ja keskihajonnat eri paikkamittauspisteissä.

LTE-verkossa signaalitasovaihtelut olivat pienempiä kuin UMTS-verkon tapauksessa. Alhaisimmat keskimääräiset RSRP-arvot mitattiin tuulipuiston sisällä pisteissä M2 ja M3 (Kuva 118). Signaalin voimakkuuden keskihajonta oli suhteellisesti suurin pisteessä M3. Signaalikohinasuhteet noudattelivat signaalin voimakkuusarvoja. Suhteellinen signaalikohinasuhteen keskihajonta oli suurin pisteissä M2 ja M3.

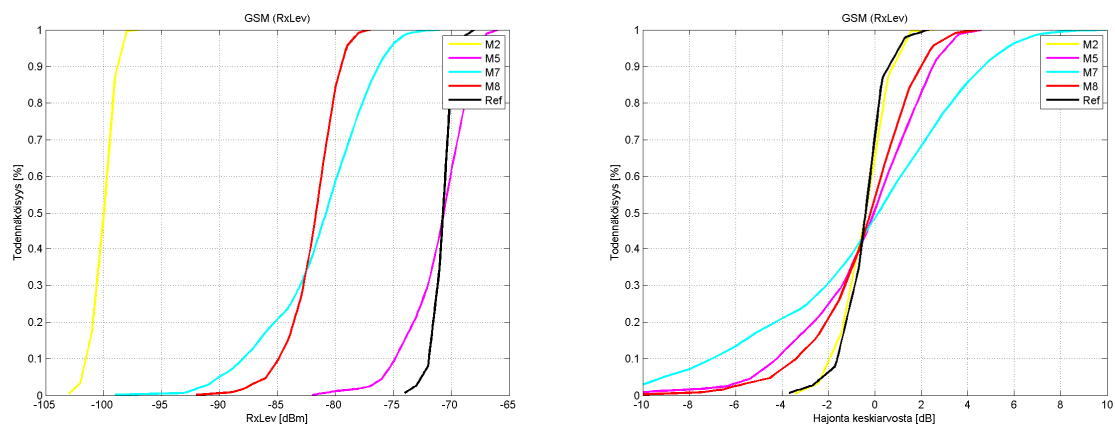


Kuva 118. LTE-verkon keskimääräinen signaalin voimakkuus, signaalikohinasuhde ja keskihajonnat eri paikkamittauspisteissä.

Keskiarvo- ja hajontatarkastelu osoitti, että tuulipuiston sisällä mitattiin alhaisempia signaalin voimakkuus- ja signaalikohinasuhtearvoja. Tämä viittaa tuulivoimaloiden varjostusvaikutukseen. Tuulipuiston sisällä myös keskimääräinen keskihajonta suhteessa signaalin voimakkuuteen oli suurin. Merkittävimmät eroavaisuudet havaittiin GSM- ja UMTS-verkoissa. Signaalikohinasuhde noudatteli signaalin voimakkuutta, joten kohinatekijä ei ollut dominoiva.

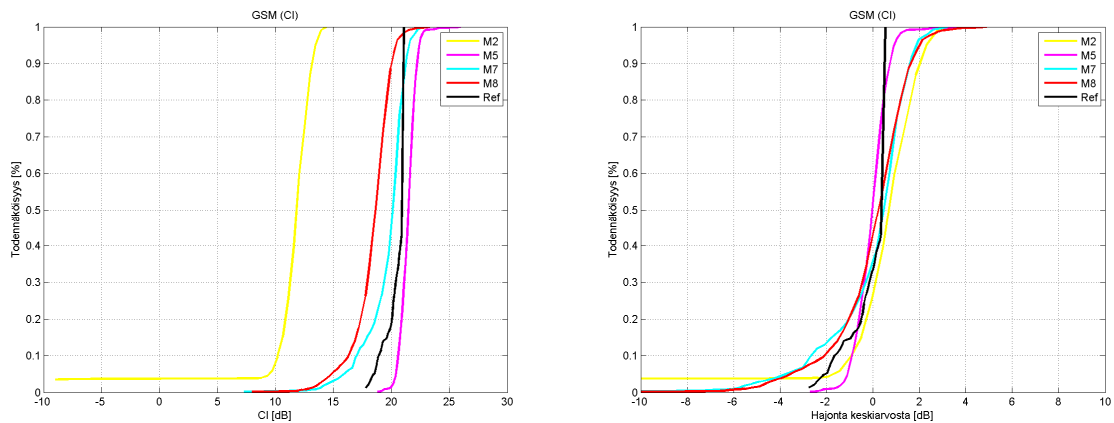
3.3.4.2 Kumulatiivinen kertymäfunktio

Seuraavaksi tarkasteltiin kumulatiivisia RxLev- (Kuva 119) ja C/I-käyriä (Kuva 120). Esitystapa on sama kuin vastaavassa Englannissa tehdyssä AEGIS:sin and ERA technology:n mittauksessa, jossa asiakkaana oli Ofcom [13]. Käyriä verrattiin referenssimittaukseen (musta viiva), joka oli tehty kaukana tuulivoimapuistosta. Vasemmalla on esitetty absoluuttiset arvot ja oikealla suhteelliset arvot keskiarvoon nähden. Tarkastelu tehtiin mittauspisteissä M2 (tuulipuiston sisällä), M5 (kaukana tuulipuistosta), M7 (kaukana tuulipuistosta) ja M8 (tuulipuiston lähietäisyydellä). Tuulipuiston sisällä mitattiin alhaisempia arvoja, mutta siellä käyräprofiili (kulmakerroin) vastasi hyvin referenssimittaukselta. Suurimmat vaihtelut havaittiin pisteen M7 tuloksissa.



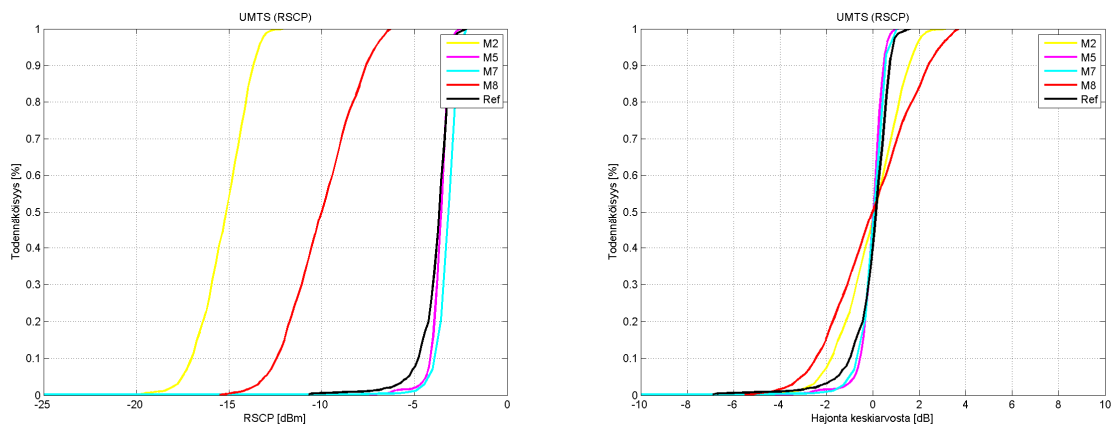
Kuva 119. GSM-verkon RxLev-arvot kumulatiivisina kertymäfunktiona.

C/I-arvoissa alhaisimmat tasot mitattiin pisteessä M2 (Kuva 120). Siellä myös poikkeama referenssitapauksesta oli suurin (pienempi kulmakerroin).



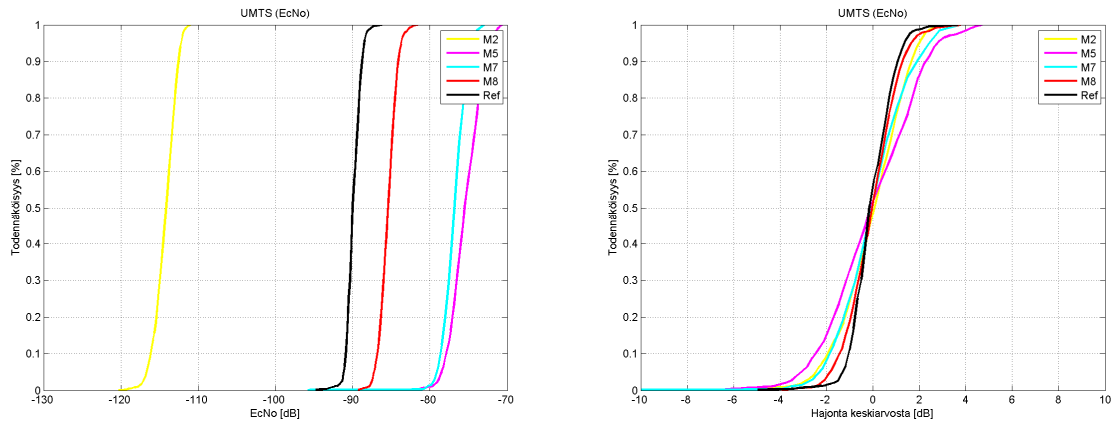
Kuva 120. GSM-verkon C/I-arvot kumulatiivisina kertymäfunktioina.

UMTS-verkossa alhaisimmat signaalitasot mitattiin pisteissä M2 ja M8 (Kuva 121). Näissä pisteissä keskihajonta poikkeaa eniten referenssitapauksesta. Pisteet M7 ja M5 noudattelevat hyvin referenssitapausta.



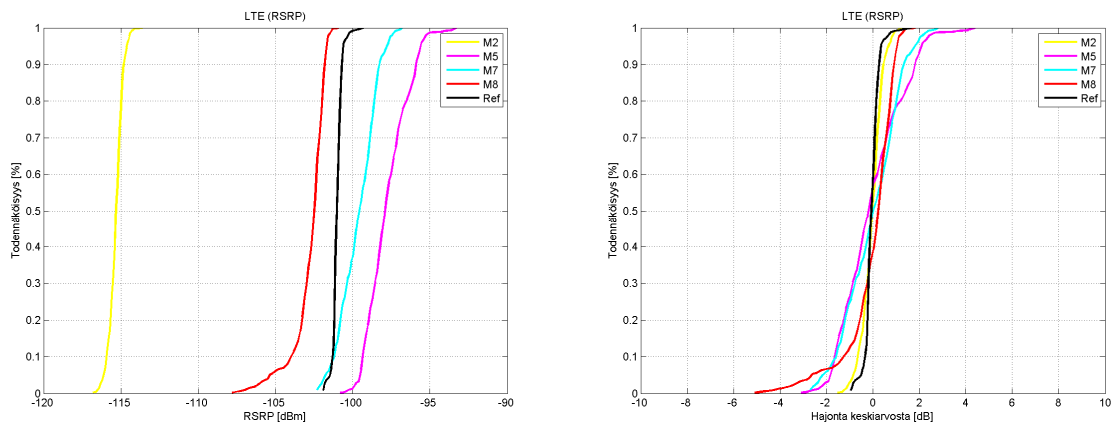
Kuva 121. UMTS-verkon RSCP-arvot kumulatiivisina kertymäfunktioina.

Ec/No-arvojen välillä on merkittäviä tasoeroja (Kuva 122). Mittauspisteessä M2 mitattiin muita selkeästi alhaisempia Ec/No-tasoja. Mittauspisteissä M5 ja M7 suhteellinen Ec/No-hajonta poikkeaa eniten referenssitapauksesta.



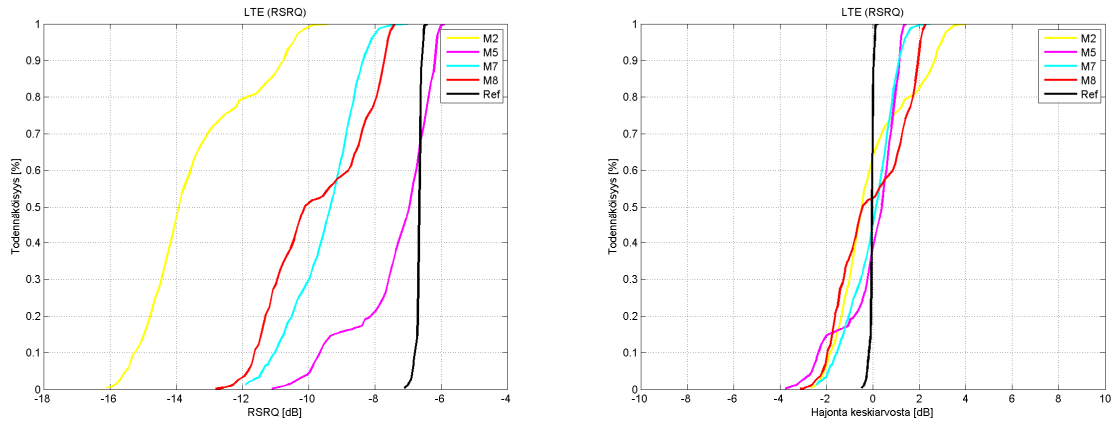
Kuva 122. UMTS-verkon Ec/No-arvot kumulatiivisina kertymäfunktioina.

Myös LTE-verkon osalta mittauspisteiden väliset tasoerot ovat suuria. Suhteellinen RSRP-hajonta on suurinta mittauspisteissä M5 ja M7, missä mitattiin myös korkeimmat signaalin voimakkuudet (Kuva 123). Referenssipisteessä RSRP-arvo ja keskimääräinen hajonta pysyivät lähes vakiona. Pisteessä M2 hajontaprofiili on hyvin lähellä referenssiä. Muissa mittauspisteissä vaihtelua esiintyi enemmän.



Kuva 123. LTE-verkon RSRP-arvot kumulatiivisina kertymäfunktioina.

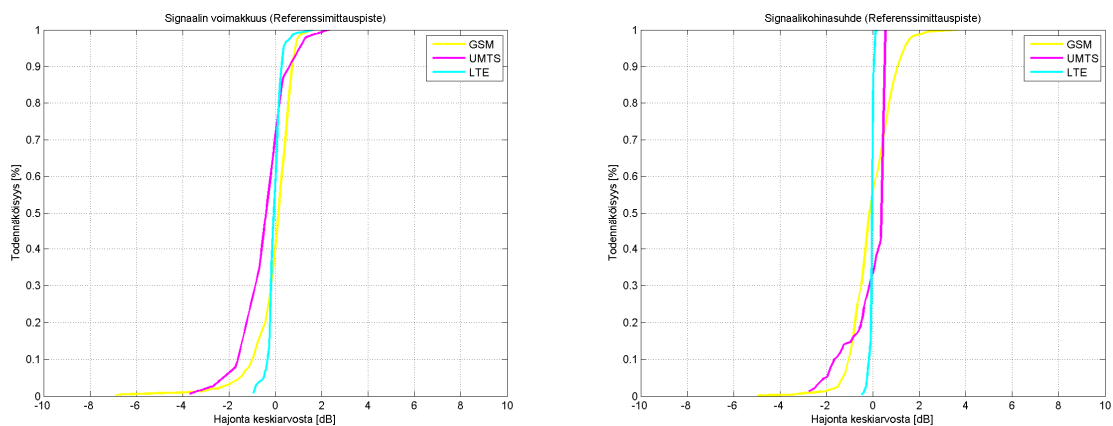
RSRQ-arvoissa poikkeamat referenssimittaukseen nähden olivat RSRP-arvoja suurempia (Kuva 124). Suurimmat erot näkyivät pisteissä M2 (tuulipuiston sisällä) ja M8 (lähellä tuulipuistoa). Huomioitavaa on se, että vain M7:ssä hajontaprofiili on tasaisesti jakaantunut kuten referenssitapauksessa. Muissa pisteissä näkyy arvojen epätasaista jakautumista: -13 dB (M5), -10 dB (M8) ja -8 dB (M2). Vastaavasti hajontaprofiilissa sama ilmiö näkyy poikkeamana keskiarvosta kohdissa -2 dB (M5), -0,25 dB (M8) ja 0,5 dB (M2).



Kuva 124. LTE-verkon RSRQ-arvot kumulatiivisina kertymäfunktioina.

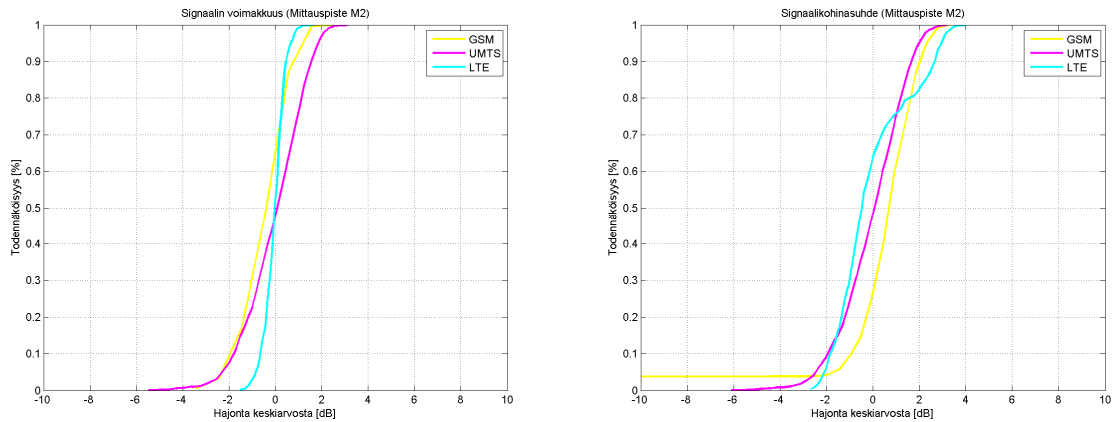
Tarkastelu osoitti, että signaalin voimakkuuden osalta absoluuttiset arvot ovat alhaisimmat tuulipuiston sisällä viitaten tuulivoimaloiden aiheuttamaan katveeseen. Referenssisignaaliin nähden keskihajonta signaalin voimakkuuden keskiarvoon kasvoi jokaisessa mittauspisteessä. Tuulipuiston sisällä tasovaihtelu ei kuitenkaan ollut suurempaa kuin tuulipuiston ulkopuolella, oikeastaan päinvastoin. Tuloksista voidaan päätellä, että periodinen häiriö ja monitie-eteneminen vaikuttavat enemmän tuulipuiston ulkopuolella. Tämä selittyy sillä, että siipien sirontavaikutus on alhaisempi, kun ollaan lähellä tuulivoimalaa.

Lopuksi suoritettiin vielä samoissa paikoissa eri järjestelmien välinen vertailu. Vertailussa käytettiin keskimääräistä hajontaa signaalin voimakkuuden ja signaalikohinasuhteen osalta. Vertailukohtena oli referenssimittaus, jonka verkkokohtaiset profiilit on esitetty alla (Kuva 125). Signaalin voimakkuuden hajonnat jakaantuvat välille -4 ja 2 dB keskiarvon ympärille ja signaalikohinasuhde vastaavasti välille -3 ja 2 dB.



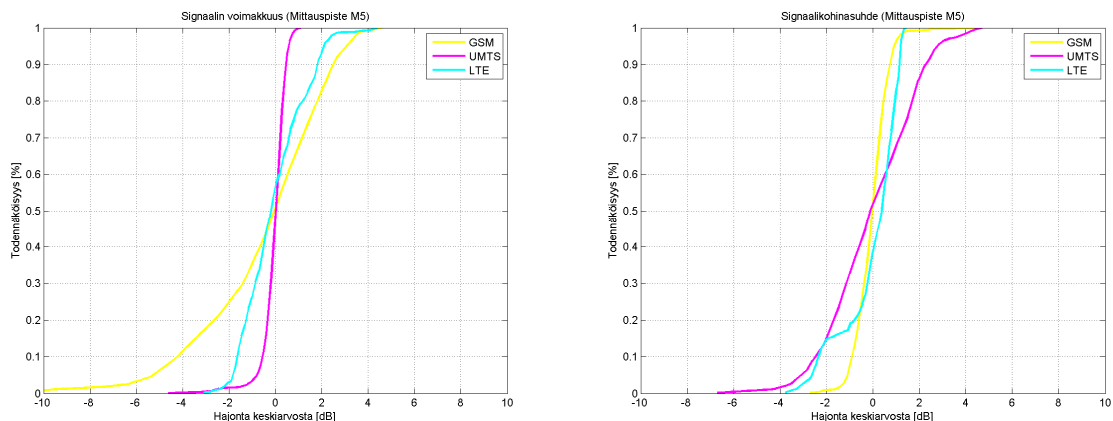
Kuva 125. Eri järjestelmien vertailu referenssimittauspisteessä.

Mittauspisteessä M2 jakauma laajenee kaikkien järjestelmien osalta (Kuva 126). GSM-arvoissa vaihtelu kasvoi eniten signaalin voimakkuuden osalta ja vastaavasti LTE- ja UMTS-arvoissa signaalikohinasuhteen osalta.



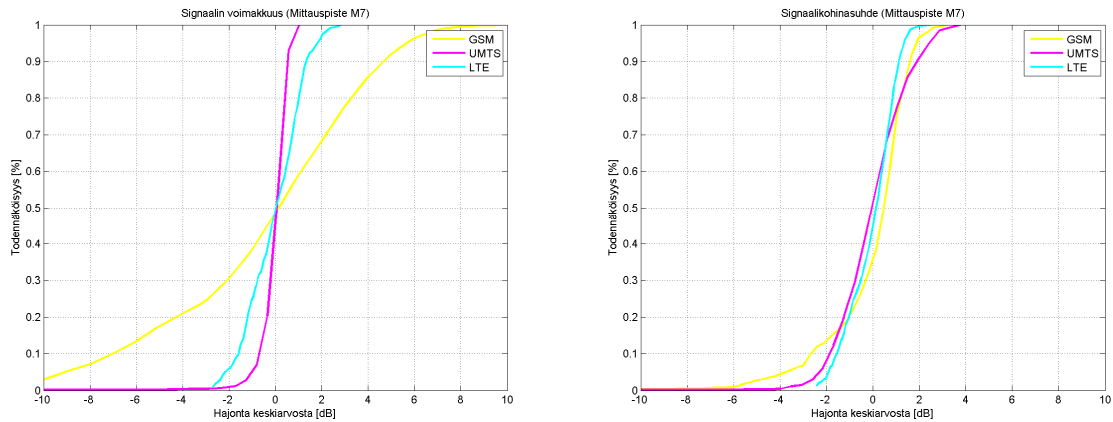
Kuva 126. Eri järjestelmien vertailu mittauspisteessä M2.

Mittauspisteessä M5 signaalin voimakkuusarvoissa hajonta on suurinta GSM- ja LTE-verkoissa referenssitapaukseen nähden (Kuva 127). Vastaavasti signaalikohinasuhteen osalta suurin vaihtelu oli UMTS-arvoissa. LTE-verkossa on myös selvästi referenssitapausta enemmän vaihtelua.



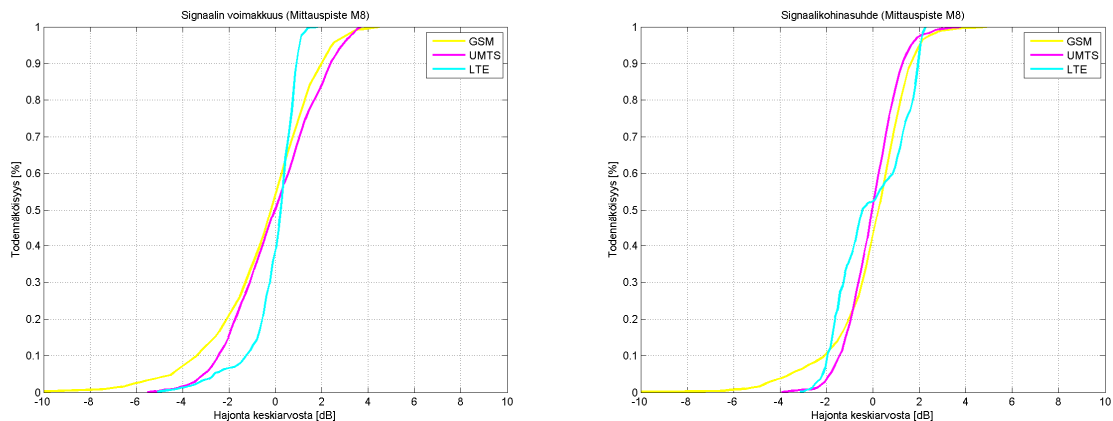
Kuva 127. Eri järjestelmien vertailu mittauspisteessä M5.

Mittauspisteessä M7 vaihtelut signaalin voimakkuudessa kasvavat GSM-verkossa (Kuva 128). LTE-verkossa näkyy myös vaihtelun kasvu. Kaikille järjestelmille on ominaista signaalikohinasuhdevaihtelun kasvaminen.



Kuva 128. Eri järjestelmien vertailu mittauspisteessä M7.

Mittauspisteessä M8 signaalin tasovaihtelut pienenevät GSM- ja LTE-verkon osalta, kun taas UMTS-verkossa ne kasvavat (Kuva 129). Signaalikohinasuhteissa nähdään edelleen kaikissa verkoissa hajonnan kasvaminen.



Kuva 129. Eri järjestelmien vertailu mittauspisteessä M8.

Järjestelmien vertailu ei tuonut lisävalaistusta mahdollisiin järjestelmien välisiin eroihin. Kapeakaistainen GSM-verkko ja laajakaistaiset UMTS- ja LTE-verkot käyttäytyivät samalla tavalla. Signaalin voimakkuuden ja signaalikohinasuhteen hajonnan laajentuminen oli ominaista kaikille järjestelmille.

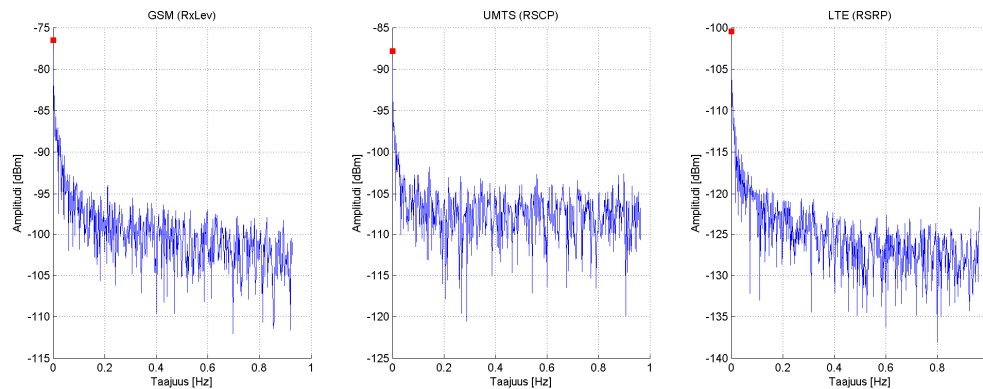
3.3.4.3 Taajuustasotarkastelu

Seuraavaksi tarkasteltiin mittaustuloksia taajuustasossa. Tuloksista etsittiin noin 0,2–1,5 Hz:n alueella esiintyviä häiriösignaaleja, jotka voisivat johtua tuulivoimaloiden lapojen pyörimisestä ja monitie-etenemisestä. Haasteena oli se, että mittaustuloksissa näkyivät kaikkien tuulivoimaloiden vaikutukset. Tuulivoimaloiden asento mittauspisteeseen nähden sekä lapojen pyörimisnopeus vaihtelivat mittausten aikana.

Nemo-järjestelmän näytteenottotaajuus riippuu siitä, miten usein verkko pyytää mittausraportteja. Mittaustiedostoissa näytteiden aikaleimat vaihtelivat jonkin verran. Tästä syystä FFT-muunnoksessa käytetty näytteistysaika laskettiin mittauksen alku- ja päättymisajan sekä näytteiden määrän avulla. Tarkastelu tehtiin sekä signaalin voimakkuuksilla että signaali-

kohinasuhteilla. Tulokset olivat hyvin samankaltaiset, joten tässä on esitetty vain tulokset signaalin voimakkuuksien osalta.

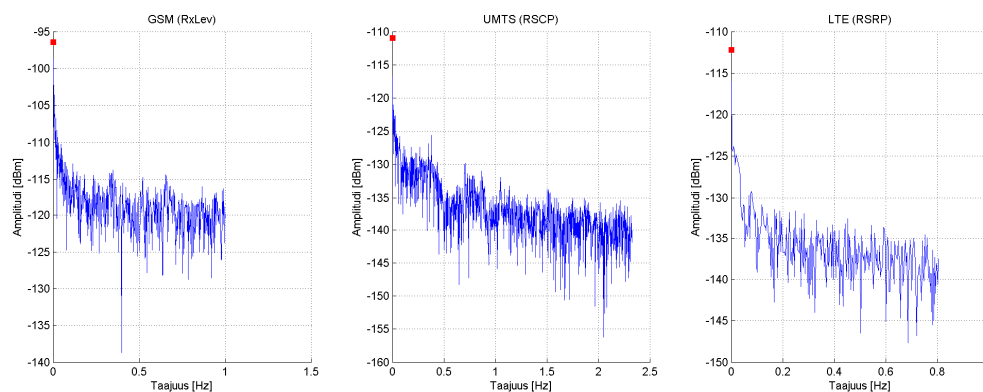
Alla olevassa kuvassa (Kuva 130) on esitetty referenssitapauksessa GSM-, UMTS- ja LTE-tulokset taajuustasossa. Keskimääräinen raportointiaika referenssitapauksessa oli 540 ms GSM-verkossa ja 520 ms UMTS- ja LTE-verkoissa. Tästä syystä seuraavissa kuvissa tarkastelu rajoittuu noin 1 Hz:n alueelle. DC-komponentti vastaa signaalin keskimääräistä voimakkuutta. GSM- ja UMTS-verkoissa se oli noin 15 dB ja LTE-verkossa noin 20 dB korkeampi kuin muut signaalikomponentit taajuustasossa.



Kuva 130. Referenssimittauspisteessä mitatut signaalin voimakkuudet taajuustasossa.

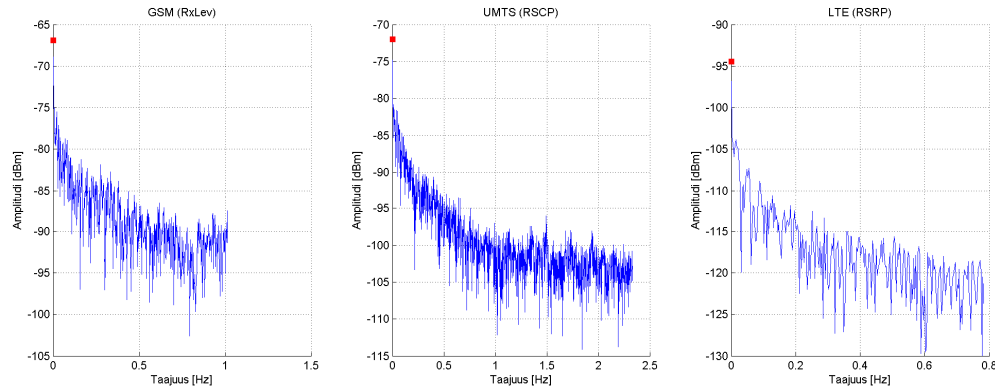
Porin Peittoon alueella keskimääräinen raportointiaika poikkesi referenssitapauksesta: GSM-verkossa 500 ms, UMTS-verkossa 218 ms ja LTE-verkossa 622 ms. Käytännössä testi-alueella UMTS-verkon näytteistystaajuus oli puolet suurempi, mikä mahdollistaa taajuusalueen laajentamisen aina 2 Hz:iin saakka. Mittauspaikkojen M2, M5, M7 ja M8 tuloksia verrattiin tähän referenssitapaukseen.

Mittauspisteessä M2 näkyy taajuustasossa matalahkoja piikkejä 0,4 Hz ja 0,6 Hz taajuuksilla (Kuva 131). UMTS- ja LTE-tuloksissa lähellä 0-taajuutta olevat signaalikomponentit ovat voimakkaampia. Ero DC-komponenttiin on kuitenkin samaa luokkaa kuin referenssituloksissa, joten merkittävää haittaa ei muista signaalikomponenteista ole.



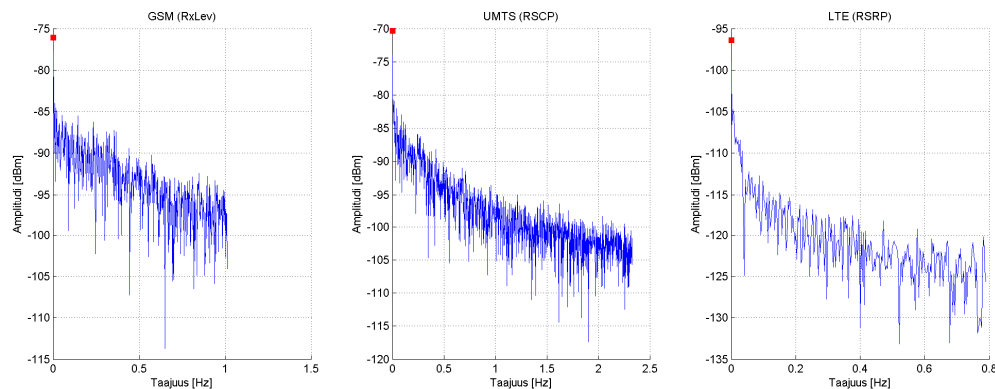
Kuva 131. Mittauspisteessä M2 mitatut signaalin voimakkuudet taajuustasossa.

Mittauspiste M5 oli tuulipuiston ulkopuolella. DC-komponentti on korkeampi kuin M2 tapauksessa (Kuva 132). Vastaavasti referenssitapaukseen verrattuna tapahtuu enemmän aaltoilua ja signaalikomponentit ovat suhteellisesti voimakkaampia aina 0,5 Hz:iin asti. Vastaava ilmiö näkyy kaikkien verkkojen tuloksissa.



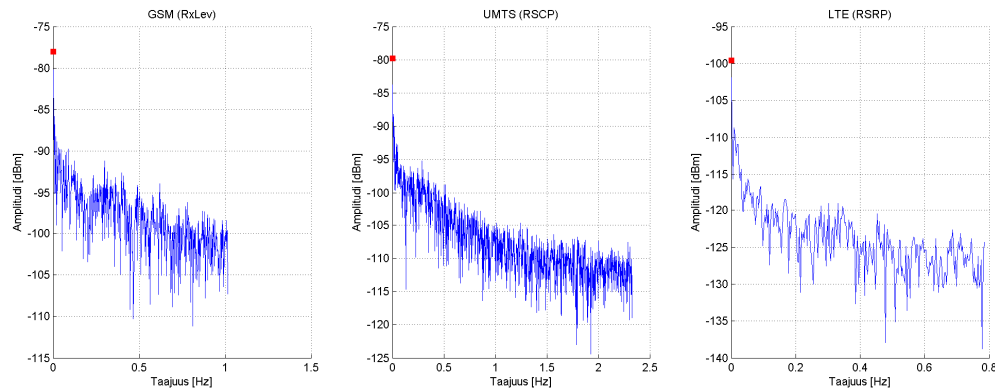
Kuva 132. Mittauspisteessä M5 mitatut signaalin voimakkuudet taajuustasossa.

Mittauspisteessä M7 ollaan tuulipuiston ulkopuolella näköyhteydellä tukiasemaan. DC-komponentti on selvästi muita signaalikomponentteja korkeampi, mutta referenssitapaukseen ja M5:een nähden 0,5 Hz:n alueella signaalikomponentit ovat voimistuneet (Kuva 133). Muutos ei kuitenkaan ole merkittävä.



Kuva 133. Mittauspisteessä M7 mitatut signaalin voimakkuudet taajuustasossa.

Mittauspisteessä M8 esiintyi selvimminkin vahvistuneet signaalikomponentit ja arvojen aaltoilu aina 0,5 Hz:iin saakka (Kuva 134). Selkeimmin matalat piikit näkyvät GSM- ja LTE-verkkojen tuloksissa. Piikit ovat kuitenkin yli 20 dB DC-komponenttia alhaisempia, joten niillä ei ole merkittävää vaikutusta signaalin laatuun.



Kuva 134. Mittauspisteessä M8 mitatut signaalin voimakkuudet taajuustasossa.

Taajuustasossa mittauksen analysointi toi esille pieni eroavuuksia, muttei sellaista mikä viittaisi merkittävään häiriötekijään. DC-komponentti oli lähes aina 20 dB muita signaalikomponentteja voimakkaampi. Sama ilmiö oli myös nähtävissä signaalikohinasuhteissa. Tuulipuiston sisällä 0-taajuuden ulkopuolella olevat signaalikomponentit olivat pieniä. Vaikutus on suurempi tuulipuiston ulkopuolella ja parhaiten ne tulivat esiin mittauspisteessä M8.

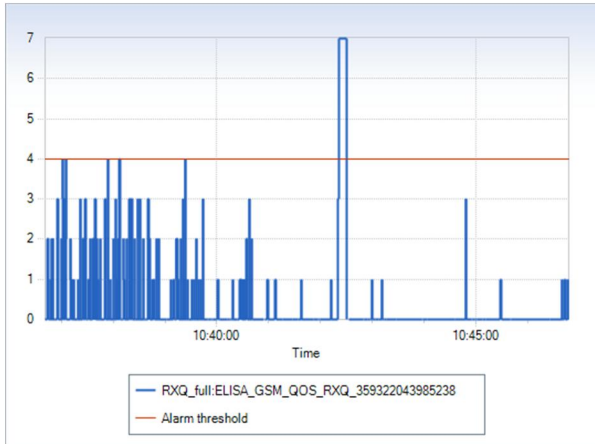
3.3.5 Paikkamittaukset puhe- ja datayhteyksillä

Alemman OSI-kerroksen parametrien tarkastelu ei tuonut selvää vastausta tuulipuiston vaikutusten suuruuteen. On selvää, että signaali vaimenee tuulipuiston sisällä ja tuulipuiston läheisyydessä signaalissa tasovaihtelu lisääntyy. Seuraavaksi selvitettiin sitä, onko tämä häiriö riittävä häiritsemään käyttäjien puhe- ja datayhteyksiä. Puhe- ja datayhteyksimittaukset suoritettiin kaikissa kahdeksassa paikassa, mutta tässä keskitytään yksityiskohtaisemmin mittauspaikkoihin M2, M5, M7 ja M8.

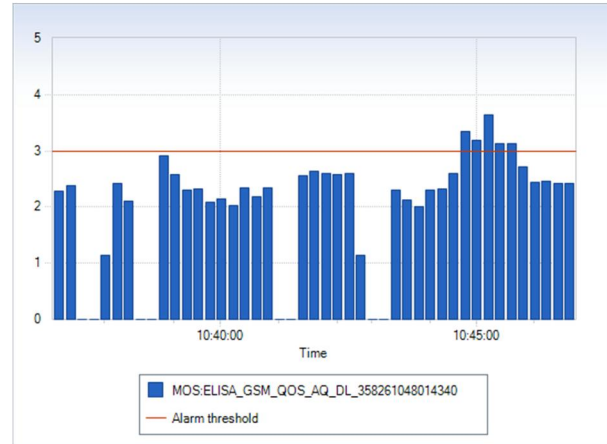
3.3.5.1 Puheyhteys GSM- ja UMTS-verkoissa

Puheytykset mitattiin GSM900- ja UMTS-900-verkoissa. Mittauksen kokonaiskesto oli 10 min. GSM-puheyhteyden laatua tarkasteltiin RxQ- ja MOS-parametrien avulla. RxQuality-asteikko poikkeaa siinä, että matalat arvot viittaavat hyvään yhteyslaatuun. Tarkastelussa RxQ:n raja-arvona käytettiin 4, jota suurempia arvoja pidettiin riittämättöminä. Vastaavasti MOS-arvojen osalta korkeampi arvo vastaa parempaa laatua. MOS-arvot 4,0–4,5 vastaavat kiinteän puhelinverkon laatua, 3,5–4 ovat tyypillisiä mobiiliverkon laatutasoja ja alle 3,5 arvoja pidetään usein riittämättöminä. Arvon putoaminen yhdellä koetaan käyttäjän kannalta häiritseväksi. MOS-raja-arvoksi asetettiin 3.

Mittauspisteessä M2 (tuulipuiston sisällä) GSM-puheyhteyden luonti epäonnistui välillä ja RxQ-arvot vaihtelivat paljon puhelujen aikana (Kuva 135). Mitatut MOS-arvot olivat pääosin alle 3 ja käyttäjää häiritsevää laatuvaihtelua esiintyi puheyhteyden aikana (Kuva 136). Katkokset MOS-kuvissa liittyvät katkaistuihin tai katkenneisiin puheluihin. Nemo keskiarvoistaa MOS-arvon 13 sekunnin yli, joten parametri ei kykene esittämään nopeita laatuvaihteluja.

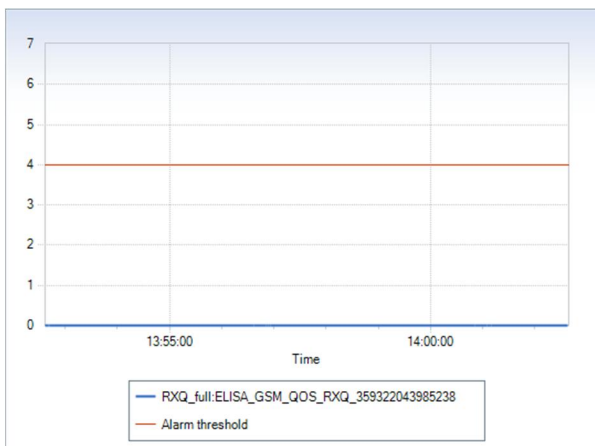


Kuva 135. Mittauspaikka 2 (RxQ).

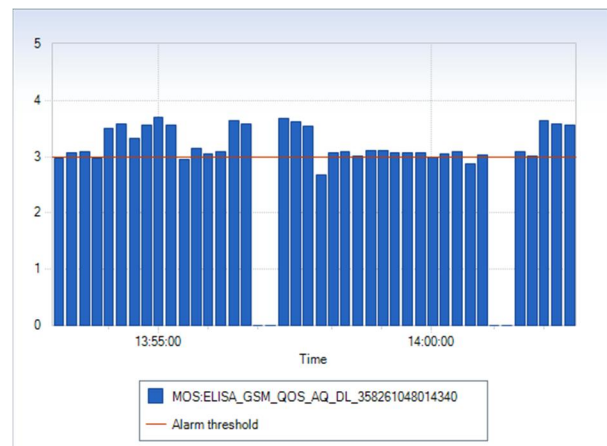


Kuva 136. Mittauspaikka 2 (MOS).

Mittauspisteessä M5 (etäällä tuulipuistosta) GSM-puheysteys oli selvästi parempi. RxQ-arvot pysyvät 0-tasossa (Kuva 137) ja MOS-arvot kohosivat yllättävänkin vähän (Kuva 138). MOS-arvovaihtelu on pienempää. Graafissa näkyvät kohdat, joissa puhelu vaihtui.



Kuva 137. Mittauspaikka 5 (RxQ).

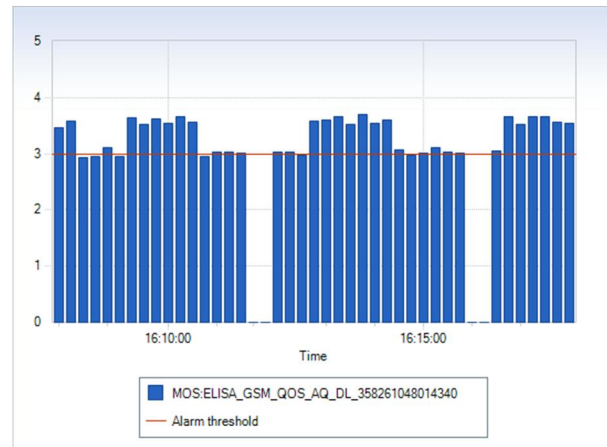


Kuva 138. Mittauspaikka 5 (MOS).

Mittauspisteessä M7 (etäällä tuulipuistosta) tulokset olivat samankaltaiset mittauspisteen M5 kanssa. RxQ-arvoissa esiintyy kuitenkin enemmän hetkellisiä häiriöpiikkejä (Kuva 139). MOS-tasot vaihtelivat puhelujen aikana vain vähän (Kuva 140).



Kuva 139. Mittauspaikka 7 (RxQ).

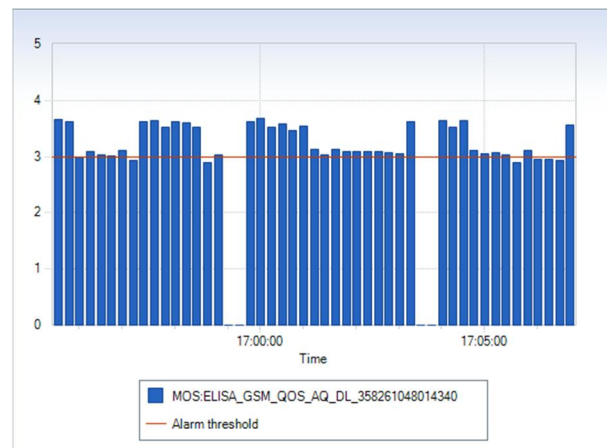


Kuva 140. Mittauspaikka 7 (MOS).

Mittauspisteessä M8 (tuulipuiston läheisyydessä) RxQ-tasossa esiintyi pari häiriöpiikkiä (Kuva 141). Tasovaihtelut olivat samaa luokkaa mittauspisteen M7 kanssa (Kuva 142).

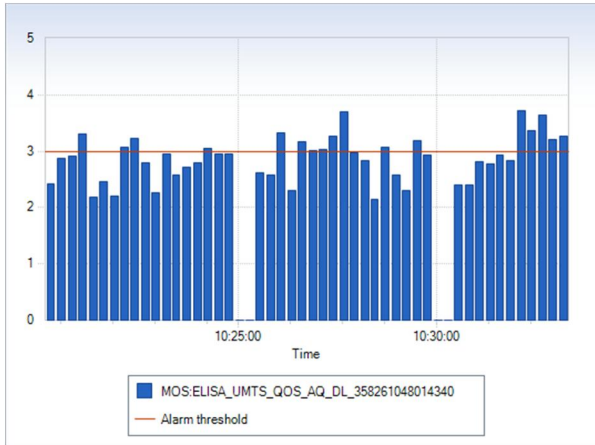


Kuva 141. Mittauspaikka 8 (RxQ).

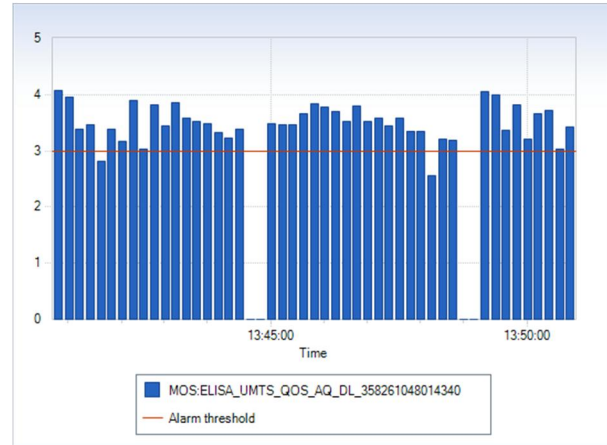


Kuva 142. Mittauspaikka 8 (MOS).

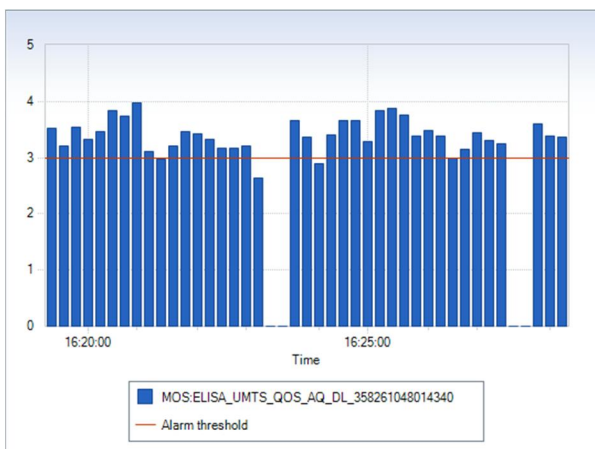
UMTS-verkon puheytyden mittaustuloksista voidaan päätellä, että suurimmat laadulliset vaihtelut tapahtuivat mittauspisteessä M2 (Kuva 143, Kuva 144, Kuva 145 ja Kuva 146). MOS-tasot kaikissa mittauspisteissä olivat keskimääräistä tasoa alhaisempia. MOS-parametrin hidas laskenta aiheuttaa sen, ettei parametrilla voida havaita nopeita laatuvahteluja.



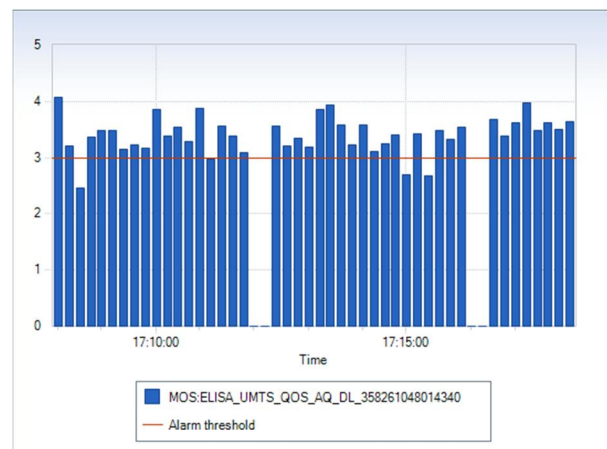
Kuva 143. Mittauspaikka 2 (MOS).



Kuva 144. Mittauspaikka 5 (MOS).



Kuva 145. Mittauspaikka 7 (MOS).

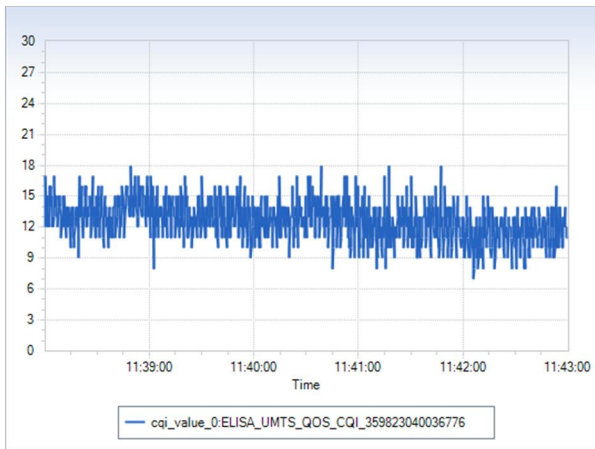


Kuva 146. Mittauspaikka 8 (MOS).

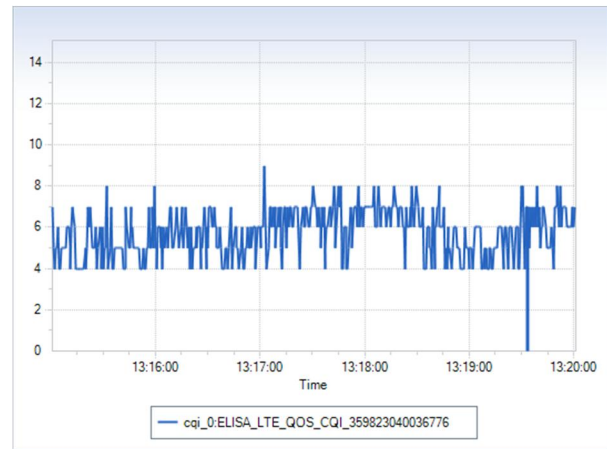
3.3.5.2 Datayhteys UMTS- ja LTE-verkoissa

Datayhteyden laatua UMTS- ja LTE-verkoissa tarkasteltiin CQI- ja RTT-parametrien avulla. LTE- ja UMTS-mittaukset suoritettiin eri aikaan. CQI indikoi radiokanavan laatua ja RTT aikaa, joka paketilta menee kulkiessa päätelaitteelta palvelimelle (www.google.com) ja takaisin. Viive riippuu kanavan lisäksi verkon kuormituksesta ja kulku aika eri suuntiin vaihtelee. CQI-arvot vaihtelevat UMTS-verkossa välillä 0–30 ja LTE-verkossa 0–15.

Mittauspaikassa M2 (tuulipuiston sisällä) UMTS-verkon CQI-arvot vaihtelivat arvon 12 (Kuva 147) ja LTE-verkossa arvon 6 molemmin puolin (Kuva 148). Arvovaihtelut olivat varsin merkittäviä ja selvää periodisuutta oli havaittavissa molemmissa verkoissa.

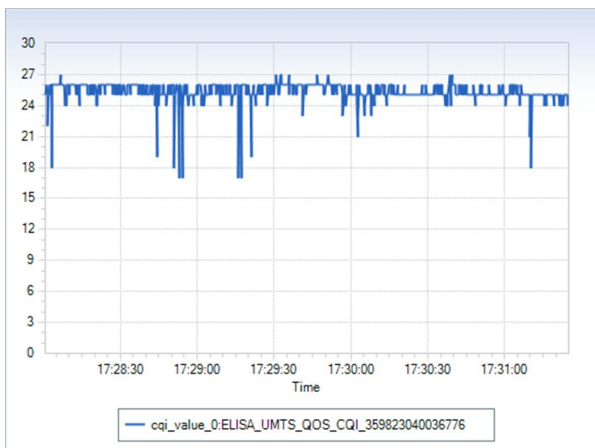


Kuva 147. M2 (UMTS).



Kuva 148. M2 (LTE).

Mittauspisteessä M5 (kaukana tuulipuistosta) radiokanava oli selvästi parempi. CQI-arvot olivat UMTS-verkossa välillä 25–26 (Kuva 149) ja LTE-verkossa lähes aina vakio 13 (Kuva 150). Vaihtelut olivat selvästi vähäisempiä eikä periodisuutta ollut havaittavissa.

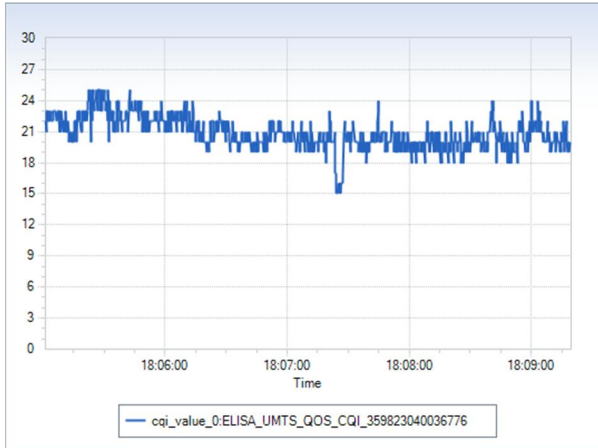


Kuva 149. M5 (UMTS).

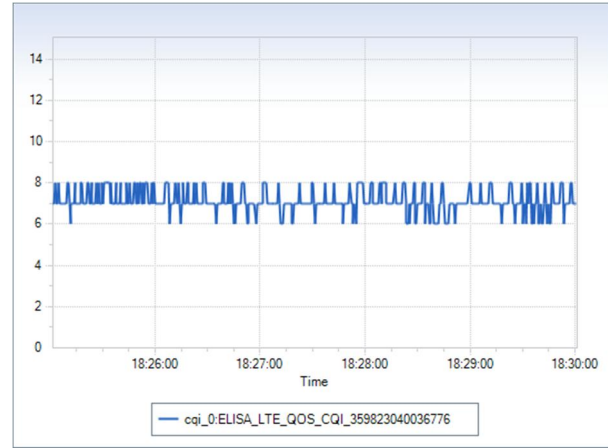


Kuva 150. M5 (LTE).

Mittauspiste M7 sijaitsi tukiaseman ja tuulipuiston välissä. Näköyhteys oli sekä tukiasemaan että tuulipuistoon. CQI-arvot olivat matalampia molemmissa verkoissa kuin mittauspisteessä M5 (Kuva 151 ja Kuva 152). Vaihtelua oli enemmän ja pientä aaltomaisuutta on havaittavissa molemmissa verkoissa.

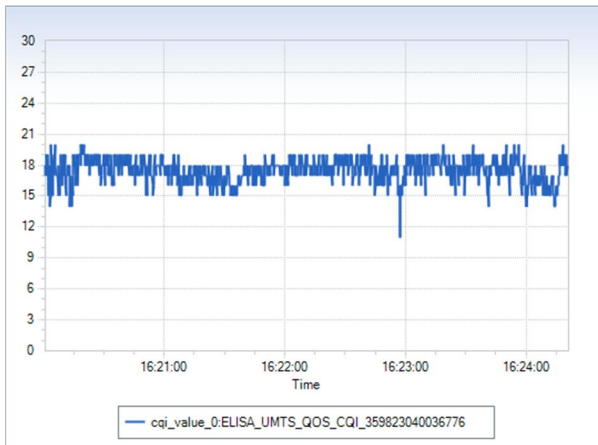


Kuva 151. M7 (UMTS).

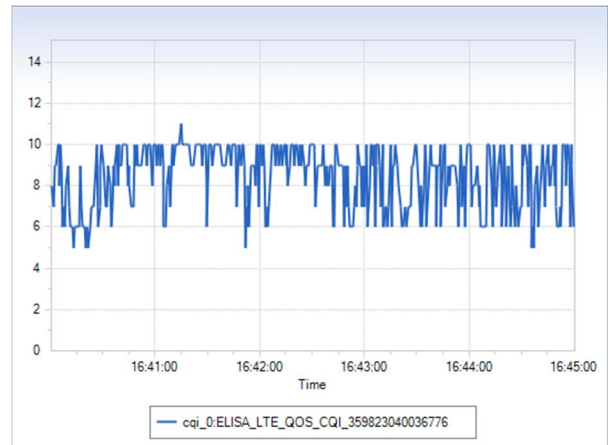


Kuva 152. M7 (LTE).

Mittauspiste M8 sijaitsi tuulipuiston lähietäisyydellä. CQI-arvot putosivat odotetusti ja periodista aaltoilua on havaittavissa etenkin LTE-verkon tuloksissa (Kuva 154).



Kuva 153. M8 (UMTS).

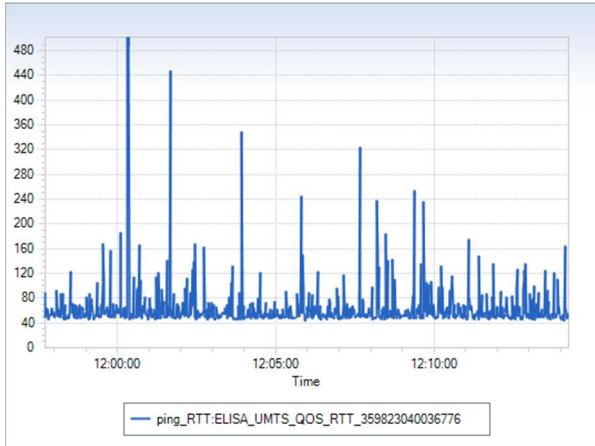


Kuva 154. M8 (LTE).

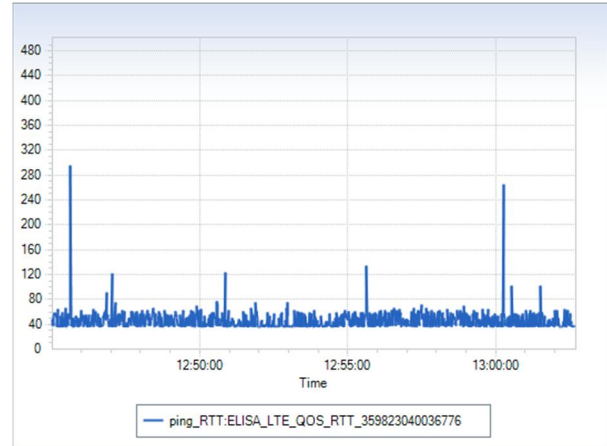
CQI-mittaukset osoittivat, että radiokanavassa tapahtuu suurempia laatumuutoksia tuulipuiston sisäpuolella kuin sen ulkopuolella. Vaihtelut pienenevät, kun siirytään kauemmaksi tuulipuistosta. Mittauspisteessä M5 ei enää havaittu muutoksia.

Seuraavaksi tarkasteltiin RTT-arvoja. Mittauspisteestä M2 ei saatu UMTS-verkon viivearvoja, joten tarkastelussa käytettiin mittauspisteen M1 arvoja. Mittauspiste sijaitsi tuulipuiston sisällä. Keskimääräinen signaalin voimakkuus ja signaalikohinasuhde oli korkeampi kuin mittauspisteessä M2.

Mittauspisteessä M1 UMTS-verkon viivevaihtelut olivat suuria (Kuva 155). Keskimääräinen viive pysyi kuitenkin 50 ms tasolla. LTE-verkossa viivevaihtelut olivat selvästi pienempiä ja keskimääräinen viive oli 40 ms luokkaa (Kuva 156). Hetkellisiä piikkejä esiintyi vain muutamassa kohdassa.

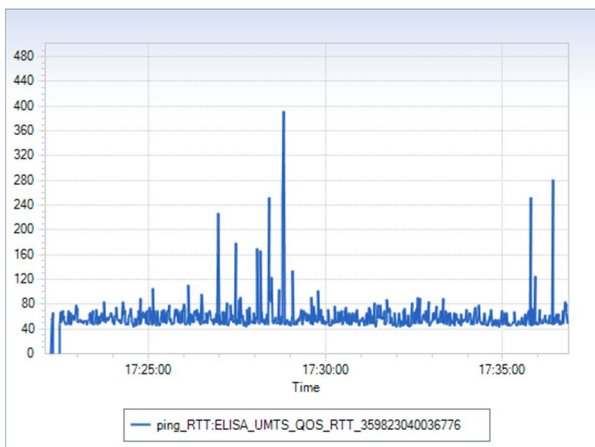


Kuva 155. M1 (UMTS).

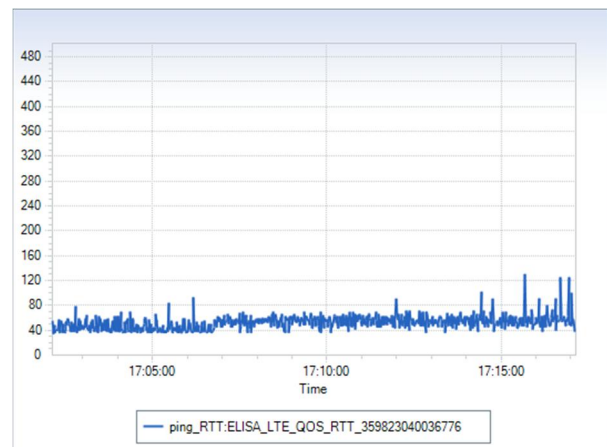


Kuva 156. M1 (LTE).

Mittauspisteessä M5 UMTS-verkon keskimääräinen viive oli samaa luokkaa kuin mittauspisteessä M1, mutta viivevaihtelut olivat selvästi pienempiä (Kuva 157). LTE-verkossa viiveet pysyvät lähes vakiona (Kuva 158). Tuloksista havaitaan, että keskimääräinen viive nousi LTE-mittauksen aikana 40 ms:sta lähemmäksi 50 ms:ia. Tämä todennäköisesti johtui verkon kuormituksen muuttumisesta mittauksen aikana.

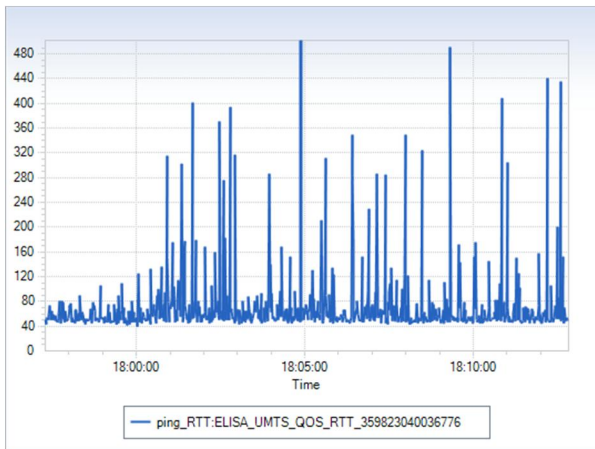


Kuva 157. M5 (UMTS).

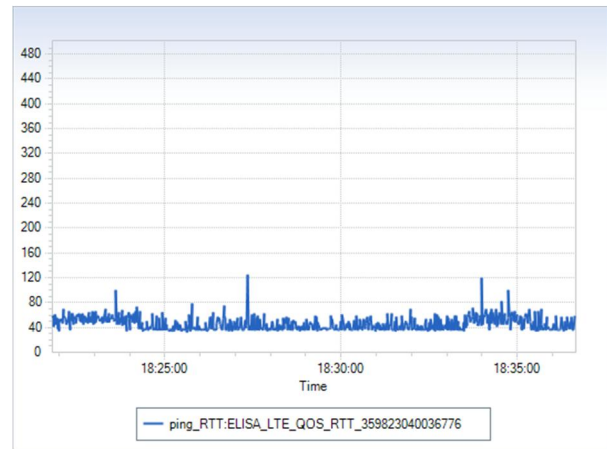


Kuva 158. M5 (LTE).

Mittauspisteessä M7 UMTS-verkon viiveet olivat selvästi mittauspistettä M5 suurempia. Tuloksissa on myös havaittavissa aaltoilua (Kuva 159). LTE-verkossa viiveet pysyivät varsin vakiona 50 ms:n tasolla (Kuva 160).

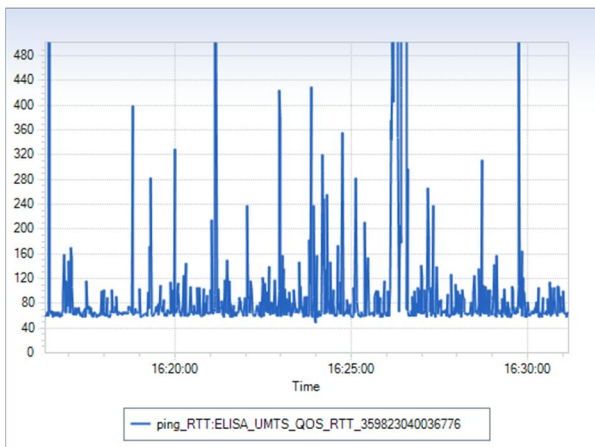


Kuva 159. M7 (UMTS).

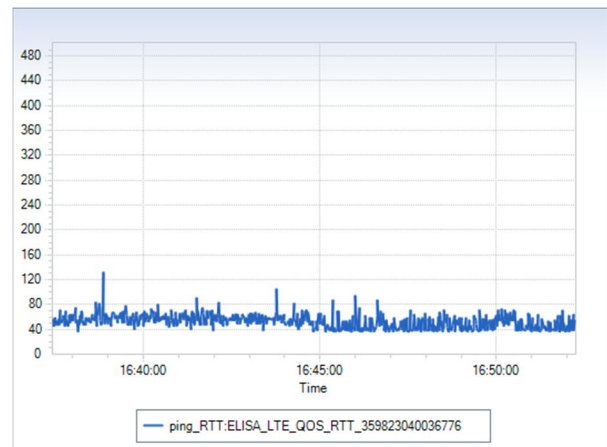


Kuva 160. M7 (LTE).

Mittauspiste M8 on hyvin samankaltainen mittauspisteen M7 kanssa. Viivevaihtelut olivat suuria UMTS-verkossa (Kuva 161) ja LTE-verkossa (Kuva 162) ne pysyivät lähes vakiona.



Kuva 161. M8 (UMTS).



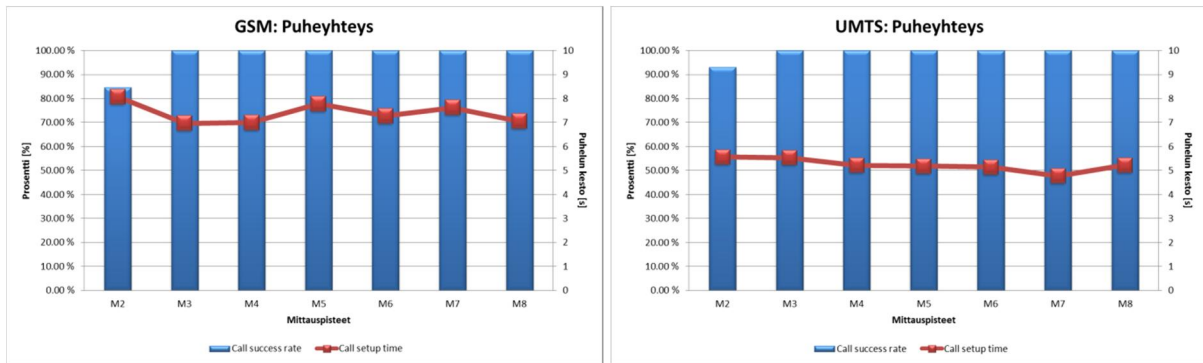
Kuva 162. M8 (LTE).

RTT-arvojen vertailu osoitti, että UMTS-verkko on herkempi radiokanavan laadun heikentymisen aiheuttamille ongelmille. Tämä osaltaan selittää kuluttajavalitukset, joita on tullut UMTS-datayhteyksistä.

Puhe- ja datamittausten yksityiskohtaiset tarkastelut eivät tuoneet merkittävää lisäarvoa, joten seuraavaksi mittauksia tarkasteltiin tilastollisten suureiden avulla.

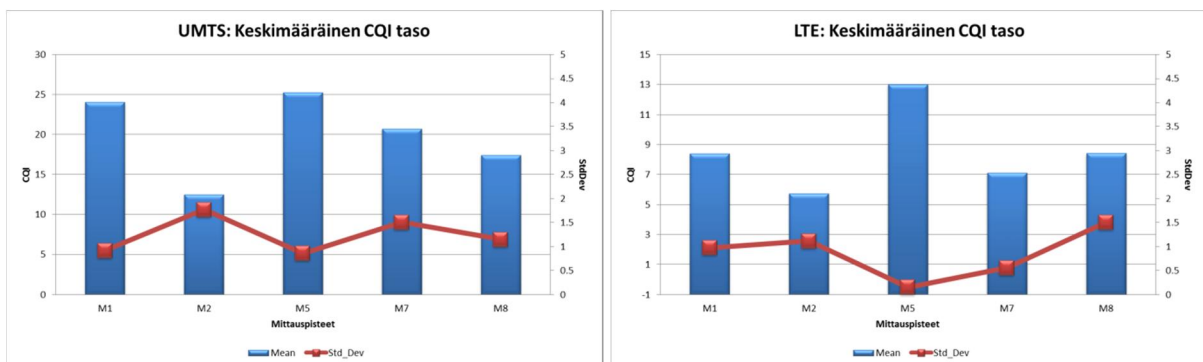
3.3.5.3 Tilastollinen tarkastelu

Ensiksi tarkasteltiin puheyhteyden onnistumisprosenttia sekä puhelun muodostusaikoja (Kuva 163). Mittauksessa käytetty skripti loi lyhyitä GSM- ja UMTS-puheluja (kesto 5 s), joiden tuloksista laskettiin onnistumisprosentti ja keskimääräinen puhelun muodostusaika. Vain mittauspisteessä M2 esiintyi puheyhteyden epäonnistumisia molemmissa verkoissa. GSM-verkossa onnistumisprosentti oli 85 % ja UMTS-verkossa 92 %. Puhelun muodostusaika vaihteli GSM-verkossa 7–8 s välillä. Keskimääräistä pidempiä aikoja mitattiin mittauspisteissä M2 ja M5. UMTS-verkossa puhelun muodostusaika oli välillä 5–5,5 s ja vastaavasti korkein keskimääräinen aika mitattiin mittauspisteessä M2. Erot olivat kuitenkin hyvin pieniä.



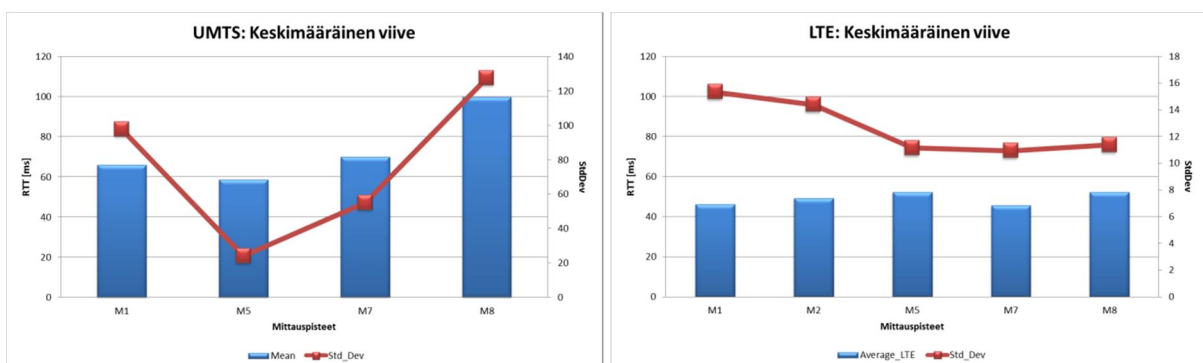
Kuva 163. Puheyhteyden onnistumisprosentit ja puhelun muodostusajat GSM- ja UMTS-verkoissa.

Seuraavassa kuvassa on esitetty radiokanavan laatua mittaavan CQI-parametrin keskiarvot ja hajonnat datayhteyksillä (Kuva 164). CQI-arvot olivat samansuuntaiset UMTS- ja LTE-verkoissa. Matalimmat tasot mitattiin tuulipuiston sisällä mittauspisteessä M2, missä suhteellinen keskihajonta oli suurin. Radiokanava oli paras mittauspisteessä M5, missä myös keskimääräinen keskihajonta (tasovaihtelut) oli pienin. Pisteiden M7 ja M8 järjestys vaihtui LTE- ja UMTS-verkkojen tapauksissa.



Kuva 164. Keskimääräinen radiokanavan laatu UMTS- ja LTE-verkoissa.

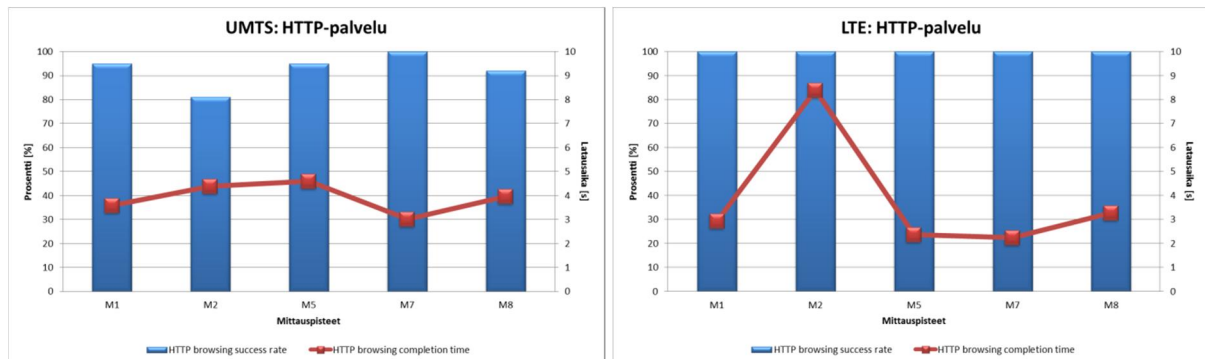
Viiveiden osalta UMTS- ja LTE-verkot erosivat enemmän toisistaan (Kuva 165). Keskimääräinen viive UMTS-verkossa oli välillä 60–100 ms ja LTE-verkossa 46–52 ms. Merkittävimmät erot olivat hajonnassa, joka oli noin 6-kertainen UMTS-verkossa. Suurimmat viiveet UMTS-verkossa mitattiin pisteessä M8 (lähellä tuulipuistoa) ja LTE-verkossa pisteessä M5. Viiveet LTE-verkossa olivat lähes vakiot.



Kuva 165. Keskimääräinen viive UMTS- ja LTE-verkoissa.

Samoissa mittauspisteissä mitattiin http-sivujen latausten onnistumisia ja latausaikoja (Kuva 166). Epäonnistuneita latauksia tapahtui UMTS-verkossa useammassa mittauspisteessä. Mittauspisteessä M2 onnistumisprosentti oli 80 %. Latausajat vaihtelivat UMTS-verkossa 3–

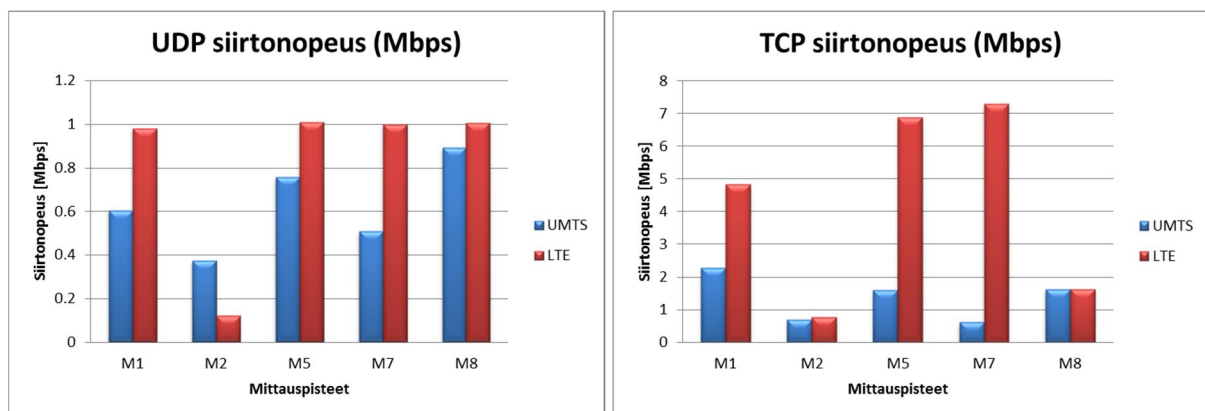
4,5 s välillä. LTE-verkossa http-sivujen lataus oli 100 % kaikissa mittauspaikoissa. Keskimääräinen latausaika oli 2,2–3 s. Poikkeuksena oli mittauspiste M2, jossa latausaika oli merkittävästi yli 8 s. LTE-yhteydessä oli selvästi ongelmia.



Kuva 166. HTTP-sivujen latausten onnistumisprosentit ja keskimääräiset latausajat UMTS- ja LTE-verkoissa.

Seuraavaksi päätelaitteelta generoitiin dataliikennettä UL-suuntaan (tukiaseman suuntaan) sekä UDP- että TCP-yhteyden yli (Kuva 167). UDP-mittauksessa IPerf-ohjelmalla generoitiin 1 Mbps:n dataliikennettä. UMTS-verkolla ei päästy 1 Mbps:n siirtonopeuteen. Keskimääräinen datan siirtonopeus liikkui välillä 0,5–0,9 Mbps. Alhaisimmat siirtonopeudet mitattiin pisteissä M2 ja M7. LTE-verkossa datayhteys pysyi 1 Mbps. Poikkeuksena oli mittauspiste M2, jossa UDP-datanopeus putosi 100 Kbps.

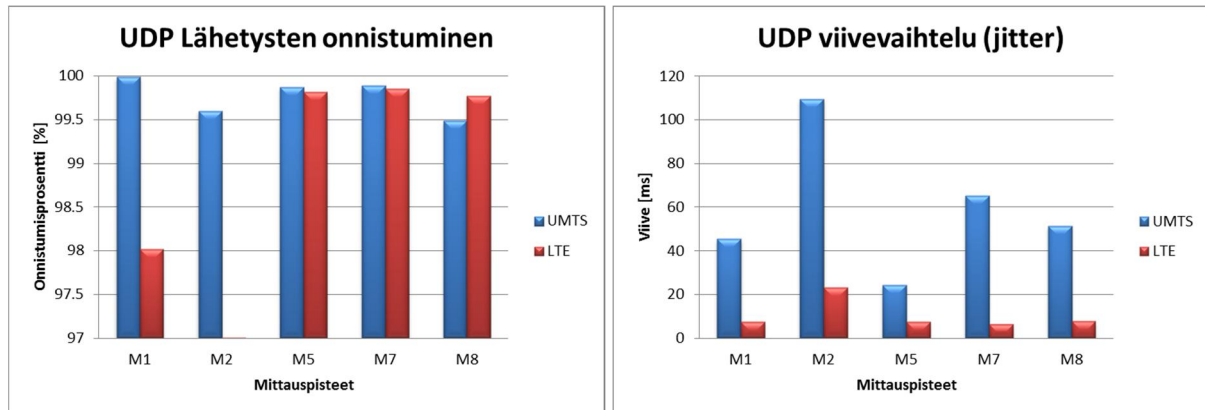
Oikeanpuoleisessa kuvassa on esitetty keskimääräiset datanopeudet TCP-yhteyden yli. Parhaimmillaan LTE-verkossa päästiin 7 Mbps nopeuksiin. Mittauspisteissä M2 ja M8 siirtonopeudet olivat selvästi alhaisempia. Mittauspisteessä M2 siirtonopeus oli noin 800 Kbps. Siirtonopeudet UMTS-verkossa olivat selvästi LTE-verkon nopeuksia alhaisempia. Nopeudet vaihtelivat keskimäärin 1,8–2,1 Mbps välillä. Mittauspisteissä M2 ja M7 nopeus putosi reilusti alle 1 Mbps.



Kuva 167. UMTS- ja LTE-verkkojen keskimääräiset siirtonopeudet UDP- ja TCP-yhteyksillä.

Alla olevassa kuvassa (Kuva 168) on esitetty lähetettyjen UDP-pakettien onnistumisprosentti UMTS- ja LTE-verkoissa. TCP/IP-protokollasta poiketen UDP-protokollassa ei tehdä uudelleen lähetyksiä, joten pakettien katoamisella on suuri vaikutus datayhteyden laatuun sovellustasolla. UMTS-verkossa onnistumisprosentti oli mittauspisteissä M1 ja M2 selvästi parempi kuin LTE-verkossa. Mittauspisteessä M2 datalähetyksen onnistumisprosentti jäi 15 %:iin, mikä selittää datasiirtonopeuden putoamisen 100 Kbps:iin. Vastaava luku UMTS-verkossa oli päälle 99,5 %. Mittauspisteissä M5, M7 ja M8 onnistumisprosentti oli

molemmissa verkoissa samaa luokkaa. Mittauspisteessä M8 LTE-verkon onnistumisprosentti oli 0,1 % heikempi kuin UMTS-verkossa.

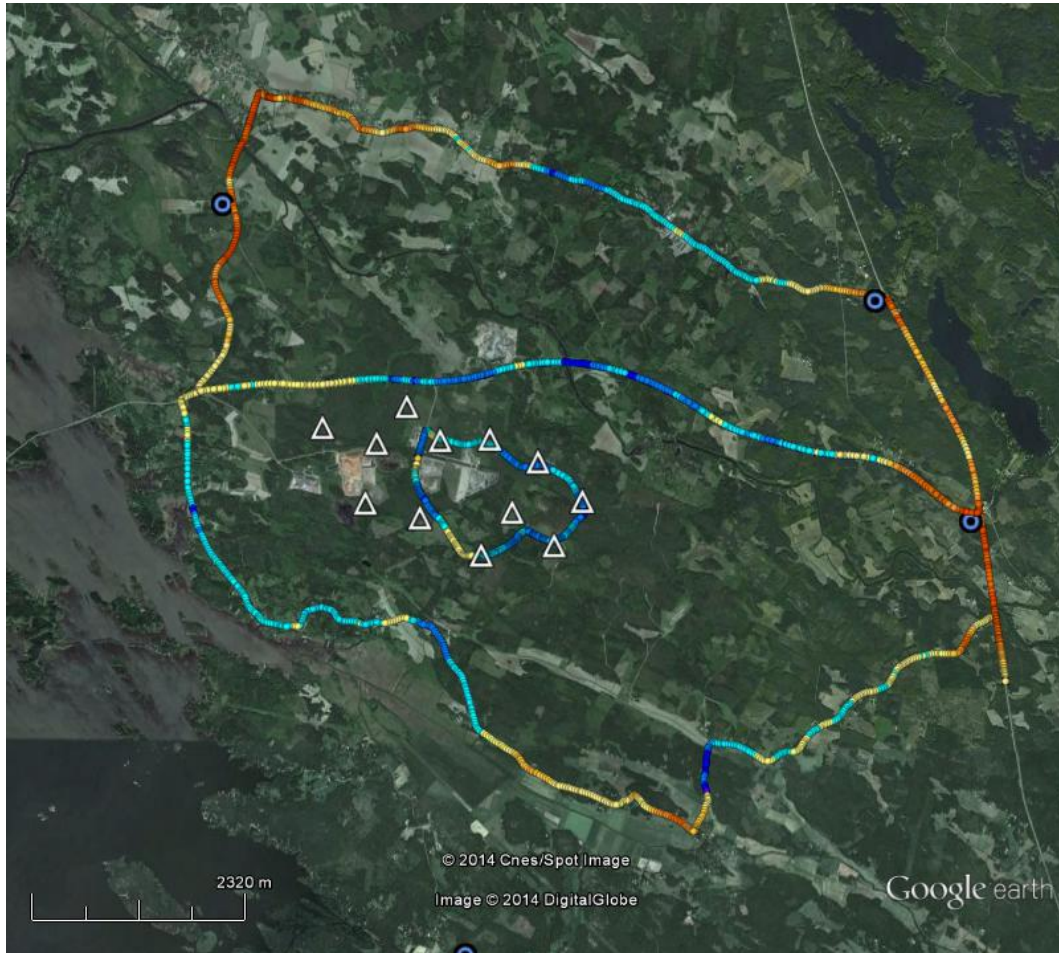


Kuva 168. Lähetettyjen UDP-pakettien onnistumisprosentit ja viivevaihtelut UMTS- ja LTE-verkoissa.

Viiveen vaihtelussa (jitter) näkyivät suurimmat erot verkkojen välillä. LTE-verkossa viiveen vaihtelu oli lähes vakio 5 ms paitsi mittauspisteessä M2. Pisteessä viiveen vaihtelu oli keskimäärin 21 ms. UMTS-verkossa viiveen vaihtelu oli välillä 40–60 ms. Mittauspisteessä M2 viiveen vaihtelu kasvoi 110 ms.

3.4 Johtopäätökset

Peittoon alueella mobiilipeitto oli toteutettu maaseutukäyttöön soveltuvilla GSM-900-, UMTS-900- ja LTE-800-verkoilla. Matalasta taajuudesta riippumatta GSM-, UMTS- ja LTE-tukiasemaverkot olivat alueella varsin tiheät. Tilanteita, joissa tuulipuisto jää päätelaitteen ja tukiaseman väliin, tapahtuu varsin harvoin, koska palveleva tukiasema vaihtuu automaattisesti parempaan, kun signaalin voimakkuus tai signaalikohinasuhde heikkenee liikaa. Alla olevassa kuvassa (Kuva 169) on esitetty tukiasemat ja palvelevan tukiaseman signaalin voimakkuus reiteillä (siniset alueet ilmaisevat heikompaa peittoa). GSM-tukiasemia (siniset ympyrät) löytyy tuulipuiston ympäriltä kaikista ilmansuunnista, mikä pienentää tuulipuiston häiriövaikutusta alueella. Signaalin voimakkuus on selvästi ympäristöä heikempi tarkastelualueen keskellä ja eritoten tuulipuiston sisällä. Huomattavaa on, että tukiasemien peittoalueen säde tuulipuiston läheisyydessä pienenee.



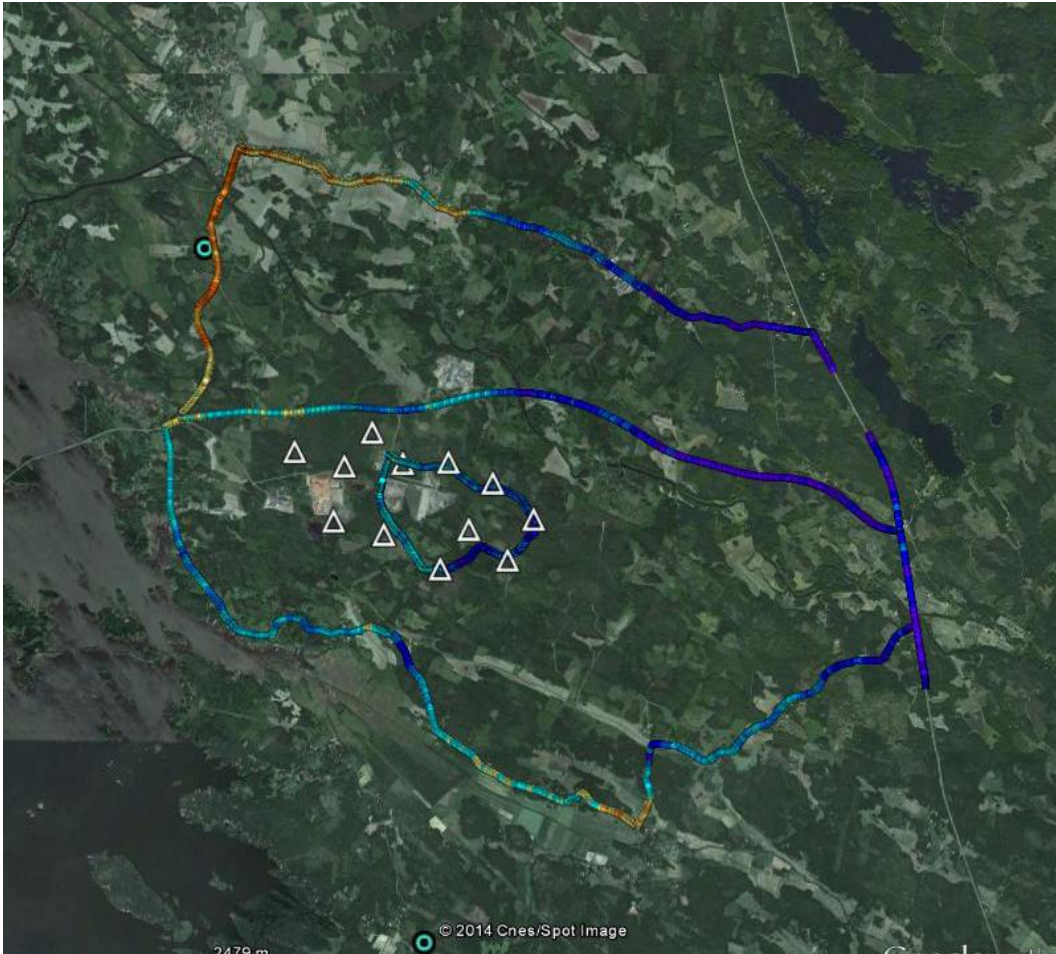
Kuva 169. Peittoon lähialueen GSM-tukiasemat ja palvelevan solun RxLev-arvot.

UMTS-tukiasemaverkko (punaiset ympyrät) on samanlainen GSM-verkon kanssa. Molempien verkkojen tukiasemat ovat samoissa mastoissa. Matalampia signaalitasoja mitataan UMTS-verkossa samoissa kohdissa kuin GSM-verkossa. Heikon peiton alue kuvan (Kuva 170) keskellä on kapeampi.



Kuva 170. Peittoon lähialueen UMTS-tukiasemat ja palvelevan solun RSCP-arvot.

LTE-tukiasemaverkko on selvästi harvempi (vaaleansiniset ympyrät). Pääosa tukiasemista sijaitsee tuulipuistosta etelään ja itään. Matalan peiton alue (Kuva 171) kasvaa itäänpäin. Siellä esiintyi tavallista enemmän solunvaihtoja ja ongelmia datayhteyksien kanssa.



Kuva 171. Peittoon lähialueen LTE-tukiasemat ja palvelevan solun RSRP-arvot.

Kuvista havaitaan, että ympärillä olevat tukiasemat rajoittavat tehokkaasti tuulipuiston häiriövaikutusaluetta. Suuntiin, joista tukiasemia ei löydy, tuulipuiston vaikutusalue luonnollisesti kasvaa. Mahdollisia ongelmatilanteita syntyy puistojen lähellä, jotka sijaitsevat meren, suuren vesistön, luonnonsuojelupuiston tai valtakunnan rajan läheisyydessä.

Häiriövaikutukset ovat selvästi suurempia tuulipuiston sisällä. Signaalin voimakkuudesta ja signaalikohinasuhteesta luodut CDF-käyrät osoittavat keskimääräisen signaalin voimakkuuden putoamisen ja vaihtelun kasvun tuulipuiston sisällä ja sen läheisyydessä. Signaalikohinasuhde käyttäytyi pitkälti signaalin voimakkuuden mukaisesti, joten dominoivaa häiriötä mittauksista ei ollut havaittavissa. Tuulivoimaloiden tornit ja siivet aiheuttavat katvetta ja tasovaihtelua signaaliin. Katvevaikutus on arviolta muutamia satoja metrejä, mutta tasovaihtelun vaikutus ulottuu tuulipuiston ulkopuolelle. Sen suuruus riippuu tuulivoimaloiden asennosta sekä lapojen pyörimisnopeudesta. Katve ja tasovaihtelut yhdessä heikentävät radiokanavaa, mikä johtaa yhteyksien laadun heikkenemiseen ja huonon peiton alueella yhteyksien katkeamiseen. Muutokset radiokanavassa eri teknologioiden tapauksissa olivat hyvin samanlaiset. Merkittävää eroa ei havaitu kapeakastaisen GSM-verkon ja laajakaistaisten UMTS- ja LTE-verkkojen välillä. Merkittävimmät erot mittauksissa johtuivat enemmän tukiasemien sijantieroista.

Mittaukset osoittivat, että UMTS- ja GSM-puheyhteydet kestivät radiokanavan laadun heikkenemistä. Ajomittauksen aikana GSM-puheyhteys katkesi vain kerran lähellä tuulipuistoa. UMTS-verkon osalta katkenneita puheluja ei esiintynyt. Paikkamittauksissa tapahtui

enemmän puheyhteyksien katkeamisia. Ne keskittyivät pääosin tuulipuiston sisään, mutta vaihtelua puheyhteyden laadussa esiintyi runsaasti myös tuulipuiston ulkopuolella.

Suurimmat tuulipuiston vaikutukset havaittiin datayhteyksissä. UMTS-verkossa esiintyi katkoksia tuulipuiston sisällä, puiston läheisyydessä sekä kauempana puistosta. LTE-verkossa datayhteyden katkeamisia tapahtui tuulipuiston sisällä (mittauspiste M2) ja valtatie 8:n varrella kaukana tuulipuistosta. Yhteyden laadussa (CQI) vaihtelut olivat suurimmat tuulipuiston sisällä ja arvoissa oli havaittavissa periodista aaltoilua. Viivearvoissa (RTT) esiintyi UMTS-verkossa enemmän hetkellisiä piikkejä tuulipuiston sisällä kuin ulkopuolella. Nämä hetkelliset piikit selittävät käyttäjän kokeman palvelulaadun heikkenemisen. LTE-verkossa viiveet pysyivät varsin vakioina. Poikkeuksena oli mittauspaikka tuulipuiston sisällä (M2), jossa http-sivujen latausaika oli jopa 9 s, onnistumisprosentti 30 % ja datansiirtonopeus vain satoja Kbps. Normaalisti LTE-verkossa siirtonopeus on 6–7 Mbps:n luokkaa. UMTS-verkossa vaikutukset näkyivät vielä selvemmin. Normaalisissa tapauksissa datansiirtonopeus UMTS-verkossa oli 1,5–2 Mbps, kun tuulipuistossa ja sen läheisyydessä siirtonopeudet putoivat alle 1 Mbps, mikä näkyy käyttäjälle datayhteyksien tahmaisutena.

Sovellustasolla radiokanavan heikentyminen näkyi UMTS-verkossa selvemmin viiveissä ja datan siirtonopeuksissa eli käyttäjän kokemassa datayhteyden laadussa. LTE-verkossa viiveet pysyivät lähes vakiona ja siirtonopeuksien putoaminen ei merkittävästi häirinyt mm. web-palveluja.

Tuulivoimaloiden lapojen periodista häiriövaikutusta etsittiin FFT-analyysin avulla. Tarkastelu ei tuonut esille merkittäviä signaalikomponentteja. Matalia piikkejä ja aaltoilua signaalissa esiintyi, mutta ne olivat merkittävästi pääkomponenttia alhaisempia.

Puheyhteyksien tarkastelussa keskityttiin katkenneiden puhelujen määrään (DCR) vaikuttaviin tekijöihin. Testialueella esiintyi aukkoja peittoalueessa. Epäonnistuneita solunvaihtoja ei esiintynyt GSM-, UMTS- tai LTE-verkoissa, mutta solunvaihtojen määrät lähellä tuulipuistoa kasvoivat merkittävästi. Interferenssin vaikutus näkyi tuulipuiston sisällä ja läheisyydessä katveena sekä lisääntyneenä signaalin vaihteluna.

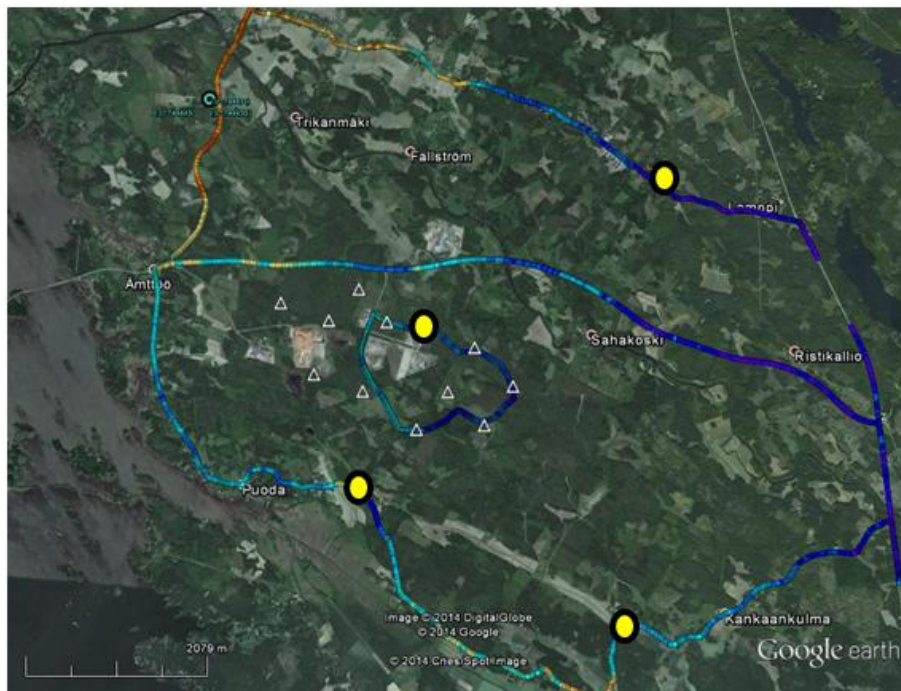
Alustavat havainnot:

- *Aiheuttaako tuulipuisto häiriötä mobiiliyhteyksille?*
Häiriövaikutukset ovat selkeimmät tuulipuiston sisällä. Tiheä tukiasemaverkko rajoittaa tehokkaasti puiston vaikutusalueita. Ongelmia syntyy tilanteissa, joissa tukiasemia ei löydy kaikista ilmansuunnista esim. meren, vesistöjen, luonnonsuojelupuiston tai valtakunnan rajan läheisyydessä.
- *Ovatko häiriöt niin suuria, että ne aiheuttavat katkenneita puheluja ja datayhteyksiä?*
Häiriöt voivat aiheuttaa katkenneita puheluja ja datayhteyksiä etenkin tuulipuiston sisällä. Todennäköisyys katkenneille puhe- ja datayhteyksille kasvaa kohdissa, joissa signaalin voimakkuus ja signaalikohinasuhde ovat ennestään jo alhaiset. Riski yhteyden katkeamiseen kasvaa siirryttäessä tuulipuiston sisään, jossa tuulivoimaloiden vaikutus lisääntyy.
- *Onko eri järjestelmien välillä eroja?*
Fyysisellä tasolla merkittäviä eroja ei havaittu kapeakaistaisen GSM- ja leveäkaistaisen UMTS- ja LTE-verkkojen välillä. Tuulipuisto vaikutti kaikkien verkkojen puhe- ja datapalveluihin. Korkeampi taajuus näyttää olevan hieman alttiimpi häiriövaikutuksille, mutta vaikutusalue on kapeampi (Fresnelin vyöhyke). Suurin vaikutus käyttäjän kokemaan laatuun havaittiin UMTS-verkoissa, joissa radiokanavan heikentyminen näkyy viiveissä ja datansiirtonopeuksissa. LTE-verkossa viiveet pysyivät lähes vakiona ja siirtonopeuksien putoaminen ei merkittävästi häirinyt mm. web-palveluja.

- *Vaikuttavatko tuulipuistot TETRA-verkkoihin?*
 TETRA-verkko toimii 400 MHz:n taajuusalueella, joten vaikutukset ovat pienemmät kuin mitatuissa GSM-, UMTS- ja LTE-järjestelmissä. TETRA-verkko on harvempi johtuen matalammasta taajuudesta. Tästä johtuen Fresnelin vyöhyke on suurempi ja vaikutukset tuulipuiston ulkopuolella ovat kauempana havaittavissa. TETRA-verkossa käytetään enemmän puhe- ja lyhytsanomapalveluja, joihin häiriövaikutukset ovat pienemmät.
- *Mitä ohjeistusta olevissa ja suunnitteilla oleville puistolle voidaan antaa?*
 On pyrittävä välttämään tilanteita, joissa jollekin tuulipuiston sivulle ei jää tukiasemia (meri, vesistöt, valtakunnan rajat, luonnonsuojelupuistot). Vaikutusalue kasvaa suuntiin, joissa tukiasemaverkko harvenee tai tukiasemat ovat kauempana. Selkeitä indikaatioita mahdollisista ongelmista ovat solunvaihtojen kasvu, signaalin voimakkuuksien heikkeneminen sekä datasiirroissa viiveiden ja yhteyskatkosten määrän lisääntyminen. Vaikutusta voidaan vähentää lisäämällä toistimia tai tihentämällä tukiasemaverkkoa tuulipuiston läheisyydessä.

Häiriötarkasteluun liittyy tuulivoimalan sijainnista, asennosta ja pyörimisnopeudesta riippuvia häiriötekijöitä (Doppler ja heijastus), joiden mittaaminen optimipaikassa tuuliolosuhteiden muuttuessa on haastavaa. Tehtyjen mittauksen aikana tuuliolosuhteet olivat hyvin maltilliset (2–5 m/s) verrattuna olosuhteisiin, joissa tuulivoimaloiden sähköntuotokyky on maksimissaan (> 11 m/s). Tästä syystä häiriötekijöiden vaikuttavuutta eri tuuliolosuhteissa ei tehdyillä mittauksilla pystytty arvioimaan. Tämän tueksi tarvitaan laskentamallien antamia ennusteita, joiden avulla voidaan ensiksikin tunnistaa mahdolliset maksimihäiriöpaikat ja toiseksi arvioida tuuliolosuhteiden vaikutusta tuloksiin.

Mittauksen analysoinnin perusteella tunnistettiin neljä uutta paikkamittauskohdetta, jotka soveltuisivat laskentamallien tulosten validointiin sekä auttaisivat tuulipuiston vaikutusmekanismien ymmärtämisessä. Nämä paikat on esitetty alla olevassa kuvassa keltaisilla ympyröillä.



Kuva 172. Validointiin soveltuvia lisämittauspisteitä.

4. Televisiovaikutukset

4.1 Kohteen kuvaus ja rajaukset

Tuulivoimaloiden TV-vaikutusten selvitys perustuu teoreettisiin tarkasteluihin ja laskelmiin sekä Digita Oy:n vuonna 2014 suorittamiin mittauksiin TV-lähettimien signaaleista Porin Peittoon tuulivoima-alueella ja sen läheisyydessä [14]. Tarkastelu kohdistuu Peittoon alueeseen, koska siellä on havaittu vaikutuksia televisiovastaanotossa 12 voimalan tuulivoimapaiston vuosina 2013–2014 tapahtuneen käyttöönoton jälkeen.

Varhaisten tuulivoimaloiden aiheuttamiin televisiohäiriöihin on ulkomailla kiinnitetty huomiota 1970-luvulta alkaen, analogiatelevision aikakaudella [15]. Siirtyminen digitaaliseen lähetystekniikkaan 2000-luvulla (DVB-T ja DVB-T2-standardit) ja samanaikainen tuulivoimaloiden lisääntyminen ovat nostaneet televisiohäiriöt uudelleen tutkimushuomion kohteeksi häiriöiden muuttaessa luonnettaan digitaalisuuden ansiosta. Asiaa on käsitelty laajahkosti tutkimuskirjallisuudessa, esimerkkeinä [16] ja [17], ja kansainvälisen tietoliikennejärjestön ITU:n (International Telecommunication Union) julkaisuissa ja suosituksissa ([18], [19]).

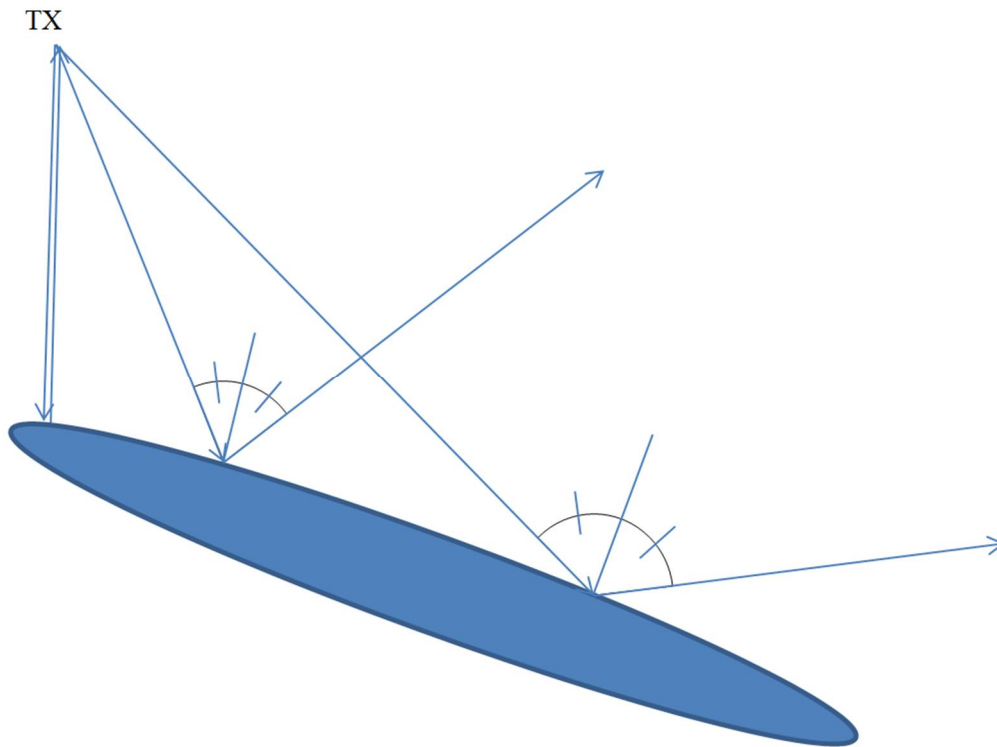
Tässä selvityksessä häiriöitä ja niiden syntyä tarkastellaan ensin tutkimalla sähkömagneettisen teorian perusteella tuulivoimaloiden sirontaa eli niiden vaikutusta etenevään radioaaltoon, tässä tapauksessa televisiosignaaliin. Sen jälkeen tarkastellaan Peittoon alueella suoritettujen mittausten tuloksia pyrkien löytämään oleelliset vaikutukset. Vaikutusten syntymekanismit pyritään tämän jälkeen tunnistamaan ja löytämään kvantitatiiviset arviot ja laskentamenetelmät häiriöiden suuruudelle. Lopuksi tarkastellaan sitä, mille alueille erityyppiset häiriöt tuulivoimaloiden vaikutuksesta kohdistuvat. Vaikka tarkastelu kohdistuu Peittoon alueelle, pyritään löytämään myös muille tuulivoima-alueille yleistettävissä olevia säännönmukaisuuksia. Jos ei erikseen muuta mainita, tarkastelu kohdistuu UHF-alueen DVB-T-standardin mukaisiin 8k-järjestelmän lähetyksiin Digita Oy:n Eurajoen lähetyksasemalta. Erikseen tarkastellaan lyhyesti DVB-T2-standardin mukaisia lähetyksiä UHF- ja VHF-alueilla.

4.2 Tuulivoimaloiden sironta

Tuulivoimaloiden aiheuttamat ajasta riippuvat häiriöt TV-lähetyksiin syntyvät lapojen hetkellisistä heijastuksista eli välkkeistä. Suurtaajuisista sirontailmiöistä **eteenpäinsironta** on voimakkain: se muodostaa kappaleen varjon kumoamalla suoraan etenevän aallon etenemissuunnassa. **Takaisinsironta** suuntautuu kohti lähetintä ja sen voimakkuus riippuu sirottajan muodosta. Silloin kun sirottajan pinta muodostaa tason, jossa aallon tulo- ja lähtökulma ovat yhtä suuret tapahtuu voimakas peiliheijastus (specular reflection), joka ohimenevänä ilmiönä ilmenee välähdyksenomaisesti. Tuulivoimaloiden kohdalla välähdyksiä tapahtuu lavoista, jotka pyöriessään sattuvat välillä sellaiseen asentoon, jossa peiliheijastus on mahdollinen.

4.2.1 Lapojen takaisinsironta

Lapa sirottaa tv-signaalia kaiken aikaa kaikkiin suuntiin. Geometrisen optiikan sääntöjen mukaan voimakkain heijastus kappaleesta tulee pisteestä, josta vedetty säde lähettimeen ja vastaanottimeen sijaitsevat samassa tasossa ja muodostavat ko. pisteen pinnan normaaliin nähden yhtä suuren kulman.



Kuva 173. Lavan peiliheijastuksen geometria.

Oheisessa kuvassa ajatellaan kappaleeseen osuvien säteiden olevan samassa tasossa siitä heijastuvien säteiden kanssa. Lähtö sijaitsee kohdassa TX. Kyseisessä geometriassa takaisinsironta tulee läheltä kärkeä, jossa kaarevuussäde on lyhyt ja heijastava pinta-ala vastaavasti pieni. Kaksi muuta sädettä heijastuvat pois päin. Niiden kohdalla kaarevuussäde on huomattavasti suurempi, jolloin sironta näihin suuntiin on vastaavasti voimakkaampaa.

Suurin vaikutus tulee kuitenkin eteenpäinsironnan suuntaan, eli kappaleen varjo-alueeseen.

Geometrisen optiikan takaisinsironnan peiliheijastukselle ennustama sirontapoikkipinta on

$$\sigma \approx 4\pi \frac{A_{eff}^2}{\lambda^2}$$

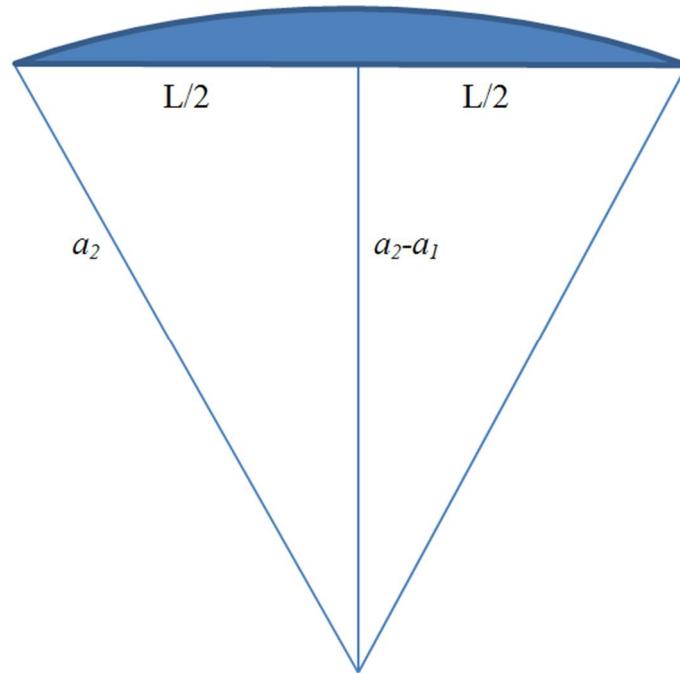
Efektiiivisen pinta-alan A_{eff} leveys saadaan kuhunkin kaareutumisen pääasuuntaan kaavasta

$$\sqrt{R \frac{\lambda}{2}}$$

jossa R on kaarevuussäde kuhunkin suuntaan. Tällöin

$$\sigma \approx 4\pi \frac{\left(\sqrt{a_1 \frac{\lambda}{2}} \sqrt{a_2 \frac{\lambda}{2}} \right)^2}{\lambda^2} = \pi a_1 a_2$$

joka pätee myös likimain muille suunnille kuin takaisinsironnan suuntaan. a_1 on kaarevuussäde poikittaissuunnassa ja a_2 pitkittäissuunnassa. Tulos ei riipu taajuudesta, mutta se pätee riittävän suurille taajuuksille. Ongelmaksi jää kaikkia mahdollisia sirontasuuntia vastaavien heijastuspisteiden määrittäminen.



Kuva 174. Lavan kaarevan pinnan likimääräinen muoto.

Tuulivoimalan lavan tarkka muoto ei yleensä ole tiedossa. Analyttisiä tarkasteluja varten voidaan muodosta kuitenkin tehdä yksinkertaistavia oletuksia, kuten yllä olevassa kuvassa. Oleellisia suureita takaisinsironnan kannalta ovat likimääräiset kaarevuussäteet pituus- ja poikittaissuunnissa.

Kun asetetaan a_1 = lavan keskimääräinen säde keskikohdassa ja oletetaan lavan noudattavan ympyrän kaaren muotoa voidaan pituus- ja poikittaissuunnissa ratkaista yllä olevasta kolmiosta

$$a_2 = \frac{(L/2)^2 + a_1^2}{2a_1} \approx \frac{L^2}{8a_1}$$

kun $a_1 \ll L$. Lavan sirontapoikkipinnan maksimiarvoksi tulee siis

$$\sigma \approx \pi \frac{L^2}{8}$$

Kun lavan pituus L on 60 m tulee sirontapoikkipinnaksi noin 31 dBm² (dB yli neliömetrin).

Eteenpäinsironnan osuus on kuitenkin takaisinsirontaa huomattavasti voimakkaampi. Eteenpäinsironnan amplitudi varjonpuoleisessa puoliavaruudessa lähellä eteenpäinsironnan suuntaa määräytyy likimain varjostavan kohteen ääriiviivaa mukailevan tasolevyn sirontakuviosta eli vastaavan tasaisesti valaistun apertuuriantennin säteilykuvioista. Suorakulmaisen levyn eteenpäinsironnan poikkipinta on

$$\sigma_0 \approx 4\pi \frac{A^2}{\lambda^2}$$

missä A on geometrinen poikkipinta-ala aallon tulosuunnasta katsottuna. Lapaa mallintavan sylinterin eteenpäinsironta on likimain

$$\sigma_{fw} \approx 4\pi \frac{(2RL)^2}{\lambda^2}$$

Oletetaan lavan pituus $L = 60$ m ja keskimääräinen säde $R = 1,5$ m. Taajuudella 800 MHz aallonpituus on 37,5 cm. Tämä antaa eteenpäinsironnan maksimipoikkipinnaksi noin 64,6 dBm². Alemmilla TV-taajuuksilla poikkipinta on hieman pienempi.

3 dB:n keilanleveys pituussuunnassa saadaan likimääräisesti kaavasta (kun $\lambda \ll L$)

$$\Delta\alpha \approx \arcsin \frac{\lambda}{L} \approx \frac{\lambda}{L}$$

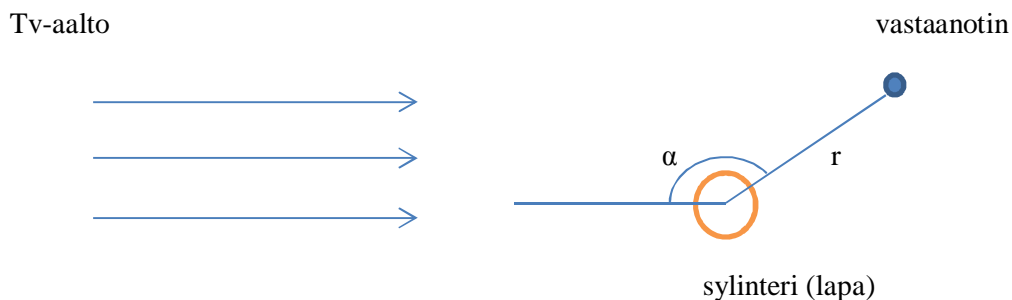
joka on noin 0,00625 eli 0,36 astetta.

Poikittainen keilanleveys on suurempi (kun $\lambda \ll 2R$),

$$\Delta\beta \approx \arcsin \frac{\lambda}{2R} \approx \frac{\lambda}{2R}$$

joka tässä tapauksessa on 0,125 eli 7,2 astetta.

Lavan välähdystä kuvaa oheinen piirros.



Kuva 175. Periaatepiirros sylinterin sironnasta poikittaistasossa, jolloin lapa välähtää johonkin suuntaan.

Sylinterin geometrisen optiikan bistaattinen sirontapoikkipinta on (ei päde eteenpäinsironnan suuntaan)

$$\sigma \approx \pi a_1 a_2 \cos \frac{\alpha}{2}$$

Bistaattinen sirontapoikkipinta määritellään limeksenä

$$\sigma = 4\pi r^2 \frac{S_{sca}(r)}{S_{inc}(d)}$$

kun tarkasteluetaisyys r lähestyy ääretöntä. Kaavassa S_{inc} on tutka-aallon tehotiheys sylinterin kohdalla (etäisyydellä d lähettimestä) ja S_{sca} on heijastuneen aallon tehotiheys suunnassa α ja etäisyydellä r . Yhdistämällä kaavat saadaan

$$\frac{S_{sca}(r)}{S_{inc}(d)} \approx \frac{\pi a_1 a_2}{4\pi r^2} \cos \frac{\alpha}{2}$$

Kerroin

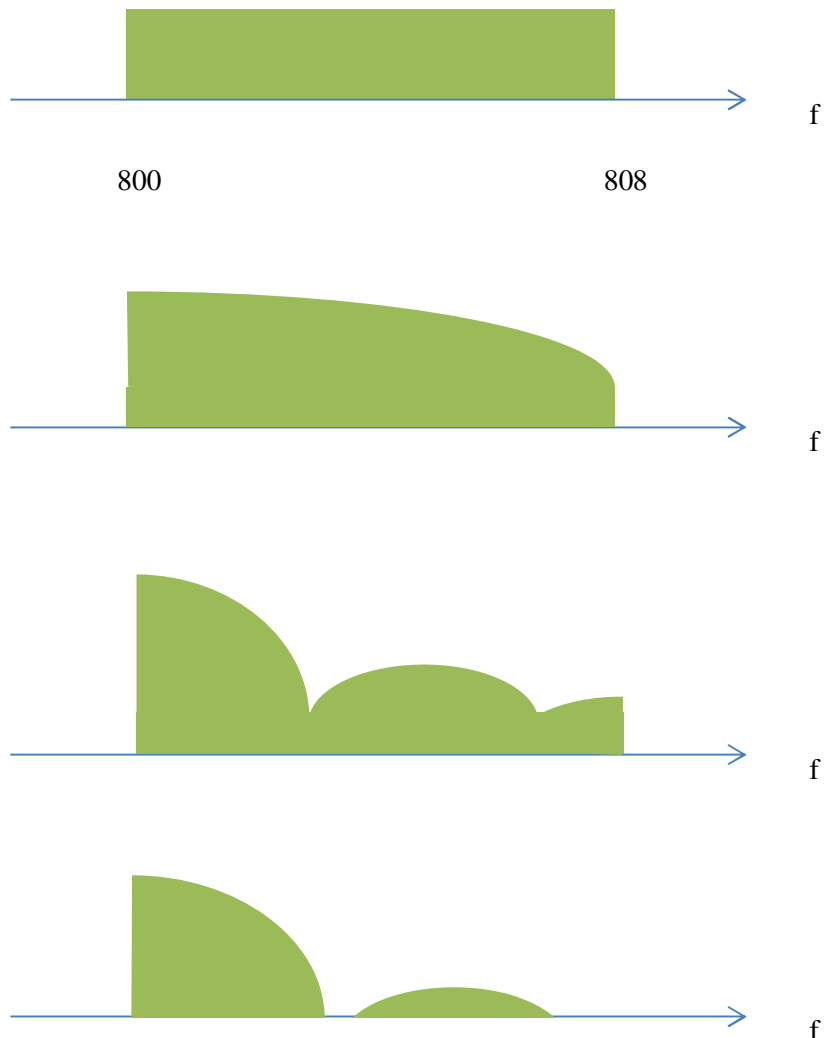
$$\frac{\pi a_1 a_2}{4\pi r^2} \cos \frac{\alpha}{2}$$

kertoo kuinka paljon sylinteristä heijastunut aalto on vaimentunut tulevan aallon tehoteiheyteen verrattuna.

Kaava ei sano mitään vaiheista vaan ainoastaan tehoteiheydestä. Vaiheet voivat siis kumota toisensa ja vahvistaa toisiaan.

4.2.2 Eteenpäinsironta

Eräs Digitan Oy:n mittauksissaan havaitsema ilmiö, joka aiheuttaa häiriötä, on TV-kanavan taajuusspektrin monitie-etenemisinterferenssistä johtuva kanavan sisäinen epäbalanssi eli selektiivinen häipyminen, joka lisäksi muuttuu ajan funktiona lapojen pyöriessä. Oheinen kuva näyttää miten monitie-eteneminen vaikuttaa TV-spektriin.



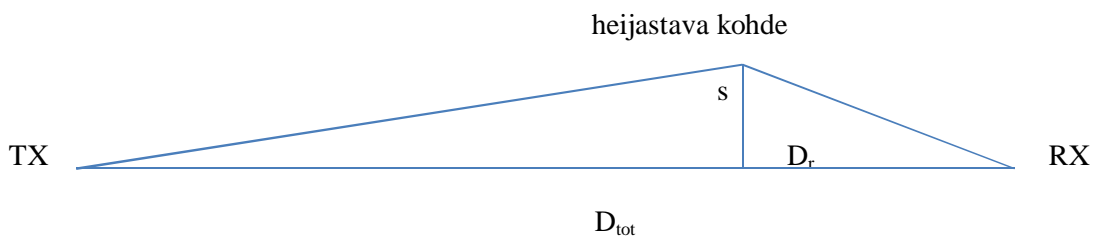
Kuva 176. Yllä häiriintymättömän lähetyksen spektri (periaatekuva), alemmat kuvat esittävät monitie-etenemisen synnyttämän interferenssin aiheuttamaa kanavan sisäistä epäbalanssia eli selektiivistä häipymistä kanavan sisällä. Alimmassa kuvassa tapahtuu jo useaa vuoroittaista kumoamista ja vahvistusta kaistan sisällä, mikä vastaa tapausta jossa heijastava kohde sijaitsee jonkin ulomman ellipsoidin alueella. Osa spektristä voi jäädä hyväksyttävään vastaanottoon tarvittavan kynnyksen alle.

Yleensä interferenssi ajatellaan vain yhden taajuuden kannalta: suoraan esteettä kulkeva aalto sekoittuu maasta tai rakennuksista heijastuneeseen signaaliin konstruktivisesti tai destruktivisesti. Koska UHF-alueen TV-lähetyksen kanava on 8 MHz leveä saattaa käydä niin, että kanavan eri laidoilla kulkevat aallot interferoivat eri tavoin. Ylärajataajuudella interferenssi tietystä kohteesta, kuten tuulivoimalasta, saattaa olla konstruktivista ja alarajataajuudella destruktivista. Toisella ajanhetkellä voi olla tilanne päinvastainen. Tuloksena spektri vääristyy. On vaikea sanoa miten suurta signaalin spektrin vääristymää TV-vastaanotin sietää, mutta on selvää, että jos osakin spektristä alittaa kriittisen signaali-kohinasuhteen rajan riittää se lähetyksen pilaamiseen. Tämä tulee kyseeseen etenkin vastaanottimen sijaitessa lähetyksen katvealueen läheisyydessä, jossa suora signaali on heikko ja lähestymässä kriittistä signaali-kohinasuhdetta. Voimaloiden lavoista siroava aalto on silloin suhteellisen voimakas tietyllä alueella voimaloiden takana.

Esimerkin vuoksi tarkastellaan lähetystä 800-808 MHz taajuusvälillä. Vastaavat ylä- ja alaraja-aallonpituudet ovat silloin $\lambda_y = 300/800 = 0,375$ m ja $\lambda_a = 300/808 \approx 0,3713$ m. Näillä taajuuksilla aaltojen on kuljettava tietty minimimatka, jotta syntyisi vähintään puolen aallonpituuden vaihe-ero signaalinen välillä. Tähän tarvitaan n kpl aallonpituuksia

$$\left(\frac{\lambda_y - \lambda_a}{\lambda_a}\right)n = \frac{1}{2}$$

eli $n = 50$. Minimimatka d on siis $n * \lambda_a$ eli tässä tapauksessa noin 18 m. Tällä tai tätä suuremmilla matka-eroilla voi siis syntyä kaistan sisäistä epäbalanssia eli selektiivistä häipymistä, mitä suurempi matka-ero, sen useampia minimejä ja maksimejä kaistalle mahtuu.



Kuva 177. Monitie-etenemisen geometria.

Olkoon signaalin suoran reitin pituus D_{tot} , jolloin heijastavan kohteen kautta kulkevan reitin pituus on vastaavasti

$$\sqrt{(D_{tot} - D_r)^2 + s^2} + \sqrt{(D_r)^2 + s^2}$$

Matka-ero suoran ja heijastuneen reitin välillä on

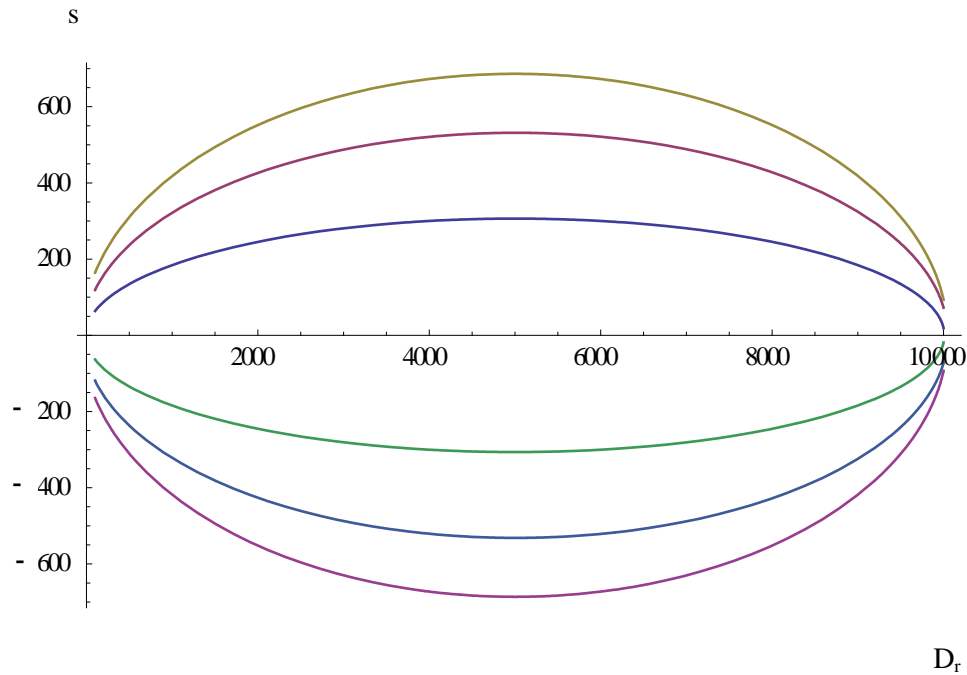
$$\sqrt{(D_{tot} - D_r)^2 + s^2} + \sqrt{(D_r)^2 + s^2} - D_{tot}$$

Tästä lausekkeesta voidaan ratkaista poikittainen etäisyys s näkösäteestä (Line of Sight = LOS) kun matka-ero on yhtä suuri kuin aallonpituuksien erotusta vastaava minimimatka d (eli matka jonka kuljettuaan ala- ja ylärajataajuudet ovat saavuttaneet puolen aallonpituuden eron).

Ratkaisu s :n neliölle on

$$s^2 = \frac{m(2D_{tot} + m)(2D_{tot} - 2D_r + m)(2D_r + m)}{4(D_{tot} + m)^2}$$

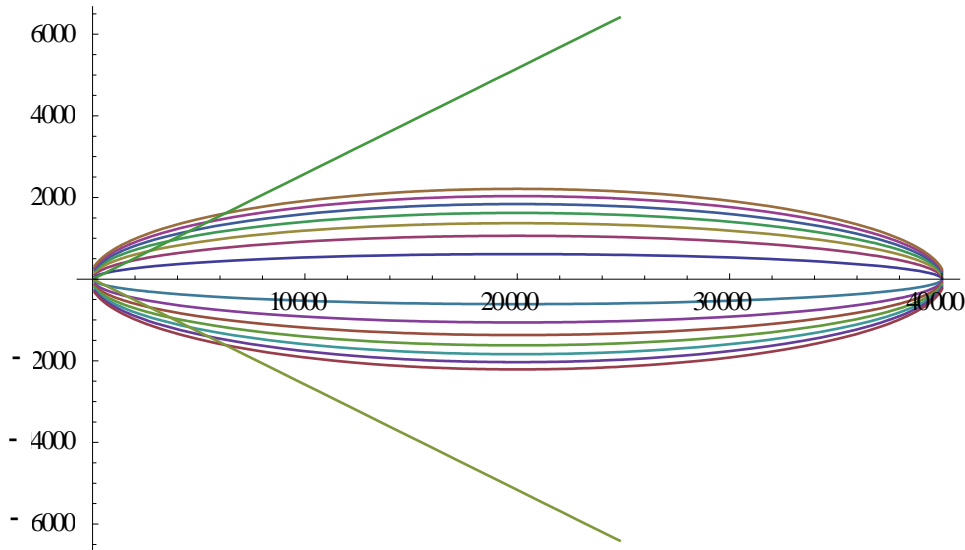
Piirretään tästä s etäisyyden sirottajan ja vastaanottimen välillä D_r funktiona kun valitaan $D_{tot} = 10$ km.



Kuva 178. Vaaka-akseli kuvaa vastaanottimen etäisyyttä sirottajasta ja pystyakseli sirottajan sivu-suuntaista poikkeamaa LOS:sta. Ellipsoidit ovat niiden alueiden rajoja, joissa monitie-etenemisestä johtuva vaihe-ero ylä- ja alataajuuksilla on puoli, puolitoista, sekä 2 ja puoli aallonpituutta. Yhteysvälin puolivälissä sallittu sivupoikkeama on suurin. (Varsinainen Fresnelin ellipsoidi on tässä tapauksessa leveimmillään halkaisijaltaan 60 metriä yhteysvälin keskellä).

Vaaka-akseli D_r kuvaa sirottajan (ts. heijastavan kohteen) etäisyyttä vastaanottimesta ja pystyakselin s kuvaa sen poikittaisetäisyyttä LOS:sta. Vaaka-akselista ylöspäin lukien alin käyrä esittää puolta aaltoa vastaavaa matka-eroa, seuraavaksi ylin 1,5 aallonpituutta ja ylin 2,5 aallonpituutta vastaavaa matka-eroa alimman ja ylimmän taajuuskomponentin välillä. Jos esim. yhteysvälin puolessavälissä sijaitsee heijastava kohde (kuten tuulivoimalan lapa), kohde saa sijaita korkeintaan noin 270 m LOS:sta sivussa, jotta matka-ero eri taajuuksilla pysyisi samanlaisena yli koko taajuuskaistan. Tätä kauempana taajuuskaistan sisällä eri aallonpituuden vuoroin vahvistuvat tai heikkenevät.

Seuraava kuva esittää samaa tapauksessa yhteysväliä $D_{\text{tot}} = 40$ km, joka vastaa Porin Peittoon alueen tilannetta Eurajoen TV-lähettimen kannalta.


 D_r

Kuva 179. Vaaka-akseli kuvaa vastaanottimen etäisyyttä ja pystyakseli sirottajan sivusuuntaista poikkeamaa LOS:sta. Ellipsoidit kuvaavat niitä alueita, joissa monitie-etenemisestä johtuva vaihe-ero ylä- ja alataajuuksilla on \pm puoli, \pm puolitoista, \pm kaksi ja puoli aallonpituutta jne. ulospäin mentäessä. Yhteysvälin puolivälissä sallittu poikkeama on suurin. (Varsinainen Fresnelin ellipsoidi on leveimmillään halkaisijaltaan 120 metriä yhteysvälin keskellä. Sitä ei ole piirretty kuvaan.)

Alin käyrä kuvaa puolen aallonpituuden minimimatka-eroa, seuraava käyrä ylöspäin on puolentoista aallonpituuden minimimatka-ero, seuraava $2\frac{1}{2}$ jne. Suoran viivan kaltevuus vastaa lavan sirontakuvion keilanleveyttä (n. 15 astetta).

Kuvasta nähdään, kun $D_r = 2$ km, että alue jossa kanavan selektiivistä häipymistä ei voi syntyä, eli maksimipoikkeama s on noin 250 m, ja alue kasvaa 6 km päässä $s = 400$ metriin. Heijastavan kohteen on siis sijaittava tätä pienemmällä etäisyydellä LOS:sta jottei selektiivistä häipymistä pääsisi syntymään. Etäisyydellä 5 km nähdään, että keila on jo noin 1,3 km leveä, kun taas alue jonka sisällä häipymistä ei synny on vajaat ± 400 m LOS:n ympärillä. Tuulivoimalan lavan sirontakeilassa syntyy tällä etäisyydellä jo monta interferenssimaksimia ja -minimiä.

Arvioidaan seuraavaksi minimien ja maksimien syvyyttä. Jos lavan keskimääräiseksi säteeksi otetaan 1,5 m ja lavan pituudeksi 60 m saadaan eteenpäinsironnan poikkipinnaksi noin $\sigma = 2,9$ milj. m^2 eli $64,6$ dBm^2 . Oletetaan yksinkertaisuuden vuoksi, että sironta tapahtuu pistemäisestä lähteestä, mikä ei täsmälleen pidä paikkaansa, koska oletus ei huomioi lähikenttäolosuhteita.

Yhtälöstä

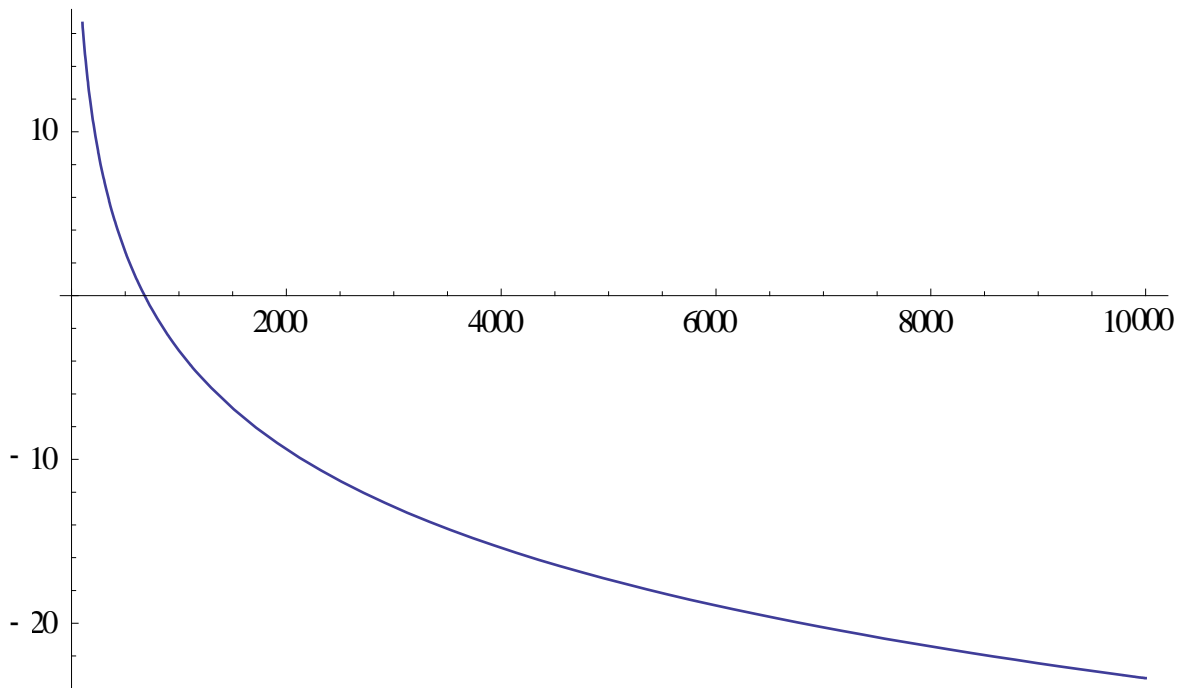
$$\sigma = 4\pi r^2 \frac{S_{sca}(r)}{S_{inc}(d)}$$

voidaan ratkaista likimain etäisyys r , jolla maanpinnalla vastaanotettu lavasta sironneen aallon tehoiteus on yhtä suuri kuin suoraan TV-lähettimestä tulleen signaalin tehoiteus. Tuolloin aallot voivat keskinäisestä vaihe-erosta riippuen joko kumota toisensa täydellisesti tai vahvistaa toisiaan (tai jotain tältä väliltä). Saadaan etäisyydelle r yhtälö

$$\frac{D^2}{(D+r)^2} \frac{1}{2} = \frac{\sigma}{4\pi r^2}$$

joka on Porin Peittoon alueella arviolta 700 m.

Lavan sirottama tehotiheys (dB)



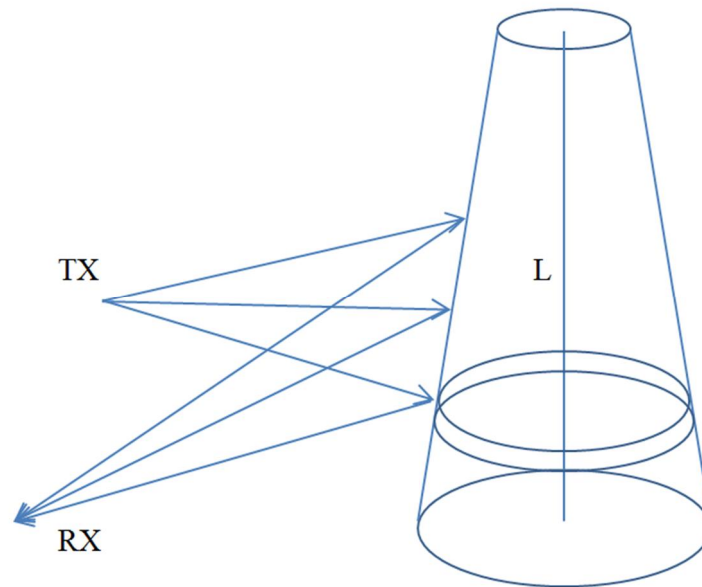
Kuva 180. Pysty akseli osoittaa lavan eteenpäinsironnan tehotiheyttä suoraan lähettimestä vastaanotettuun signaalin tehotiheyteen verrattuna funktiona etäisyytenä voimalaan.

Nähdään, että 700 metrin päässä suora signaali on yhtä voimakas kuin lavan eteenpäinsironnan maksimivoimakkuus. Tämän jälkeen sironneen tehon intensiteetti laskee nopeasti.

Etäisyydellä 1 km monitie-signaali on noin 4 dB vaimeampi kuin pääsignaali ja etäisyydellä 2 km jo 10 dB. Tässä laskussa on otettu huomioon, että maanpinnalla vähintään puolet Fresnelin ellipsoidista on peitossa, mikä automaattisesti antaa noin 6 dB vaimennusta. Jos vaimennus maanpinnalla on suurempi, mikä katvealueella on täysin mahdollista, tilanne huononee ja 2 km päässä monitie-edennyt signaali on monta dB suurempi.

4.2.3 Tuulivoimalan tornin sironta

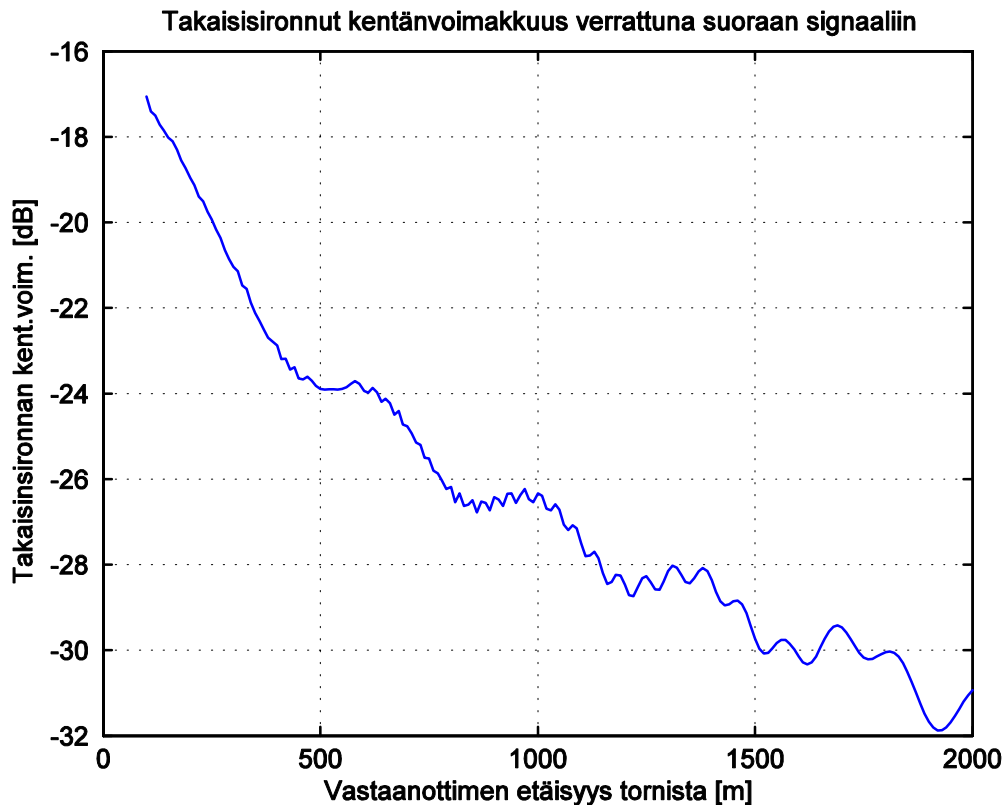
Tuulivoimalan torni on useimmiten huippua kohti suippeneva metallisylinteri.



Kuva 181. Skemaattinen esitys tuulivoimalan tornin sironnan laskemisesta. Tornin ylöspäin suippenevasta muodosta johtuen ”peiliheijastus” suuntautuu viistosti ylöspäin, jossa TV-vastaanottimia ei ole. Toisin sanoen maan pinnalla ei aallon tulokulma voi milloinkaan olla yhtä suuri kuin heijastuskulma siten, että lähetin ja vastaanotin olisivat tuulivoimalan kanssa samassa tasossa.

Heijastuksen laskentaa varten sylinteri jaetaan korkeussuunnassa kapeisiin viipaleisiin, joiden säde on vakio ja korkeus L/N , jossa L on tornin korkeus ja N on viipaleiden lukumäärä. Viipaleiden on kuitenkin oltava selvästi yli aallonpituuden korkuisia fyysikaalisen optiikan menetelmää ajatellen. Koska kunkin viipaleen fyysikaalisen optiikan mukainen sirontakuvio tunnetaan, voidaan summaamalla kunkin viipaleen heijastama kenttä laskea tornin heijastus. Yhtälöt, joihin laskenta perustuu, on esitetty julkisessa raportissa VTT-R-08482-11 ”Tuulivoimaloiden vaikutus valvontasensoreihin. Loppuraportti”, s. 88 [4].

Tuulivoimalan tornin vaikutus muuhun kuin eteenpäinsironnan suuntaan osoittautuu kuitenkin vähäiseksi johtuen erityisesti siitä, että voimala kapenee ylöspäin. Oheinen teoreettisesti laskettu kuva osoittaa, kuinka heikkoa heijastus on takaisinsironnan suuntaan kun etäisyys TV-lähettimeen $D_{tot} = 40$ km. Lähetinantennin korkeus on 300 m maasta ja tuulivoimalan juuren korkeus 10 m maasta sekä vastaanotinantennin korkeus myös 10 m maanpinnasta. Taajuus on 800 MHz. Maaston vaimennusta suoraan TV-signaaliin ei ole huomioitu.

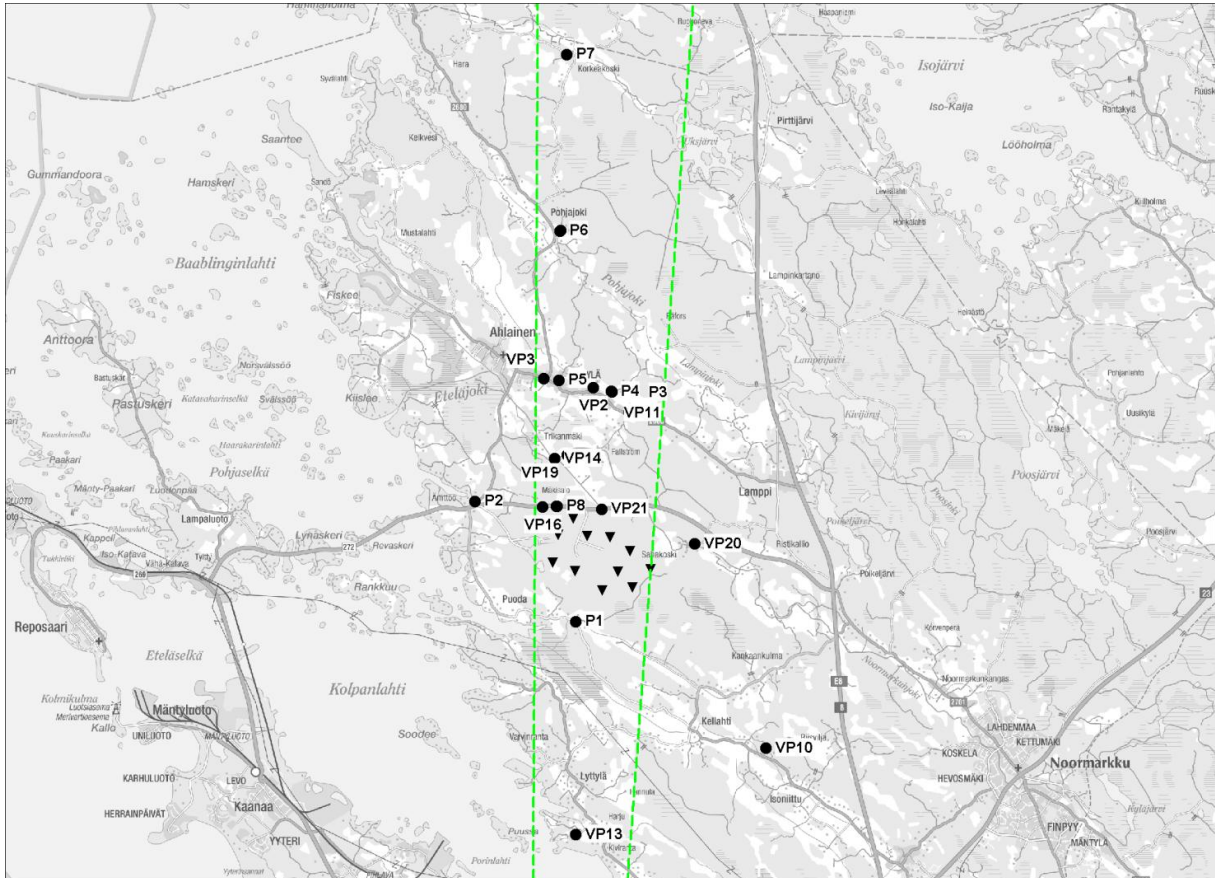


Kuva 182. Tuulivoimalan tornin heijastus. Nähdään, että jo puolen kilometrin päässä voimalasta voimakkuus on laskenut 24 dB alle TV-lähettimestä suoraan tullen signaalin tason. Tulos perustuu Peittoon tuulivoimaloiden päämittoihin.

Sivuille päin sironta on vielä heikompaa, mutta eteenpäinsironnan suuntaan eli voimaloiden ”varjopuolelle” sironta on voimakasta.

4.3 Peittoon alueen mittaukset

Tuulivoimaloiden TV-vaikutusten kokeellinen tarkastelu perustuu Digita Oy:n vuonna 2014 suorittamiin mittauksiin TV-signaalista TuuliWatti Oy:n Porin Peittoon tuulivoima-alueella ja sen läheisyydessä [14]. Tarkastelu kohdistuu Peittoon alueeseen, koska siellä on havaittu vaikutuksia televisiovastaanotossa 12 voimalan tuulivoimapuiston vuosina 2013–2014 tapahtuneen käyttöönoton jälkeen. Tuulivoima-alue ja mittauspisteet on esitetty seuraavissa kuvissa lähteestä [14].



Kuva 183. Mittauspisteet Peittoon tuulivoimaloiden vaikutuspiirissä.



Kuva 184. Mittauspisteet Peittoon tuulivoimaloiden lähiympäristössä.



Kuva 185. TuuliWatti Oy:n tuulivoimala Peittoon alueella.

4.3.1 Alustavia havaintoja

Mittaukset kohdistuivat sekä signaalin voimakkuuteen ja sen vaihteluun ajan mukana että sen laatuun, kuten bittivirhesuhteeseen. Mittauspisteet oli valittu niin, että niitä on lähettimestä katsottuna tuulivoimapuiston edessä, sivulla ja varsinkin takana. Jotkut mittauspisteet oli valittu tarkoituksellisesti sellaisiksi, että niissä voimaloiden vaikutusta ei todennäköisesti havaita.

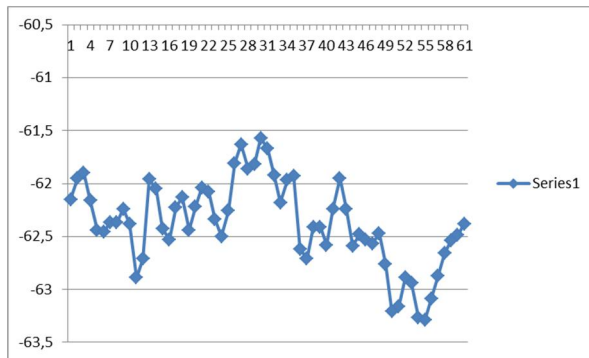
Tuulivoimapuiston edessä (TV-lähettimestä katsottuna) ja sivulla ei merkittäviä vaikutuksia näissä mittauksissa ole havaittu, mutta kentänvoimakkuus muuttuu troposfäärin vaihteluiden takia myöskin niissä mittauspisteissä, joissa tuulivoimaloiden vaikutusta ei näy (P1, P2, VP10, VP13).

Tuulivoimapuiston takana näkyy nopeampaa signaalin vaihtelua tuulivoimaloista johtuen, vastaanotto ei silti aina huono sielläkään.

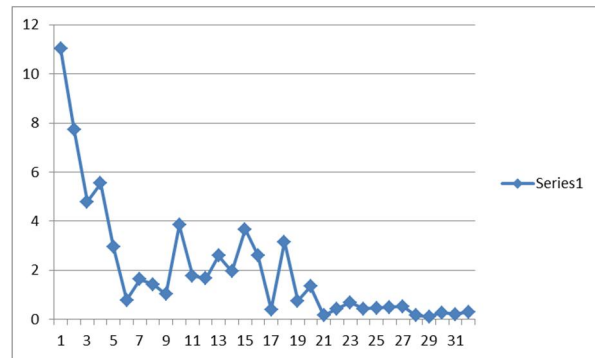
Takasektorissa vaikutusten voimakkuus ja laatu riippuu etäisyydestä.

4.3.2 Esimerkkejä mittauksista

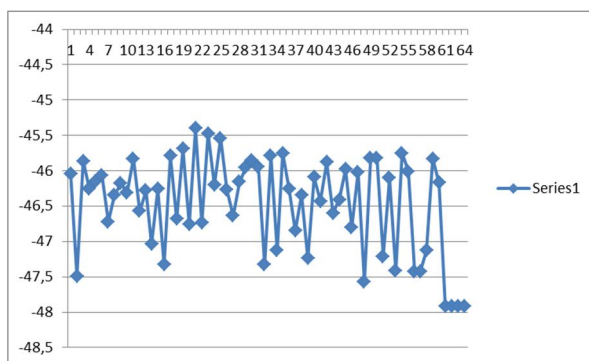
Mittaustuloksia on erittäin suuri määrä, alla olevissa kuvissa (kuva 186, a ja c) on kaksi esimerkkiä tyypillisistä signaalin voimakkuuden mittaustuloksista. Näiden perusteella on FFT-muunnoksella laskettu vaihtelujen spektrit (kuva 186, b ja d). Havaitaan vaihtelun keskittymistä joko pienille tai suurille taajuuksille, tämä ero on osakuvista a ja c helposti silmälläkin havaittavissa ja kuvastaa tuulivoimaloiden tyypillistä vaikutusta (c ja d) tai sen puuttumista (a ja b).



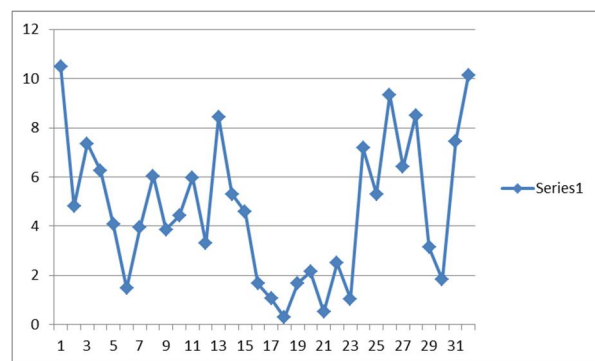
a) Signaalin voimakkuus minuutin aikana pisteessä VP10A (heinäkuu 2014). Ei havaittavaa tuulivoimaloiden vaikutusta.



b) Kuvan a vaihtelun spektri.



c) Signaalin voimakkuus minuutin aikana pisteessä P4A (heinäkuu 2014). Tuulivoimaloiden vaikutus on havaittavissa.



d) Kuvan c vaihtelun spektri.

Kuva 186.

Parhaan mitan signaalin laadulle muodostaa kuitenkin bittivirhesuhde (BER), joka myös mitattiin. Sen digitaaliselle televisiolle DVB-T-järjestelmässä käytetty maksimiarvo hyväksyttävälle vastaanotolle on $2 \cdot 10^{-4}$ ennen Viterbi-dekoodausta, DVB-T2-järjestelmässä vastaava mitta on BER ennen LDPC-dekoodausta.

4.4 Häiriöiden syntymekanismit

4.4.1 Alustavia päätelmiä häiriöiden syistä

On selvää, että tuulivoimaloiden paikallaan pysyvät osat (tornit) aiheuttavat heijastustensa kautta monitie-etenemistä, mutta tämä pysyy vakiona. Viiveet eivät voi ylittää lähellekään suojaväliä (esim. 112 μ s, 33,6 km:n matkaero), joten niistä ei liene haittaa siksi, että ne ulottuisivat usean symbolin yli. Suojavälin suuruinen matkaero edustaa niin suurta tuulivoimaloiden etäisyyttä, että häiriösignaalin pitäisi tällöin olla hyvin heikko, eikä sen tällöin uskota voivan aiheuttaa merkittävää haittaa. Vastaanotin kykenee pilottisignaaleihin perustuvan kanavakorjaimensa avulla tiettyyn rajaan asti korjaamaan monitie-etenemisestä johtuvat vaihe- ja amplitudivirheet.

Edellisestä seuraa, että ainakin osan haittavaikutuksista täytyy liittyä voimaloiden liikkuviin osiin eli lapoihin. Toisaalta tuulivoimaloiden lapojen pyörimisen aiheuttamat signaalitason muutokset eivät yksin riitä "pilaamaan" vastaanottoa, koska muutokset ovat kokonais-signaalin tasoon verrattuina pieniä ja suhteellisen hitaita. Koska haittavaikutuksia kuitenkin

myös voimakkaassa kentässä esiintyy, niin on etsittävä muuta selitystä. Haittojen syynä näyttävät tässä tapauksessa olevan nimenomaan lapojen aiheuttamat Doppler-siirtyneet häiriöt.

Heikossa kentässä näkyvyysalueen rajojen läheisyydessä ei Doppler-siirtymään riitä selittämään vastaanotossa ilmenneitä häiriöitä, vaan syytä on etsittävä muualta, kuten monitie-etenemisestä ja voimaloiden aiheuttamasta vaimennuksesta signaalille.

Edellisen perusteella päätellään, että häiriöiden pääasiallisia aiheutumismekanismeja on kolme, joista yksi liittyy voimalan lapoihin ja yksi torniin:

- 1) Voimaloiden aiheuttama vaimennus etenevälle signaalille.
- 2) Voimalan **lapojen** liikkeen aiheuttama **Doppler-siirtynyt heijastus**, joka aiheuttaa vastaanotettavaan signaaliin kohinaan rinnastettavaa häiriötä.
- 3) Voimalan **tornien** eteenpäinsironnasta aiheutuva **monitie-eteneminen**, joka aiheuttaa selektiivistä häipymistä kanavan kaistalla ja aiheuttaa heikossa kentässä signaalin joidenkin osien painumisen hyväksyttävän kynnystason alapuolelle.

Näitä häiriömekanismeja käsitellään jatkossa erikseen.

4.4.2 Voimaloiden vaikutus signaalin voimakkuuteen

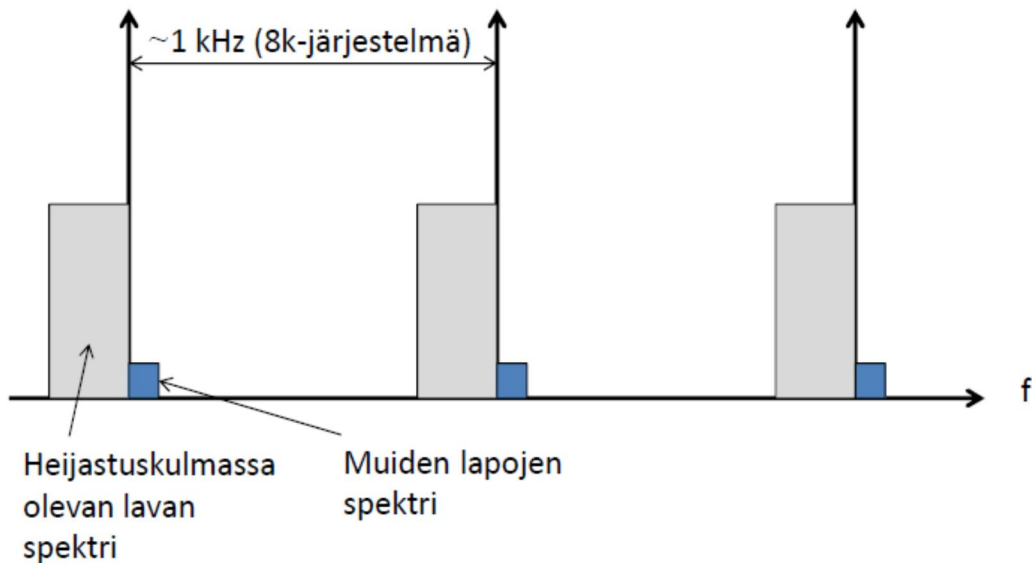
Signaalin kulkureitillä olevat voimat varjostavat signaalia vaimentaen sitä jonkin verran. Vaimennuksen arvioimiseksi ajatellaan radioaallon etenevän lähettimestä pisteessä P7 olevaan vastaanottimeen Fresnelin vyöhykkeen suuruudessa ”putkessa”, jonka halkaisija välissä olevien tuulivoimaloiden kohdalla on 132 metriä ja poikkipinta-ala $A_F = 13762 \text{ m}^2$. Yhden tuulivoimalan suurin geometrinen poikkipinta-ala A_T Fresnelin vyöhykkeen sisällä on noin 1300 m^2 . Huygensin periaatteen ([23]) nojalla vuoputken poikkipinnalla olevat kentät voidaan korvata ekvivalenttilähteillä, joiden aiheuttamien kenttien koherenttina summana kaukoalueen kenttä muodostuu. Kun nyt voimaloiden peittämät ekvivalenttilähteet ovat ”poissa pelistä”, niin sähkökentän vaimennuskerroin F on luokkaa

$$F = (A_F - A_T)/A_F \text{ eli desibeleinä } 20\lg((A_F - A_T)/A_F).$$

Yllä olevilla lukuarvoilla saadaan tällöin 0,86 desibelin vaimennus, joka on pieni muihin vaihteluihin ja epävarmuustekijöihin verrattuna. Jos vyöhykkeen sisään sattuu useita tuulivoimaloita, on peittyvä pinta-ala ja vaimennus vastaavasti suurempi.

4.4.3 Doppler-siirtymän vaikutus

Seuraava kuva esittää Doppler-siirtyneiden heijastusten vaikutusta televisiosignaaliin.



Kuva 187. Tuulivoimalan lapojen Doppler-siirtyneiden heijastusten digitaalisen televisiosignaalin kantaaltoihiin aiheuttama kohinatyyppinen häiriö.

Digitaalisen DVB-T- tai DVB-T2-järjestelmän OFDM-kanavanipuissa on 8 MHz:n (UHF-alue) tai 7 MHz:n (VHF-alue) kaistalla tuhansia kantaaltoja, esimerkiksi 8k-järjestelmässä noin 1 kHz:n päässä toisistaan. Oletetaan, että samaan aikaan on vaikuttamassa sekä suoraan lähettimestä tullut signaali että tuulivoimalan liikkuvista lavoista heijastunut signaali, jonka taajuus on muuttunut Doppler-siirtymän johdosta. Vastaanottimessa nämä summautuvat kuvan 187 mukaiseksi kokonaissignaalksi. Lavan ollessa sellaisessa asennossa (heijastuskulmassa), että signaali voi heijastua siitä heijastumislain mukaisesti suoraan vastaanottimeen, saadaan kuvan 187 kantaallon vasemmalla puolella (taajuudessa alapuolella) oleva voimakas heijastussignaali. Tämä signaali voi olla kuvan mukaisesti kantaallon alapuolella, jos lavan liikkeen suunta on sellainen, että signaalitie pitenee, muussa tapauksessa se sijaitsee kantaallon yläpuolella. Kolmilapaisen tuulivoimalan kaksi muuta lapa ei välttämättä samaan aikaan kuin yksi niistä voi olla heijastuskulmassa, jonka takia niistä tuleva heijastus on huomattavasti heikompi, mutta kuitenkin olemassa. Sitä kuvaa kantaallon oikealla puolella oleva heikompi Doppler-siirtynyt signaali, joka on aina eri puolella kantaaltoa kuin voimakkaampi signaali. Suurimman osan ajasta mikään lapa ei ole heijastuskulmassa, jolloin voimakkainta signaalia ei joka hetki esiinny. Voimakkaimman signaalin kestoaika riippuu muiden tekijöiden ohella lapojen sen hetkisestä pyörimisnopeudesta. Sen kestoaika ulottuu aina usean peräkkäisen symbolin ajalle. Usean tuulivoimalan signaalit summautuvat yhteen kokonaishäiriösignaalksi.

Liikkuvista lavoista tapahtuva heijastus eroaa esimerkiksi liikkuvassa autossa havaittavasta Doppler-siirtymästä siinä, että se ei ole yksittäinen spektriviiva, vaan on jakautunut tietyille taajuuskaistalle jatkuvaksi kohinamaiseksi signaalksi. Tämä johtuu siitä, että heijastusta aiheuttavat lavan osat liikkuvat eri nopeudella, joka kasvaa lineaarisesti roottorin navasta lavan kärkeen. Tällöin vastaavan kohinaspektrin muoto noudattaa heijastuspoikkipinnan jakaumaa pitkin lapa kuljettaessa. Kuvassa tämä on oletettu yksinkertaisuuden vuoksi tasan jakautuneeksi. Kohinaspektrin tarkka muoto riippuu siis lapojen muodosta, koosta, asennosta ja nopeudesta.

Doppler-siirtymän suuruus f_d riippuu signaalitien pituuden s muutosnopeudesta ds/dt . Tämä taas riippuu, paitsi roottorin pyörimisnopeudesta, myös sen asennosta lähettimeen ja vastaanottimeen nähden, joka taas riippuu tuulen suunnasta. Luonnollisesti vastaanottimen sijainti tuulivoimaloihin nähden ja suhteessa lähettimeen vaikuttaa myös. Tuulivoimaloiden koko arvattavasti vaikuttaa heijastuneen signaalin voimakkuuteen. Vaikka lavat ovat ainakin suurimmaksi osaksi eristeainetta eivätkä metallia, ne silti heijastavat televisiotajuusalueen

radioaaltoja, koska eri aineiden välisellä rajapinnalla tapahtuu heijastus. Se on yleensä suuruusluokkaa 5 dB heikompi kuin vastaavan muotoisen metallipinnan heijastus.

Jos tuulivoimala sijaitsee lähettimen ja vastaanottimen välisellä suoralla, ei signaalireitin pituus juuri muutu voimalan pyöriessä, jolloin Doppler-siirtymä jää pieneksi. Voimalan sijaitessa hiukan tältä reitiltä sivussa siirtymä on suurempi. Suurin arvo saavutetaan, kun tarkastellaan voimalasta takaisin heijastunutta signaalia vastaanottimen sijaitessa voimalan edessä lähettimestä katsottuna. Jos lapojen asento on sellainen, että sekä vastaanotin että lähetin ovat roottorin tasossa roottorin pyöriessä maksiminopudellaan, saadaan suurin mahdollinen Doppler-siirtymä lasketuksi seuraavasti:

$$f_d = (ds/dt)(f/c)$$

Suoraan voimalan takana tai edessä voi olla $f_d = 0$ Hz. Suurin arvo saavutetaan suoraan voimalan edessä, esim. $f_d = 2 v_{\max} f / c = 2 * 80 \text{ m/s} * 600 \text{ MHz} / 300\,000 \text{ km/s} = 320 \text{ Hz}$. Yleensä arvo on jotain tältä väliltä **0...320 Hz**.

v_{\max} = lavan kärjen maksiminopeus = 80 m/s

f = taajuus = 600 MHz

c = valon nopeus = 300 000 km/s

Tämä laskelma ei kerro mitään Doppler-siirtyneen signaalin voimakkuudesta, joka on oleellinen tekijä häiritsevyyden kannalta. Tätä kysymystä tarkastellaan myöhemmin.

Häiritsevyyden arvioimiseksi oletetaan (riittävän voimakkaassa kentässä): Hyväksyttävään vastaanottoon

tarvittava kantoaalto-häiriösuhde C/I = tarvittava kantoaalto-kohinasuhde C/N,

joka on suuruusluokkaa ~ esim. 17,3 dB.

Tätä kriteeriä voidaan perustella myös sillä, että DVB-T2-järjestelmässä on katsottu päteväksi asettaa hyväksyttävä minimi halutun signaalin suhteelle saman kanavan häiriöön (toinen DVB-T2-lähetin) samaksi kuin tarvittava signaalikohinasuhde C/N ([20], sivu 37, kohta 3.4.2.1).

Häiriön voimakkuuden laskemiseksi on tunnettava sen aiheuttavat mekanismit. Näitä ovat takaisinsironta ja eteenpäinsironta.

4.4.4 Tornien eteenpäinsironta

Lasketaan tuulivoimalan tornista eteenpäinsironnan kautta sironneen signaalin voimakkuus vastaanottoantennin luona. Merkitään

σ = tuulivoimalan tornin eteenpäinsironnan poikkipinta / m^2

A = tuulivoimalan tornin geometrinen poikkipinta-ala / m^2

D = tuulivoimalan tornin keskimääräinen halkaisija / m

L = tuulivoimalan tornin korkeus / m

r_1 = tuulivoimalan etäisyys lähettimestä / m

r_2 = vastaanottimen etäisyys tuulivoimalasta / m

S_1 = halutun signaalin tehotiheys tuulivoimaloiden luona / Wm^{-2}

S_2 = tuulivoimalasta sironneen häiriösignaalin tehotiheys vastaanotinantennin luona / Wm^{-2}

P_1 = lähettimen säteilyteho (EIRP) / W

G_2 = vastaanottoantennin vahvistus

L_2 = vastaanottoantennin kaapelivaimennus

F_2 = kentänvoimakkuuden vaimennuskerroin tuulivoimalasta vastaanotinantenniin (vapaan tilan vaimennukseen verrattuna)

S_2' = kertoimella F_2 korjattu S_2

Eteenpäinsironna voidaan ymmärtää ajattelemalla, että alun perin häiriöttömään homogeeniseen tasoallon kenttään (lähettimen lähete) tuodaan häiritsevä esine, tässä tapauksessa tuulivoimalan torni. Tornin aiheuttaa sironneen kentän, joka summautuu alkuperäiseen kenttään. Sironnut kenttä on sama kuin olisi tasaisesti valaistulla apertuuriantennilla, joka säteilisi kuin tornin geometrinen poikkipinta lähettimestä pois päin. Sironnut kenttä on yhtä voimakas kuin häiriöttömän tasoallon kenttä kyseisen pinta-alan kohdalla, mutta vastakkaisvaiheinen, siksi se kumoaa välittömästi tornin takana alkuperäisen kentän, jolloin sinne syntyy varjo. Kauempana sironnut kenttä vähitellen heikkenee levitessään laajemmalle alueelle, jolloin se ei enää pysty täysin kumoamaan alkuperäistä kenttää, ja varjostusvaikutus vähenee.

Edellä on eteenpäinsironnan poikkipinnaksi todettu $\sigma = 4\pi A^2/\lambda^2$. Todetaan, että tuulivoimalan tornille $A = DL$. Tästä voidaan laskea sironneen signaalin tehotiheys S_2 etäisyydellä r_2 voimaloista:

$$S_2 = \frac{\sigma S_1}{4\pi r_2^2}$$

jossa $S_1 = P_1/(4\pi r_1^2)$. Tämä S_2 :n kaava pätee pistemäiselle säteilijälle kaukokentässä, tällöin tehotiheys on kääntäen verrannollinen etäisyyden neliöön, ei kuitenkaan välttämättä tässä tapauksessa täsmälleen voimalan suuresta koosta johtuen. Mahdollinen lähikenttätilanne otetaan huomioon seuraavasti:

Sironnan säteilykeilan leveys pystytasossa olkoon $\Delta\alpha$ ja vaakatasossa $\Delta\beta$. Edellä olevan perusteella, ja kun λ on pieni verrattuna mittoihin D ja L , saadaan likimain $\Delta\alpha \approx \lambda / L$ ja $\Delta\beta \approx \lambda / D$. Näiden kulmien kärkipiste ei sijaitse tornissa, vaan etäisyyksien L^2/λ ja D^2/λ päässä tornista lähettimeen päin. Saadaan lähikentässä tarkennettu kaava S_2 :lle:

$$S_2 = \frac{S_1 DL}{DL + (D\Delta\alpha + L\Delta\beta)r_2 + \Delta\alpha\Delta\beta r_2^2}$$

Kaavan muodosta huomataan, että keskipitkillä etäisyyksillä tehotiheys on likimain kääntäen verrannollinen etäisyyteen eikä sen neliöön, tämä johtuu siitä, että keila levenee aluksi voimakkaasti vaakatasossa, mutta hyvin vähän pystytasossa, vasta pidemmällä etäisyyksillä riippuvuus alkaa lähestyä käänteistä neliölakia.

Arvioidaan tuulivoimaloista sironneen häiriön voimakkuus verrattuna haluttuun signaaliin lähellä näkyvyysalueen rajaa heikossa kentässä. Olkoon F_2 kentänvoimakkuuden vaimennuskerroin tuulivoimalasta vastaanotinantenniin (vapaan tilan vaimennukseen verrattuna).

Oletetaan, että vastaanotin on suoraan tuulivoimalan takana lähettimestä katsottuna eli eteenpäinsironnan keilassa pisteessä P7, joka sijaitsee 51 km lähettimestä. Lähetysantennin korkeus olkoon 300 m maan pinnasta (vastaten hyvin Eurajoen lähetysasemaa) ja vastaanotinantennin vastaavasti 10 m. Tuulivoimalan sirottavan osan keskikorkeudeksi arvioidaan 150 m maan pinnasta. Tällöin vaimennuskertoimeksi tuulivoimalan ja vastaanottoantennin välillä saadaan ITU-R:n käyrästä ([22], sivu 15, kuva 9, 50 % ajasta) taajuudelle 600 MHz $F_2 = -16$ dB (vastaava absoluuttiarvo tehotiheydelle 0,02512). Lähetysantennin ja tuulivoimalan välillä oletetaan vallitsevan vapaan tilan etenemisen, koska ne molemmat ovat korkealla. Lukuarvoilla

$D = 6$ m

$L = 120$ m (näkyvässä oleva osa)

$r_1 = 39500$ m

$$r_2 = 11500 \text{ m}$$

$$P_1 = 50\,000 \text{ W (EIRP)}$$

$$\lambda = 0,492 \text{ m (610 MHz)}$$

$$G_2 = 12 \text{ dB}$$

$$L_2 = 2 \text{ dB}$$

saadaan

$$S_1 = P_1 / (4\pi r_1^2) = 2,550 \cdot 10^{-6} \text{ Wm}^{-2}$$

$$S_2 = 1,158 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}$$

$$\Delta\alpha/2 = 0,00410 \text{ rad}$$

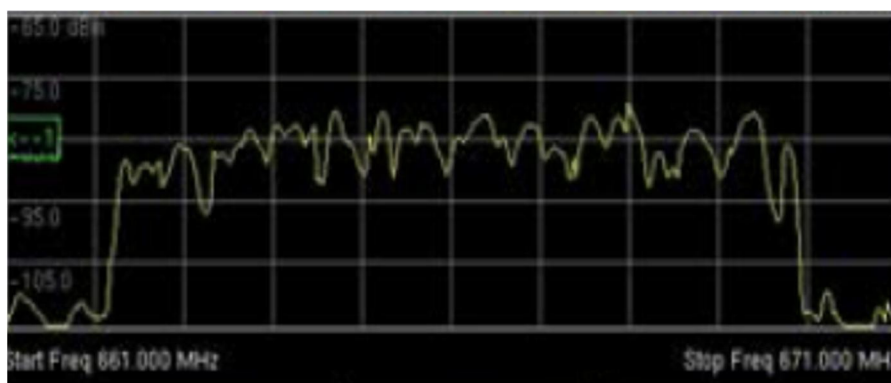
$$\Delta\beta/2 = 0,08197 \text{ rad}$$

$$S_2' = 2,909 \cdot 10^{-10} \text{ Wm}^{-2}$$

ja lopulta vastaanottimeen saatavaksi tuulivoiman tornista eteenpäinsironnan kautta tullee häiriötehoksi **-72,5 dBm**. Mittausten ([14]) mukaan kanavanipun A signaalitaso tuossa pisteessä P7 on keskimäärin noin **-72 dBm**, eli sangen lähellä tätä.

Toisaalta kartan perusteella voidaan arvioida, että lähetysaseman ja pisteen P7 väliseltä suoralta eniten, noin 2 km, sivussa olevan voimalan aiheuttama heijastuneen signaalin matkaero on noin 223 metriä suoraan signaaliin verrattuna, ja vastaava aikaviive **0,744 μ s**. Tämä aiheuttaa $1/0,744 \mu\text{s} = 1,344 \text{ MHz:n}$ välein olevia minimejä kanavan kaistalle, kun vastakkaisessa vaiheessa olevat signaalit kumoavat toisiaan. Jos ne ovat yhtä voimakkaita, signaali periaatteessa häviää tuolla pistetaajuudella ja vaimenee merkittävästi sen ympäristössä. Signaalitasojen erotessa toisistaan esimerkiksi 2 dB on maksimivaimennus 13,7 dB voimakkaamman signaalin tasosta. Toimittaessa lähellä pienimmän käyttökelpoisen signaalin tasoa, joka on tässä tapauksessa noin -77 dBm, riittää muutaman desibelin lisävaimennus jossakin osassa kaistaa nostamaan bittivirhesuhteen yli hyväksyttävän rajan $2 \cdot 10^{-4}$. Näin juuri on käynyt kanavanipun A mittaustuloksissa pisteessä P7.

On todennäköistä, että pisteessä P7 häiriöitä on aiheuttanut useampi tuulivoimala, koska niiden eteenpäinsironnan keilanleveys on vaakatasossa muutamia asteita ja etäisyys kyseisestä pisteestä yli 11 km. Niiden aiheuttama viive on välillä 0...0,744 μ s ja minimien väli vähintään 1,344 MHz. Eri tuulivoimaloiden aiheuttamat minimit voivat sijaita toisistaan riippumatta missä tahansa osassa kanavan kaistaa. Niiden voimakkuus ja tarkka paikka myös vaihtelevat tuulivoimalan lapojen eteenpäinsironnan vaikutuksesta, joskin se on mittojen perusteella arvioituna kertaluokkaa (noin 10 dB) heikompaa kuin tornin aiheuttama.



Kuva 188. Digitaalisen televisiokanavan spektri tuulivoimaloiden aiheuttaman monitieetenemisen olosuhteissa Porin Peittoon alueella (Digita Oy:n mittaustulos Heidi Himmasen esityksestä Radiotaajuspäivänä 20.11.2014).

Toimittaessa jonkin verran lähempänä lähetysasemaa, pisteessä P6, havaitaan bittivirhesuhteen olevan riittävän hyvä virheettömään vastaanottoon, vaikka signaalin voimakkuus vaihtelee ilmeisesti tuulivoimaloiden lapojen vaikutuksesta. Nyt kuitenkin

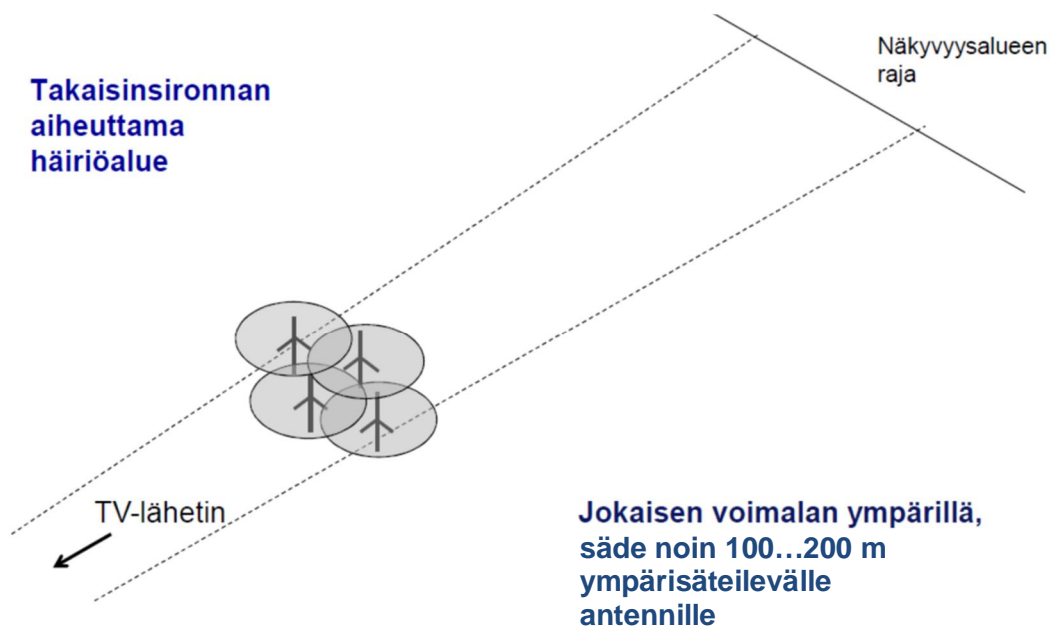
signaali on selvästi voimakkaampi kuin pisteessä P7, jolloin ei ole todennäköistä, että se häipymäkohdissakaan painuisi minimitason alapuolelle. Vielä lähempänä, pisteessä P4 noin 3 km tuulivoimapuistosta, havaitaan laadukas signaali ja selkeää kentänvoimakkuuden vaihtelua noin 2 sekunnin jaksonajalla (kuva 186 c). Näin lähellä tuulivoimapuistoa on todennäköistä, että vaihtelu johtuu vain yhdestä voimalasta, koska muiden kapeahkot sirontakeilat menevät mittauspisteen ohi. Vaihtelun jaksonaika viittaa siihen, että saman tilanteen toistuessa noin 2 sekunnin välein roottorin kierrosaika on noin 6 sekuntia, joka on tyypillinen arvo suurelle tuulivoimalalle riittävällä tuulen voimakkuudella.

4.5 Häiriöalueet

Häiriöalueiden laajuus voidaan arvioida teoreettisesti ja mittausten perusteella. Seuraavassa esitetään häiriöalueiden yleinen luonne pyrkien mahdollisuuksien mukaan selittämään havaitut häiriöt ja niiden syyt.

Seuraavassa esitettävien häiriöalueiden yleinen kvalitatiivinen luonne on yleistettävissä. Alueiden tarkempi laajuus, etäisyydet ja muut ominaisuudet riippuvat paikallisista olosuhteista. Esitetyt luvut pätevät vain Peittoon tapaukseen ja siihenkin likimääräisesti. On myös oletettu, että vastaanottoantenni on ympärisäteilevä. Koska näin ei käytännössä ole, vaan antenni on suuntaava, tilanne on todellisuudessa parempi takaisinsironnan aiheuttamille häiriöille.

4.5.1 Takaisinsironnan aiheuttamat häiriöt



Kuva 189. Takaisinsironnan aiheuttamat häiriöt.

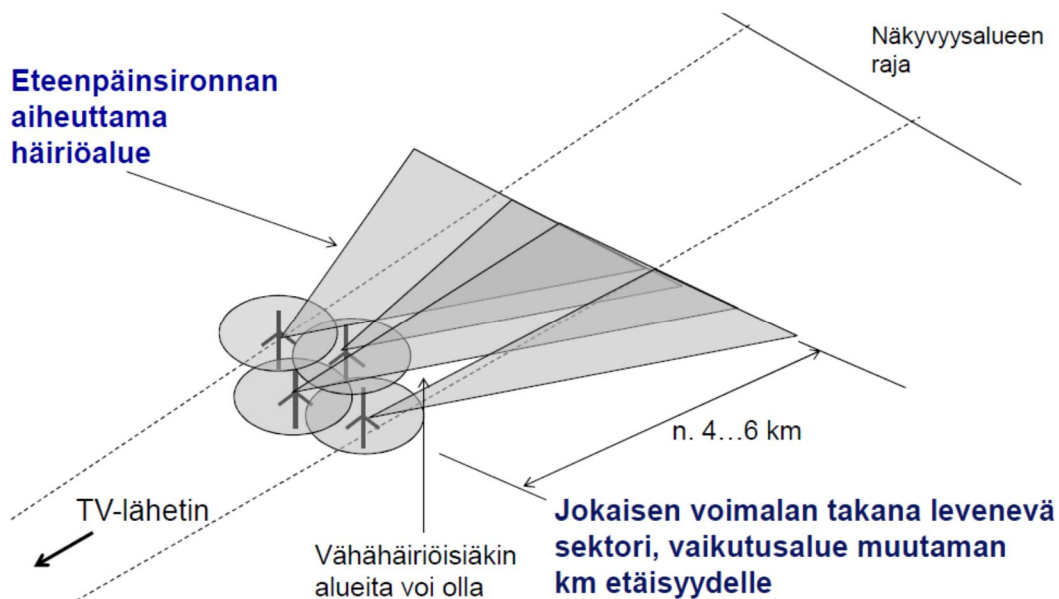
Takaisinsirontaa on käsitelty edellä. Lajojen lukuarvoilla $a_1 = 1000$ m, $R = 1,5$ m, $L = 60$ m ja taajuudella 610 MHz saadaan etäisyydeksi, jolla saavutetaan suoraan tulleele ja Doppler-siirtyneelle lavoista sironneelle signaalille häiriösuhde $C/I = 17,3$ dB, noin **140 metriä tuulivoimalasta**, eli hyvin lähellä. Kuvan 182 mukaisesti taas tyypillisillä tornin arvoilla noin 18 dB:n C/I -suhde saadaan suunnilleen samalla etäisyydellä puolestaan tornista sironneelle signaalille. Tornin heijastus ei kuitenkaan voimakkaassa kentässä ole niin haitallinen, koska se ei sisällä Doppler-siirtymää. Nämä häiriöt ulottuvat likimain samalle etäisyydelle myös sivusuunnassa.

Todetaan, että lähettimestä katsottuna tuulivoimaloiden edessä ja sivulla esiintyy takaisinsironnasta johtuvaa häiriötä, mutta sen haitallinen kantomatta on sängen lyhyt, tyypillisesti vain alle 200 metriä yksittäisestä tuulivoimalasta. Tämä häiriöalue esiintyy jokaisen tuulivoimalan yhteydessä, mutta niiden tyypillisen välimatkan ollessa vähintään 400...600 metriä erilliset häiriöalueet eivät juurikaan mene päällekkäin eivätkä vahvista toisiaan. Näin sitäkin suuremmalla syyllä, koska lapojen pyörimisestä johtuen voimakkaimmat häiriöt kestävät yleensä vain muutamia kymmeniä millisekunteja kerrallaan, eivätkä eri voimaloiden häiriöt useinkaan ilmene samanaikaisesti. Kuitenkin, jos lähettimen ja vastaanottimen välillä sijaitsee maastoeste, joka vaimentaa suoraan lähettimestä tulevaa signaalia, voivat yli 200 metrin päässäkin olevat tuulivoimalat aiheuttaa haitallisen häiriön, kun se tulee korkealta voimalan lavoista suoran näköyhteyden reittejä pitkin.

Nämä laskelmat on tehty olettaen, että vastaanottoantenni on ympärisäteilevä. Normaalin jagityyppisen televisioantennin tapauksessa takaisinsirontahäiriöiden tilanne on todellisuudessa parempi, koska antenni vahvistaa haluttua signaalia suhteessa häiriöihin ja häiriöiden vaikutusmatka lyhenee yllä arvioidusta. Jos esimerkiksi antennin etu-takasuhde on 20 dB (tehosuhde 100), ja häiritsevä tuulivoimala on suoraan takakeilassa, niin voidaan arvioida häiriöiden vaikutusmatkan lyhenevän kertoimella $\sqrt{100} = 10$, eli kymmenenteen osaan. Vaikutusmatka olisi tällöin vain joitakin kymmeniä metrejä. Lähikenttäolosuhteiden vuoksi laskelma on likimääräinen, mutta joka tapauksessa voidaan arvioida hyvälaatuisen vastaanottoantennin parantavan tilannetta takaisinsironnan aiheuttamien häiriöiden suhteen niin paljon, että ne käytännössä poistuvat niillä etäisyyksillä, joilla asutusta tuulivoimaloiden läheisyydessä yleensä voi olla.

Eteenpäinsironnan (lähettimestä katsottuna) voimaloiden takana aiheuttamiin häiriöihin antennista ei juuri ole apua, koska voimaloiden takana olevalla alueella haluttu signaali ja häiriöt tulevat likimain samasta suunnasta antennin päikeilassa, eikä häiriösuhdetta tällöin voida parantaa.

4.5.2 Eteenpäinsironnan aiheuttamat häiriöt



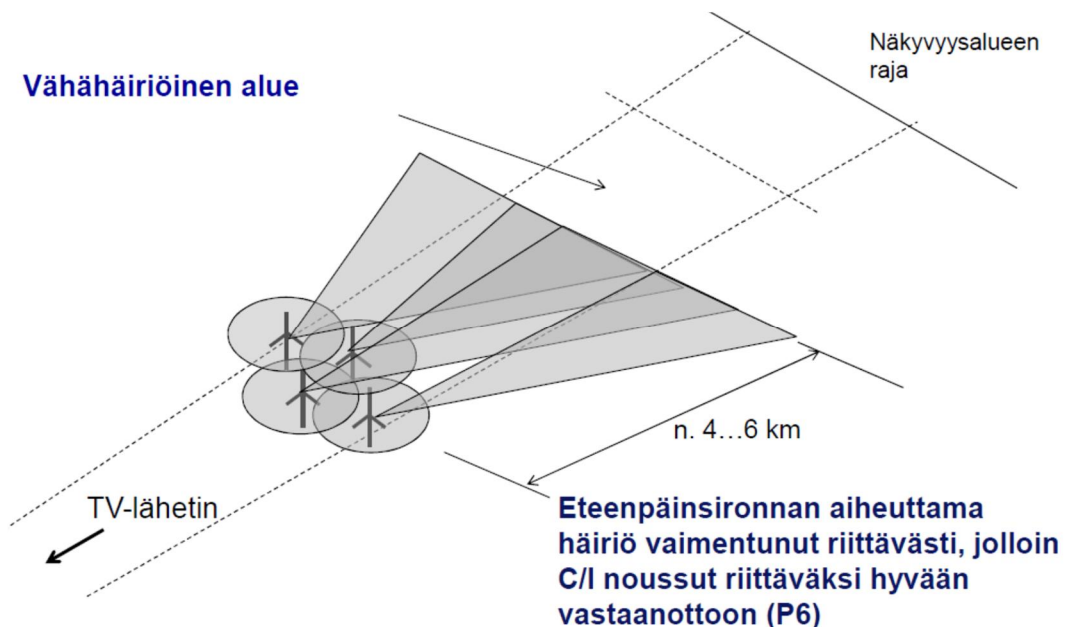
Kuva 190. Eteenpäinsironnan aiheuttama häiriöalue.

Kuten edellä on todettu, voimakkain sirontamuoto tuulivoimaloista on eteenpäinsironta. Sitä aiheuttavat tuulivoimalassa sekä lavat että torni, ja se suuntautuu lähettimestä pois päin. Pystysuorat esineet, kuten torni ja ylä- tai ala-asennossa oleva lapa aiheuttavat sirontakeilan,

joka on vaakasuunnassa leveä (tyypillisesti muutamia asteita) ja pystysuunnassa kapea (alle asteen). **Välittömästi tuulivoimaloiden takana voi olla alueita, joissa häiriötaso on alhainen**, koska signaali tulee lähettimestä tuulivoimaloiden ohi niiden välistä. Lapojen aiheuttama Doppler-siirtynyt sironnut signaali on ilmeisesti pääasiallinen vastaanottoa haittaava tekijä, tornien vaikutus on vähäisempi, koska vastaanotin kykenee korjaamaan monitie-etenemisestä aiheutuneita häiriöitä. Tuulivoimaloiden taakse (lähettimestä katsoen) mentäessä etäisyys voimaloihin kasvaa suhteessa nopeammin kuin lähettimeen. Tämän vuoksi voimaloista sironnut häiriösignaali heikkenee nopeammin, ja signaali-häiriösuhde C/I paranee. **Tietyllä etäisyydellä voimaloiden takana on raja, jonka jälkeen häiriöt ovat vaimentuneet riittävästi ja kelvollinen vastaanotto on taas mahdollista, muodostuu vähähäiriöinen alue**, joka on kuvattu kuvassa 191. Peittoon tapauksessa tämä raja on arviolta noin 4...6 km voimaloiden takana.

Tuulivoimaloiden pyörimisen vaikutuksesta signaalin voimakkuus vaihtelee voimaloiden takana tyypillisesti noin 2...3 dB. Vastaanotin kykenee kuitenkin sopeutumaan tähän melko hitaaseen vaihteluun, eikä se ole häiriöiden varsinainen syy.

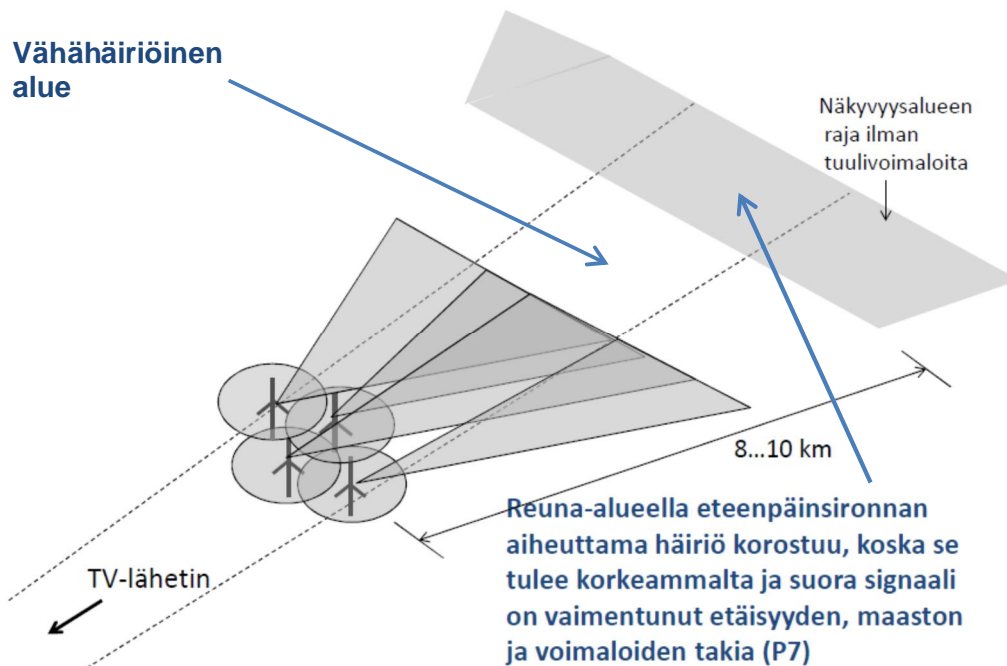
4.5.3 Vähähäiriöinen alue



Kuva 191. Vähähäiriöinen alue.

Tietylle minimietäisyydelle voimaloiden taakse muodostuu vähähäiriöinen alue, jossa voimaloiden eteenpäinsironnan aiheuttamat häiriöt ovat vaimentuneet riittävästi. DVB-T2-järjestelmässä tämä vähähäiriöinen alue saattaa jäädä kokonaan pois.

4.5.4 Häiriöt näkyyvyyden reuna-alueella



Kuva 192. Häiriöllinen alue lähellä näkyyvyysalueen rajaa.

Edelleen suuremmilla etäisyyksillä lähettimestä ja tuulivoimaloista vastaanotto-olosuhteet huononevat jälleen. **Lähestyttäessä häiriöttömän (ilman tuulivoimaloiden vaikutusta) näkyyvyysalueen rajaa voi tuulivoimaloiden aiheuttama häiriö riittää estämään kelvollisen vastaanoton.** Tämä johtuu kahdesta syystä:

- Tuulivoimaloiden aiheuttama vaimennus halutulle signaalille. Tämä vaikutus on melko pieni, mutta sen vaikutus korostuu marginaalisissa olosuhteissa.
- Tuulivoimaloiden tornien eteenpäinsironnut signaali, joka aiheuttaa monitie-etenemistä. Tämä aiheuttaa taajuuskaistalle minimejä (kuvat 176 ja 188), joissa signaali heikkenee alle riittävän tason, jolloin koko kanavanipun kelvollinen vastaanotto käy mahdottomaksi. Tämä vaikutus on huomattavasti merkittävämpi kuin tuulivoimaloiden vaikutus suoraan signaaliin.

Kulma-alue, jolle häiriövaikutukset kohdistuvat, on laajempi kuin ylläoleviin kuviin katkoviivoilla merkitty alue, jonka reunaviivat kulkevat lähettimestä alkaen sivusuunnassa uloimpien voimaloiden kautta. Tämä johtuu eteenpäinsironnan keilasta, joka tornin aiheuttamana on leveydeltään noin λ/D radiaania, jossa D on tornin keskimääräinen leveys. Vaikutusalue leviää tuulivoimapuistosta lähtien sen takana kummassakin reunassa noin $\lambda/(2D)$ radiaania enemmän kuin mainitut uloimpien voimaloiden kautta kulkevat katkoviivat näyttäisivät. Tässä ei ole huomioitu lapojen vaikutusta, joka on vähäisempi ja ajan mukana muuttuva.

Voidaan kysyä, saataisiinko TV-vastaanoton selektiivistä häipymää vaimennettua käyttämällä usean jagiantennin ryhmää. Esille nousee ainakin seuraavat kaksi vaihtoehtoa tämän toteuttamiseksi:

- 1) Kytetään useita jagiantenneita antenniryhmäksi. Kun tämä tehdään asianmukaisesti, saadaan antenniryhmän vahvistusta kasvatetuksi 3 dB aina lisättäessä jagien määrä kaksinkertaiseksi, esimerkiksi neljällä jagilla saadaan 6 dB enemmän vahvistusta kuin yhdellä jne. Tämä auttaisi rajatapauksessa, jos kaikkien häipymäminimien taso

saataisiin näin nostetuksi minimitason yläpuolelle. Haittana on suuri ja monimutkainen antennirakenne.

- 2) Kytetään kaksi jagia rinnakkain niin, että ne ovat riittävän kaukana toisistaan, ja niiden signaalit yhdistetään vastaanottimen sisäänmenossa. Antennien paikat ja kaapelien pituudet valitaan niin, että halutun signaalin kulku-aika molempien antennien ja kaapelien kautta vastaanottimeen on suurella tarkkuudella (~ 100 ps) sama. Haluttu signaali summautuu konstruktiivisesti samassa vaiheessa, mutta monitie-edenneet häiriösignaalit eivät korreloi keskenään, vaan esimerkiksi niiden aiheuttamat minimi ovat todennäköisesti eri antenneissa eri taajuuksilla, jolloin summattaessa minimi "täyttyvät" tai ainakin taso niiden kohdalla voi nousta minimitason yläpuolelle. Antennien välimatkan tulisi olla kymmeniä tai satoja metrejä. Antennivahvistimet tarvittaisiin kaapelihäviöiden takia. Järjestelyn haittapuolena ovat pitkät siirtolinjat ja suuret tarkkuusvaatimukset.

Ehdotetut järjestelyt näyttävät periaatteessa teknisesti mahdollisilta, mutta niiden toteutusmahdollisuudet riippuvat myös taloudellisista ja muista tekijöistä.

4.6 Arvio vaikutuksista UHF-alueen DVB-T2-lähetyksiin

Edellinen tarkastelu kohdistui DVB-T-standardin mukaiseen läheteeseen UHF-alueella kanavaleveydellä 8 MHz, modulaatiolla 64-QAM, 8k-järjestelmällä ja FEC-arvolla 2/3. Tämä parametrijärjestelmä on käytössä kanavanipuilla A, B, C ja E.

Verrataan kuvattua UHF-alueen DVB-T-järjestelmää DVB-T2-standardin mukaiseen läheteeseen UHF-alueella kanavaleveydellä 8 MHz, modulaatiolla 256-QAM, 32k-järjestelmällä ja FEC-arvolla 4/5. Tämä parametrijärjestelmä on käytössä kanavanipuilla D ja H.

Kantoaaltojen määrän muutos mainittujen järjestelmien välillä ei sinänsä muuta signaali-häiriösuhdetta C/I, koska jokainen kantaalto tuottaa omaan voimakkuuteensa verrannollisen häiriön. Sen sijaan häiriönsieto heikkenee tässä kuvatussa tapauksessa siirryttäessä UHF:llä DVB-T2-järjestelmään. Viitteiden [20] (ss. 14-21) ja [21] (s. 79) perusteella nähdään, että normaalille antennivastaanotolle tyypillisen Rice-kanavan olosuhteissa näillä parametriarvoilla tarvittava C/N-suhde (tässä sama kuin C/I-suhde) on DVB-T:llä 17,3 dB ja DVB-T2:lla 24,8 dB. DVB-T2-standardiin siirryttäessä tarvitaan siis tässä tapauksessa 7,5 dB parempi kantaalto-häiriösuhde. DVB-T2:lle vaadittava suurempi C/N-taso johtuu DVB-T2-nipuissa käytössä olevasta herkemmästä 256-QAM modulaatiosta ja verkolle valitusta virhekorjaustasosta. DVB-T2-verkko voidaan myös parametroida siten, että vaadittava C/N-arvo on hyvin matala, eivätkä suuremmat C/N-arvot sinänsä suoraan ole DVB-T2-järjestelmän yleinen ominaisuus.

Tässä tapauksessa C/N-suhteiden ero merkitsee häiriöiden kantomatkan kasvua. Kun oletetaan yksinkertainen käänteinen neliölaki häiriösignaaleille, niin voidaan arvioida, **että lähialueen taaksepäinsironnasta johtuvien häiriöiden vaikutussäde pitenee noin 2,37-kertaiseksi**, eli karkeasti arvioiden 100...200 metristä 250...500 metriin. Samasta syystä DVB-T2:lla näillä parametriarvoilla eteenpäinsironnasta johtuvat **häiriöt ulottuvat kauemmas voimaloista**. Samalla **kaukoalueen häiriöiden esiintyminen alkaa lähempänä**, saattaapa käydä niinkin, että edellä kuvattu **vähähäiriöinen alue ehkä jää välistä kokonaan pois**, jolloin vastaanotto häiriytyy koko lähettimestä katsottuna tuulivoimaloiden takana olevalla alueella.

Nämä laskelmat on tehty olettaen, että vastaanottoantenni on ympärisäteilevä. Normaalin jagityyppisen televisioantennin tapauksessa takaisinsirontahäiriöiden tilanne on todellisuudessa parempi, koska antenni vahvistaa haluttua signaalia suhteessa häiriöihin ja häiriöiden vaikutusmatka lyhenee yllä arvioidusta. Eteenpäinsironnan aiheuttamiin häiriöihin

antennista ei juuri ole apua, koska voimaloiden takana olevalla alueella haluttu signaali ja häiriöt tulevat likimain samasta suunnasta ja molemmat ovat antennin pääkeilassa.

DVB-T:n 8k-järjestelmää ja DVB-T2:n 32k-järjestelmää verrattaessa voidaan kysyä, miten kantoaaltojen määrä ja välimatka vaikuttavat tuulivoimaloiden aiheuttaman häiriön sietoon. Kantoaaltojen määrä ei sinänsä vaikuta, vaan kantoaalto-häiriösuhde C/I. Jokainen kantoaalto tuottaa omaan voimakkuuteensa verrannollisen häiriön. Tämä Doppler-siirtynyt kohinatyyppinen häiriö voi levitä viereisenkin kantoaallon alueelle, mutta se heikkenee samalla hertsia kohti. Oleellista on yhden kantoaallon tehon suhde näin syntyvän kohinatyyppisen häiriön tehotasoon yhtä kantoaaltoa kohti eli C/I, jonka vaadituksi minimitasoksi oletetaan sama kuin tarvittava kantoaalto-kohinasuhde C/N, joka tunnetaan eri parametrijärjestelmille. Järjestelmien välinen ero otetaan huomioon erilaisella C/N (C/I)-vaatimuksella, johon vaikuttavat pääasiassa modulaatiomenetelmä ja virheenkorjaus. Muiden mekanismien kautta mahdollisesti syntyvien häiriöiden häiritsevyyden oletetaan myös sisältyvän kullekin järjestelmälle vaadittavaan kantoaalto-häiriösuhteeseen C/N. Tässä käytetyillä parametrioilla DVB-T2:n tarvitsema C/I (eli C/N) -suhde on 7,5 dB suurempi kuin DVB-T:n, eli DVB-T2 on häiriintyvämpi myös tuulivoimaloiden aiheuttamista häiriöistä. Tämä on se hinta, joka on maksettava kyvystä välittää enemmän informaatiota samalla kaistaleveydellä.

4.7 Vertailu UHF- ja VHF-alueen vaikutusten välillä (DVB-T2)

VHF-taajuusalueella III (174...230 MHz) toimiva DVB-T2-lähetysasema sijaitsee Ulvilan Harjunpäässä noin 21 km Peittoon tuulivoimapuistosta kaakkoon. VHF-alueen kanavanipuissa käytetään DVB-T2-standardia kanavaleveydellä 7 MHz, modulaatiolla 256-QAM, 32k-järjestelmällä ja FEC-arvolla 4/5. Kun tätä verrataan UHF-alueen yllä kuvattuun DVB-T2-standardin järjestelyyn, havaitaan päätelmien ja mittausten avulla tuulivoimaloiden vaikutuksissa seuraavat yhtäläisyydet ja erot:

- **Taaksepäinsironnan aiheuttaman lähialuehäiriön voimakkuus on suunnilleen sama**, koska se on periaatteessa taajuudesta riippumaton ja vaikutusetaisytydeltään noin 250...500 metriä molemmissa järjestelmissä. Tämä pätee, jos sirottavat kappaleet ovat huomattavasti suurempia kuin aallonpituus. Tämä oletamus ei kuitenkaan ainakaan VHF:llä lapojen sivusuunnassa täysin pidä paikkaansa (lajojen leveys 2...3 m, aallonpituus noin 1,5 m), jonka takia sironna vaihtelee vaikeasti ennustettavalla tavalla. Annettu lukuarvo kuitenkin pitää keskiarvona likimain paikkansa.
- VHF-alueella eteenpäinsironnan säteilykuvio on noin kolme kertaa pienemmästä taajuudesta johtuen noin kolme kertaa leveämpi kuin UHF:llä, jonka takia **häiriöiden vaikutusmatka voimaloiden takana on lyhyempi**. Toisaalta samaan vastaanottopisteeseen voi tällöin saapua häiriöitä useammasta tuulivoimalasta, joskaan ei välttämättä yhtäaikaaisesti. Doppler-häiriöiden kantomatka voimaloiden takana voi VHF:llä olla samaa luokkaa kuin UHF-alueen DVB-T-järjestelmässä.
- Kaukoalueella monitie-etenemishäiriöiden voimakkuus VHF:llä on heikompi kuin UHF:llä leveämmästä sironnakeilasta johtuen. Samalla VHF-aallot etenevät paremmin mäkien ja esteiden taakse kuin UHF:llä, jonka takia haluttu signaali on voimakkaampi ja kaukoalueen häiriöt alkavat vaikuttaa kauempana kuin UHF:llä.
- Edellämainituista syistä **VHF-alueen DVB-T2-järjestelmässä voi esiintyä vastaava vähähäiriöinen etäisyysalue kuin UHF-alueen DVB-T:llä**.

4.8 Johtopäätökset

Mittaustulosten analyysin ja teoreettisten tarkastelujen perusteella voidaan tehdä seuraavassa esitettävät pääasialliset johtopäätökset tuulivoimaloiden häiriövaikutuksista televisiolähetteisiin. Porin Peittoon lisäksi ne ovat yleistettävissä myös muualle, jos olosuhteet eivät oleellisesti poikkea Peittoon alueesta.

- Mittausten mukaan häiriötä esiintyy lähettimestä katsottuna tuulivoimapuiston takana sekä vähemmässä määrin lähialueella voimaloiden edessä ja sivuilla.
- Tuulivoimapuiston etäisyys TV-lähettimestä vaikuttaa, voimakkaassa kentässä häiriöalueet ovat pienempiä. Tuulivoimalat itsessään varjostavat signaalia vain vähän. Maaston muoto voi pahentaa tilannetta, jos se varjostaa haluttua signaalia, mutta vähemmän häiriösignaalia.
- Merkittävä häiriö on Doppler-siirtynyt heijastus voimalan liikkuvista lavoista, toinen merkittävä häiriö johtuu eteenpäinsironnasta, joka voi ulottua kauas ja aiheuttaa selektiivistä häipymistä, jolloin signaalitaso voi reuna-alueilla painua hyväksyttävän rajan alapuolelle.
- Voimaloiden takana häiriöt vaimenevat nopeammin kuin suora signaali, jolloin tietyillä etäisyyksillä voi esiintyä vähähäiriöisiä alueita.
- Tässä tarkastelussa käytetyillä parametrioilla DVB-T2-standardin mukainen 32k-järjestelmä on alttiimpi tuulivoimahäiriöille kuin DVB-T-standardin 8k-järjestelmä, tarkemmin sanoen DVB-T2:n herkemmän 256-QAM-modulaation omaava moodi on herkempi häiriöille kuin DVB-T:n 64-QAM-moodi.. Lähihäiriöiden vaikutusalue on tästä johtuen ensin mainitulla laajempi sekä VHF- että UHF-alueella, samoin häiriöt voimaloiden takana. VHF-alueella DVB-T2 on jonkin verran vähemmän häiriytyvä voimaloiden takana kuin vastaava UHF-alueen järjestelmä.

5. Yhteenveto ja suositukset

Tuulivoimalat eroavat häiriövaikutusten näkökulmasta muista suurista rakennuksista ja rakennelmista siinä, että niiden liikkuvat lavat aiheuttavat pyörimisliikkeellään Doppler-siirtynyttä kohinatyyppistä häiriötä, joka poikkeaa esimerkiksi ajoneuvon liikkeen aiheuttamasta. Oleellinen vaikutus on myös voimaloiden lukumäärällä ja sijoittumisella lähetyks- ja vastaanottoaikojen suhteen. Nämä vaikutukset koskevat sekä matkaviestintää että televisiotoimintaa. Seuraavassa tarkastellaan yhteenvetona vaikutuksia molempien osalta, ja myös vastaavia suosituksia haittavaikutusten vähentämiseksi.

Matkaviestinverkkojen osalta

Häiriövaikutukset matkaviestinyhteyksille ovat selkeimmät tuulipuiston sisällä. Tiheä tukiasemaverkko rajoittaa tehokkaasti puiston vaikutusalueita. Ongelmia syntyy tilanteissa, joissa tukiasemia ei löydy kaikista ilmansuunnista esim. meren, vesistöjen, luonnonsuojelupuiston tai valtakunnan rajan läheisyydessä.

Häiriöt voivat aiheuttaa katkenneita puheluja ja datayhteyksiä etenkin tuulipuiston sisällä. Todennäköisyys katkenneille puhe- ja datayhteyksille kasvaa kohdissa, joissa signaalin voimakkuus ja signaalikohinasuhde ovat ennestään jo alhaiset. Riski yhteyden katkeamiseen kasvaa siirryttäessä tuulipuiston sisään.

Fyysisellä tasolla merkittäviä eroja ei havaittu kapeakaistaisen GSM- ja leveäkaistaisten UMTS- ja LTE-verkkojen välillä. Korkeampi taajuus näyttää olevan hieman alttiimpi häiriövaikutuksille, mutta vaikutusalue on kapeampi. Tuulipuisto vaikutti kaikkien verkkojen

puhe- ja datapalveluihin. Suurin vaikutus käyttäjän kokemaan laatuun havaittiin UMTS-verkossa, jossa radiokanavan heikentyminen näkyy selvemmin viiveissä ja datan siirtonopeuksissa. LTE-verkossa viiveet pysyivät lähes vakiona ja siirtonopeuksien putoaminen ei merkittävästi häirinnyt mm. web-palveluja.

TETRA-verkko toimii 400 MHz:n taajuusalueella, jolloin vaikutukset ovat pienemmät kuin mitatuissa GSM-, UMTS- ja LTE-järjestelmissä. TETRA-verkko on harvempi johtuen matalammasta taajuudesta. Tästä johtuen Fresnelin vyöhyke on suurempi ja vaikutukset tuulipuiston ulkopuolella ovat kauempana havaittavissa. TETRA-verkossa käytetään enemmän puhe- ja lyhytsanomapalveluja, joihin häiriövaikutukset ovat pienemmät.

Liikkuvan päätelaitteen voitaisiin olettaa kestävänsä paremmin häiriötä, koska tuulipuiston häiriön voidaan ymmärtää olevan paikallinen ilmiö ja mobiilijärjestelmät kykenevät korjaamaan radiokanavassa ilmeneviä hetkittäisiä häiriötä mm. virheenkorjauksella. Jos tie kulkee lähellä tuulipuistoa tai sen halki, niin häiriövaikutusaika on varsin pitkä, mikä itsessään voi johtaa yhteyden katkeamiseen. Toisaalta matkapuhelinjärjestelmät on kehitetty kestävänsä liikkuvasta autosta syntyvää Doppler-ilmiötä, mutta tuulivoimalan tapauksessa syntyy aaltomainen lisä-Doppler-ilmiö, joka aiheutuu yhden lavan liikkeessä kohti ajoneuvoa ja toisen liikkeessä pois päin. Lisäksi Doppler-häiriö on kohinamainen ja jakautunut tietyille taajuuskaistalle. Tämä luo tilanteita, joissa tavanomainen Doppler-vaikutuksen käsittely ei ole enää riittävä.

Suosituks:

On pyrittävä välttämään tilanteita, joissa jollekin tuulipuiston sivulle ei jää tukiasemia (meri, vesistöt, valtakunnan rajat, luonnonsuojelupuistot). Vaikutusalue kasvaa suuntiin, joissa tukiasemaverkko harvenee tai tukiasemat ovat kauempana. Selkeitä indikaatioita mahdollisista ongelmista ovat solunvaihtojen kasvu, signaalin voimakkuuksien heikkeneminen sekä data-siirroissa viiveiden ja yhteyshäiriöiden määrän lisääntyminen. Vaikutusta voidaan vähentää lisäämällä toistimia tai tihentämällä tukiasemaverkkoa tuulipuiston läheisyydessä. Vaikutusta voidaan vähentää myös käyttämällä lähitukiasemissa suuntaavia kapeakeilaisia antenneja.

Television osalta

Mittausten ja teoreettisten tarkastelujen mukaan tuulivoimaloiden aiheuttamia häiriötä esiintyy varsinkin lähettimestä katsottuna tuulivoimapuiston takana sekä vähemmässä määrin lähialueella voimaloiden edessä ja sivuilla. Häiritty alue puiston takana leviää viuhkamaisesti laajempaan kulmaan kuin puiston lähettimestä katsottuna peittävä kulma-alue. Tuulivoimapuiston etäisyys TV-lähettimestä vaikuttaa, voimakkaassa kentässä häiriö-alueet ovat pienempiä. Tuulivoimalat itsessään varjostavat signaalia vain vähän. Jos maaston muoto varjostaa lähettimestä suoraan vastaanottimeen tulevaa signaalia, mutta vähemmän tuulivoimaloista sironnutta signaalia (koska se tulee vastaanottimesta katsottuna korkeammalta), häiriösuhde huononee ja häiritty alue voi tämän takia laajentua.

Merkittävä häiriö on Doppler-siirtynyt heijastunut signaali voimalan liikkuvista lavoista, toinen merkittävä häiriö johtuu eteenpäinsironnasta, joka voi ulottua kauas ja aiheuttaa selektiivistä häipymistä, jolloin signaalitaso voi reuna-alueilla lähellä näkyvyysalueen rajaa painua hyväksyttävän rajan alapuolelle osalla TV-kanavan kaistaa. Voimaloiden takana häiriöt toisaalta vaimenevat nopeammin kuin haluttu signaali, jolloin tietyillä etäisyyksillä voi esiintyä myös vähähäiriöisiä alueita.

DVB-T2-standardin mukainen 32k-järjestelmä on tässä tarkastelussa käytetyillä parametriarvoilla alttiimpi tuulivoimahäiriöille kuin DVB-T-standardin 8k-järjestelmä, tarkemmin sanoen DVB-T2:n 256-QAM-modulaation omaava moodi on herkempi häiriöille kuin DVB-T:n 64-QAM-moodi. Lähihäiriöiden vaikutusalue on ensin mainitulla laajempi sekä VHF- että UHF-alueella, samoin häiriöt voimaloiden takana. VHF-alueella DVB-T2 on jonkin verran vähemmän häiriytyvä voimaloiden takana kuin vastaava UHF-alueen järjestelmä,

koska VHF-alueella häiriökeilat ovat leveämpiä ja nopeammin etäisyyden mukana vaimenevia.

Mahdollisessa jatkohankkeessa voitaisiin maaston tarkan muodon huomioon ottavaa peittoaluelaskentaa soveltaa myös televisioverkkoon, näin mahdollistaen häiriövaikutusten paikkakohtaisen laskennan ja häiriöalueet sisältävien peittoaluekarttojen tuottamisen.

Suosituks:

Olemassa olevien tuulivoimaloiden suhteen televisiolähettimet on pyrittävä sijoittamaan niin, että niiden takana oleva häiritty alue kohdistuu mahdollisimman harvaanasutulle seudulle, mieluiten esimerkiksi merelle. Voimaloiden lähialueilla, varsinkin edessä ja sivuilla alle yhden kilometrin päässä olevan asutuksen TV-palvelut on pyrittävä hoitamaan sopivin antennijärjestelyin, kuten mahdollisimman monielementtisellä jagiantennilla, jolla on hyvä etu-takasuhde. Antennivahvistimista on tuskin apua, sillä ne vahvistavat myös häiriöitä. Voimaloiden takana tarvitaan lisäksi todennäköisesti alilähettimeä, jotka on pyrittävä sijoittamaan häirityn alueen ulkopuolelle ja siitä sivuun niin, että kulmaero vastaanottimesta katsottuna voimaloiden suuntaan nähden on riittävä, mieluiten noin 90 astetta. Hyvät vastaanottoantennit ovat myös tässä tapauksessa ehdottoman tärkeitä.

Lähdeviitteet

- [1] D. Sozen, M. Kartal: "Scatter and Doppler Effect of Wind Power Plants to Land Radars", Computer Modelling and Simulation (UKSim), 2012 UKSim 14th International Conference on, 28-30 March 2012, pp. 453-458.
- [2] D. de la Vega, C. Fernandez, O. Grande, I. Angulo, D. Guerra, Y. Wu, P. Angueira, J.L. Ordiales: "Software tool for the analysis of potential impact of wind farms on radiocommunication services", Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB), 2011 IEEE International Symposium on, 8-10 June 2011, pp. 1-5.
- [3] I. Angulo, D. de la Vega, I. Cascón, J. Cañizo, Y. Wu, D. Guerra, P. Angueira: "Impact analysis of wind farms on telecommunication services", Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 32, April 2014, pp. 84-99.
- [4] M. Sipilä, J. Sten, S. Horsmanheimo, T. Dufva, A. Hujanen, L. Tuomimäki, H. Toivanen: "Tuulivoimaloiden vaikutus valvontasensoreihin", Loppuraportti, VTT, 28.11.2011.
- [5] http://stakeholders.ofcom.org.uk/binaries/consultations/pssr-2014/annexes/Prediction_Study.pdf (linkki tarkastettu 23.1.2015)
- [6] <http://radioaccess.blogspot.fi/2012/11/lte-rf-conditions-classification.html> (linkki tarkastettu 23.1.2015)
- [7] https://www.netlab.tkk.fi/opetus/s38310/04-05/Kalvot_04-05/Bilal_010205-1.ppt (linkki tarkastettu 23.1.2015)
- [8] H. Holma, A. Toskala: "LTE for UMTS: Evolution to LTE-Advanced", Wiley, 2011, ISBN 978-0-470-66000-3.
- [9] H. Holma, A. Toskala: "HSDPA/HSUPA for UMTS: High Speed Radio Access for Mobile Communications", Wiley, 2006. ISBN 978-0-470-01884-2.
- [10] J. Salo: "Mobility Parameter Planning for 3GPP LTE: Basic Concepts and Intra-Layer Mobility", white paper, June 2013.

- [11] Tutkimusraportti, "Measuring mobile broadband performance in the UK 4G and 3G network performance", Ofcom UK, 13 November 2014.
- [12] A. Messina, G. Caragea, P.T. Compta, F.H.P. Fitzek, S.A. Rein: "Investigating Call Drops with Field Measurements on Commercial Mobile Phones", Vehicular Technology Conference (VTC Spring), 2013 IEEE 77th, 2-5 June 2013, pp. 1-5.
- [13] B. S. Randhawa, R. Rudd: "RF Measurement Assessment of Potential Wind Farm Interference to Fixed Links and Scanning Telemetry Devices", March 2009.
- [14] Televisiosignaalien mittaustulokset Porin Peittoon alueelta. Digita Oy 2014.
- [15] D.L. Sengupta, T.B.A. Senior: "Electromagnetic interference to television reception caused by horizontal axis windmills", Proc. IEEE, vol. 67, no. 8, Aug 1979, pp. 1133-1142.
- [16] I. Angulo, D. de la Vega, C. Fernández, D. Guerra, Y. Wu, P. Angueira, J. Luis Ordiales: "An empirical comparative study of prediction methods for estimating multipath due to signal scattering from wind turbines on digital TV services", IEEE Trans. Broadcast., vol. 57, no. 2, June 2011, pp. 195-203.
- [17] I. Angulo, D. de la Vega, O. Grande, N. Cau, U. Gil, Y. Wu, D. Guerra and P. Angueira: "Empirical evaluation of the impact of wind turbines on DVB-T reception quality", IEEE Trans. Broadcast., vol. 58, no. 1, March 2012, pp. 1-9.
- [18] Assessment of impairment caused to analogue television reception by a wind turbine. Recommendation ITU-R BT.805, 1992.
- [19] The effect of the scattering of digital television signals from a wind turbine. Report ITU-R BT.2142-1, 2010.
- [20] Frequency and network planning aspects of DVB-T2. EBU Tech 3348, Report, version 4.1.1, Geneva, Oct 2014.
- [21] Digital Video Broadcasting (DVB); Implementation guidelines for DVB terrestrial services; Transmission aspects. ETSI TR 101 190 V1.3.2, Technical Report, 2011.
- [22] Method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 3 000 MHz. Recommendation ITU-R P.1546-5, 2013.
- [23] I.V. Lindell: Radioaaltojen eteneminen, Otatiето Oy, Helsinki, 2000.