

**Mika-Petteri Haasiomäki**

**AJOMITTAUS MATKAVIESTINVERKOILLE**

**Opinnäytetyö**

**CENTRIA AMMATTIKORKEAKOULU**

**Mediatekniikan koulutusohjelma**

**Toukokuu 2014**

## TIIVISTELMÄ OPINNÄYTETYÖSTÄ

<b>Yksikkö</b> Ylivieska	<b>Aika</b> Toukokuu 2014	<b>Tekijä/tekijät</b> Mika-Petteri Haasiomäki
<b>Koulutusohjelma</b> Mediatekniikan koulutusohjelma		
<b>Työn nimi</b> Ajomittaus matkaviestinverkoille		
<b>Työn ohjaaja</b> Lehtori Ritva Saviluoto		<b>Sivumäärä</b> 67
<b>Työelämäohjaaja</b> Kehittämispäällikkö Marjo Heikkilä		
<p>Työn aiheena oli tutkia matkaviestinverkkojen ajomittauksen toteutusta ja verkon kuuluvuuteen vaikuttavia tekijöitä. Tavoitteena oli verkkojen mittauksen kehittäminen. Työssä arvioitiin simulaatiosta saatujen tietojen hyödyntämisen mahdollisuutta matkaviestinverkkojen mittauksissa.</p> <p>Työn mittaukset suoritettiin Ylivieskassa sijaitsevan testiverkon alueella. Testiverkossa hyödynnettiin aktiiviantennijärjestelmää. Mittauksilla tutkittiin antennijärjestelmän muutoksien vaikutusta. Työssä käytetyt teoretiset tiedot käsittelivät radiosignaalin etenemistä, syitä teettää ajomittaus matkaviestinverkossa ja lyhyesti simulaatiossa hyödynnettäviä etenemismalleja. Aihe rajattiin koskemaan päätelaitteen ja tukiaseman välistä kommunikaatiota. Käytännön osuudessa käytettiin kannettavalla tietokoneella toimivaa sovellusta ja matkaviestinverkkojen mittaamiseen tarvittavia lisälaitteita.</p>		

<b>Asiasanat</b> 3G, ajomittaus, kuuluvuus, matkaviestinverkot, signaalin eteneminen, signaalin häipyminen, UMTS, WCDMA
--

**ABSTRACT**

<b>Unit</b> Ylivieska	<b>Date</b> May 2014	<b>Author/s</b> Mika-Petteri Haasiomäki
<b>Degree programme</b> Media technology		
<b>Name of thesis</b> Drive test for mobile networks		
<b>Instructor</b> Lecturer Ritva Saviluoto		<b>Pages</b> 67
<b>Supervisor</b> Development manager Marjo Heikkilä		
<p>The subject of thesis was to study the testing of mobile networks and the factors affecting the coverage. The goal was to improve the testing of networks. The possibility of utilizing simulated information for drive test measurements was evaluated.</p> <p>The measurements were conducted in the area of a test network located in city of Ylivieska. The network utilized an active antenna system. The measurements focused on effects produced by altered antenna settings. The theory section of thesis discussed radio wave propagation and the grounds for conducting a drive test. In addition, the theory part includes a brief overview of propagation models used in simulations. The topic was limited to the communication between a mobile device and the base station. During the empirical part, a laptop with measurement software and necessary peripherals was utilized.</p>		

<p><b>Key words</b></p> <p>3G, coverage, drive test, mobile networks, signal fading, signal propagation, UMTS, WCDMA</p>
--

## KÄSITTEIDEN MÄÄRITTELY

3GPP	3 <sup>rd</sup> Generation Partnership Project on yhteistyöorganisaatio, joka kehittää matkaviestinverkkojen standardeja.
Beamforming	Tekniikka, jolla antennin säteilykeila kohdistetaan halutulle alueelle.
BER	Bit Error Rate tai Bit Error Ratio kuvaa virheellisten bittien suhdetta yhteensä siirrettyihin bitteihin.
BLER	Block Error Rate kuvaa suhdetta virheellisten ja yhteensä siirrettyjen lohkojen välillä.
CPICH	Common Pilot Channel on yleinen pilottikanava. Sitä käytetään osana prosessia, jonka mobiililaite suorittaa liittyessään verkkoon sekä signaalin tason tarkkailuun.
CQI	Channel Quality Indicator on arvio mahdollisesta siirron laadusta päätelaitteen ja tukiaseman välillä.
dBm	Desibelit milliwatin suhteen. Käytetään tehotason kuvaamisessa.
DC-HSPA+	Dual Carrier - High Speed Packet Access, katso HSPA. Päätelaitte käyttää kahta kantoaaltoa.
DOWNLINK	Liikenteen suunta on verkosta kohti päätelaitetta.

Drive test	Ajomittauksella tarkoitetaan ajoneuvolla tehtävää mittausta verkon kuuluvuusalueella.
FER	Frame Error Rate, vastaanotetun virheellisen datan ja saadun datan yhteismäärän suhde
FTP	File Transfer Protocol, tiedostonsiirtoprotokolla
HSDPA	High-Speed Downlink Packet Access, downlink-suuntainen HSPA.
HSPA	High-Speed Packet Access, yleisnimitys high-speed downlink packet access ja high-speed uplink packet access protokollille.
HTTP	Hypertext Transfer Protocol, tiedonsiirto protokolla.
MAC	Medium Access Control on siirtokerroksen (L2) alikerros, joka toimii fyysisen ja datalinkkerroksen välissä.
MAC-e	MAC-kerroksen kokonaisuus (entity), lisättiin MAC-kerrokseen 3GPP julkaisussa 6.
MAC-hs	MAC-kerroksen kokonaisuus (entity), lisättiin MAC-kerrokseen 3GPP julkaisussa 5.
MCG	Mobile Call Generator on matkaviestinverkkojen testauksessa käytettävä ohjelmisto.

MDT	Minimization of Drive Tests on 3GPP:n menetelmä jossa pyritään vähentämään ajomittauksen tarvetta keräämällä tietoa verkkoa käyttäviltä UE:lta.
NODE B	UMTS-verkossa käytettävä nimitys tukiasemalle.
Nemo	Anite Finland Ltd kehittämä matkaviestinverkkojen testaustuoteperhe.
KPI	Key Performance Indicator tarkoittaa määriteltyä arvoa, jonka mitatun tuloksen tulee tavoittaa. Käytetään laadunvarmistustehtävissä. KPI:n tavoittamatta jättäminen aloittaa yleensä optimisointiprosessin.
QAM	Quadrature Amplitude Modulation on modulointitekniikka, jossa hyödynnetään vaihe- ja amplitudimodulaatiota.
QCI	Qos Class Index. Määritelty arvo, jonka tarkoitus on kertoa palveluntasosta ja sen parameterista yhden arvon avulla.
QoS	Quality of Service. Palvelutason luokitus.
RNC	Radio Network Controller ohjaa ja säätää NODE B:itä.
RSCP	Received Signal Code Power kuvaa vastaanotetun signaalin tehoa tietyistä kanavasta mitattuna. Voidaan käyttää kuvaamaan signaalin vahvuutta.
RSSI	Received Signal Strength Indicator kuvaa vastaanotetun signaalin tehon tasoa.

Rake-vastaanotin	Monitie-etenemisen aiheuttaman häipyamisen vaikutuksia vähentämään kehitetty vastaanotin. Pyrkii koostamaan signaalin yhdistämällä useita viivästyneitä signaaleja.
SIR	Signal to Interference Ratio on signaalin ja häiriön suhdetta kuvaava käsite.
SNR	Signal to Noise Ratio on signaalin ja kohinan suhdetta kuvaava käsite.
SINR	Signal-to-Interference and Noise Ratio kuvaa signaalin suhdetta häiriöihin ja kohinaan.
TELNET	Tietoverkkojen protokolla, jonka avulla voidaan luoda yhteys muihin laitteisiin.
TXPower	Päätelaitteen lähetykseen käyttämän tehon taso. Ilmaistaan usein käyttämällä yksikköä dBm.
UE	User Equipment on nimitys päätelaitteelle, jolla verkkoa käytetään.
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System, on matkaviestinverkkoteknologia. Sillä kuvataan koko verkkoa yhtenä kokonaisuutena.
UPLINK	Liikenteen suunta on päätelaitteelta kohti verkkoa.

Vertical Sectorization	Vertikaalisektoroinnilla jaetaan perinteinen solu kahdeksi, sisäiseksi ja ulkoiseksi soluksi. Solut erotetaan vertikaalisesti kallistuskulmien avulla.
VoIP	Voice over Internet Protocol, protokolla äänen siirtämiseen IP-pohjaisen verkon kautta
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access on tekniikka tukiaseman ja mobiililaitteen välissä. Tukiaseman ja päätelaitteen välistä rajapintaa kutsutaan Uu:ksi.



## **ESIPUHE**

Aluksi haluan kiittää tämän opinnäytetyön etenemiseen vaikuttaneita henkilöitä. Ilman heidän tarjoamaan vetoapuaan työ ei olisi itsensä näköinen. Kiitokset ohjauksesta kehittämisspällikkö Marjo Heikkilälle ja lehtori Ritva Saviluodolle. Kiitokset myös mittauksista ja työn kommentoinnista projektisuunnittelija Piritta Kärsämälle ja Pentti Eteläaholle, projekti-insinööri Tero Kippolalla, Pekka Tuutilalle ja muille työtä kommentoineille henkilöille.

Työ kasvoi ja kutistui elinkaarensa aikana. Alkuperäisestä suunnitelmasta ei ole jäljellä, kuin paljas idea ja nippu papereita. Aika juoksi ja kahvia kului, mutta valmista tuli. Olkoon tästä työstä hyötyä, niille jotka sitä kaipaavat.

<b>TIIVISTELMÄ</b>	
<b>ABSTRACT</b>	
<b>KÄSITTEIDEN MÄÄRITTELY</b>	
<b>ESIPUHE</b>	
<b>SISÄLLYS</b>	
<b>1 JOHDANTO</b>	<b>1</b>
<b>2 LANGATTOMAT LAAJAKAISTA-LIITTYMÄT</b>	<b>3</b>
2.1 Liittymien määrä	3
2.2 Verkkopalvelun laatu	4
<b>3 SIGNAALIN ETENEMINEN</b>	<b>8</b>
3.1 Vapaa tila	8
3.2 Häipyminen	10
3.3 Rayleigh	11
3.4 Doppler	12
3.5 Monitie-eteneminen	13
<b>4 AJOMITTAUS</b>	<b>17</b>
4.1 Määrittely	19
4.2 Merkitys/tarkoitus	20
4.2.1 Verkon muutokset	21
4.2.2 Merkittävät ympäristön muutokset	22
4.2.3 Asiakaspalaute	23
4.2.4 Säännölliset ajomittaukset	23
4.3 Nykytilan kuvaus	24
4.3.1 Kaaviot ja tilastot	24
4.3.2 Arvot	25
4.4 Mittauksissa käytettävät välineet	28
4.4.1 Mittausohjelmisto	29
4.4.2 Tukiasema / antennit	31
<b>5 SUORITETUT MITTAUKSET</b>	<b>33</b>
5.1 Mittauksien kuvaus	34
5.2 Vaatimusmäärittelyt	35
5.2.1 Testitapaus 1	35
5.2.2 Testitapaus 2	37
5.2.3 Testitapaus 3	39
5.3 Raportti	41
5.4 Raportin luettavuuden tarkastelu	42
<b>6 SIMULAATIO</b>	<b>44</b>
6.1 Vertailu simulaation ja mittauksien välillä	47
6.1.2 Erot	50
6.1.3 Yhteneväisyydet	51
6.2 Käyttökelpoisuus	53
<b>7 JOHTOPÄÄTÖSET JA TUTKIMUKSEN JATKOKEHITTELY</b>	<b>55</b>
7.1 Johtopäätökset	55
7.2 Huomautettavaa	56

<b>7.3 Ehdotukset</b>	<b>58</b>
<b>7.4 Jatkokehitys</b>	<b>63</b>
<b>8 POHDINTA</b>	<b>66</b>
<b>LÄHTEET</b>	<b>67</b>

## **KUVIOT**

KUVIO 1. Tyypillinen Rayleigh-häipymän kuvaaja, esittää monitie-etenemisestä johtuvia vaimentumia	12
KUVIO 2. Monitie-eteneminen johtaa saman signaalin saapumiseen useana vääristyneinä kappaleina (Toskala & Holma 2010)	14
KUVIO 3. Antennin jakaminen kahdeksi itsenäiseksi soluksi voi tuoda parannuksia peittoalueeseen ja kapasiteettiin (Nokia Solutions and Networks 2012)	18
KUVIO 4. Matkaviestinverkon käyttöönoton prosessi	22
KUVIO 5. Ajomittausta voidaan käyttää osana markkinointia	24
KUVIO 6. Mittauksissa käytetty radiaalireitti kartalla	33
KUVIO 7. Mittauksissa käytetyt sektorireitti kartalla	34
KUVIO 8. Nemo2 mittauspaikka	36
KUVIO 9. Testitapaus 1 mittauksen kulku	37
KUVIO 10. Nemo2 ja Load2 mittauspaikat	38
KUVIO 11. Testitapaus 2 mittauksen kulku	39
KUVIO 12. Testitapaus 3 mittauspaikat Nemo2 ja Load2 laitteille	40
KUVIO 13. Testitapaus 3 mittauksen kulku	41
KUVIO 14. Mittauksien jälkeen tehtävä analyysi	42
KUVIO 15. Kahden tai useamman reitin sovittaminen samalla kartalle	43
KUVIO 16. Simulaation ja mittaus tuloksien vertailu	52
KUVIO 17. Raportin y-akselin arvot jäävät dokumentin ulkopuolelle	58
KUVIO 18. Esimerkki suunnittelussa käytettävästä kartasta	60
KUVIO 19. Versiointi voidaan toteuttaa yksinkertaisimmillaan käyttämällä Tekstilaatikkoa	61
KUVIO 20. Sivun reunaan lisätty puskuri-elementti	62
KUVIO 21. Verkon toimintaa voidaan arvoida nopeasti RSCP:n ja Ec/No:n arvojen jakauman avulla (Entelecom 2011).	63

## **TAULUKOT**

TAULUKKO 1. Simulaatiossa käytetyt tukiasemien asetukset tapauksessa yksi	48
TAULUKKO 2. Simulaatiossa käytettyjen tukiasemien asetukset tapauksessa kaksi.	48
TAULUKKO 3. Simulaatiossa käytettyjen tukiasemien asetukset tapauksessa kolme	48
TAULUKKO 4. Simulaatiossa käytettyjen tukiasemien asetukset tapauksessa neljä	46
TAULUKKO 5. Simulaatioon verrattavat arvot käytännössä tehdyssä mittauksessa	49
TAULUKKO 6. Solut tunnistetaan sen käyttämän sekoituskoodin perusteella	49
TAULUKKO 7. Ajomittauksen tarkistuslista	65

## 1 JOHDANTO

Opinnäytetyössä tutustuttiin matkaviestinverkkojen toiminnallisuuden mittaamiseen ajomittaus-menetelmällä. Ajomittauksen tarkoitus on kerätä käytännöllistä tietoa siitä, kuinka verkko toimii kentällä. Tavanomaisemmin mittaus tehdään liikkuvassa ajoneuvossa käyttäen apuna kannettavaa tietokonetta ja langatonta vastaanotinta, jonka keräämä tieto tallennetaan yhdessä paikkatietojen kanssa. Ajoreitti suunnitellaan etukäteen ja sen on hyvä olla mahdollisimman kattava.

Työ pohjautuu tutkimusongelmaan, jossa matkaviestinverkkojen mittauksia on tehty ja tarvetta olisi mittausten prosessin järjeistämiseksi. Yhtenä osana tarkasteltiin simulaation tai mallin käyttöä mittausten apuna. Hyvin toimivan mallin avulla voidaan suunnitella monipuolisempi ja täten paremmin todellisuutta vastaava langattomien matkaviestinverkkojen toiminnallisuutta mittaava ajomittaus.

Työn alkuosa koostuu teoriaosuudesta, jossa kuvataan signaalin etenemistä ja CORE+ projektia. Opinnäytetyön käytännön osuus suoritettiin Centria t&k:lta saaduilla mittauslaitteilla ja ohjelmistoilla Ylivieskan alueella. Työn kulku alkoi teoriaosan kirjoittamisesta, sopivan lähdekirjallisuuden etsimisestä ja käytännönsä hyödynnettävän laitteiston ja ohjelmiston tutkimisesta.

Ensimmäinen pääluku on varattu johdannolle. Toisessa pääluvussa käsitellään työn taustaa. Kolmannessa pääluvussa tarkastellaan radiosignaalin etenemistä ja siihen vaikuttavia seikkoja sekä etenemisen mallintamisen pääpiirteitä. Neljäs pääluku keskittyy kuvaamaan ajomittaukseen liittyviä seikkoja yleisesti. Opinnäytetyön aikana suoritettiin mittauksia, jotka kuuluivat laajempaan mittaussarjaan. Viidennessä pääluvussa käsitellään mittauksiin läheisesti liittyviä seikkoja sekä kuvataan mittauksen kulku. Kuudennessa pääluvussa tarkastellaan voidaanko simulointituloksia käyttää hyödyksi mittauksien esivalmisteluissa ja tuloksien varmistamisessa. Seitsemäs pääluku päättää työn ja esittää kootusti sen aikana

tehdyt havainnot sekä ehdotukset. Luvussa esitellään myös lyhyt ehdotus, jolla pyritään kuvaamaan hyvä ajomittaus. Kahdeksas pääluke varataan pohdintaosuudelle, jossa tarkastellaan työtä kokonaisuutena.

Tietoperusta rakentuu pääasiassa kolmen lähteen ja niitä tukevien teknisten artikkelien varaan. Ajomittaukselle omistettuja kirjoja en löytänyt tämän työn avuksi, vaan käyttöön poimittiin testaukseen liittyvät kappaleet seuraavista kirjoista:

- WCDMA for UMTS : HSPA Evolution and LTE (5th Edition). Julkaistu 2010
- Introduction to LTE : LTE, LTE-Advanced, SAE and 4G Mobile Communications (2nd Edition). Julkaistu 2012
- LTE-Advanced and Next Generation Wireless Networks : Channel Modelling and Propagation. Julkaistu 2012

## **2 LANGATTOMAT LAAJAKAISTA-LIITTYMÄT**

Langattomat, alkujaan matkapuhelimien käytössä olleet tietoliikenneverkot, kuten ensimmäisen sukupolven pakettikytkentäinen matkaviestinverkko General Packet Radio System (GPRS) (Brax 2011, 77) ja sen jälkeiset sukupolvet, 3G, 4G, LTE ovat monipuolistuneet. Nykyaikaiset matkaviestinverkot eivät ole enään puhelimien yksinoikeus, vaan ne ovat levinneet kuluttajien koteihin, sekä kiinteän internet-yhteyden tilalle. Matkaviestinverkkojen varaan rakentuneita laajakaistayhteyksiä voidaan käyttää kiinteän ADSL- ja valokuituyhteyksien sijaan pääasiallisina keinoina liittyä internetiin. Seuraavan sukupolven matkaviestinverkko Long Term Evolution (LTE) on saatavissa kirjoitushetkellä Suomessa toimivilta matkapuhelinliittymiä tarjoavilta operaattoreilta. LTE on 3G-verkkojen kahdeksannessa julkaisussa tehty laajennus. Tietoa LTE:stä ja sen ominaisuuksista löytyy useista alan julkaisuista, siitä on myös kirjoitettu useita asiaa laajemmin käsitteleviä kirjoja.

### **2.1 Liittymien määrä**

Tilastokeskuksen tekemien tutkimusten mukaan vuosina 2010 - 2012, kotitalouksien laajakaistaliittymien määrä ei ole muuttunut merkittävästi, 42 prosenttia kaikista kotitalouksista käytti kiinteää laajakaistaliittymää. Kaikkien kotitalouksien suhteen vaihteluväli on ollut kolmen prosentin luokkaa. Tutkimuksessa kiinnitettiin myös huomiota kuinka kotitalouksien nettotulot vaikuttivat käytössä oleviin internet-liittymiin. Tutkimuksen tuloksien mukaan kotitalouksien nettotulojen noustessa sekä kiinteät, että langattomat laajakaistaliittymät yleistyvät. Poikkeuksena olivat alle 2000 euroa kuukaudessa tienaavat kotitaloudet. Niissä vuodesta 2011 lähtien langattomat laajakaistaliittymät olivat yleisempiä, kuin kiinteät liittymät. Merkittävää on, että vain kolmen vuoden aikana kaikkien kotitalouksien kohdalla langattomat yhteydet yleistyivät, tietokoneen tai matkapuhelimen yhteysmuotona. Tästä voidaan päätellä

matkaviestinverkkojen kehittyneen tasolle, jolla ne voivat kilpailla kiinteiden verkkojen kanssa. (Tilastokeskus 2012; Tilastokeskus 2011; Tilastokeskus 2010).

Langattomien verkkojen käyttö pääasiallisena yhteytenä internetiin yleistyy. HSPA-verkon siirtonopeuteen vaikuttavat loppukäyttäjän päätelaite ja siihen asennetun vastaanottimen tekninen suorituskyky. Käytettävän verkon ominaisuudet, käyttöpaikassa vallitsevat olosuhteet, tai mahdolliset häiriöt ja signaalin vaimentuminen. Myös tukiaseman runkoverkon suorituskyky ja muiden aktiivisesti samassa verkossa dataa siirtävien käyttäjien lukumäärä voi vaikuttaa siirtonopeuksiin. (Sauter 2010). Sauter esittää, että vastaanottimen sijaintipaikan muutoksella voi olla merkittävä vaikutus saavutettuihin siirtonopeuksiin.

## **2.2 Verkkopalvelun laatu**

Tietoliikenneverkossa toimivat palvelut muuttuvat yhä enemmän datapainotteiseksi. Puhelimilla otetut valokuvat tallennetaan paikallisen muistin sijasta pilveen matkaviestinverkon välityksellä, videota saatetaan katsoa suoraan verkosta, sekä yleisesti ottaen maksetusta laajakaistasta otetaan enemmän irti niin verkon, kuin päätelaitteidenkin kehittyessä. Siksi uutta verkkoa käyttöönotettaessa, tai vanhaa päivitettäessä on hyödyllistä varmistua sen toimintavarmuudesta. Näin operaattori voi vielä puuttua löydettyihin puutteisiin. Runsaasti dataa käyttävien palveluiden yleistyessä tulisi verkon testauksessa kiinnittää aikaisempaa suurempaa huomiota palvelun kykyyn vastata käyttäjien tarpeisiin.

Piirikytkentäinen verkko luokitellaan yhteydelliseksi verkoksi, jossa kaikki liikenne kulkee ennen käyttöä erikseen avatun, käyttäjälleen varatun yhteyden kautta. Tällöin verkon resursseja varataan, riippumatta siitä käytetäänkö yhteyttä. Tämä tarkoittaa toisaalta sitä, että verkkoliikenteeseen ei aiheudu viivettä tai sen vaihteluita yhteyden avauksen jälkeen.

Pakettikytkentäinen verkko eroaa piirikytkentäisestä verkosta sen tavalla lähettää tietoa ja

siitä kuinka se vaikuttaa verkon muihin käyttäjiin. Nimensä mukaisesti pakettikytkentäisessä verkossa siirrettävä informaatio, oli se puhetta tai dataa, pilkotaan paketteihin ja lähetetään kohti määränpäättä. Toisin kuin piirikytkentäisessä verkossa paketeilla ei ole ennalta sovittua yhteyttä, vaan kukin paketti reititetään optimaalisinta reittiä pitkin. Saavutettu hyöty kulminoituu verkon resurssien tehokkaalla käytöllä.

Verkon luonteesta johtuvia ongelmia ovat viive ja viiveen vaihtelu. Voice over Internet Protocol (VoIP)-protokolassa käytetään IP-paketteja puhelinkeskustelun välittämiseen. Puhelun aikana tapahtuvat reititysmuutokset tai viiveen nopea vaihtelu vaikuttavat välittömästi ja huomattavasti reaaliaikaiseen puheluun. Puheen laatu voi laskea niin paljon, että siitä on mahdotonta saada selvää. Tasaisena pysyvä viive ei ole merkittävä ongelma, mutta tarpeeksi suurena se heikentää palvelun laatua. Quality of Service (QoS) tekniikalla voidaan priorisoida haluttuja palveluita, asiakkaita ja protokollia. Sen lisäksi QoS-tekniikalla voidaan muokata pakettiliikennettä siten, että korkeammalle priorisoidut palvelut saavat taatusti käyttöönsä tarpeellisen määrän resursseja toimiakseen tyydyttävästi. Näin tarkoituksena on taata vähintään vaadittu verkon suorituskyky. (Motorola 2009).

LTE-verkoissa on käytössä luokkiin perustuva QoS. Tarkoitus on antaa operaattoreille mahdollisuus eritellä palveluita ja niille varattavien verkkoresurssien määrää. Luokat ja niille taatut siirtonopeudet ovat herkkiä verkossa esiintyviin ympäristötekijöihin. LTE-verkossa käytettävässä QoS-tekniikassa on määritelty yhdeksän eritasoista luokkaa eriarvoiselle dataliikenteelle. Palveluille määrätään oma luokka, joka määrittelee kuinka sen datapaketteja käsitellään siirron aikana. Luokille on sovittu standardoidut parametrit, kuten mm. taattu tiedonsiirtonopeus ja korkein hyväksyttävä viive pakettia kohti. Palvelulle määrätystä luokasta riippuen yhteys voi toimia taatulla miniminopeudella, tai nopeus voi olla takaamaton, jolloin tiedonsiirto voi verkon kuormituksesta riippuen vaihdella. Luokat ovat riippuvaisia verkossa esiintyvän viiveen, sen vaihteluiden ja pakettien tippumisen suhteen. Verkon käyttöasteesta riippuen QoS:n käyttämättä jättämisen seurauksena voi olla pätkivä puhelu. QoS:n käyttämisellä on tarkoitus taata viiveelle ja kaistalle riippuvaiset, lähes reaaliaikaiset sovellukset toimimaan tasolla, joka on



loppukäyttäjälle huomaamaton. Samalla tarjotaan vähemmän viiveelle herkille, mutta nopeampaa tiedonsiirtoa vaativille palveluille, kuten puskurointia tukeville videoille paras mahdollinen suorituskyky häiritsemättä kriittisempiä palveluita. (Motorola, 2009).

Loppukäyttäjän laitteille on määritelty omat kategoriat 3GPP:n spesifikaatiossa 36.306. Laitteet ja niissä käytettävä radiorajapinta jaetaan viiteen luokkaan niiden arvioidun siirtonopeuden mukaan. (Kreher & Gaenger 2010).

Käytössä olevaan 3G matkaviestinverkon standardiin on sisällytetty neljä tietoliikenteen tyyppiä, joita käytetään priorisoimaan verkon läpi kulkevaa liikennettä. Nämä kategoriat on tarkoitettu langattomaan viestintään ja ne ovat: puhe, suoratoisto, vuorovaikutteinen- ja taustaliikenne. Kategorioiden liikennetyypit eroavat toisistaan niiden verkolle asettamilla vaatimuksilla. Puhe- ja suoratoistoliikenteen vaatimukset muistuttavat toisiaan niiden tarpeiden muodostuessa lyhyen viiveen, vähäisen datahävikin ja tasaisen vasteajan varaan. Suoratoistoa ei kuitenkaan pidetä niin haavoittuvana viiveelle, kuin puheliikennettä mutta se vaatii todennäköisesti enemmän kaistanleveyttä teräväpiirtomateriaalin yleisen saatavuuden ja käytön vuoksi.

Vuorovaikutteisen ja taustaliikenteen osalta asetelma on samanlainen, molemmat luokat muistuttavat toisiaan ja niiden käyttötarkoitus kattaa HTTP-, TELNET-, FTP- ja sähköposti-protokollien kautta tapahtuvan liikenteen. Vuorovaikutteinen- ja taustaliikenne eroaa aikaisemmin käsitellyistä luokista löysemmistä viiveelle asetetuista vaatimuksistaan. Taustaliikenteessä tietoa ladataan loppukäyttäjän laitteelle, mutta vuorovaikutteinen liikenne käsittää molemmansuuntaisen viestinnän. (Zhang, Sun & Yang 2003).

Langattoman verkon suorituskykyä mitattaessa on tärkeää valita seurattavat parametrit huolella, sillä niiden avulla voidaan arvioida loppukäyttäjän kokemusta. Kokemus on riippuvainen siitä ympäristöstä ja tilanteesta missä laite kulloinkin sijaitsee. Tilanne voi tarkoittaa myös laitteen liikkumista verkon alueella. Ympäristö vaikuttaa radiotien vaimennukseen ja verkon käyttöpaikan muuttumisella on selvä vaikutus sen toimintaan.

Puheyhteyden mittauksissa tulisi korostaa kuuluvuus-aluetta, yhteyden muodostuksen viivettä, äänenlaatua, yhteyden katoamista ja sen muodostamisen epäonnistumista.

Yleistyville datapohjaisille, esimerkiksi VoIP-sovelluksille tärkeimpiä tekijöitä ovat siirtonopeus, paketin lähettämiseen ja vastauksen saamiseen kulunut aika, vasteaika ja sen muutokset sekä virheiden esiintymistiheys. (Zhang ym 2003). Suoritettaessa mittauksia pakettikytkentäisille verkoille, Sedoyekan mukaan voidaan keskittyä neljään tekijään, joilla on merkittävä rooli tarkastellessa verkon toimivuutta kokonaisuutena. Tekijät ovat vasteaika, siirtonopeus, hävinneet paketit ja yhteyden toimintavarmuus (Sedoyeka, Hunaiti, Almasri, Cirstea & Rahman 2008).

### 3 SIGNAALIN ETENEMINEN

Jotta tiedonsiirto toimisi langattomasti, täytyy signaalin täyttää tietyt ehdot. Toimiakseen, lähettävältä osapuolelta vastaanottajalle kulkeneen signaalin on oltava riittävän voimakas. Edetessään signaalin taso laskee ja voidaan puhua signaalin vaimenemisesta. Jos vaimeneminen on liian voimakasta, ei signaali erotu taustakohinastaan ja vastaanottava osapuoli ei pysty havaitsemaan sitä. Vaimenemisen aiheuttavien tekijöiden vaikutukset riippuvat signaalin taajuudesta. Mitatun radiotaajuuden voimakkuudelle annetaan arvo joko tehotasoina (dBm), tai signaalin ja kohinan suhteena (SNR). (McCullough 2001).

Kirjassaan McCullough esittää signaalin ja kohinan suhteen sopivan hyvin signaalin voimakkuuden esittämiseen, sillä arvossa on huomioitu taustakohinan voimakkuus. (McCullough 2001). Signaalin ja kohinan suhteen paranemisella on suotuisa vaikutus saavutettuihin siirtonopeuksiin. Riittävä SINR pitää signaalin tulkittavana ja vähentää virhelähettyksiä, sekä uudelleenlähettyksiä. (Cox 2012, 49-50).

Ajomittauksen aikana tallennetaan huomattava määrä mittaustietoa. Eräs tallennettavista arvoista on mitatun signaalin taso. Kun signaali etenee lähettävältä tukiasemalta vastaanottavalle asiakaslaitteelle, siihen vaikuttavien tekijöiden aiheuttamaa vaimennusta voidaan kutsua yleisnimityksellä yhteysvälivaimennus (path loss). Etenemiseen vaikuttavia tekijöitä voivat olla esimerkiksi: vapaantilan vaimeneminen, absorptiovaimennus, heijastuminen, hajautuminen, siroutuminen, häipyminen, monitie-eteneminen ja vaimeneminen. (Isabona, Koneyha, Chinule & Isaiah 2013).

#### 3.1 Vapaa tila

Vapaassa tilassa tapahtuvalla vaimenemisella tarkoitetaan optimaalista tapausta, sillä silloin signaali ei törmää esteisiin tai heijastu niistä. Vaimenemista esiintyy signaalin levittyessä laajemmalla alueella ja täten sen sisältämä energia heikkenee etenemisen aikana.

Ilmatilassa tapahtuva vaimeneminen vaikuttaa vahvemmin korkeammista taajuuksista koostuvaan signaaliin. (Juutilainen 2007).

Asennettujen antennien ympäristössä on useita tekijöitä, kuten pintoja ja kulmia, jotka vaikuttavat siihen, kuinka radioaalto etenee vastaanottavaan antenniin. Kun antenni säteilee ympärilleen, sen lähettämä signaali etenee usean reitin kautta vastaanottimeen. Tämä tarkoittaa tyypillisesti signaalin heijastumista, siroamista tai taipumista. Heijastumisessa radioaalto osuu täysin heijastavaan pintaa ja kimpoaa siitä valon tavoin samassa kulmassa, kuin se siihen osuikin. Materiaalista riippuen aalto osittain heijastuu ja osittain etenee materiaalin läpi. Materiaalin läpi edenneen signaalin taso on vaimentunut. (Gustray 2012). Kasvillisuus ja puusto vaimentavat signaalia, kuin myös sää-olosuhteet esimerkiksi lumisade.

Heijastuneen signaalin ominaisuudet pysyvät muuttumattomina, täten heijastuneen radioaallon aallonpituus, etenemisnopeus ei eroa pintaan saapuneesta radioaallostaa. Jotta radioaalto voi heijastua, tulee heijastavan pinnan olla suuri suhteessa signaalin aallonpituuteen. Heijastumisesta aiheutuu vaimentumista, kun osa signaalista etenee materiaaliin. Signaali voi myös polarisoitua (Salous 2013). Jos radioaalto osuu pintaan, jossa on aallonpituutta pienempiä tai yhtä suuria epätasaisuuksia, kuten aukkoja tai koloja, ei radioaalto heijastu muuttumattomana vaan hajoaa ympäristöön. Samoin käy radioaallon osuessa lukuisiin pieniin kohteisiin, Gustray antaa tästä loistavan esimerkin vesisateen vaikutuksesta radioaaltoihin. Vesisateen vaikuttaessa radioaaltoon siinä ilmenee heijastumista, taittumista, taipumista ja energian imeytymistä. (Gustray 2012).

Urbanissa ympäristössä, jossa teräviä kulmia on riittämiin, esiintyy taipumista. Taipumisella tarkoitetaan ilmiötä, jossa radioaalto nimensä mukaisesti taipuu pinnan ohi, jota se ei voi läpäistä. Taipuminen ei vaadi terävää kulmaa, mutta radioaallot käyttäytyvät niiden kanssa suotavammin kuin pyöreämpien kulmien kanssa. Taipumisessa radioaallot tyypillisesti vaimentuvat. Gustray kertoo kirjassaan taipumisen perustuvan Huygensin periaatteeseen. (Gustray 2012). Radioaallon eteneminen esteen takana olevalle

katvealueelle, johon ei ole näköyhteyttä, selittyy Huygensin periaatteella. Periaatteen mukaan aaltorintaman jokainen piste synnyttää uuden alkeisaallon. Nämä uudet aallot muodostavat seuraavan aaltorintaman. Eteneminen on luonteeltaan laajentuvaa ja edellä olevan periaatteen mukaan taittuu esteiden taakse. Radioaallot vaimentuvat runsaammin taittuessaan pyöreiden muotojen ohi. Langattomien verkkojen näkökulmasta ilmiö mahdollistaa signaalin vastaanottamisen radioaaltoja läpäisemättömän objektin takana, eli varjoalueella, johon ei ole suoraa näköyhteyttä lähettävältä antennilta. Hyödyt tulevat hyvin esille urbaaneissa ympäristöissä, kun signaalia otetaan vastaan ilman näköyhteyttä tukiasemaan. (Gustray 2012).

### 3.2 Häipyminen

Häipymisenä pidetään signaalin amplitudin heikkenemistä ja vahvistumista, joka johtuu vastaanottimen liikkeestä. Häipyminen on matkaviestinverkoissa jatkuvasti läsnä, vastaanottimen liikkeen takia. Häipymistä esiintyy erillaisena. Häipymisen luokittelussa ne jaetaan kolmeen päätyyppiin:

- hidas ja nopea
- Tasainen ja valikoiva
- Rayleigh ja Rician

Häipymiseksi voidaan käsittää myös varjostuminen, jossa signaalin näkötie-etenemistä estää jokin objekti ja se aiheuttaa radioaallon amplitudin häipymistä. Varjostus-häipyminen on luonteeltaan hidasta häipymistä. (Juutilainen 2007).

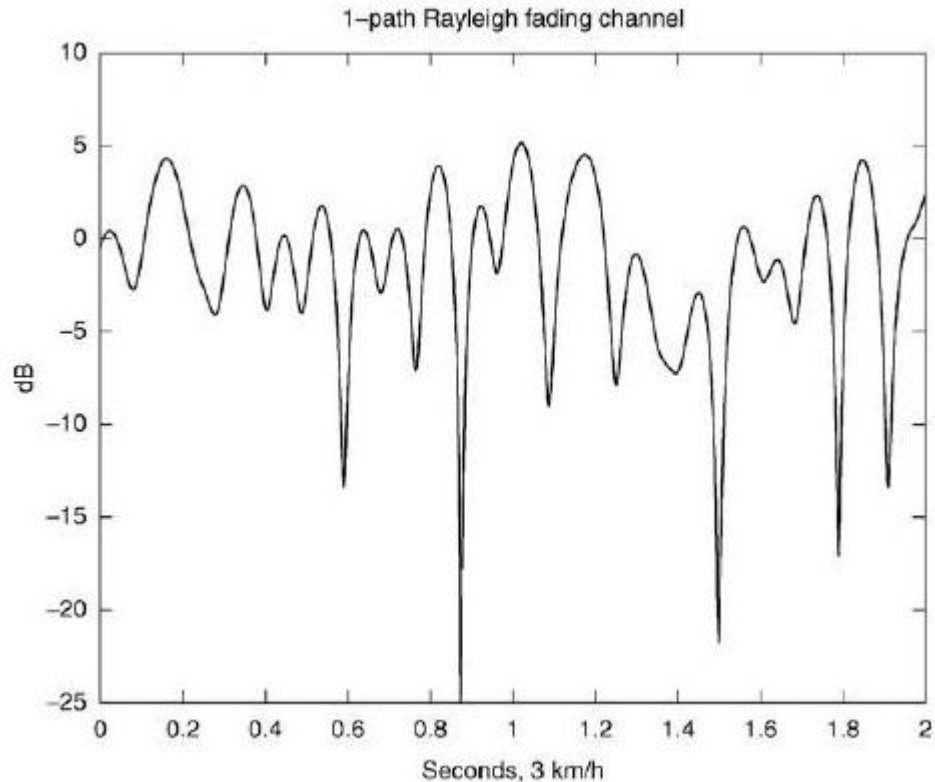
Hitaassa häipymisessä signaalin voimakkuuteen kohdistuvat muutokset ovat suhteellisen tasaisia, nopealle häipymiselle tyypillisiä äkillisiä amplitudin muutoksia ei ole nähtävissä. Tyypillisesti hidas häipyminen johtuu varjostumisesta, kun vastaanottavan antennin ja tukiaseman välissä olevaan etenemistiehen tulee muutoksia. Muutokset voivat olla vaikka

rakennuksia tai maaston muotoja. (Juutilainen 2007). Nopea häipyminen johtuu niin ikään antennien sijainnin muutoksista, mutta hitaaseen häipymiseen verrattuna se on rajumpi. Nopea häipymisen taustalla on vastaanottimen liike ja siihen lisäksi liittyvä monitie-eteneminen. Vastaanottimessa saapuneet signaalit summautuvat. Kun vastaanotin on liikkeessä, signaalien välisistä vaiheista riippuen lopullisen summautuneen signaalin taso voi vaihdella jopa 20-30 desibeliä (Juutilainen 2007). Suurimmat vaikutukset amplitudiin koetaan puolen aallonpituuden välein. Tällöin vaihe-erot ovat tyypillisesti suurimmillaan, johtuen monitie-etenemisen osasignaaleista.

Tasaisella ja valikoivalla häipymisellä kuvataan häipymisen vaikutusta taajuuden suhteen. Tasaisessa häipymisessä signaaliin kohdistuvat muutokset ovat yhtä suuria sen taajuuskomponenteissa. Signaalin taajuuksien häipymisillä siis ei ole eroja vaan ne heikkenevät ja voimistuvat samassa suhteessa. Tämä ei pidä paikkaansa tarkastellessa valikoivaa häipymistä. Se on vastakohta tasaiselle häipymiselle ja siinä etenemisestä johtuvat vaikutukset signaalin tasoon vaihtelevat taajuuskomponenteittain. (Juutilainen 2007).

### **3.3 Rayleigh**

Rayleigh-häipymisellä tarkoitetaan mallia, jossa häipymän luonne perustuu monitie-etenemiseen ilman dominoivaa polkua, eli näköyhteyttä vastaanottajan ja lähettäjän välillä ei ole. Rayleigh-häipymän malli siis soveltuu hyvin matkaviestinverkkojen käyttäytymisen kuvaamiseen tilanteissa, joita esiintyy ulkotiloissa liikkuesssa. Rayleigh-mallin sanotaan edustavan pahinta mahdollista häipymistä (Juutilainen 2007). Tyypillinen Rayleigh-mallin signaali on aaltoilevaa ja siinä on äkillisiä, syviä signaalitason häipymiä (KUVIO 1).



KUVIO 1. Tyypillinen Rayleigh-häipymän kuvaaja, esittää monitie-etenemisestä johtuvia vaimentumisia (Toskala & Holma 2010).

Häipymän syynä ovat vastaanottimelle saapuneiden yksittäisten aaltojen vaihe-erot monitie-etenemisestä johtuen. Esimerkiksi 3G:ssä käytetyillä 2.1 GHz taajuuksilla, signaaliteiden pituuksien erotuksen ei tarvitse olla suuri aiheuttaakseen häipymistä signaalien summautuessa vastaanottimella. Signaalitiedon eron ollessa puolet käytetyn taajuuden aallonpituudesta, ovat signaalien vaiheet vastakkaiset. Koska aallon vaiheen muuttumiseen vaikuttavan liikkeen tarve on pieni, heittelee liikkuvan vastaanottajan signaalin voimakkuus laajasti rayleigh-häipymän takia. (Toskala & Holma 2010, 52).

### 3.4 Doppler

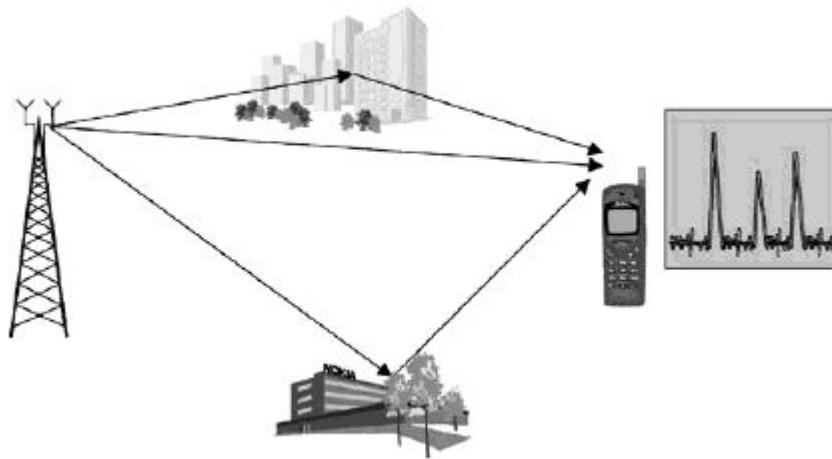
Tutkasta tuttu Doppler-ilmiö liittyy viestintään, etenkin kun ollaan nopeassa liikkeessä. Doppler-ilmiö yksinkertaistettuna käsitetään radioaallon taajuuden, vaiheen tai aallonpituuden muutoksena, joka johtuu liikkeessä olevan lähettäjän tai vastaanottajan

välisen etäisyyden muutoksesta. Doppler-ilmiössä lähettävän ja vastaanottavan antennin välinen etäisyys muuttuu, joko yhden tai molempien osapuolien liikkeen vaikuttaessa etäisyyteen. Liikkeessä oleva lähetin lähestyy joko paikallaan pysyvää tai myös liikkeessä olevaa vastaanottajaa. Etäisyyden muuttuessa muuttuu myös vastaanottajalle näkyvä taajuus aikayksikköä kohti. Sama toimii myös, kun etäisyys kasvaa, taajuus pienenee samassa suhteessa. Yhdistämällä monitie-eteneminen ja Doppler-ilmiö huomataan, että monitie-etenemisen kautta saapuvat signaalit ovat Doppler-ilmiön johdosta muuttuneet taajuudeltaan. Monitie-etenemispolkujen kautta saapuneet signaalit ovat siis muuttuneet taajuudeltaan. Näiden muutoksien yhteenlaskettua summaa kutsutaan Doppler-hajonnaksi. Doppler-hajonnassa signaalin taajuus leviää, riippuen ympäristöstä sekä etäisyyden muutoksista. (Gustray 2012).

### 3.5 Monitie-eteneminen

Monitie-etenemisessä signaaleja vastaanottava antenni näkee kahta tai useampaa polkua pitkin matkanneita radioaaltoja. Radioaallot eivät välttämättä kuulu alkuperäiseen lähetykseen, vaan voivat olla naapurisolun lähettimen signaaleja. Monitie-etenemisessä radioaallot etenevät moninaisia reittejä pitkin, jolloin siihen vaikuttavat aikaisemmin käsitellyt heijastuminen, siroaminen, taipuminen ja vapaantilan eteneminen. Monitie-etenemisessä signaalilla voi olla joko dominoiva yleensä suorassa näköyhteydessä oleva ensisijainen etenemispolku ja muita toissijaisia polkuja, joita pitkin edenneet signaalit viivästyvät, häipyvät ja saattavat muuttua doppler-ilmiön takia taajuudeltaan (KUVIO 2.). Rician-häipyminen edustaa edellä kuvatun etenemisen käyttäytymistä. Aikaisemmin käsitellyn rayleigh-häipymisen tapauksessa dominoivaa ensisijaista etenemispolkua ei ole, vaan jokainen vastaanotettu signaali on edennyt ilman suoraa näköyhteyttä ja saattanut muuttua.





KUVIO 2. Monitie-eteneminen johtaa saman signaalin saapumiseen useana vääristyneinä kappaleina (Toskala & Holma 2010).

Monitie-etenemisen vaikutukset signaaliin perustuvat suuremmaksi osaksi erinäisten etenemispolkujen aiheuttamiin viiveen ja vasteen eroavaisuuksiin ja sen aiheuttamaan interferenssiin, joka voi siis olla vahvistavaa, jolloin kahden signaalin vaiheet ovat keskenään samassa vaiheessa vahvistuen summutunutta signaalia tai se voi olla destruktiivista interferenssiä, jossa vaiheet ovat keskenään vastakohtaisia ja pahimmassa tapauksessa kumoavat toisensa. Lähetetty signaali, tai pulssi etenee kohteeseensa eri polkuja pitkin, jolloin vastaanottava antenni näkee pulssin lisäksi vaimentuneita ja heijastuneita pulsseja. Näiden pulssien tai signaaleiden keskinäiset vaikutukset vääristävät vastaanotettua signaalia, sekä summutuvat muihin signaaleihin ja niiden heijastuksiin. Virheiden vääristämisen signaalin tulkinta täten vaikeutuu ja tästä aiheutuu virhettä. Monitie-etenemisestä johtuvalla nopea häipyminen on yleistä käytössä olevissa verkoissa. Nopeasta häipymisestä johtuvia vaimentumia vastaan WCDMA:ssa on käytössä seuraavia vastakeinoja: Rake-vastaanottimet, nopea tehonhallinta sekä lomitus- ja uudelleenlähetysohjelmien käyttö. (Toskala & Holma 2010).

Rake-järjestelmässä jokaiselle saapuneelle signaalikomponentille varataan oma Rake-alivastaanotin ja saapuneet heijastuneet signaalit käsitellään jokainen omassa alivastaanottimen haarassaan. Käsitellyt komponentit yhdistetään myöhemmin yhteen.

Rake-järjestelmän etuina on parantunut signaalin ja kohinan suhde, sekä varmempi tapa tulkita häipynyt signaali käyttäen apuna heijastuneita signaaleja, sillä signaalitien muutoksien johdosta häipynyt komponentti voi olla eri heijastuneiden signaalien välillä. (Toskala & Holma 2010).

Nopealla tehonhallinnalla ja Rake-vastaanottimien käytöllä paikataan häipyvän signaalin tehon aiheuttamia ongelmia. Nopealla tehon hallinnalla tarkoitetaan WCDMA-järjestelmässä 1500 kertaa sekunnin aikana tapahtuvaa toimintoa, jossa tukiasema säätelee UE:n lähetystehoa. Lähetystehon sääntely perustuu tukiaseman vertailuun tavoitellun ja mitatun SIR:n välillä. Jos mitattu SIR jää tavoitellun arvon alle, tukiasema pyytää mobiilia laitetta, josta käytetään tässä työssä vastaavuudessa termiä User Equipment (UE), nostamaan lähetystehoa. Toimenpiteen tarkoitus on pitää tukiaseman vastaanottamien signaalien teho samana. Tavoitellun SIR:n arvo muuttuu riippuen sen aikaisesta häipymisolosuhteista. Tavoitteena on vähentää turhan voimakkaasta lähetystehosta aiheutuvaa häiriötä muihin signaaleihin, mutta samalla pitää tukiasemalle saapuvan signaalin teho riittävänä toimivan viestinnän takaamiseksi. Tyypillisesti SIR kohdearvo onkin pienin tarvittava. (Toskala & Holma 2010).

Lomitus- ja uudelleenlähetysprotokollien käyttöä ja niihin liittyen aikadiversiteettiä hyödyntämällä pyritään palautumaan siirtotien aiheuttamista virheistä. Aikadiversiteetti yksinkertaistettuna tarkoittaa saman datan lähettämistä moneen kertaan tai lähetettävään dataan lisätään virheen korjaukseen tarvittavia tietoja. Tavoitteena on vähentää purskemaisia virheiden esiintymisiä, joita yleensä esiintyy nopean häipymisen, signaalitien muutoksen tai esteen varjostaessa signaalia. (Toskala & Holma 2010).

Virheiden suhdetta siirrettyyn kokonaismäärään kuvataan bittivirhesuhteen (BER) avulla. Suhde kuvaa todennäköisyyttä, jolla signaalitietä pitkin siirretty bitti kääntyy toiseksi. Bittivirhesuhde on riippuvainen muun muassa käytetystä modulaatiosta. Toisin sanoen tehokkaammat modulointitekniikat kuten 64-QAM vaativat signaalitieltä enemmän kuin 16-QAM tai alemman tason modulaatiotekniikat. Vastaavasti hyötyinä saavutetaan

korkeammat siirtonopeudet niillä verkon alueilla, joissa on sopivat edellytykset käyttää korkeampaa modulointia. QAM-moduloinnissa yhdistetään amplitudi- ja vaihemodulointi.

## 4 AJOMITTAUS

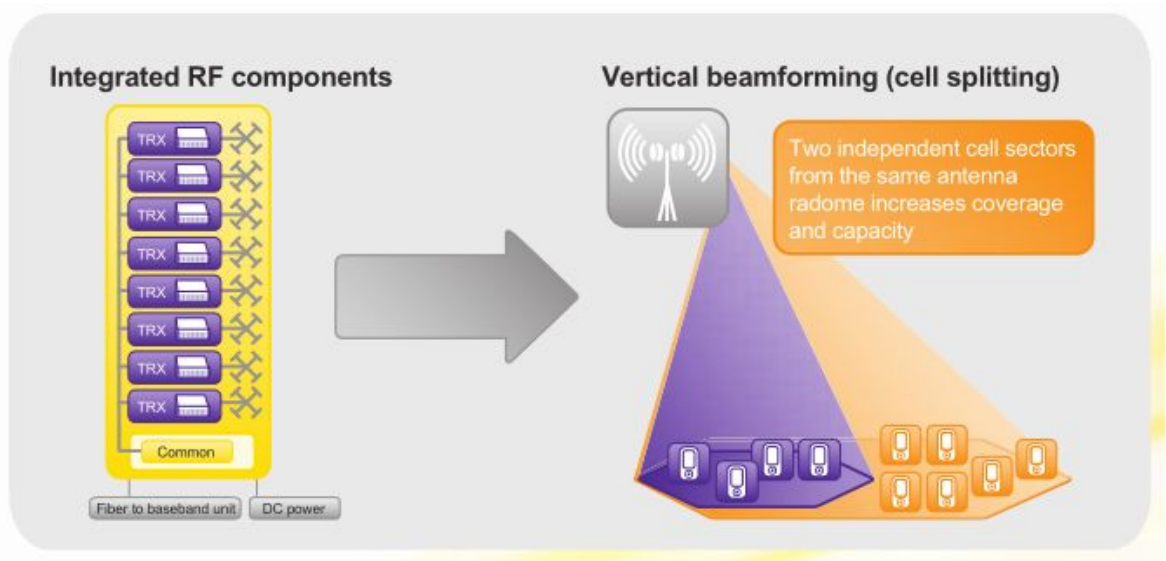
Ajomittaus on menetelmä, jolla kerätään tietoa matkaviestinverkon toiminnasta tietyllä alueella. Kuitenkin kattavan ajomittauksen tekeminen on aikaa vievä ja työläs tehtävä, jos ajoreitit ovat pitkiä ja testaustapauksia on useita. Mittauksien raaka-dataa pitää vielä muokata raportinomaiseksi esitykseksi. Aikataulullisesta ja budjettisyyden lisäksi kompakti sekä optimoitu ajoreitti vähentää ajettavien kilometrien määrää ja nopeuttaa analysoinnin tekoa. Ajomittausta toteutettiin testaussuunnitelman mukaan. Suunnitelma oli mittava ja siihen sisältyi useita testitapauksia. Ajomittaukseen osallistuu tyypillisesti useita henkilöitä. Koordinaatiossa käytetään ryhmäpuhelua.

Ajomittaukseen voi kulua huomattava määrä työtunteja. Myös mittauksien esivalmistelut kestävät pitkään. Ajoreittiä suunnitellessa, riippuen mitä mittauksella on tarkoitus mitata, on hyödyllistä laatia reitti kattamaan koko tukiaseman kantoalue. Kattavaa mittausta varten ajoreitti voi kattaa kaupunkiajosta, tukiaseman kantaman rajoille asti. Jos tukiaseman antennin suuntakuviot on tiedossa, sitä voidaan hyödyntää mittausreitien suunnittelussa. Yleisesti mittauksien ajoreitit tulisi olla mahdollisimman tiivistetty, pitkät ajot vievät aikaa ja useille päiville venytetyt mittaukset voivat kärsiä olosuhteiden muutoksien takia. Esimerkiksi sään vaihtelun aiheuttamat erot etenemishäviöön vaikeuttavat tuloksien analysoimista ja pahimmillaan johtaa harhaan. Mittaukset kohdistuivat antenniin, jossa käytettiin aktiiviantennijärjestelmää (AAS), tarkemmin sen ominaisuuteen luoda ja suunnata radioaaltoja solun alueella.

Vertikaalisessa sektoroinnissa (VS), solun kantoalue jaetaan kahdeksi erilliseksi soluksi muokkaamalla vaihetta ja amplitudia tukiaseman kantataajuuskaistaa ohjelmallisesti. Muutoksilla joko vahvistetaan tai vaimennetaan signaaleja, jolloin voidaan ohjata säteilykeilaa. Ohjaus perustuu säteilykuvion muodon ja suunnan muokkaamiseen signaalin sähköisellä käsittelyllä. Säteilykeilaa voidaan ohjata vaaka- ja pystysuunnassa, jos laitteisto tukee ominaisuutta. Nokia Solutions and Networks esittää beamforming-tekniikan tuovan

parannuksia verkon kapasiteettiin ja sen peittoalueeseen (KUVIO 3). Tekniikka oli myös käytössä mittauksissa ja simulaatioissa. (Nokia Solutions and Networks 2012).

Jaettaessa yhden antennin peittoalue kahdeksi soluksi voidaan esimerkiksi jakaa verkko lähellä tukiasemaa olevaksi sisäsoluksi ja kauemmas kantavaksi ulkosoluksi. Tavanomaisen solun jakaminen kahdeksi soluksi kasvattaa kapasiteettia ja luo resursseja molemmille soluille. Molemmilla soluilla on omat resurssinsa verkossa olevien päätelaitteiden palvelimiseen. (Nokia Solutions and Networks 2012).



KUVIO 3. Antennin jakaminen kahdeksi itsenäiseksi soluksi voi tuoda parannuksia peittoalueeseen ja kapasiteettiin (Nokia Solutions and Networks 2012).

Ajoreitti voi leikata näiden solujen liitoskohdassa, tai vastaavasti käytettäessä toista, paikallaan seisovaa mittaustilastoa ja sijoittamalla se solujen väliselle handover-alueelle saadaan tuloksia siitä, kuinka hyvä yhteys laitteella on solun kanssa. Käyttämällä antennien tai säteilykeilojen kallistusta hyödyksi voidaan minimisoida se alue, jossa solujen lähettimien radioaalto häiritsevät toisiaan tai solut kuuluvat yhtä hyvin, mutta häipymisen johdosta kuuluvuus on nopeasti vaihtelevaa. Usean solun ollessa päällekkäin, voi alueella oleva UE suorittaa soft ja softer handover-tapahtumia. (Nokia Solutions and Networks 2012).

Soft handover tarkoittaa sitä toimintoa, jossa UE vaihtaa paremman yhteyden perässä solua, katkaisematta yhteyttä ennen kuin siirto voidaan suorittaa. Soft handover vaatii sekä aktiivisen solun (serving cell), että vaihdon kohteena oleva solun (target cell) käyttävän samaa taajuutta. Soft handover ratkaisee aikaisemman ongelman jossa yhteys, kuten puhelu katkesi tukiaseman vaihdon eli handoverin takia. Soft handover on käyttäjälle näkymätön. Vaihdoksen aikana tukiasemat reitittävät liikennettä keskenään ilman katkeamista. Softer handover toimii muuten samalla periaatteella, mutta siinä handover tehdään saman tukiaseman kahden tai useamman sektorin välillä. (Toskala & Holma 2010).

Ajomittauksen vaiheita optimoimalla saavutetaan hyötyjä testauksen koko elinkaaren ajalta (Telecomhall 2011a). Ajoreitin pituus ei saisi kasvaa liian suureksi. Noin puolen tunnin yhtämittainen ajo testiä kohden on vielä sopivissa rajoissa. Pitkän ajoreitin vaikutukset levittävät mittaukseen tarvittavaa aikataulua, kuormittavat suorittavaa testihenkilökuntaa ja ellei siirtonopeuksissa käytettävää siirrettävää tiedostoa mitoiteta mitattavien nopeuksien mukaan, saattaa siirto edetä loppuun asti ennen mittauksen varsinaista loppua. Ajoreittiä suunnitellessa pyritään täyttämään mittauksen tavoitteet, jos tarkoituksena on saada tietoa verkon suorituskyvystä sen kuuluvuusalueella, niin ajoreitti kuvastaa tätä kattamalla monipuolisesti kantaman alueet.

#### **4.1 Määrittely**

Testisarjan mittauksissa, jotka kuuluivat työhön, suoritettiin ajomittaus kahdelta reitiltä jokaista mittausta kohti. Mittauksissa käytettiin yhteensä kolmea kannettavaa tietokonetta, joista Nemo oli liikkeessä oleva mittaustilaite. Nemo2:lle ja MCG:lle etsittiin ennen mittausta staattinen mittauspiste. Staattiset mittauspisteet vaihtuivat myöhemmin esiteltävien testitapauksien välillä. Työssä Nemo2:sta nimitetään kuormittavaksi Nemoksi ja MCG:tä Load2:ksi.

Mittauslaitteiden nimitys johdettiin niissä käytettävästä ohjelmistosta, sekä roolista

mittauksessa. Näiden laitteiden tehtävänä on aiheuttaa kuormitusta testattavaan verkkoon, tallentaen samalla mittaustietoa verkon käyttäytymisestä niiden osalta.

Mittauksissa antennien sähköisen kallistuskulman vaihtamisen tai mittauksissa vertailupohjana toiminut verkkoon liikennettä luoneen, paikallaan pysyneen Nemo2:n paikan muutoksen jälkeen ajettiin kaksi reittiä, joiden jälkeen asetuksia vaihdettiin. Nemo2 käytti samaa laitteistoa kuin varsinainen mittausta suorittanut Nemo Outdoor, mutta mittaus suoritettiin liikkumatta. Nemo2:n paikka määräytyi mittauksen mukaan. Esimerkiksi jos haluttiin mitata, miten laitteisto käyttäytyy ja sen vaikutukset muihin verkon laitteisiin, tai jos Nemo2 sijoitetaan kahden solun raja-alueelle. Ajettavia reittejä kutsuttiin kuvaavilla nimillä radiaali- ja sektorireitti. Tarkoituksena oli nimetä mittauksien tulokset sisältävät tiedostot niin, että niiden katselijan ei tarvitsisi avata tiedostoa ymmärtääkseen mitä on mitattu. Radiaalireitti sivuaa kartalle piirrettäessä Alpuminkankaan tukiasemaa mukailen Alpuminkankaan antennin pääsuuntakuviota.

Sektorireitti on pyritty levittämään tukiaseman molempien solujen kuuluvuusalueelle. Radiaalireitti on luonteeltaan yksinkertainen ja nopea suorittaa. Eräs mittauksia suorittaessa esiin noussut seikka liittyy muiden autoilijoiden vaikutuksiin mittauksia tehdessä. Jos mittaava auto seisoo liikennevaloissa tai risteyksessä yhdellä ajolla ja pääsee toisella suoraan vihreille, ovatko vaikutukset merkittäviä tarkastellessa reitin kokonaiskuvaa vertaillen muihin mittauksiin. Voidaanko tarpeettomat risteyksessä seisomiset suodattaa analysointivaiheessa pois GPS-koordinaatteja sekä mittauksen aikaleimaa hyväksikäyttämällä. Molemmilla ajoreiteillä oli samat aloitus- ja lopetuskohdat, vain reitti niiden välillä oli erilainen.

#### **4.2 Merkitys/tarkoitus**

Ajomittauksen tarkoitus on hankkia realistista tietoa verkon käyttäytymisestä, kuin loppukäyttäjä sen kokisi. Ajomittausta käytetään tiedon keräämiseen verkon toiminnasta,

jota voidaan verrata vertailuarvoihin. Matemaattisesta simuloinnista saadaan osviittaa, mutta Agilent Technologies esittää julkaisussaan, ettei käyttäjien laitteiden (UE) käyttäytymistä ja sen vaikutusta verkkoon voida mallintaa täysin matemaattisin menetelmin. He perustelevat ajomittauksen tarpeellisuutta myös verkon toiminnan tarkkailussa. Toiminnallisuutta on ajan saatossa siirretty radioverkko-ohjaimelta (RNC) tukiasemalle (Node B). HSDPA:ssa aikaisemmin RNC:llä tapahtunut päätös paketin uudelleenlähetyksestä on siirretty Node B:hen (Toskala & Holma 2010, 356). HSUPA:ssa tätä Node B:n toiminnallisuutta laajennettiin myös uplink-suuntaan (Toskala & Holma 2010, 393). Vaikka näin saadaan vähennettyä viivettä, kuitenkin UE:n ja Node B:n välistä liikennettä ja tilannetta ei voida tarkkailla verkon hallintatyökaluilla, sillä päätöksenteko tapahtuu Node B:llä. (Rumney 2013). Tietoa ja arvoja voitaisiin tosin kerätä suoraan NodeB:ltä. Vaikka julkaisussa puhutaan LTE:stä, voidaan yleispiirteitä soveltaa HSPA-verkon ajomittaukseen.

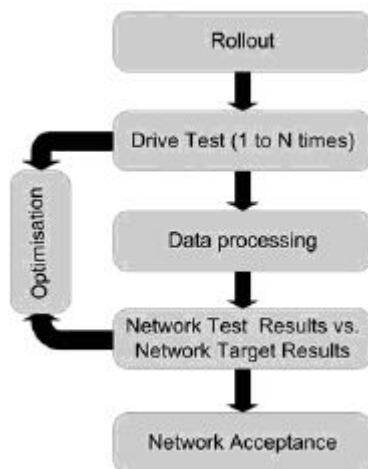
Milloin ja miten usein operaattoreiden kannattaa suorittaa ajomittaus? Kun verkon toimintaympäristö muuttuu merkittävästi, uusia tukiasemia otetaan käyttöön ja kentällä huomattujen häiriöiden tultua tietoon esimerkiksi asiakaspalautteen muodossa. Mittauksia voidaan suorittaa tietyin väliajoin verkon suoristuskyvyn varmistamiksi. On olemassa myös ulkopuolisia tekijöitä, jotka voivat muuttaa ympäristöä ja toimia pakotteina suorittaa ajomittaus. 3GPP:n julkaisussa TR36.805 linjataan ehtoja, joiden täytyttyä on hyvä suorittaa ajomittaus verkon toimintakyvyn ylläpitämiseksi (Hämäläinen, Sanneck & Sartori 2011).

#### **4.2.1 Verkon muutokset**

Uuden tukiaseman käyttöönottoon kuuluu sen testaaminen. Testauksen tarkoituksena on kerätä tietoa verkon kuuluvuusalueesta. Ensisijaisesta testauksesta saatujen tuloksien mukaan muokataan tukiaseman asetuksia, kuten antennien kallistuskulmia tai lähetystehoja (Hämäläinen ym. 2011). Ajomittauksia voidaan jatkaa tämän jälkeen, jonka pohjalta tehdään



verkon hienosäätämistä. Kuviossa 4 esitetään uuden tukiaseman tai verkon laajennoksen käyttöönottovaiheet. Verkossa suoritetaan ajomittaus ja mittauksien tuloksia verrataan tavoitetuloksiin, jotka halutaan saavuttaa. Tavoitetuloksia kohti edetään ajomittauksen ohessa tai tuloksista riippuen suoritettavalla verkon optimoinnilla. Tätä jatketaan kunnes verkon ajomittauksella mitatut arvot vastaavat tai ylittävät kohdearvot. (Hämäläinen ym. 2011).



KUVIO 4. Matkaviestinverkon käyttöönoton prosessi (Hämäläinen ym. 2011).

#### 4.2.2 Merkittävät ympäristön muutokset

Uusien asuinalueiden rakentaminen voi luoda verkon kuuluvalle alueelle varjostumia. Hämäläisen ym. mukaan laaja rakentaminen ennakoit käyttäjämäärän ja siten verkossa liikkuvan liikenteen kasvua. Näissä tapauksissa pyritään selvittämään, onko verkon kapasiteetti riittävä vastaamaan kasvavaan liikenteeseen. (Hämäläinen ym. 2011). Verkon käyttäjämäärä vaikuttaa myös verkossa esiintyvään soluhengitykseen. Kyse ei ole biologiasta vaan matkaviestinverkoissa esiintyvistä ilmiöistä, jossa käyttäjämäärän lisääntyminen solussa nostaa myös häiriöiden määrää. Korkeampi häiriöiden määrä vaikeuttaa erityisesti tukiasemasta kauempana olevien UE:den kommunikointia tukiaseman kanssa.

### 4.2.3 Asiakaspalaute

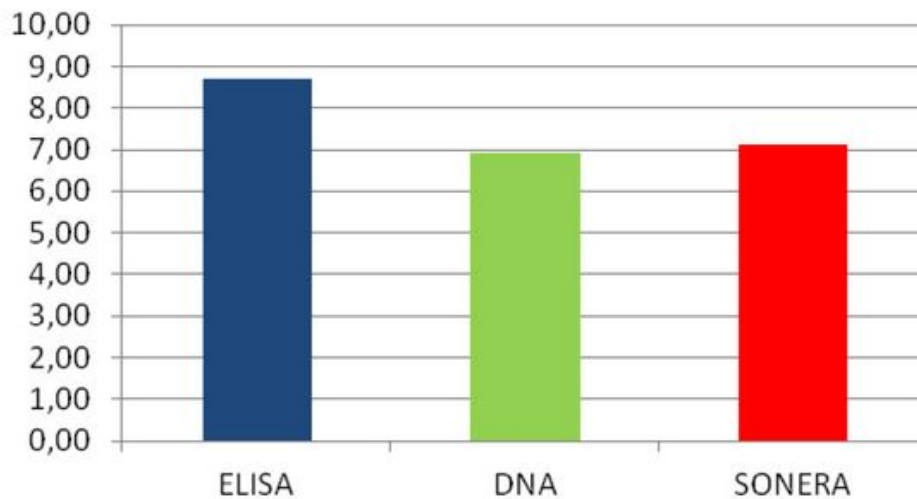
Tapaukset, joissa solun käyttäjät ilmoittavat verkossa olevan ongelmia, kuten yhteyden katkeamisia tai heikentynyttä äänenlaatua puheluissa, ovat operaattoreille syitä suorittaa ajomittauksia alueella. Mittauksien tuloksien mukaan arvioidaan jatkotoimenpiteiden tarve. Ajomittauksen korvaajaksi Hämäläinen ym. ehdottaa Minimisation of Drive Tests (MDT) menetelmää. Siinä verkkoon liittyneet UE:t, mahdolliset asiakaslaitteet mittaavat ja raportoivat verkon tilan GPS-koordinaattien kera operaattorin palvelimella. Lähetetty tieto muistuttaa ajomittauksesta saatua tietoa. Etuina nähdään laajamittaisempi tiedon keruu, mittauksia suoritetaan jatkuvasti ja niitä saadaan alueista, joihin ei ajomittauksen aikana päästä. Ongelmana pidetään menetelmän vaikutusta UE:iden akunkestoon ja riittämätöntä standardia. (Hämäläinen ym. 2011).

### 4.2.4 Säännölliset ajomittaukset

Edellä kuvatut syyt suorittaa ajomittaus ovat tapahtumapainotteisia. Ajomittaus suoritetaan, kun kriteerit täyttyvät. Säännölliset ajomittaukset täydentävät aukkoja ja pitävät operaattorit ajan tasalla verkon toimintaan liittyvistä seikoista. Ajomittauksien aikana voidaan havaita ongelmia, jotka pystytään korjaamaan ajoissa. Ajomittauksia käytetään myös markkinoinnin tukena. Kuuluvuuskarttaa voidaan käyttää hyödyksi myynissä ja suorituskykymittaukset vertailuineen kilpailijan tai omiin alemman luokan tuotteisiin auttavat myymään uusimpia palveluita. Teleoperaattori Elisa käytti kolmannen osapuolen tekemiä tiedonsiirtonopeusmittauksia osana markkinointimateriaaliaan (KUVIO 5). Mittaukset suoritettiin Elisan toimeksiannosta. Suorittajana toimi European Communications Engineering (ECE Oy). Mittauksia tehtiin 34 kunnan alueella ja niissä tarkasteltiin keskimääräistä siirtonopeutta aikayksikön suhteen. (ECE Oy 2013).

## Elisalla nopea ja kattava verkko

### Keskimääräinen datanopeus



*Keskimääräinen 3G-datanopeus mitatuissa 34 Suomen kaupungissa loka-marraskuussa 2013. 3G:lla tarkoitetaan tässä mittauksessa UMTS/HSPA/HSPA+ -teknologiaa sisältäen myös 4G Dual Carrier -ominaisuuden (mittaus ei koske 4G LTE -nopeuksia). Tiedonsiirtonopeuteen vaikuttavat päätelaitteen ominaisuudet, sijainti ja verkon kuuluvuus. Tiedonsiirtonopeuksissa on operaattoriakohtaisesti alueellisia eroavaisuuksia.*

KUVIO 5. Ajomittausta voidaan käyttää osana markkinointia (ECE Oy 2013)

### 4.3 Nykytilan kuvaus

Tässä osiossa avataan mittauksien sisältöä ja mitä merkitystä kerätyillä arvoilla on verkon toimintaan. Mittausohjelmistot ja laitteet mittaavat myös muita arvoja. Mittauksen aikana kerätyt tiedot tallennetaan mittauksessa käytetyn tietokoneen kovalevyille. Analysointia varten tiedot siirretään ulkoisella kiintolevyllä Nemo Analyze:llä varustetulle tietokoneelle.

#### 4.3.1 Kaaviot ja tilastot

Mittauksen tulokset esitellään raportissa käyttämällä yhdistettyä kartta-, statistiikka- ja kuvaajanäkymää. Karttanäkymällä on hyvä esittää kokonaisvaltainen näkymä ja esittää,

miten verkon käyttäytyminen vaihtelee reitin alueella. Karttanäkymässä arvojen suuruutta esitetään käyttämällä arvon suuruuden mukaan vaihtuvaa väriä. Tämä ei tarjoa pohjaa tarkalle arvojen esittämiselle. Tarkempaa esitystä varten voidaan käyttää statistiikkanäkymää, jossa mittauksen arvot näytetään yhdistämällä taulukkoa ja pylväskaaviota. Taulukossa tyypillisesti on nähtävillä keskiarvot, maksimiarvo, minimiarvo, näytteiden määrä, varianssi. Pylväskaaviossa tavanomaisesti arvot on esitetty sen arvon esittävällä pilarilla ja arvojen esiintymisen todennäköisyyskuvaajalla. Graafinäkymä piirtää kuvaajaa valitusta arvosta ajan suhteen. Näkymä on perinteinen kuvaaja, jota voidaan muokata funktiolla. Kaikki näkymät ovat ajan suhteen esitettyjä.

### 4.3.2 Arvot

**MAC siirtonopeus.** Mittauksissa käytettiin verkon siirtokykyä sen suorituskyvyn päämittarina. Tarkemmin seurattiin MAC-hs ja MAC-e entiteettien siirtokykyä. Näillä NodeB:llä sijaitsevilla Medium Access Control (MAC) alitasoilla hallinnoidaan aikaisemmin RNC:llä käsiteltyjä toimenpiteitä, kuten virheellisten pakettien uudelleenlähetystä ja lähetyksen hallintaa. Siirtämällä toiminnallisuutta NodeB:lle saatiin parannuksia liikenteen käsittelynopeuteen. MAC-hs otettiin käyttöön 3GPP:n release 5:ssa ja MAC-e release 6:ssa. MAC-hs ja MAC-e toimivat lähellä fyysistä kerrosta, niiden siirtokykyä seuraamalla saadaan todenmukaisin kuva verkon läpi kulkevasta liikenteestä silloinkin, kun paketteja joudutaan uudelleenlähettämään. (Toskala & Holma 2010).

**RSCP:n paras arvo.** Active set on kokoelma niitä tukiasemia tai NodeB:itä, joihin mobiililaite on sillä hetkellä yhteydessä. Jotta tukiasema voidaan lisätä active settiin, on sen signaalitien täytettävä määritellyt minimiarvot. Jotta ei tehtäisi hätäisiä päätöksiä handoverien kanssa, käytössä on hystereesi, eli tukiasemaehdokkaan on täytettävä kriteerit säädetyn ajankohdan ajan, ennen kuin päätös sen lisäämisestä active settiin tehdään RNC:llä ja komento lähetään UE:lle. Tämä mittausero käsittää siis vain active settiin

kuuluvien tukiasemien mitatun RSCP:n. Received Signal Code Power (RSCP) kuvaa CPICH-kanavasta mitattua tehoa. Common pilot channel (CPICH) lähettää jatkuvasti esimääriteltyä bittijonoa. Koska RSCP pohjautuu common pilot channelista mitattuihin arvoihin, on sen laadulla merkitystä soft handoverissa. RSCP arvona kuvataan dBm:nä ja on etumerkiltään negatiivinen. Mitä lähempänä ollaan arvoa 0 dBm, sen parempi on linkin laatu. (Toskala & Holma 2010).

**TX power.** Mitattu lähetystehon taso (dBm). Koska lähetystehon lisääminen tarkoittaa käänteisesti signaalitien heikentymistä, ovat mittauksen aikana esiinnousseet mahdolliset piikit lähetystehossa niitä mielenkiintoisimpia tapauksia. Tyypillisesti näin käy kun UE ajautuu kantoalueen reunoille ja yli, menettää yhteyden tukiasemaan ja pyrkii täydellä teholla vielä hakemaan yhteyttä, ennen kuin se luovuttaa ja yhteys katkaistaan. Muita syitä lähetystehon nousuun on häiriöiden lisääntyminen ja tästä johtuva SNR:n lasku ja sitä seuraava lähetystehon kompensoiva nosto. (Toskala & Holma 2010).

**Ec/N0:n paras arvo.** Ec/No, eli suhde palvelevan solun CPICH-kanavan ja yhteenlasketun vastaanotetun energian välillä. Sillä voidaan esittää yhdellä arvolla sekä verkon kuuluvuutta että häiriöiden määrää. Ec/No:a voidaan käyttää kuvaamaan signaalin laatua. Ec/No saadaan jakamalla RSCP RSSI:n arvolla, jossa Received Signal Strength Indicator (RSSI) kuvaa vastaanotettua kokonaistehoa, ei pelkästään hyötysignaalin tehoa. Ec/No muuttuu solun kuormituksen myötä, koska lisääntynyt radioliikenne näyttäytyy UE:lle häiriöinä nostaten RSSI:n arvoa ja täten Ec/No laskee. Tämän pitäisi olla nähtävissä verrattaessa mittauksia, joissa muutettiin käytössä olevien kuormittavien laitteiden määrää, joiden tarkoituksena oli luoda liikennettä solun sisälle. Ec/No:n käyttämisestä mittauksissa esitetään, että solussa ei sen mittauksen aikana olisi liikennettä ja että jo pelkkä mittaus ilman liikennettä olisi riittävä mittaus kuvaamaan solun laatua (Niemi, Borkowski & Lempiäinen 2005).

**RSCP vs Ec/N0.** Graafissa kuvataan Ec/No:n arvoja mitatun RSCP:n funktiona. Mittauksissa käytetty esitystyyli kuvaa koko verkossa vallitsevaa tilaa. Kuvaajasta voidaan

arvioida otosten määrää käyttämällä koko solun toimintakykyä. Ideaalisessa verkossa Ec/No ja RSCP arvot ovat mahdollisimman lähellä nollaa. Kuvion tarkoituksena on esittää verkon signaalin kuuluvuus ja laatu yhdessä kuvaajassa.

**SIR.** WCDMA:ssa tämä suhde lasketaan tukiasemalla käyttäen DPCCH-kanavaa määräävänä tekijänä, jota verrataan häiriöihin. Tämä on osa nopeaa suljetun silmukan tehonsäätöä, jolla säädetään UE:n lähetystehoa. Tarkoituksena on käyttää viestintään alhaisinta mahdollista lähetystehoa. Tukiasema tarkkailee SIR:in arvoa ja vertailee sitä tavoitearvoon, eli mahdollisimman alhaiseen tehoon, jolla modulointi on vielä mahdollista saada toimimaan häiriöttä. Jos mitattu SIR on korkeampi kuin tavoitearvo, eli lähetystehoa on liikaa, käskee RNC tai Node B tiputtamaan tehoa. Vastaavasti jos mitattu arvo jää alle kohdearvon, UE nostaa lähetykseen käytettävää tehoa. Node B:n suorittamaa arvojen vertailua tehdään 1500 kertaa sekunnissa, jolla pyritään vastaamaan nopeisiin signaalitien muutoksiin kuten häipymiseen. Lähetystehon säätämisen tarkoituksena on pitää jokaisen UE:n SIR hyväksyttävänä. (Dalhman, Parkvall. & Skold. 2007).

**CQI.** UE raportoi NodeB:lle Channel Quality Indicatorin (CQI). CQI on lukuarvo, jonka suuruus kuvastaa siirtotien laatua. CQI on käytössä linkin muutoksien hallinnassa sekä joissain pakettien jaksotusalgoritmeissa. CQI lasketaan käyttämällä pohjana mitattua signaalin suhdetta häiriöihin ja kohinaan (SINR):ä. Arvoa voidaan käyttää verkon arvioinnissa, mutta se on määritelty standardeissa heikosti. Näin ollen sitä ei suositella käytettäväksi yksinään, vaan yhdessä Ec/No mittauksien kanssa. (Tapia, Liu & Feuerstein. 2009).

**Modulaatio.** Tämä mittauksen osio koostui karttapohjalla esitettävästä käytetyn modulaation ja paikkatiedon yhdistämisestä. Värien avulla havainnollistettiin käytetty modulaatio alueittain. Tätä voitaisiin verrata suoraan CQI-karttaan, jolloin voidaan paikallistaa ne alueet, jossa siirtonopeutta on jouduttu tiputtamaan, koska korkeamman tason modulaatio ei toimi virheettää. Mitattava testiverkko tukee korkeintaan 64-QAM downlink-suuntaan ja 16-QAM uplink-suuntaan. Downlink tarkoittaa verkosta

päätelaitteelle päin siirtyvää liikennettä ja uplink päätelaitteelta verkkoon päin siirtyvää liikennettä. Sillä korkeampaa (higher-order-modulation) modulaatiota käytettäessä vaaditaan parempaa yhteyttä, joka rajoittaa 64-QAM:n käytön lähelle palvelevaa solua. Tämä on nähtävissä mittaustuloksista modulaatiota kuvaavilla sivuilla. (Toskala, Holma 2010).

**Yhteydessä olevien solujen määrä.** Tämä osio esittää graafisesti kuinka moneen soluun UE oli yhteydessä ajoreitin aikana. Sen funktio on selvittää millä alueilla UE on ollut yhteydessä useampaan soluun. Tästä voidaan saada osviittaa mahdollisiin solujen päällekkäisyyksiin.

**Handover.** Kartta-näkymässä näytetään ajomittauksen aikana tapahtuneet handover-tapahtumat, käyttämällä myös tallennettuja GPS-koordinaatteja. Handover-tapahtumia kuvaavaa karttaa tehostetaan numeerisella statistiikalla, sillä varsinaisesta karttanäkymästä on vaikea laskea niiden tiheyttä. Onnistunut soft tai softer handover-tapahtuma ei tarkoita palvelevan solun vaihtoa, vaan UE on kahden solun kuuluvuusalueella. UE keskustelee molempien solujen kanssa ja vaihtaa tarvittaessa palvelevaa solua. (Toskala & Holma 2010).

#### 4.4 Mittauksissa käytettävät välineet

Mittauksissa käytettiin sovittua, vaatimusmäärittelyyn kirjattua laitteistoa sekä ohjelmistoa. Laitteet ja ohjelmistot, kuin myös ajoneuvo niiltä kohdin, kuin sitä tarvitaan, pysyvät mittauksen välillä samoina tulosten pitämiseksi vertailukelpoisina. Ajomittauksessa käytetään liikkuvaa ajoneuvoa, vaikka eräs tapa urbaanissa ympäristössä on tehdä mittaus kävellen kantaen laitteita reussa. Ajoneuvon reitti ja nopeus ovat yleensä määritelty valmiiksi vaatimusmäärittelyyn, pysähtymistä pyrittiin välttämään tilanteen sallimien rajojen sisällä. Antennien sijoituksessa ajoneuvon katolle annetaan suositukset Antennien toimittamassa ohjekirjassa. Antennit sijoitetaan vähintään yhden aallonpituuden päähän

katon reunasta ja mahdollisesta kattoikkunasta. Jos mittauksissa käytetään kahta antennia, niin niiden väliin olisi jätettävä aallonpituus kerrottuna kahdella. Aallonpituus riippuu mitattavasta verkosta ja siinä käytettävästä taajuudesta. (Nemo Outdoor-ohjelman käyttöohjeet).

Ajomittauksen perimmäisenä tarkoituksena on kartoittaa laajalta alueelta verkon toimintaa. Telecomhallin sivuilla esitetty laitteisto ajomittauksen suorittamiseen on hyvin pitkälle samantyyppinen kuin se, millä mittaus suoritettiin (Telecomhall 2011a). Ajomittauksessa käytettiin aikaisemmin vaatimusmäärittelyssä kuvattua kannettavaa tietokonetta, sen lataamiseen auton akusta mahdollistavaa invertteriä, GPS-antennia, WCDMA-antennia, USB-modeemia ja mittausohjelmistona käytetyn Nemo Outdoorin toimivuuden kannalta välttämätöntä USB-lisenssiavainta. GPS- ja WCDMA-antenni sekä Nemo Outdoorin USB-lisenssiavain liitettiin USB-portteihin. Laitteet on kiinnitetty omiin portteihinsa, eikä niiden paikkaa vaihdettu mittauksien aikana muuttujien minimoimiseksi. Mittauksien aikana käytettiin yhteensä kolmea kannettavaa tietokonetta. Käytetty WCDMA-antenni, USB-modeemi ja siihen liittyvä SIM-kortti olivat tarkoitettuja käytettäväksi testiverkossa.

#### **4.4.1 Mittausohjelmisto**

Nemo Outdoor on Anite Finland Ltd:n kehittämä sovellus ajomittauksen suorittamiseen. Lähtökohtaisesti se on kannettavalle laitteelle asennettava tarkkailu- ja mittausohjelmisto langattomille digitaaliverkoille. Laitteeseen liitettyjä apulaitteita ohjataan Outdoorista käsin, eikä esimerkiksi datayhteyden muodostamiseen tarvitse käyttää ulkopuolista ohjelmistoa, vaan kaikki tehdään Outdoorista käsin. Ajomittauksissa on käytetty datayhteyttä ja FTP-tiedostonsiirtoa, mutta ohjelmisto tukee myös perinteistä puhelua sekä muita tapoja. Mittauksissa käytettiin komentosarjaa, jonka tehtävänä on muodostaa yhteys tukiasemaan, kytkeä datayhteys päälle, aloittaa GPS-koordinaattien seuranta sekä FTP-tiedoston siirto. Mittauksissa käytettiin verkon epäsymmetrisistä siirtonopeuksista johtuen verkosta kannettavalle tietokoneelle siirrettäessä kahta kahden gigatavun kokoista



tekstiedostoa sekä ylöspäin siirtävään linkkiin yhtä kahden gigatavun tekstiedostoa. Outdoor voi tarvittaessa aloittaa tiedoston siirron uudestaan, jos yhteys katkeaa tai tiedoston siirto päättyi ennen mittauksen loppua.

Komentosarjan suorittamisen aloittaminen ja lopettaminen merkkavat mittauksen alkua ja loppua. Outdoor tukee aluekartan käyttöä ja osaa näyttää liikkeessä olevan mittaajan sijainnin GPS-koordinaateista. Koordinaatit tallentuvat myös jokaisen tallennetun näytteen yhteyteen. Vaikka tulosten tulkinta onkin helpompi tehdä monipuolisemmalla Nemo analyzerillä, voidaan Outdoorilla luoda päänäkymän välilehtiin mittauksen kulkua kuvaavia graafeja tai näyttää muuta ajankohtaista tietoa. Esimerksi yhteyden yllättävä katoaminen voidaan todeta siirtonopeuden romahtamisesta, kohonneesta lähetystehosta sekä odotusajan jälkeen ohjelmisto voi ilmoittaa äänimerkillä tapahtumasta. Nämä jää luonnollisesti ylös mittauksesta tallennettavaan tietokantaan. Nemo Outdoorin käyttäminen vaatii USB-porttiin liitettävän lisensointi-avaimen. (Nemo Outdoor-ohjelman käyttöohjeet).

Nemo Analyze tavallaan vie Outdoorin toiminnallisuutta eteenpäin tulosten käsittelyn saralla. Outdoorin paikalliselle kiintolevyille tallentamansa tulokset kopioidaan ulkoisen kiintolevyn kautta Analyzerillä varusteltuun työasemaan. Analyzellä suoritetaan mittauksien käsittely ja yhteenveto. Käytännössä tämä tarkoittaa mittauksen tuloksien tarkastelua ajan funktiona. Analyze tukee laajasti käytettyjä verkkostandardeja ja teknologioita. Mittaustulokset sijaitsevat paikallisessa tietokannassa ja niiden esittämiseen voidaan käyttää useita graafityylejä, lähtien viivagraafista ja päättyen muokattaviin graafeihin. Kuvaajia voidaan myös muokata erilaisilla funktioilla. Funktiolla voidaan esimerkiksi selkeyttää kuvaajan muotoa laskemalla siitä keskiarvoa, jos nopea häipyminen on liian nopeasti vaihtelevaa ja tekee muuten kuvaajasta vaikeasti luettavan. Tämä tekee ohjelmistosta joustavan ja esitettyjen tulosten ulkonäköön voi vaikuttaa monella tapaa. Outdoorin tapaan myös Analyze on riippuvainen sen USB-lisenssiavaimesta. (Nemo Analyze-ohjelman käyttöohjeet).

Mittaustuloksien käsittely tapahtuu Analyzessä kolmessa eri tasoisessa tilassa, tiloja ovat työkirja, sivut, datanäkymät. Työkirja on hierarkiassa korkeimpana ja se muodostuu sivuista ja sivuilla sijaitsevista datanäkymistä. Sivuilla olevia datanäkymiä voidaan lisätä tai poistaa tarpeen mukaan. Sivuilla voidaan lisätä työkirjassa olevien tuloksien määrää, sillä ne toimivat työkirjan sisäisinä välilehtinä. Datanäkymät mahdollistavat mittaustuloksien näyttämisen graafisesti ja ne sijoitetaan sivujen sisälle. Datanäkymässä voidaan näyttää mittaustuloksia mm. graafina, taulukkona ja karttanäkymänä. Graafi voi olla vaikkapa kuvaaja tai ruudukkoon pohjautuva esitystapa. Parametrit tarkoittavat tarkemmin tässä sitä, mitä tallennettua tuloksen osaa tarkastellaan. Graafiin voidaan siis valita vaikkapa signaalin taso, jolloin graafi esittää vain signaalin tasoa ajan funktiona. Yhdessä datanäkymässä voidaan kerroksien avulla näyttää useilta mittauksilta saatuja tietoja käyttäen samaa datanäkymää. Datanäkymät ovat synkronisoidut keskenään ajan suhteen. (Nemo Analyze-ohjelman käyttöohjeet).

Mittauksissa, joissa paikallaan olevia, verkkoa kuormittavia laitteita on useampia, käytetään MCG-ohjelmistolla varustettuja kannettavia Outdoorin rinnalla. Tarkoitus on kuitenkin sama, eli verkkoa kuormitetaan lataamalla dataa FTP-protokollan kautta. Riippuu mittauksista, käytetäänkö MCG:llä vai Nemo Outdoor:lla varustettua kannettavaa. Työn aikana tehdyissä mittauksissa käytettiin suurimmaksi osaksi Outdoor:lla varustettuja laitteita.

#### **4.4.2 Tukiasema / antennit**

Tukiasemissa käytettiin antennia, jonka solujen kallistuskulmia voitiin hallita amplitudi- ja vaihesäätöjen avulla. Kallistuskulmaa säädettiin toimistosta käsin, tukiaseman ohjaukselle varatulta kannettavalta tietokoneelta. Antenneissa voidaan käyttää kahdenlaista tapaa säätää kallistuskulmia, mekaanista ja elektronista. Mekaanisessa kallistuksessa, antennin kulmaa muutetaan kallistamalla sitä fyysisesti, joko moottoreilla tai asennusvaiheessa asentamalla antenni tiettyyn kulmaan antennimastossa. Elektroninen kallistuskulman säätö

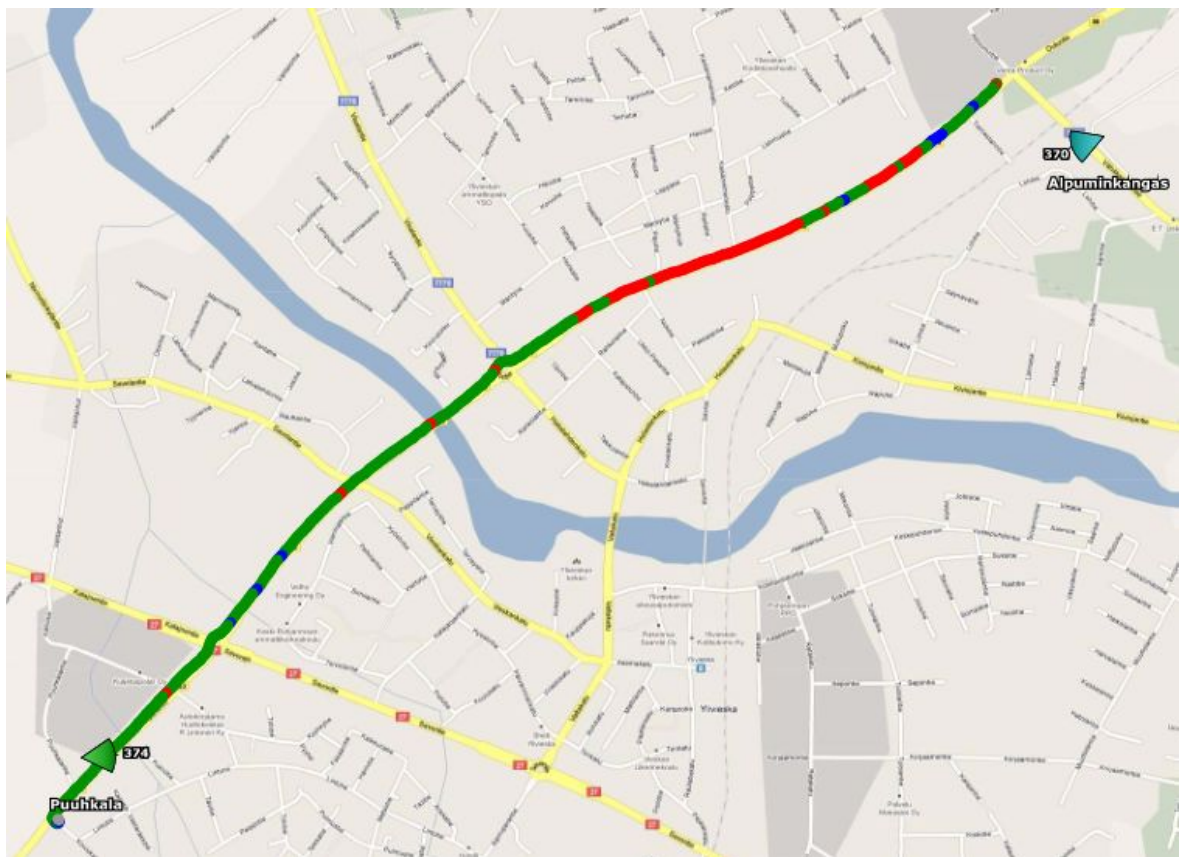
ei tee muutoksia antennin fyysiseen kulmaan, vaan siinä muutetaan antennien elementtikohtaista vaiheen säätöä, jolla saadaan kallistusta vastaava ilmiö aikaan.

Antennin kallistuskulman muutos kääntää sen kolmiulotteista säteilykuviota, jolla tarkoitetaan kolmiulotteista kaaviota antennin säteilyominaisuuksista eri suuntiin. Tyypillisesti antennin säteilykuvio ei ole täydellinen ympyrä tai puolipallo, vaan se koostuu pääkeilasta ja sivukeiloista. Antennien kallistuskulmien muutoksella voidaan pääkeilaa suunnata alueelle, jossa verkkoa on tarkoitus käyttää. Liian pitkälle kuuluvaa lähetystä voidaan rajoittaa häiritsemästä naapurisolua kallistuksen avulla. Käyttämällä riittäviä kallistuskulmia voidaan rajoittaa kahden solun välistä häiriötä, jos solujen alueet menevät päällekkäin. Kallistamalla antennia alaspäin, eli kasvattamalla kallistuskulmaa, keskitetään sen pääkeila pienemmälle alueelle. Mekaanisen ja elektronisen kallistuksen vaikutukset antennin kuuluvuuteen eroavat hiukan toisistaan, mutta niitä alaspäin kallistamalla peittoalueen enimmäiskantama lyhenee. Kallistaminen voidaan myös tehdä ylöspäin. Elektronista kallistusta käyttämällä säteilykeilat säilyttävät muotonsa. Pelkästään mekaanista kallistusta käyttämällä säteilykeilojen muotoon ei voida vaikuttaa ja ne leviävät sivuille. (Telecomhall 2011b). Mittauksissa käytettiin antennia, joka oli asennettuna kiinteästi mastoon käyttäen viiden asteen mekaanista kallistuskulmaa ja mittauksissa hyödynnettiin sen elektronisen kulman säätöominaisuuksia.

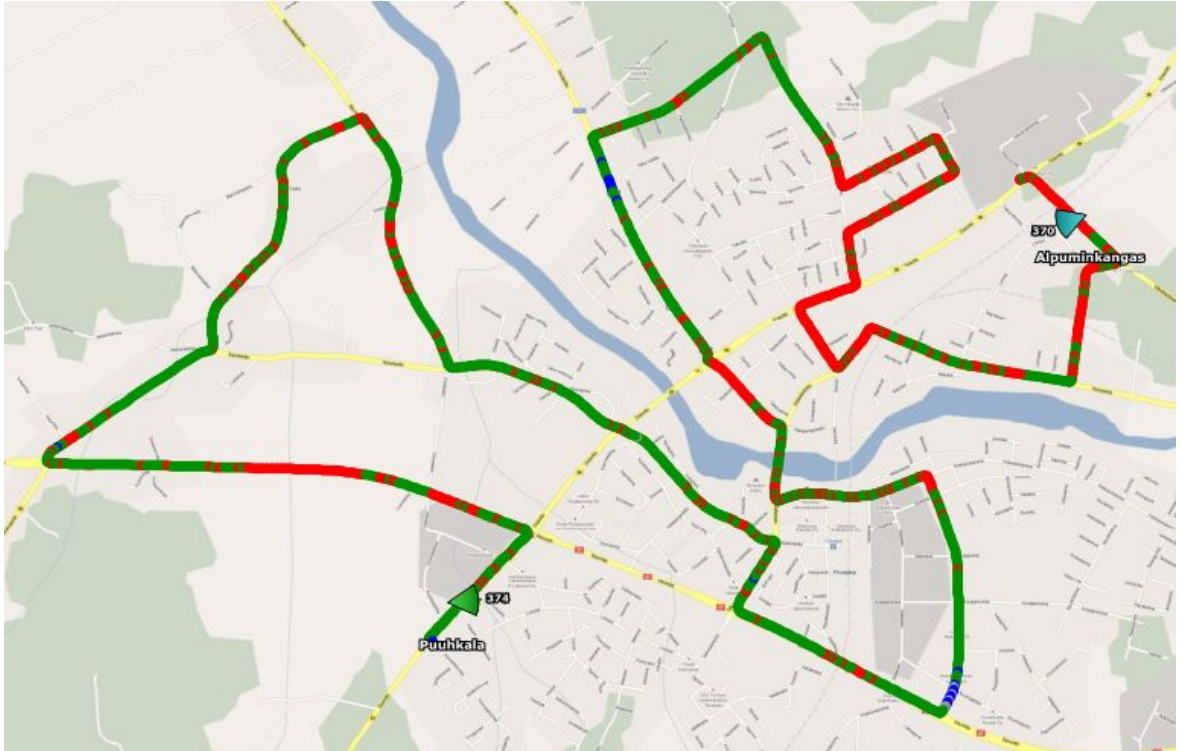
Tukiaseman tai NodeB:n lisäksi järjestelmään kuuluu radioverkko-ohjain (RNC), jolle lankeaa vastuu ohjata siihen liitettyjä tukiasemia. RNC on päättävä elin solusta toiseen siirtymiselle, sillä se hallinnoi handover-päätöksiä. RNC myös säätelee lähetykseen käytettävää tehoa. RNC tekee päätöksen UE:n puolesta, mitkä solut liitetään osaksi kunkin laitteen aktiivista settiä. Jos siirtyminen pääasiallisen solun alueelta toiselle tapahtuu kahden eri RNC:den hallinnoitavien tukiasemien välillä, keskustelevat ne keskenään käyttämällä Iub/Iur-yhdyskäytävää. (Toskala & Holma 2010). Suoritetuissa mittauksessa sekä Alpuminkankaan että Puuhkalan tukiasemat kuuluivat saman RNC:n kontrolloimalle alueelle.

## 5 SUORITETUT MITTAUKSET

Mittaussarja kuuluu laajempaan testikokonaisuuteen, joka kattaa useita skenaarioita ja asetuksia. Tehdyt mittaukset olivat niin sanotusti huonompia tapauksia, joissa tarkasteltiin verkon käyttäytymistä, jos UE:t sijoittuvat epäsuotuisiin paikkoihin. Epäsuotuisia paikkoja ovat tyypillisesti handover-alueet, joissa UE on yhteydessä kahteen tai useampaan soluun. Verkon käyttäytymisen vaikutusta handover-tapahtumien tiheyteen ja vastaavasti siirtonopeuksiin mitattiin vaihtelemalla UE:den paikkaa ja määrää. Ajoreitti pysyi samana läpi mittaussarjan (KUVIO 6; 7. Radiaali- ja sektori-reitit kartalla).



KUVIO 6. Mittauksissa käytetty radiaalireitti kartalla



KUVIO 7. Mittauksissa käytety sektorireitti kartalla

### 5.1 Mittauksien kuvaus

Suoritettujen mittauksien suurimpana muuttujana toimi Alpuminkankaan tukiaseman sisäsolun asetukset. Sisäsolun kallistuskulmaa muutettiin kymmenestä asteesta kahdeksaan asteeseen ja lopuksi se käännettiin pois päältä. Ulkosolun kallistuskulma pidettiin koko mittauksen ajan kahdessa asteessa. Sisäsolun muutoksien vaikutukset mitattiin radiaali- ja sektorireitiltä, downlink- ja uplink-suuntaan. Mittauksen tuloksien analysoinnissa kiinnitetään huomiota muutoksien vaikutuksiin liikkuvan UE:n ja paikallaan pysyvien kuorma UE:iden siirtonopeuksiin. Tuloksista olisi nähtävillä miten verkon sisäsoluksi ja ulkosoluksi jakaminen vaikuttaa niiden leikkausalueilla sijaitseviin UE:ihin. Näissä mittauksissa vain Alpuminkankaan tukiaseman solut olivat toiminnassa.

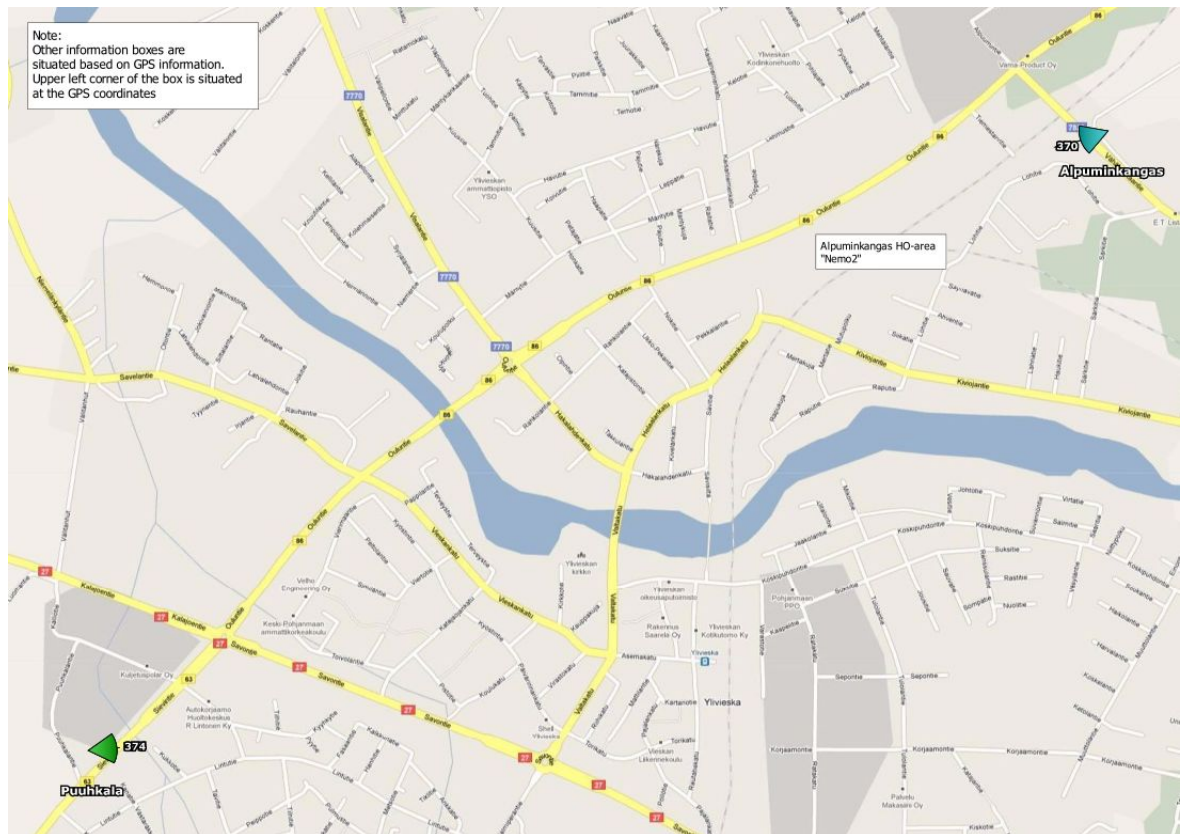
## 5.2 Vaatimusmäärittelyt

Vaatimusmäärittelyssä linjattiin mittausten kulku. Se toimi mittausohjeena ja seuraamalla vaiheita voidaan mittaus toistaa. Raportissa on dokumentoitu mittaukseen osallistuneiden UE:iden sijainti ja mitä valitulta sijainnilta odotetaan.

### 5.2.1 Testitapaus 1

Mittaus suoritettiin kahdella kannettavalla tietokoneella, joihin on liitetty Huaweiin USB-modeemi, erillinen antenni, GPS-antenni, Nemo Outdoor. Tietokone sai virtaa auton 12V:n liittimestä invertterin avulla. Näin pyrittiin estämään käyttöjärjestelmän virranhallintaa vaikuttamasta mittauksiin ja varmistamaan koneen virransaanti pitkien mittauksien ajan. Mittauksessa ajoreittiä pitkin liikkuvan UE:n lisäksi sijoitettiin toinen verkkoa kuormittava UE (Nemo2) sisäsolun ja ulkosolun väliselle kanavanvaihtoalueelle. Ennen mittauksen aloitusta asetettiin Alpuminkankaan sisäsolu kymmenen asteen kallistuskulmaan ja ulkosolun kallistuskulma kahteen asteeseen. Ennen mittauksen aloitusta etsitään kuormittavalle UE:lle (Nemo2) mittauspaikka A. Mittauspaikka A:lla on seuraavat ominaisuudet:

- Mittauspaikka sijoittuu antennin pääsäteilykeilan alueelle
- Mittauspaikalta on suoran näköyhteys, Line of Sight (LOS) tukiasemaan
- Mittauspaikka sijoittautuu sisä- ja ulkosolun väliselle kanavanvaihtoalueelle. (KUVIO 8).



KUVIO 8. Nemo2 mittauspaikka

Kun kuormittavalle UE:lle on löydetty mittauspaikka A, liikkuva UE ja kuormittaja UE käynnistävät komentosarjan, joka aloittaa FTP-siirron. Suoritettava komentosarja voi olla downlink- tai uplink-suuntainen. FTP-siirron alkaessa aloitetaan myös ajomittaus. Komentosarjan suoritus keskeytetään, kun liikkuva UE saapuu ajoreitin päätepisteeseen. Mittauksessa kerätty data tallennetaan kuvaavalla nimellä omaksi tiedostokseen. Suoritetaan mittaukset downlink- ja uplink-suuntaan ajamalla radiaali- ja sektorireitit. Sen jälkeen muutetaan sisäsolun kallistuskulmaa kahdeksaan asteeseen ja suoritetaan samalla kaavalla mittaukset radiaali- ja sektorireiteillä. Lopuksi kytketään sisäsolu pois käytöstä ja toistetaan mittaukset (KUVIO 9.).

### 3.13.Case 13

Test case 13.001 - One load UE at hand-over area

Measurement procedure for Alpuminkangas:

1. Antenna height: 30 m
2. Inner and outer cell on
  - inner tilt 10 deg, outer tilt 2 deg
  - Tx and Rx tilt same for both cells
3. One load UE:
  - first find a correct static point A for load UE1 (Nemo) at point where it will be
    - i. on main radiation direction of antenna with
    - ii. LOS connection and
    - iii. on hand-over area of inner and outer cell (preferably connected with outer cell when no other traffic on BTS)
4. One measuring UE with fast data connection
  - FTP over TCP/IP
5. Measure radial and sector routes to define DL and UL cell capacity and coverage area
6. Change inner tilt 8 deg, outer tilt still 2 deg.
7. Measure radial and sector routes to define DL and UL cell capacity and coverage area
8. Turn inner cell off, outer cell tilt still 2 deg.
9. Measure radial and sector routes to define DL and UL cell capacity and coverage area

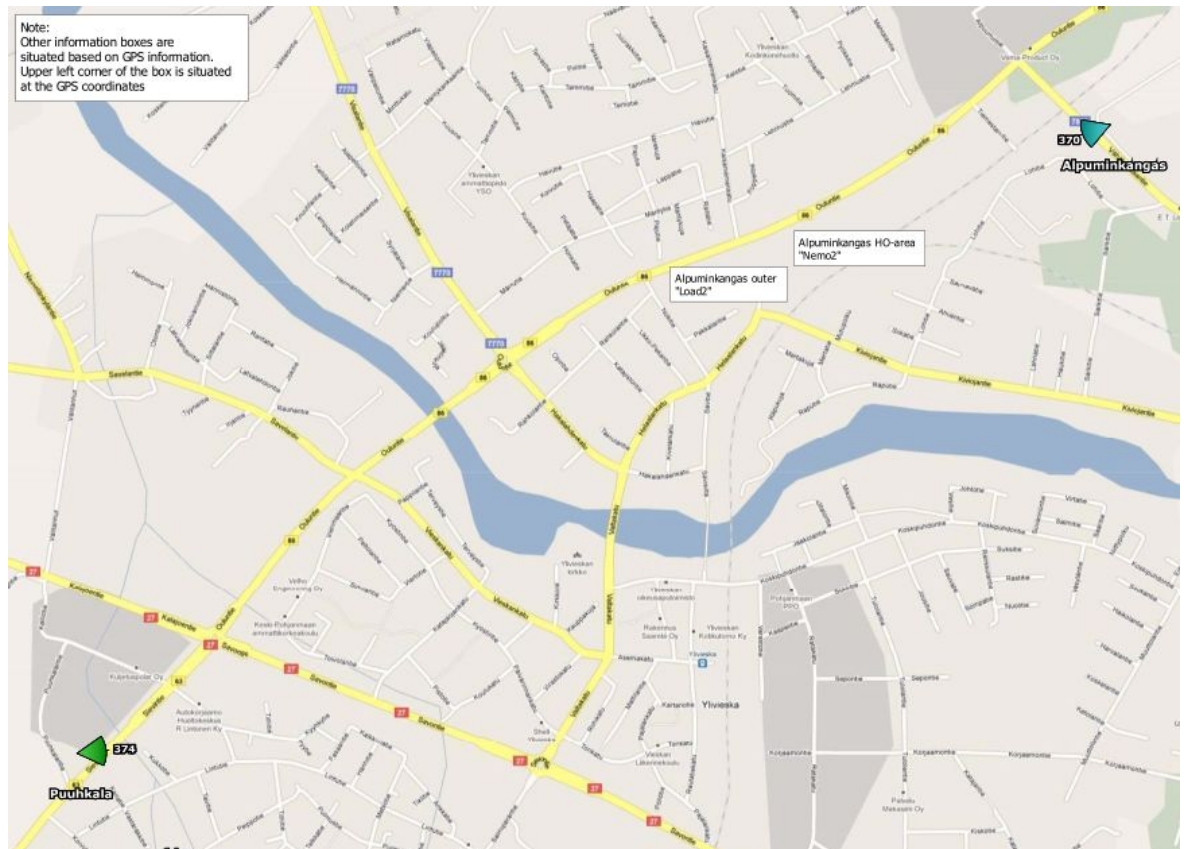
KUVIO 9. Testitapaus 1 mittauksen kulku

## 5.2.2 Testitapaus 2

Mittaus suoritettiin kolmella kannettavalla tietokoneella, joihin on liitetty Huaweiin USB-modeemi, erillinen antenni ja GPS-antenni oli käytössä kahdessa koneessa (Nemo1 ja Nemo2). Toiseen koneeseen on asennettu Nemo Outdoor ja kolmanteen koneeseen MCG 2<sup>nd</sup> Edition. Tietokone sai virtaa auton tupakansytyttimeen invertterin avulla. Mittauksessa ajoreittiä pitkin liikkuvan UE:n lisäksi sijoitettiin toinen verkkoa kuormittava UE sisä- ja ulkosolun väliselle kanavanvaihtoalueelle. MCG 2<sup>nd</sup> Editionilla varustetulle UE:lle (Load2) etsitään mittauspaikka B. Ennen mittauksen aloitusta palautettiin Alpuminkankaan sisäsolu kymmenen asteen kallistuskulmaan ja kytkettiin sisäsolu takaisin päälle. Nemo2 sijaitsee aikaisemmin määritetyllä mittauspaikalla A. Mittauspaikka B:lla on seuraavat ominaisuudet:

- Mittauspaikka sijoittuu antennin pääsäteilykeilan alueelle
- Mittauspaikalta on suora näköyhteys tukiasemaan
- Mittauspaikalta on hyvä yhteys ulkosoluun. (KUVIO 10).





KUVIO 10. Nemo2 ja Load2 mittauspaikat

Kun kuormittavalle UE:lle (Load2) on löydetty mittauspaikka B, liikkuva UE ja kuormittavat UE:t käynnistävät komentosarjan, joka aloittaa FTP-siirron. Suoritettava komentosarja voi olla downlink- tai uplink-suuntainen. FTP-siirron alkaessa aloitetaan myös ajomittaus. Komentosarjan suoritus keskeytetään, kun liikkuva UE saapuu ajoreitin päätepisteeseen. Mittauksessa kerätty data tallennetaan kuvaavalla nimellä omaksi tiedostokseen. Suoritetaan samat mittauksen vaiheet, kuin aikaisemmassa testitapauksessa (KUVIO 11.).

### 3.13.Case 13

Test case 13.002 - Outer cell loaded when another load UE at hand-over area

Measurement procedure for Alpuminkangas:

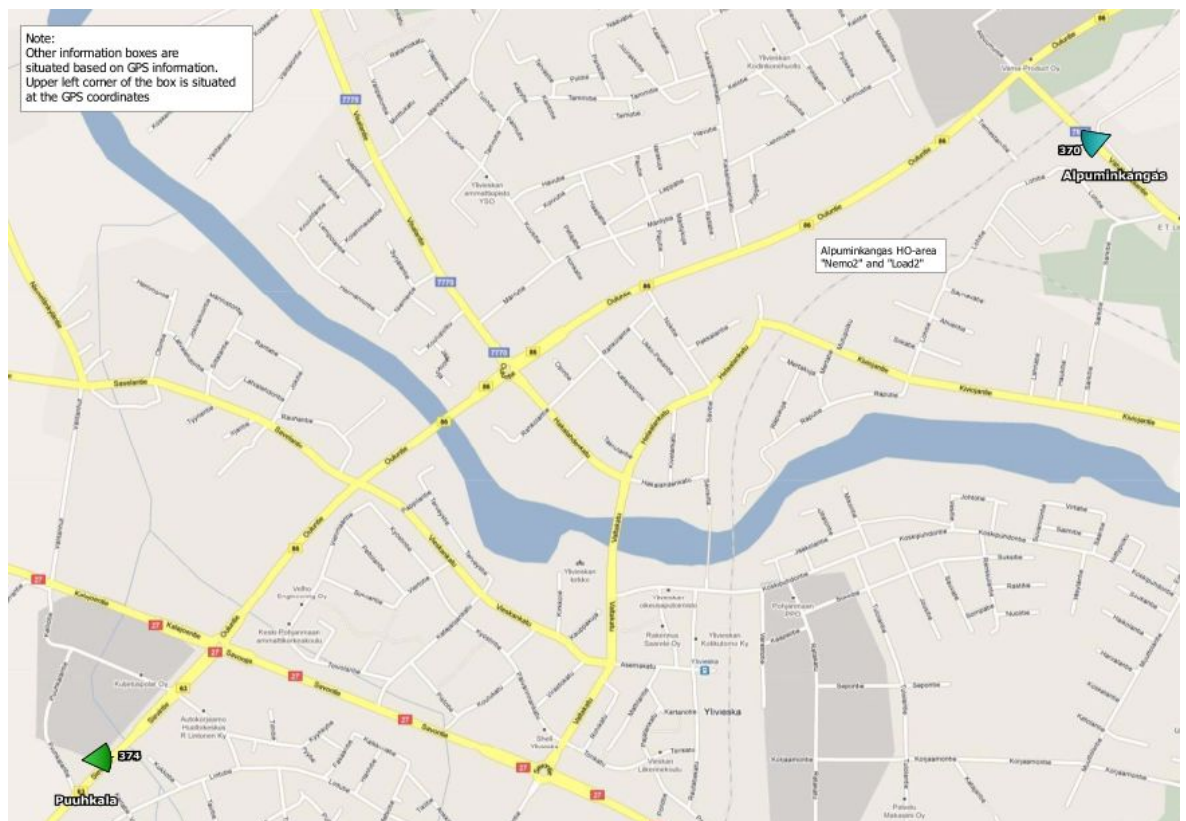
1. Antenna height: 30 m
2. Inner and outer cell on
  - inner tilt 10 deg, outer tilt 2 deg
  - Tx and Rx tilt same for both cells
3. Two load UEs:
  - use same static point A for load UE1 (Nemo) as previously
  - locate another load UE2 (laptop without Nemo) to point B where it will have a clear and good (LOS) outer cell connection
4. One measuring UE with fast data connection
  - FTP over TCP/IP
5. Measure radial and sector routes to define DL and UL cell capacity and coverage area
6. Change inner tilt 8 deg, outer tilt still 2 deg.
7. Measure radial and sector routes to define DL and UL cell capacity and coverage area
8. Turn inner cell off, outer cell tilt still 2 deg.
9. Measure radial and sector routes to define DL and UL cell capacity and coverage area

KUVIO 11. Testitapaus 2 mittauksen kulku

### 5.2.3 Testitapaus 3

Mittaus suoritettiin kolmella kannettavalla tietokoneella, joihin on liitetty Huaweiin USB-modeemi, erillinen antenni ja GPS-antenni oli käytössä kahdessa koneessa (Nemo1 ja Nemo2). Toiseen koneeseen on asennettu Nemo Outdoor ja kolmanteen koneeseen MCG 2nd Edition. Tietokone sai virtaa auton 12V:n liittimestä invertterin avulla. Näin pyrittiin estämään käyttöjärjestelmän virranhallintaa vaikuttamasta mittauksiin ja varmistamaan koneen virransaanti pitkien mittauksien ajan. Mittauksessa ajoreittiä pitkin liikkuvan UE:n lisäksi sijoitettiin toinen verkkoa kuormittava UE (Load2) sisä- ja ulkosolun väliselle kanavanvaihtoalueelle. MCG 2nd Editionilla varustetulle UE:lle (Load2) etsitään mittauspaikka D. Mittauspaikka D on samalla solujen välisellä rajalla kuin mittauspaikka C ja sillä on LOS-yhteys tukiasemaan (KUVIO 12). Ennen mittauksen aloitusta palautettiin Alpuminkankaan sisäsolu kymmenen asteen kallistuskulmaan ja kytkettiin sisäsolu takaisin päälle. Mittauspaikka C on käytännössä mittauspaikka A. Mittauspaikoilla C ja D ovat seuraavat ominaisuudet:

- Mittauspaikoilta on suora näköyhteys tukiasemaan
- Mittauspaikat sijoittautuvat sisäsolun ja ulkosolun väliselle kanavanvaihtoalueelle



KUVIO 12. Testitapaus 3 mittauspaikat Nemo2 ja Load2 laitteille

Kun kuormittavalle UE:lle (Load2) on löydetty mittauspaikka D, liikkuva UE ja kuormittavat UE:t käynnistävät komentosarjan, joka aloittaa FTP-siirron. Suoritettava komentosarja voi olla downlink- tai uplink-suuntainen. FTP-siirron alkaessa aloitetaan myös ajomittaus. Komentosarjan suoritus keskeytetään, kun liikkuva UE saapuu ajoreitin päätepisteeseen. Mittauksessa kerätty data tallennetaan kuvaavalla nimellä omaksi tiedostokseen. Suoritetaan samat mittauksen vaiheet, kuin aikaisemmissa testitapauksissa (KUVIO 13.).

### 3.13.Case 13

Test case 13.003 - Two load UEs at hand-over area

Measurement procedure for Alpuminkangas:

1. Antenna height: 30 m
2. Inner and outer cell on
  - inner tilt 10 deg, outer tilt 2 deg
  - Tx and Rx tilt same for both cells
3. Two load UEs:
  - first find a correct static point C for load UE1 (Nemo) at point where it will be
    - i. on horizontal edge of sector with
    - ii. LOS connection (if possible) and
    - iii. on hand-over area of inner and outer cell (preferably connected with outer cell when no other traffic on BTS)
      - for a second load UE2 (without Nemo) find a correct static point D where it will be
        - i. on another horizontal edge of sector than point C
        - ii. LOS connection (if possible) and
        - iii. on hand-over area of inner and outer cell (preferably connected with outer cell when no other traffic on BTS)
4. One measuring UE with fast data connection
  - FTP over TCP/IP
5. Measure radial and sector routes to define DL and UL cell capacity and coverage area
6. Change inner tilt 8 deg, outer tilt still 2 deg.
7. Measure radial and sector routes to define DL and UL cell capacity and coverage area
8. Turn inner cell off, outer cell tilt still 2 deg.
9. Measure radial and sector routes to define DL and UL cell capacity and coverage area

KUVIO 13. Testitapaus 3 mittauksen kulku

## 5.3 Raportti

Mittauksien tulokset nimetään jokaisen ajoreitin päätteeksi. Nimeämisellä pyritään kertomaan mittauksen tarpeelliset tiedot suoraan tiedostonimessä, jotta oikean mittauksen löytää muiden joukosta. Käytetty nimeäminen sisälsi tiedot mittauksen aloitusajankohdasta, mihin testaussarjaan mittaus kuului, millä mittauslaitteella se suoritettiin, mitä ajoreittiä ajettiin, mitattiinko downlink-suuntaa vai uplink-suuntaa, sisäsolun kallistuskulman ja ulkosolun kallistuskulman. Tiedostonimi sai muodon 13Nov07 144159\_13.001\_Nemo\_Radial\_Route\_DL\_Inner\_10\_Outer\_2.1. Pitkä tiedostonimi aiheutti ongelmia raportin teossa. Nemo Analyze lisää tiettyihin näkyymiin myös tiedostonimen. Pitkän tiedostonimen vaatiman tilan takia samalle sivulle sopivien kuvioiden ja kaavioiden määrä on rajallinen, jos halutaan pitää nimi esillä. Ohjelmisto ei tue tiedostonimen jaksottamista kahdelle riville.

Mittauksista koottiin yksittäiset kohdistetut raportit ja yhteenvetoraportit, johon kerättiin mittaussarjan tulokset. Tulokset järjestellään raporttiin vertailun suorittamista varten. Kohdistetut raportit tehdään käyttämällä raporttipohjaa, johon on asetettu valmiiksi kaaviot

ja kuvaajat. Raporttipohjalle viedään haluttut mittaustulokset ja ohjelma poimii esimääriteltymiin kaavioihin arvot. Ohjelma sallii edellä kuvatun mittauksen siirtämisen raporttipohjalle vain yhdellä mittaukselle kerrallaan. Yhteenvetoreportit pitää asetella käsin, koska usean mittauksen tuomista pohjalle ei voida tehdä nykyisellä järjestelmällä automaattisesti.

Vaatusmäärittelyssä linjattiin mittaussarjan lopuksi suoritettava tuloksien analysointi. Analyysissa selvitetään kallistuskulmien muutoksien vaikutukset mittaustaikalla A, C, D olleiden sekä liikkuvan UE:n siirtonopeuteen (KUVIO 14). Vertikaalisektoroinnin vaikutukset ovat nähtävillä kun vertaillaan vertikaalisektorointia käyttäviä mittauksia ja mittauksia, joissa sisäsolu oli kytketty pois päältä. Tuloksia verrataan myös aikaisempiin tuloksiin, joissa kuormittava UE (Load2) ei sijaitisi kahden solun välisellä kanavanvaihtoalueella.

In analysis of results define/examine:

A. behaviour of loads in places A, C and D

- does they change cells they are connected according moving UE place ?
- at which tilt/cell combination they get best throughputs

B. behaviour of moving UE

- which tilt/cell combination gives best throughput
- is coverage map different between cases 13.001 - .003

C. total throughput of AAS site

- does VS bring some gain/loss and to which user/where
- how total throughput compares to previously measured more optimal cases (inner \_outer cell loads with mobile UE)

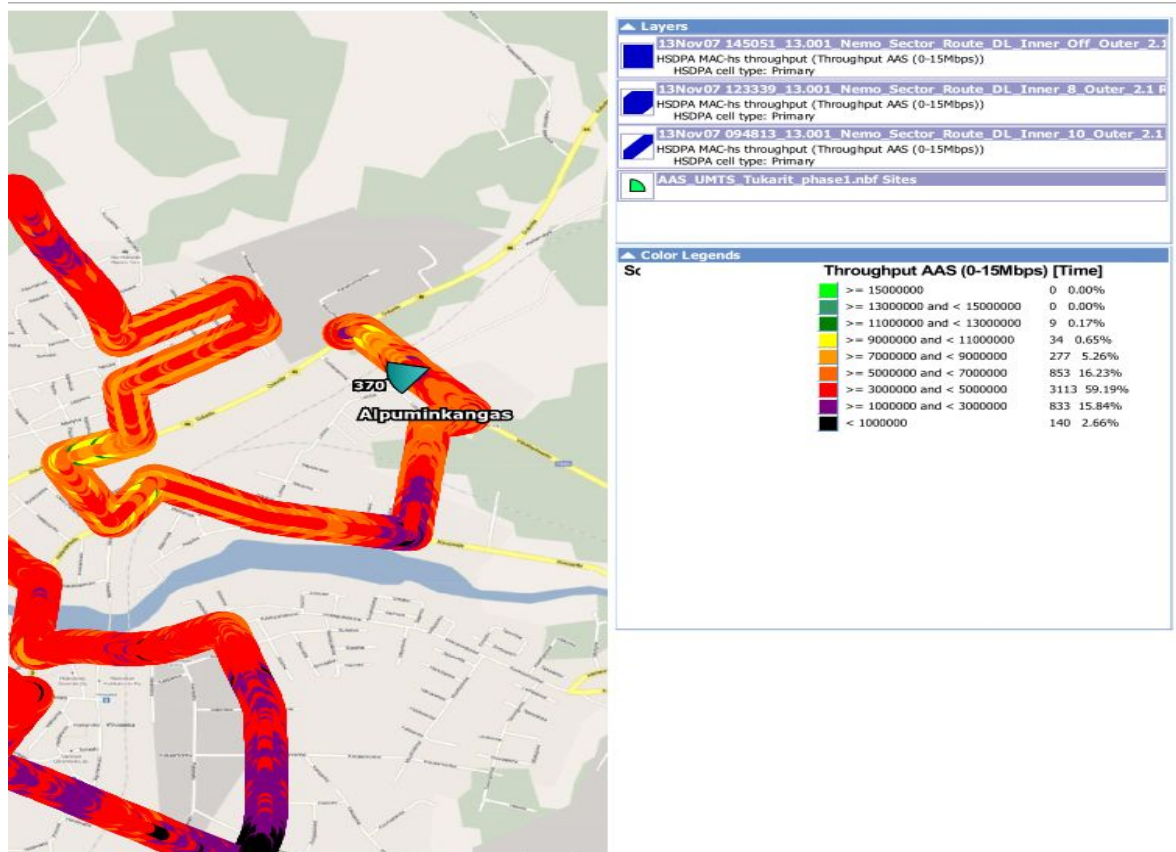
KUVIO 14. Mittauksien jälkeen tehtävä analyysi

#### 5.4 Raportin luettavuuden tarkastelu

Mittauksien välillä raportit vaihtelivat, niin sisällöltään kuin esitystavoiltaan. Sama tieto saatettiin esittää kallistuskulma mittauksien välillä kahdella tavalla tai jotkut kuvaajat olivat tyhjiä. Ajansäästämiseksi käytettiin samaa raporttipohjaa mittaussuuntien välillä. Myös Analyzen toiminta vaikeutti huomattavasti raporttien lukemista. Kun raportti muunnettiin PDF-muotoiseksi dokumentiksi, sen sivuilta saattoi joissain tapauksissa leikkautua alue. Tavallisesti tällä alueella sijaitsevat graafien pysty-akselin arvot, joiden

puuttuessa sitä ei voi tulkita oikein. Nämä pitää tarkistaa erikseen jokaisen raportin luomisen jälkeen. Mielestäni versionhallinnan puuttuminen hankaloittaa raporttien tarkastelua jälkeenpäin.

Aikaisemmin sektorireitiltä saatuja mittauksia ei liitetty osaksi yhteenvetoraporttia sen graafisen esittämisen vaikeuden vuoksi. Kokeilin piirtävän elementin leveyttä ja z-indeksiä hyväksikäyttävää menetelmää, jolla voidaan saada kuvio piirrettyä kartalle ilman, että se leikkaa itseään (KUVIO 15). Menetelmän ongelmaksi muodostuu kuvion tarkoituksen hahmottaminen. Se voidaan ratkaista käyttämällä selitetekstejä. Menetelmä soveltuu paremmin kahden tai useamman reitin vertailuun, mutta se on sekava, jos tarkoitus on tarkistaa mittauksen arvo jossain paikassa. Kuviossa levein viiva kuvaa mittausta, jossa sisäsolu oli pois päältä. Kapein, keskellä oleva viiva kuvaa mittausta jossa sisäsolun kallistuskulma oli asetettuna kymmeneen asteeseen. Näiden väliin jää sisäsolun kahdeksan asteen mittausta kuvaava viiva. Kuvioista on helppo eritellä ne alueet, joissa mittauksen tulokset olivat samaa tasoa tai jos yhden mittauksen tulokset eroavat muista tuloksista.



KUVIO 15. Kahden tai useamman reitin sovittaminen samalla kartalle

## 6 SIMULAATIO

Nokia Solutions and Networks (NSN) antoi tämän työn käyttöön aikaisemmin laadittuja simulaation tuloksia liittyen testiverkkoon ja sen mittauksiin. Käytössä olevat tulokset ovat graafisia ja täten niiden arvioiminen ja vertailu tulee tehdä silmämääräisesti. Simulaatiot perustuvat etenemismalliin nimeltään Enhanced Macrocell. Etenemismallia ei ole erityisesti kohdennettu Ylivieskan maastoon, vaan se on suuntaa-antava käytetyillä oletusarvoilla.

Etenemismallit voidaan jakaa pääperiaatteeltaan kahteen pääryhmään, jotka riippuvat tavasta, jolla etenemismallit ovat kehitetty. Etenemismallit voidaan johtaa aikaisempien mittauksien pohjalta ja tätä tapaa kutsutaan empiiriseksi malliksi. Empiirisille malleille ominaista on niiden yleispätevyys. Ne toimivat hyvin, kun halutaan saada karkea arvio verkon toiminnasta ilman alueen maastoon liittyviä tietoja. Teoriaan pohjautuvat deterministic-mallit käyttävät mallinnukseen alueen maaston tietoja. Näitä tietoja voivat olla maakartat tai skannaukset. Deterministisiä malleja käyttämällä voidaan arvioida myös signaalin siirtokykyä rakennelmien sisällä. Näiden välimuotona on teoriaa ja käytännön mittauksia hyödyntäviä malleja yhdistelemällä saatu semi-deterministinen malli. Kuitenkin yhdistetyssä mallissa käytettävä aluetta kuvaavan mallin resoluutio on heikompi kuin puhtaasti deterministisessä mallissa. Siksi välimuotoa voidaan käyttää antamaan suuntaa urbaanissa ympäristössä ja tarkempaan mallinnukseen voidaan käyttää ray-tracing pohjaista mallia. Malleja on useita, mutta tärkeintä on muistaa mikä malli soveltuu laajaan arviointiin verkon suunnittelun alkuvaiheessa ja millä voidaan optimoida antennien asetuksia tukiasemien sijoituksen jälkeen. (de la Roche, Glazunov & Allen 2012).

De la Roche ja Andres Alayon Allen esittelevät kirjassaan tarkemmin kahta empiiristä mallia ja semi-empiiristä Cost231-mallia. Ensimmäinen esitellyistä empiirisistä malleista on nimeltään Leen malli ja sen pohjana on käytetty 900 MHz verkoissa tehtyjä mittauksia. Leen malli ottaa huomioon antennin korkeuden  $h_{\text{eff}}$ , UE:n korkeuden  $h_{\text{mobile}}$ , UE:n

etäisyyden tukiasemasta  $R$  ja mittauksista johdetut arvot ympäristön aiheuttamille muutoksille  $n$  sekä  $D$ . Malli pitää sellaisena paikkansa vain 900 MHz taajuutta käyttävissä verkoissa. Signaalitien vaimennus Leen mallissa saadaan kaavasta:

$$L_{lee} = 10n \log(R) - 20\log(h_{eff}) - D - 10\log(h_{mobile}) + 29 \quad (1)$$

Toinen esitelty malli on nimeltään Ercegin malli, joka pohjautuu 1.9 GHz taajuudella toimivien verkkojen mittauksiin. Mallissa ympäristön vaikutus jaetaan kolmeen ryhmään. Tyypin A on mäkinen maasto, jossa puusto on tiheydeltään kohtalaisen ja tiheän väliltä. Tyypin B on myös mäkinen maasto, jossa ohutta kasvustoa tai tasainen maasto kohtalaisen ja tiheän puuston kanssa. Tyypin C kuvaa tasaista maastoa, jossa myös puusto on harvaa. Tyypeittäin on johdettu parametrit  $a$ ,  $b$  ja  $c$ , joita käytetään signaalitien vaimenemisen laskemiseen. Erceg's model ottaa huomioon tukiaseman antennin korkeuden, aallonpituuden ja tukiaseman ja UE:n välisen etäisyyden. Mallista on johdettu myös laajennos, jossa huomioidaan muut taajuusalueet sekä UE:n korkeus maanpinnasta. (de la Roche ym. 2012).

Vaikka semi-empiriiset mallit ovat yhdistelmä teoriaa ja mittauksia, ne luokitellaan aluekohtaisiksi malleiksi. Tämä tarkoittaa, että niiden hyödyntämiseen tarvitaan tietoa simuloinnin kohteena olevasta alueesta, vaikka de la Rochen ym esittelemissä malleissa ei käytetty tarkkaa karttaa vaan alueen rakennusten keskiarvoja. (de la Roche ym 2012). Yleispätevä kaava esitellään heidän kirjassaan ja sillä saadaan signaalitien vaimentuma  $L = A + B * \log(r) + C + D$ . Kaavassa esiintyvät muuttujat  $A$  ja  $B$  on johdettu aikaisempien empiristen mittaustuloksien perusteella. Muuttuja  $A$  kuvaa signaalitien vaimenemista kilometrin matkalta, muuttuja  $B$  on etenemisen kerroin ja  $r$  kuvaa tukiaseman ja UE:n etäisyyttä kilometreinä. Muuttuja  $C$  kuvaa diffraktiosta johtuvaa häviötä ja se saadaan käyttämällä taipumismallia. Muuttuja  $D$  on erikseen sopeutettava alueen ominaisuuksiin mittausten tuloksien perusteella. Edellä karkeasti kuvattua etenemismallia on jalostettu eteenpäin ja sitä on ulotettu kattamaan laajempi kirjo käytettäviä taajuuksia. (de la Roche ym. 2012)



Simulointityökaluissa suosittu malli, empiirinen Okumura Hata-malli, laskee muuttujan A riippuen taajuudesta, antennin korkeudesta, UE:n korkeudesta ja muuttuja B riippuen antennin korkeudesta. He myös esittelevät COST 231 Walfisch-Ikegami-mallin kaupungissa etenevän radiosignaalin mallintamiseen. Tämä malli on tarkoitettu käytettäväksi ympäristöön, jossa eteneminen koostuu pääasiassa talojen katon vaikutuksesta taittuneista radioaaltoista. Mallilla on ratkaisut tapauksiin, jossa suoraa näköyhteyttä ei ole UE:n ja tukiaseman kanssa ja tapauksiin, jossa näköyhteys on olemassa. Tapauksissa, jossa näköyhteys puuttuu, signaalitien etenemiseen vaikuttavat tukiaseman ja UE:n viereisen talon välissä olevat talot sekä niiden aiheuttamat siroamiset. Edellä esitetyn siroamisen lisäksi pitää huomioida viimeisen talon katolta, kohti UE:ta suuntaavan signaalin siroaminen ja kadulla olevista rakenteista mahdollisesti aiheutuvat heijastukset. Näin ollen signaalitien vaimentumaa laskiessa otetaan huomioon talojen korkeus, katujen leveys, talojen välinen väli, kadun ja suoran signaalitien välinen kulma. Edellä mainitut arvot ovat mallin semi-empiirisestä luonteesta johtuen keskiarvoja, vaikka tarkat arvot olisivat saatavilla. (de la Roche ym. 2012). Tilanteissa, jossa näköyhteys on olemassa, on asiat helpommin hahmotettavissa. Signaalitiellä tapahtuva vaimeneminen perustuu COST231-malliin, joka on johdettu kaupungissa suoritettujen mittauksien perusteella.

Työn käyttöön annetuissa simulointituloksissa kerrottiin käytetyn mallin olevan yleisluontoinen, eikä mallia ole kohdennettu alueeseen. Etenemismallien soveltaminen mittausympäristössä tapahtuu kalibroimalla. Kalibroinnin ja simuloinnin tarkkuuteen vaikuttavat erityisesti simuloinnin pohjana käytetty tieto, kuten tukiaseman lähetysteho, antennin korkeus ja ympäristön geologinen kartta. Muita vaikuttavia tekijöitä ovat valittu etenemismalli ja sen soveltuvuus kohdeympäristön kanssa. Mallin ja mittausympäristön soveltuvuuden tarkastelemiseksi suoritetaan yleensä myös mittauskampanja. Sen tarkoitus on saada mitattua tietoa verrattavaksi simuloinnista saatujen tuloksien kanssa. De la Roche ym. esittävät, että mittauksista saaduista tuloksista osa olisi suunnattu kalibroinnin parantamiseksi ja loput erinäisiin tuloksien oikeudellisuuden varmentamistarkoituksiin. Sen lisäksi koska esitellyt etenemisvaimenemisen mallit käsittelevät signaalitiellä

tapahtuvaa vaimentumista, voidaan samoja malleja käyttää verkon kuuluvuusalueen arvioimiseen. Jotta verkko olisi kuuluvuudeltaan tarpeeksi hyvä, tulee vastaanotetun signaalin olla suurempi, kuin mitä signaalin vastaanotto vaatii, ottaen huomioon vastaanottimen herkkyyden. (de la Roche ym. 2012).

### **6.1 Vertailu simulaation ja mittauksien välillä**

Simulaatio koostuu neljällä, toisistaan jollain tavalla eriävällä parametrilla tehdystä mallinnuksesta. Simulaatiossa käytetyt tukiasemat ovat samat, jotka olivat käytössä myös ajomittauksen aikana. Tukiasemat on nimetty niiden sijainnen mukaan. Alpuminkankaan ja Puuhkalan tukiasemat ovat kumpikin jaettu kahdeksi soluksi, käyttämällä AAS-antennin ominaisuutta, jolla antennin säteilykuvio jaetaan useaksi soluksi. Solut on sijoitettu siten, että tukiaseman toinen solu sijaitsee tukiaseman läheisyydessä ja toinen ulottuu kauemmas. Lähellä oleva solu on tyypillisesti radiotien ominaisuuksiltaan parempi ja sen oli nähtävissä mittauksien tuloksista. Solut on nimetty tukiaseman mukaan ja sen pääte kertoo onko solu lähellä vai kauempana tukiasemasta.

Simulaatiossa käytettävät tukiasemien parametrit keskittyvät antennien korkeuksien, antennien kallistuskulman, antennien sähköisen kallistuskulman ja pilottikanavan tehon ympärille. Sen lisäksi tuloksiin vaikuttavat myös käytettävän antennin säteilykuvio ja etenemismalli. Antennien sähköistä kallistuskulmaa voitiin kääntää ylös- ja alaspäin viisi astetta (TAULUKKO 1-4).

TAULUKKO 1. Simulaatiossa käytetyt tukiasemien asetukset tapauksessa yksi

Solu	Antennin korkeus (m)	Kallistuskulma (astetta)	Sähköinen kallistuskulma
Alpuminkangas_inner	50	5	4
Alpuminkangas_outer	50	5	-2
Puuhkala_inner	42	5	4
Puuhkala_outer	42	5	-2

TAULUKKO 2. Simulaatiossa käytettyjen tukiasemien asetukset tapauksessa kaksi.

Solu	Antennin korkeus (m)	Kallistuskulma (astetta)	Sähköinen kallistuskulma
Alpuminkangas_inner	50	3	5
Alpuminkangas_outer	50	3	0
Puuhkala_inner	42	3	5
Puuhkala_outer	42	3	0

TAULUKKO 3. Simulaatiossa käytettyjen tukiasemien asetukset tapauksessa kolme.

Solu	Antennin korkeus (m)	Kallistuskulma (astetta)	Sähköinen kallistuskulma
Alpuminkangas_inner	50	3	5
Alpuminkangas_outer	50	3	0
Puuhkala_inner	42	3	5
Puuhkala_outer	42	3	0

TAULUKKO 4. Simulaatiossa käytettyjen tukiasemien asetukset tapauksessa neljä.

Solu	Antennin korkeus (m)	Kallistuskulma (astetta)	Sähköinen kallistuskulma
Alpuminkangas_inner	50	5	4
Alpuminkangas_outer	50	5	-2
Puuhkala_inner	42	5	4
Puuhkala_outer	42	5	-2

Simulaatiossa tutkittiin myös solujen toimintaa silloin, kun sitä käyttää useampi UE. Siinä tutkittiin tilannetta, jossa jokaisella neliökilometrillä olisi kymmenen aktiivista käyttäjää.

Varsinaisesta mittauksesta ei löytynyt parametreiltaan täysin vastaavaa testitilannetta. Näin ollen verrokiksi valittiin mittaus, joka olisi mahdollisimman lähellä simulaatiota. Tähän valittiin aikaisempaan testisarjaan kuuluva mittaus (TAULUKKO 5). Siinä on käytössä molemmat tukiasemat ja antennien korkeus mahdollisemman lähellä simulaatiossa käytettyä korkeutta, johon verrokkimittauksista valitessa piti kiinnittää huomiota. Valitussa vanhemmassa mittauksessa suoritettiin ajoreitti Alpuminkankaan läheisyydestä, kohti Puuhkalan tukiasemaa. Reitti oli eri, kuin työssä tehdyillä mittauksilla, mutta siitä on hyötyä verrattaessa sitä simulaatioon. Ajoreitti noudattelee samaa radiaalireittiä, kuin käytettiin uusimmissa mittauksessa, mutta verrattuna suoraan reittiin, tässä on vaihtelevuutta sivusuunnassa. Ajon aikana mittavan laitteen lisäksi jokaisessa solussa oli yksi kuormitus UE sijainnissa, josta sen yhteys suunniteltuun soluun oli erinomainen.

TAULUKKO 5. Simulaatioon verrattavat arvot käytännössä tehdyssä mittauksessa.

Solu (m)	Kallistuskulma (astetta)	Sähköinen kallistuskulma
Alpuminkangas_inner	5	4
Alpuminekangas_outer	5	-2
Puuhkala_inner	5	4
Puuhkala_outer	5	-2

Kun tarkastellaan simulointituloksia ja mittauksen tuloksia, huomataan että vertailussa rajoittavaksi tekijäksi muodostuu simulaatio. Tämä tarkoittaa, että simulaationtuloksissa oli kolme kohtaa, joita voitiin verrata tehtyjen mittausten kanssa. Näin ollen verrattavat parametrit valitaan simulaation ehdoilla. Simulaatiosta valikoitui vertailuun kolmen parametrin tulokset. Ensimmäisessä haetaan parasta solua käyttämällä kriteerinä RSCP:n arvoa. Toisessa vertaillaan saavutettuja downlink-nopeuksia. Kolmannen kohdan Ec/Io eroa aikaisemmin esitellystä, ajomittauksessa käytetystä Ec/No:sta siten, että siinä on huomioitu myös oman pilotti-kanavan teho. Molemmat kuvaavat pilotti-kanavan tehon suhdetta RSSI:hin. TelecomHallin mukaan CDMA-verkoissa häiriöt ovat kuin kohinaa, joten arvoja saatetaan käyttää ristiin. (Telecomhall 2011c). Raportissa solut tunnistetaan niiden sekoituskoodin (scrambling code) perusteella (TAULUKKO 6).

TAULUKKO 6. Solut tunnistetaan sen käyttämän sekoituskoodin perusteella.

Sekoituskoodi	Solu
370	Alpuminkangas_outer
371	Alpuminkangas_inner
374	Puuhkala_outer
375	Puuhkala_inner

### 6.1.2 Erot

Käytettäessä alaspäin suunnattua mekaanista kallistusta, eli positiivista kallistusta, sen sivuvaikutuksena on sivuille pullistunut alue, jossa solu kuuluu (TelecomHall 2011b). Suurimmat erot simulointien välillä esiintyivät sen pilottikanavan Ec/Io tuloksissa. Konfiguraatioiden kolme ja neljä, kaksi desibeliä tehokkaampi ulkosolun lähetysteho vaikutti simulaatiossa pilottikanavan kuuluvuuteen ulkosolussa positiivisesti, sisäsolun peittoalueen kustannuksella. Näissä tapauksissa myös alueet, joissa sisäsolu oli parhain kuuluvuudeltaan, kutistuivat. Ajomittauksesta kerättyihin tuloksiin verrattaessa ei suuria

eroja syntynyt, vaan eroavaisuudet löytyivät pienistä alueista Puuhkala\_outer solussa, joissa Alpuminkangas\_outer oli kuuluvuudeltaan voimakkaampi. Kyseisellä alueella on kerrostaloja, jotka ovat voineet aiheuttaa ratkaisevan varjostumisen näille alueille ja simulaatiossa käytetty etenemismalli ei ottanut huomioon tarkkoja ominaisuuksia.

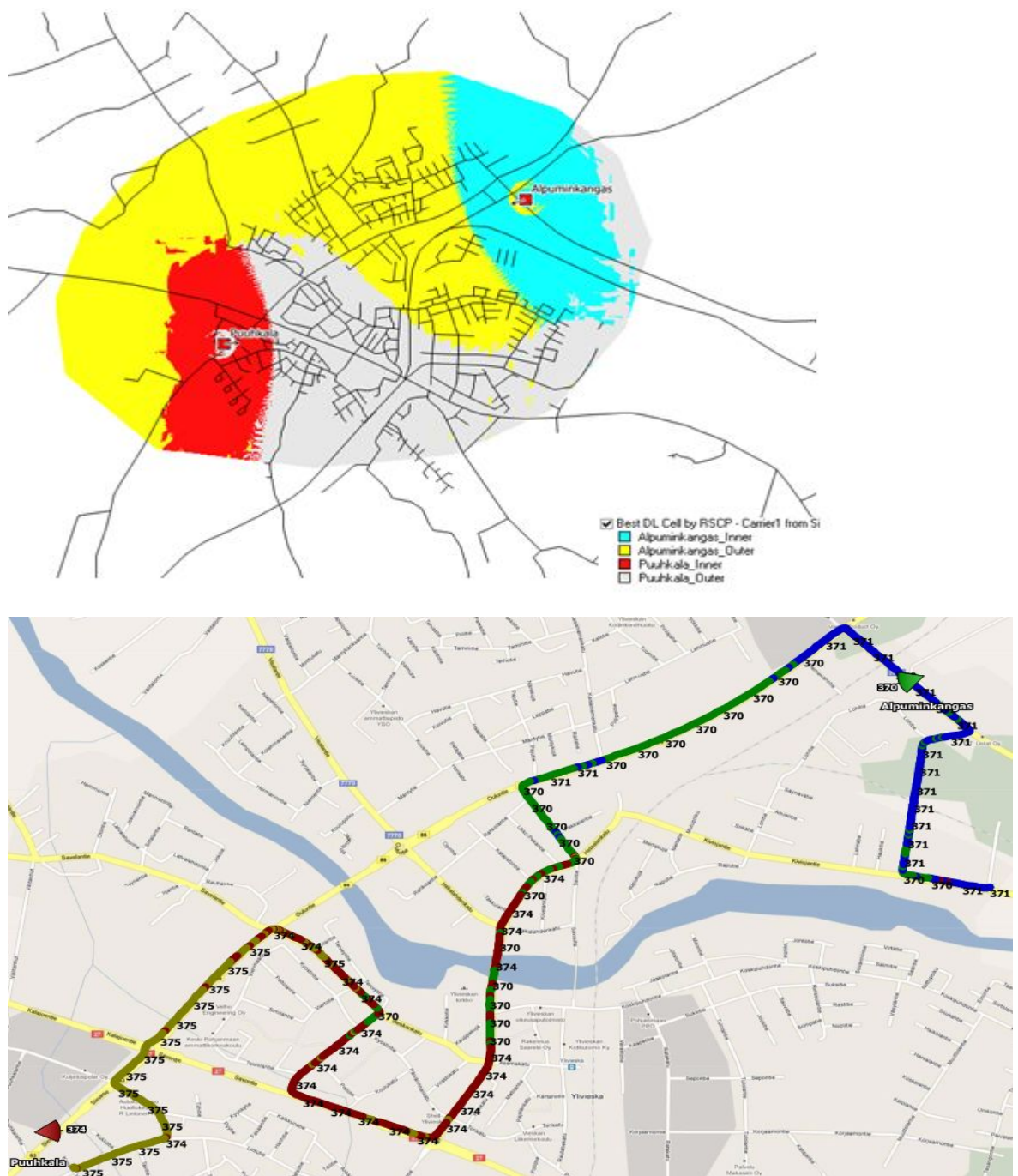
Konfiguraatiot yksi ja kaksi vastasivat Ec/Io tuloksien osalta paremmin simulointia, vaikka testiverkon ulkosolun lähetysteho on konfiguraatioiden kolme ja neljä mukainen. Tämä tarkoittaa sitä, että simulaatiossa on oletettu häiriöiden määrän olevan alhaisempi tai Ec/Io ja ajomittauksen Ec/No eroavat toisistaan, vaikka UMTS:ssa on käytetty molempia sekaisin (Kreher & Gaenger 2010, 220). Syynä voi olla yksinkertaisesti se, että arvot eivät ole suoraan verrannollisia. Päinvastoin konfiguraatiot yksi ja kaksi toimivat muissa tarkastelluissa testeissä paremmin kuin suuremmalla teholla lähettäneet konfiguraatiot.

Siirtonopeuksien kannalta kävi selväksi, että simulaatio antaa optimistisia arvioita, jotka ovat kauttaaltaan noin 1000 kbps ajomittauksella mitattuja arvoja korkeampia. Erot voivat myös johtua simulaatiossa oletettujen häiriöiden ja testiverkon häiriöiden määrän erosta. Huomiota herätti myös Alpuminkankaan eteläpuolella, joen pohjoispuolella oleva alue, jossa on paikallinen kuuluvuuden varjostuma. Siinä missä simulaation mukaan alueella olisi pitänyt olla hyvä kuuluvuus ja siirtonopeudet, niin tosiasiallisesti mittaava UE raportoi ajon huonoimmat CQI-arvot tältä alueelta. Myös siirtonopeudet kärsivät ja lähetykseen käytettävä teho oli korkeampi, vaikka etäisyyttä tukiasemaan ei ollut kuin alle puolet siitä, mitä muilta samalla teholla lähetetyistä alueista.

### **6.1.3 Yhteneväisyydet**

Etsittäessä tilanteita, joissa simulaation tuottama tulos vastaa mahdollisimman läheisesti verkon toimintaa, huomataan, että pilottikanavan tehon ollessa sama sekä simulaatiossa että varsinaisessa mittauksessa, verkon palveleva solu myötäilee konfigurointien kolme ja neljä rajoja. Tämä ei varsinaisesti yllätä, sillä näiden välillä lähetyksen teho pidettiin

samana. Simulaatiossa Ylivieskan alue oli jaettu sektoreiksi, joissa jonkin solun RSCP-arvo on tarkastelupisteen korkein. Kun verrataan simulaation karttaa ja ajomittauksen raportin palveleva solu-karttaa, jossa UE:n aktiivisen yhteyden määrittää hetkellinen RSCP:en arvo pilotti-kanavasta mitattuna. (KUVIO 16). Lukuun ottamatta Kiviojantien ja Ylivieskan kirkon läheisyydessä sijaitsevia poikkeamia, voidaan simulaatiota käyttää pääpiirteittäin solun kuuluvuuden arviointiin.



KUVIO 16. Simulaation ja mittaus tuloksien vertailu

Kuten aikaisemmin on todettu, verrattaessa  $E_c/I_o$ :n arvoja ajomittauksen mittauksiin, huomataan simulaation, jossa on käytetty kenttämittauksiin verrattuna kahta dBm:ää alemmaa lähetystehoä, ja kenttämittauksien vastaavan toisiaan. Näin ollen pidän mahdollisuutena muun Ylivieskan alueella tapahtuvan langattoman liikenteen vaikuttaneen mitattuihin  $E_c/No$  arvoihin aiheuttaen häiriötä ja tiputtaneen mitattua arvoa. Kuitenkin myös näissä on nähtävillä Alpuminkankaan eteläpuolella sijaitseva katvealue. Tällä alueella on aktiivisessa joukossa kolme solua, hyvä SIR, alhainen CQI ja modulaatio, mutta myös RSCP ja  $E_c/No$  ovat alhaisia sekä lähetysteho on korkeahko. Tästä voidaan vetää johtopäätös, että kyseisellä alueella on useita heikkoja signaaleita ja mahdollisia näköesteitä.

## 6.2 Käyttökelpoisuus

Alustavissa simulaatioissa ei ole tarkkoja tietoja. Näin ollen siitä ei ole tarkaksi siirtonopeuden arviointimenetelmäksi varsinkaan, jos käytössä ei ole deterministinen malli ja käytetään keskiarvoja kuvaamaan maastoa ja rakenteita. Simulaation resoluutio ei riitä havaitsemaan kaikkia huonon kuuluvuuden alueita. Simulaatio ei mielestäni korvaa ajomittausta, kun halutaan selvittää verkon kapasiteettia tai siirtonopeuksia. Kuitenkin se tarjosi tarkan oloisen arvion solujen jakautumisesta alueelle. Se saattaa osoittautua hyödylliseksi verkon suunnitteluvaiheessa, etenkin kun halutaan estää liiallinen peittoalueiden päällekkäisyys. Muita keinoja hyödyntää simulaatiota voisi olla hankalien ja työläästi muutettavien parametrien, kuten antennin korkeuden vaikutuksien selvitys.

Verkon käyttöönoton jälkeen voidaan myös hyödyntää 3GPP:n julkaisussa 10 esitettyä tekniikkaa, jonka tarkoitus on vähentää ajomittauksen tarvetta keräämällä mitattavat tiedot suoraan asiakkaiden laitteista. Tekniikkaa kutsutaan nimellä minimization of drive tests (MDT) ja Cox luokittelee sen osaksi LTE:n itsestään optimoivia verkkoja (Cox 2012). Tietojen kerääminen olisi luvanvaraista ja luvan tai suostumuksen siihen antaa laitteen omistaja. Tietojen kerääminen voidaan suorittaa, jos UE on RRC\_Connected tai



RRC\_idle tilassa. Connected-tilassa tapahtuvalla mittauksella UE lähettää tiedot RSRP tai RSRQ:sta mahdollisten paikkatietojen kera eNodeB:lle, joka lähettää ne tarvittaessa eteenpäin. Jos UE on RRC\_idle tilassa, tallennetaan mittauksen tiedot lokiin, josta lähetetään tieto eNodeB:lle seuraavan tilaisuuden tullen. Tukiasemalle ilmoitetaan lokin olemassa olosta RRC-yhteyden muodostamisen yhteydessä. Tukiasema voi tiedon saatuaan noutaa tulokset käyttämällä RRC UE Information toimintoa. UE voidaan myös komentaa käynnistämään tiedon kerääminen seuraavan kerran astuessaan RRC\_idle tilaan, lähettämälle sille tähän tarkoitettuun RRC-viestin. (Cox 2012).

## 7 JOHTOPÄÄTÖSET JA TUTKIMUKSEN JATKOKEHITTELY

Kappaleessa esitetään mittauksen jatkokehityksen kannalta merkittävät asiat, sekä kuinka mahdolliset ongelmat voitaisiin selvittää ja kehittää mittausprosessia.

### 7.1 Johtopäätökset

Simulaation ja mittaustuloksien välistä vertailua oli vaikea suorittaa. Simulaatiossa tutkittiin verkon käyttäytymistä erilaisella näkökulmalla, kuin varsinaisissa mittauksissa. Simulaatiossa painotettiin tukiaseman toimintaa ja siinä mallinnettiin myös tukiaseman kapasiteettia, kun vastaavasti mittauksissa tutkittiin kolmen erillisen laitteen toimintaa. Simulaatio oli myös huomattavasti suppeampi sisällöltään ja keskittyi tukiaseman toimintaan kokonaisuutena, kun ajomittauksen tarkoitus on suorittaa mittaus UE:n näkökulmasta. Simulaatiossa käytetty pinta-ala levittyi laajalle alalle. Mielestäni simulaatio on hyödyllisin uuden verkon ensimmäistä ajoreittiä suunniteltaessa. Siinä esitetty kuuluvuusalueen arvio oli paikkaansa pitävä ajetun reitin osalta, lukuun ottamatta tiettyjä alueita. Kun ensimmäinen ajomittaus on suoritettu, käytetään sitä simulaation sijaan. Ensimmäisenä ajettavan ajomittauksen tulisi mielestäni muistuttaa sektorireittiä ja sen tarkoitus on mitata verkon RSCP- tai Ec/No-arvoja ilman kuormaa. Näitä tuloksia käytettäisiin staattisten mittauspaiikkojen löytämiseen tuleviin mittauksiin. Niemelän ym. ohjeena on tehdä tämä vain kerran ja se uusittaisiin, mikäli tukiasemien sijainnit muuttuvat (Niemelä ym. 2005).

Matkaviestinverkkojen käyttö on muuttumassa IP-pohjaiseksi data-liikenteeksi. Korvaavat viestintäpalvelut, jossa perinteiset GSM-verkon palvelut kuljetetaan IP-protokolan yli, kasvattavat suosiotaan. Kasvua rohkaisee rajattoman määrän dataliikennettä sallivat liittymät. VoIP-palvelun käyttö vaatii tasaisen vasteajan käyttäjien välillä. Viiveen vaihtelu tunnetaan ilmiönä jitter, jossa viiveen määrä vaihtelee äkillisesti ja palvelun käytössä

esiintyy siksi häiriöitä. Ajomittauksessa voitaisiin seurata myös päätelaitteen ja FTP-palvelimen välistä vasteaikaa.

Mittaukset sujuivat ongelmitta. Käytännön toteutuksen kehittäminen jää ajomittauksta suorittavien työn helpottamisen tasolle. Ohjelmisto piti sisällään raportointia hidastavia piirteitä. Suurimmat hyödyt ovat saavutettavissa ohjelmiston optimoinnilla. Nykytilanteessa raportti voi tulostusvaiheessa muuttua käyttökelvottomaksi kaavion asteikon jäädessä sivurajojen ulkopuolelle.

Mittauksen aikana sää oli selkeä. Aina näin ei kuitenkaan ole. Sääennustukset olisivat mielestäni hyvä ottaa työkaluksi aikataulujen suunnittelussa. Vastaavasti mittauksiin voitaisiin sisällyttää tietoa sen hetkisestä säätilasta myöhempää tarkastelua varten.

## **7.2 Huomautettavaa**

Epäkohtia työn toteutuksessa nousi sekä mittauksen suorituksen, että raporttien teon aikana. Ajomittauksen suorituksen aikana ei ollut käytettävissä ulkoisia handsfree-laitteita, joten jouduimme tyytymään puhelimen sisäisen kaiuttimen käyttöön. Parempi ratkaisu olisi liittää puhelin ulkoiseen äänentoistojärjestelmään puhelimen sisäänrakennetun kaiuttimen sijasta, jos siihen on mahdollisuus. Automelun takia kommunikatio oli pahimmassa tapauksessa vaikeaa, ellei puhelinta sijoitettu lähelle korvaa. Erillisen handsfree-laitteen käyttö helpottaisi mittausta suorittavan henkilön toimia. Tilanteita, joissa ei voida käyttää normaalia handsfree-laitetta, voitaisiin käyttää erillistä akkukäyttöistä bluetooth-kaiutinta.

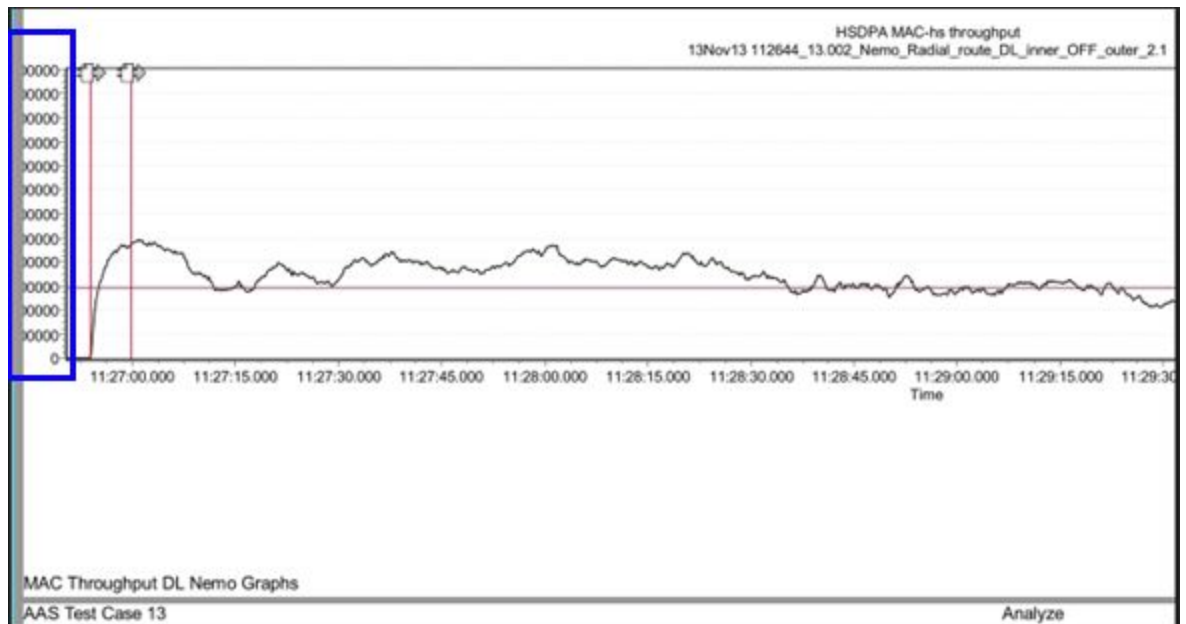
Mittauksiin Entuudestaan tuntemattomalla ajoreitillä ajaminen yksin vaatisi jonkinlaista avustusta navigointiin, etenkin ajoreitin ollessa monimutkainen. Esimerkiksi ensimmäisillä ajokerroilla liikkuvissa ajoneuvoissa voitaisiin suorittaa mittaus ajajan ja häntä avustavan henkilön voimin. Projektin edetessä avustaja voidaan jättää pois, kun ajoreitti ja sen ominaisuudet kuten tunnetut heikon kantaman alueet ovat tiedossa. Vastaavasti ennen

mittauksien suorittamista luodaan ajoreitti käyttämällä Nemo Outdoorin waypointeja (Nemo outdoor).

Ajomittauksien aikana sää pysytteli muuttumattomana, mutta suoritetaanko ajomittausta rankkasateessa, tai muussa sellaisessa tilanteessa, joka vaikuttaa testauksen tuloksiin. Poikkeavissa tapauksissa tulisi jättää tietoa mittaustiedostoon, esimerkiksi käyttämällä tekstilaatikkoa mittauksen tallentamisen jälkeen. Windows käyttöjärjestelmässä tiedostopolun pituuden rajana on tavallisella nimeämistavalla 260 merkkiä (Microsoft 2014). Kuitenkin jos käytetään Nemo outdoorin oletushakemistoa mittauksen tuloksille, kannattaa ennen mittauksien tekoa selvittää mahtuvatko kaikki merkit rajoituksen sisään. Sama pätee myös kopioitaessa tiedostoja analysointia varten. Vielä ongelmaa ei ole mutta tämä on hyvä huomioida.

Ajomittauksen aikana siirretyt tiedostot olivat mitatuilla nopeuksilla tarpeeksi suuria, ettei pitkänkään mittauksen aikana tullut vastaan tilannetta, jossa tiedoston siirto on saatettu loppuun ennen mittausta. Tulevaisuudessa voidaan lisätä rinnakkain ladattavien tiedostojen määrää ja kasvattaa niiden kokoa. Tiedoston kokoa rajoittavat käytetty tiedostojärjestelmä ja käytettävien ohjelmien asettamat rajoitteet (Disk Interchange 2010). Suosittelen lisäämään siirrettävien tiedostojen määrää tai aloittamaan siirron uudestaan niiden päätyttyä, ellei koko testausympäristön yleisesti asettamaa tiedostokokorajoitusta ole selvitetty.

Mittauksien raporteissa oli eroja. Yhdestä yhteenvetoraportista puuttui sivu ja handover-merkinnät toisesta. Raporteissa esiintynyttä virhettä, jossa y-akseli leikkautuu osittain sivun ulkopuolelle tulisi korjata. Virhe vaikeuttaa luettavuutta. Sen lisäksi skaalautuvat graafien asteikot estävät vertailun. Se havaitaan vasta raportin PDF-muotoon kääntämisen jälkeen. Ongelman esiintymistä on täsmennetty sinisellä värillä (KUVIO 17).



KUVIO 17. Raportin y-akselin arvot jäävät dokumentin ulkopuolelle

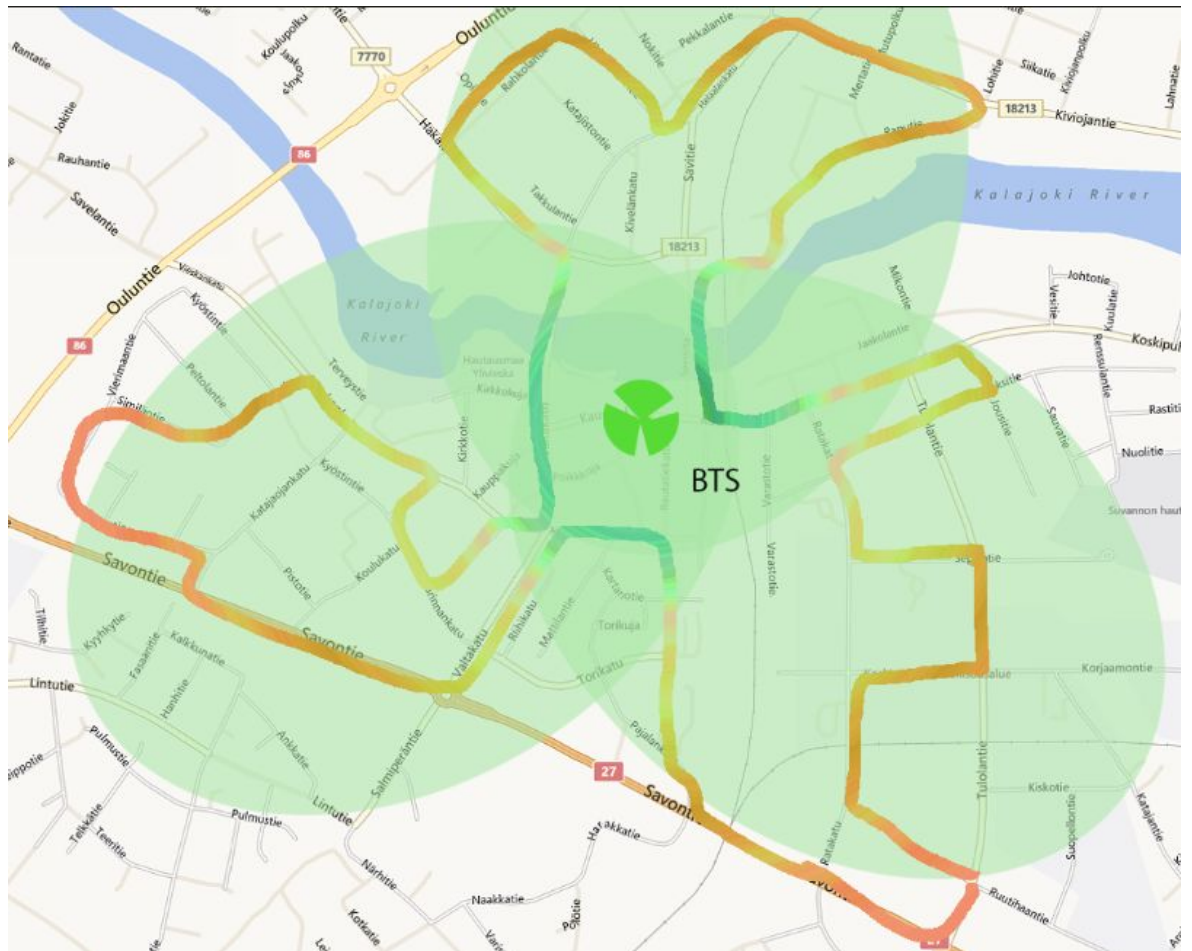
### 7.3 Ehdotukset

Tässä luvussa esittelemäni ehdotukset jakautuvat mittaustuloksien käsittelyohjelmiston ja mittausten suorituksen kesken. Mittausten näkyvänä tuloksena toimivat raportit ovat tärkeitä ja niiden luottavuuteen on hyvä kiinnittää huomiota. Hyvän raportin tukena toimii mittausten käytännön osuus. Yhteenvetoraportissa esitellään valikoitu kokoelma tuloksia kootusti. Yhteenvetoraportissa voitaisiin periaatteessa vertailla mittausryhmittäin tai mittaussarjoittain. Käytännössä karttanäkymässä tai graafissa voitaisiin esittää tuloksia kallistuskulman mukaan ryhmiteltynä, jolloin verkossa olleiden Nemo2 ja MCG päätelaitteiden vaikutusta olisi helpompi tutkia. Näin voitaisiin toimia, jos mittauksen tarkoituksena on tutkia päätelaitteiden sijainnin vaikutusta, yhdessä kallistuskulmien kanssa.

Testaajilla tulisi olla käytössään erillinen handsfree-laitteisto, kun suoritetaan ajoneuvolla liikkuvaa mittausta. Puhelimen kaiuttimen ääni voi peittyä auton rengasmeluun. Handsfree-laitteiden saatavuus voitaisiin tarkistaa ennen mittauksiin ryhtymistä ja tarvittaessa priorisoida ajavia testaajia, jos niitä ei riitä kaikille. Toinen ratkaisu on hankkia

ulkoinen, autokäyttöön tarkoitettu Bluetooth-autokaiutin, jotta muutkin autossa olevat henkilöt voivat osallistua kommunikointiin. Auton 12V-liittimestä virran otettavan invertterin lisäksi esitän harkittavaksi myös virranjakajaa, sekä puhelimen laturia käytettäviin työkaluihin. Mittauksien aloitusvaiheessa, kun ajoreitti on tuntematon, navigoinnin tarve korostuu. Nemo Outdoor:ssa voi luoda ajoreitin, jota pitkin liikkuu auton sijainnin mukaan päivittyvä kuvake. Ajomittaukset voitaisiin suunnitella mahdollistamaan liikkuvan mittauksen suorittamisen kahden henkilön toimesta. Tarkoituksena on saada ajettava reitti tutuksi. Mittaussarjan aluksi suoritettaisiin mittaukset, joissa mittaavien laitteiden määrä sallii ajomittauksen suorittamisen kahdella henkilöllä.

Simuloimalla voidaan arvioida verkon käyttäytymistä ilman ajomittauksia. Simulaatio ei ainakaan tämän työn perusteella tarjoa kaiken kattavaa ratkaisua. Simulaation peittokartta ei ollut täysin tarkka, joka on myös sen suurin heikkous. Käytännön mittauksissa huomattiin verkon peitossa olevan alueita, jossa kuuluvuus oli selvästi heikompi, kuin sopii odottaa. Nämä eivät näkyneet simulaatiossa. Koska ajoreitin suunnitteluvaiheessa pitäisi olla tiedossa antennien säteilykuvio ja toivottavasti myös alustavat simulaatiot, ehdottaisin niiden käyttöä ajoreitin alan rajoittamiseen ja keskittämiseen mittauksen puolesta kiinnostaville alueille. Käytännössä tämä tarkoittaa kartalle piirretyn säteilykuvion ja arvioidun kuuluvuusalueen käyttöä ajoreitin pohjan suunnittelussa. Ajoreitin kannalta merkittävää on tieto sillä suoritettavista mittauksista. Jos tiedetään, että osa suoritettavista mittauksista liittyy UE:n käyttäytymiseen handover-alueella, on arvio solujen peittoalueesta tarpeen. Menettelyllä on potentiaalia vähentää työtä, joka syntyy kun ajoreittiä pitää muuttaa soveltumaan suoritettaviin mittauksiin. Tarkoitukseen voidaan soveltaa vaikka yksinkertaista karttaa, jossa näkyvät kadut, tukiasema, antennien säteilykuvio ja arvioitu peittoalue (KUVIO 18).



KUVIO 18. Esimerkki suunnittelussa käytettävästä kartasta

Mittauksista tehtäviin raportteihin voi tulla muutoksia ja korjauksia. En havainnut raporttien sisältävän mitään versionhallintaa tai johdonmukaista nimeämistapaa, vaan olin pitkälti tiedoston luomispäiväyksen varassa. Ehdotan luettavuuden helpottamiseksi raportteihin lisättäväksi erillistä versiointia, jossa muutokset sekä niiden tekopäivämäärä ilmoitettaisiin vaikka raportin ensimmäisellä sivulla. Versiointi voi olla yksinkertainen, kuten kuvassa on esitelty punaisilla laatikoilla (KUVIO 19) ja koostua muokkauspäivästä sekä lyhyestä kuvauksesta muutetusta sisällyksestä.

The screenshot displays the 'Analyze' window of the Nemo software. At the top, it shows 'AAAS Test Case 13' and the date '26.11.2013 9:48:30'. The main area is divided into two tables of measurement data. The first table lists three measurements from 13Nov07, and the second table lists three measurements from 13Nov07 and 13Nov08. Below the tables, there are sections for 'Measurement report' and 'Measurement Equipment'. The 'Measurement report' includes details like '13.001 Comparison report', 'BTS: Alupunkkangas', 'VAN in use: No', and 'VS Active: Yes'. The 'Measurement Equipment' section lists hardware such as '2x Laptop: HP ProBook 6470B', 'OS: Windows 7 PRO 32-bit', 'Processor: Intel Core i5-3120M', 'RAM: 4.0GB', 'Hard Disk type: Mechanical', '2x End Device: Huawei 352u-12 with antenna pigtail cable', '2x Antenna: External magnetic vehicle antenna', '2x GPS antenna: Garmin GPSi/Bx USB', '2x Power Inverter: Victron Energy 180W', 'Measurement Software: 2x Avite Nemo Outdoor 6.41', and 'Analyzing Software: Avite Nemo Analyze 6.50'.

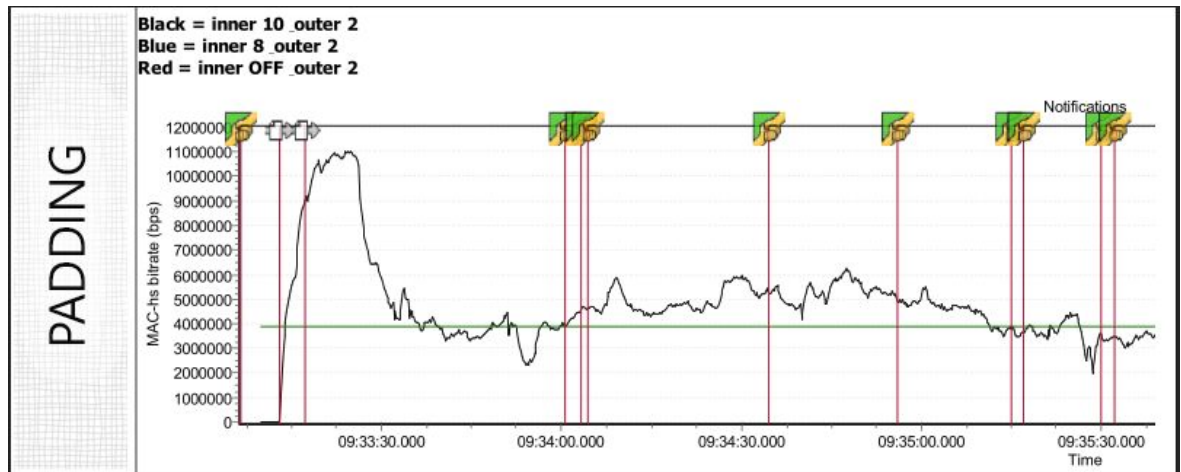
Below the equipment list, there is a 'Muutoshistoria' (Change History) table with two columns: 'Date' and 'Description'. The table shows two entries: '1.4.2014' with 'Alkuperäinen tiedosto' and '2.4.2014' with 'Lisäty CQI-graafi.'. A red box highlights this table. To the right of the table, there is a note: 'Versiohistorian mahdolliset sijoituspaikat, riippuen tuleeko samalla sivulla myös kuvaus lopuksi suoritettavasta analyysistä.'

At the bottom left, there is another 'Muutoshistoria' table, identical to the one above, also highlighted with a red box. The bottom of the window shows 'Measurement info' and a small '5/17' indicator.

KUVIO 19. Versiointi voidaan toteuttaa yksinkertaisimmillaan käyttämällä tekstilaatikkoa

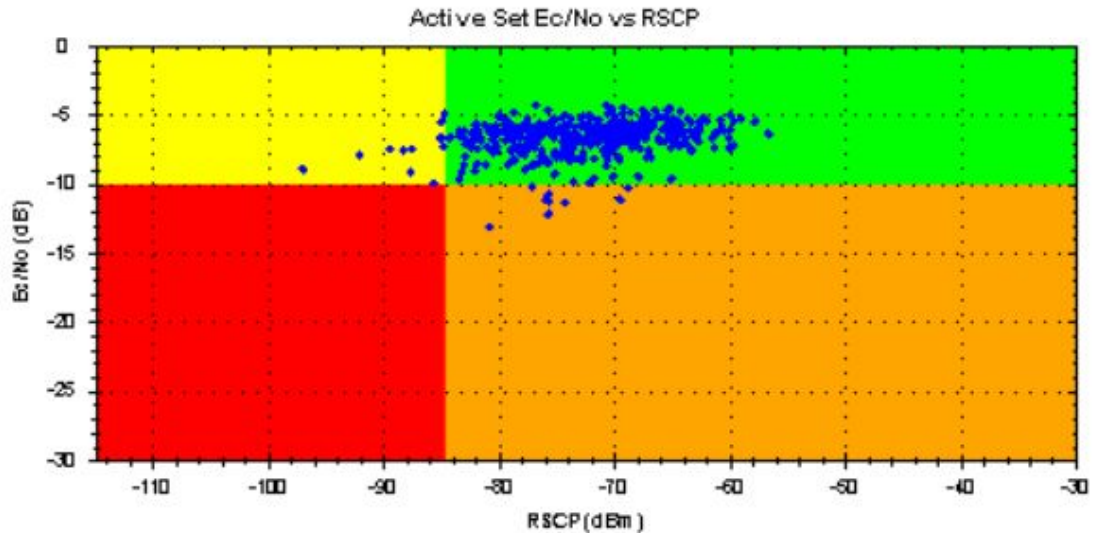
Raporteissa esiintyy ongelma, jossa osa kaaviosta leikkautuu sivun rajojen ulkopuolelle. Esitän raporttien vasempaan laitaan lisättävää elementtiä, joka voisi toimia puskurina (KUVIO 20). Raportoinnissa oli tarvetta myös merkinnälle, jolla voi osoittaa mittauksen mielenkiintoinen kohta sekä karttanäkymässä, että viivagraafissa. Merkin pitäisi olla nopea tapa merkata kohtaa jokaisessa näkymässä, jossa kyseistä mittausta on käytetty. Ominaisuus muistuttaisi notification-elementtejä, jotka sijoitetaan parametrien mukaan. Haluttu ilmoitus olisi sijoitettavissa manuaalisesti. Sen käyttö helpottaisi tapahtumien merkitsemistä mittauksen raporttiin. Raportteja suunniteltaessa voitaisiin ottaa huomioon myös tilanteet, joissa värejä ei ole saatavilla, kuten tulostus. Ehdotan, että kahden tai useamman kuvaajan graafeissa käytettäisiin erillaisia viivatyylejä, jos se on mahdollista. Myös värit voisivat erottua toisistaan, varsinkin yhteenvertaeraporteissa. Ehdotan käytettäväksi vastavärejä, jos samassa näkymässä näytetään kahta tai useampaa kuvaajaa.





KUVIO 20. Sivun reunaan lisätty puskuri-elementti

Mielestäni tärkein ehdotus ajomittauksien parantamiseksi on käyttää RSCP- ja Ec/No-arvoja ongelma-alueiden etsimiseen. Myöhemmin mittauksien vertailuvaiheessa voidaan tarkastella, miten muutokset vaikuttavat verkon kuuluvuuteen ja signaalin laatuun käyttämällä RSCP- ja Ec/No-arvojen välistä suhdetta. Menetelmää voidaan käyttää kahdella tavalla. Ensimmäinen tapa on esittää verkkoa mittauksen ajalta kuvaajan avulla. (KUVIO 21). Kuvaajasta voidaan päätellä nopeasti signaalin kuuluvuus ja laatu. Taulukon alue on jaettu neljään osaan. Vihreällä alueella verkon kuuluvuus on hyvä ja häiriöt alhaisia. Keltaisella alueella häiriöiden määrä on alhainen mutta kuuluvuus huono. Oranssilla alueella kuuluvuus on hyvä mutta verkossa on häiriötä. Punaiselle alueelle keskittyvissä tapauksissa kuuluvuus on alhainen ja verkossa on häiriötä, huonoin mahdollinen tilanne. (Entelecom 2011). Kuvatun kaltaista kaaviota käytettiin mittauksien kanssa, mutta sen käytöstä on luovuttu. Kuvaaja voitaisiin tuoda takaisin yhteenvetoraporttiin.



KUVIO 21. Verkon toimintaa voidaan arvoida nopeasti RSCP- ja Ec/No-arvojen jakauman avulla (Entelecom 2011).

Toinen tapa hyödyntää samaa tietoa pohjautuu aikaisemmin esitettyyn tapaan, mutta kaavion sijaan sitä kuvataan mittausalueen kartalla. Menetelmä on joustava ja sitä voi muokata. Halutessaan menetelmällä voidaan etsiä ongelma-alueita. Idea on luoda värikoodattu taulukko RSCP- ja Ec/No-arvojen väliselle suhteelle. Värikoodaus muistuttaa SQL-syntaksia. Kartalla värjätään ajoreittiä riippuen koordinaattien kohdalla mitattujen RSCP- ja Ec/No-arvojen keskinäisistä suhteista. Jos halutaan etsiä mittausreitiltä ne alueet, jossa kuuluvuus on heikko, mutta häiriöitä ei ole. Voidaan hakea kaikki pisteet, jotka toteuttavat ehdot  $RSCP < -90$  ja  $Ec/No > -9$ . (Bilal 2005). Edellä kuvattu menetelmä saattaa olla mahdollista toteuttaa Nemo Analyzen suodattimilla. Vastaavaa tiettyjen kriteerien täyttävää raportointia olisi mielestäni hyvä käyttää myös muiden mitattavien parametrien kanssa, kun edellytykset täyttyvät.

#### 7.4 Jatkokehitys

Työn aikana huomasin ajomittauksen suorittamisen olevan rutiininomaista työtä. Mittauksien kehitysmahdollisuudet ovat ohjelmiston käytön ja mitattavien parametrien

valitsemisen keskuudessa. Mittauksia suorittava henkilökunnan jäsenet ilmaisivat tarpeen Anite Finland Ltd-ohjelmiston käytön koulutukselle. Sen lisäksi esitettiin mahdollista päivitystä enterprise-tason ohjelmistoon, joka tarjoaa laajemmat ominaisuudet.

Tulevaisuudessa voi olla mahdollista käyttää rakennuksiin kiinnitettyjä mittauspisteitä apuna mittauksissa, tämä vaatisi aikaisempaa enemmän SIM-kortteja, johdotuksen kohteisiin ja näkemystä kuinka mittausdata saadaan turvallisesti käyttöön. Kiinteät mittauspisteet voisivat sijaita, vaikka Centrian rakennuksien katolla. Nyt kun dataliittymät ovat parantaneet toimintaansa, ehdotan tuleviin mittauksiin, varsinkin LTE-A, otettavaksi mukaan yhteydessä esiintyvän viiveen ottamista mukaan raportointiin. Viiveellä on suurempi merkitys VoIP-palveluiden laatuun, kuin suurella siirtonopeudella (de la Roche ym 2012). Ajoreitillä navigoimista voidaan helpottaa pimeämpinä vuodenaikoina käyttämällä ilmaista Hudway-sovellusta tai vastaavaa. Sovellus heijastaa ajoreitin auton tuulilasiin, eikä se vaadi ajon aikana internet-yhteyttä (Hudway 2014). Jos mikään olemassa oleva sovellus ei vastaa tarpeita, voisiko sopivan ohjelmoida toisena opinnäytetyönä? Jos aihe-alueelta tarjotaan myös muille opiskelijoille mahdollisuutta tehdä opinnäytetyötä, toivon heille tarjottavan mahdollisuutta tutustua tarkemmin Aniten ohjelmistoihin.

Puhelimen toimintojen vaihtoehtoinen käyttö on helpompaa, kuin aikaisemmin. Myös suoratoistopalvelut ovat nousussa, joita tukevat langattomien matkaviestinverkkojen siirtonopeuksien kasvaminen. Kuitenkaan nopeuksista ei ole hyötyä, jos palvelu vaatii alhaista viivettä. Tästä syystä voisi olla mielenkiintoista kokeilumielessä käyttää viiveiden mittaus tietoa, yhdessä BLER-mittaus tuloksien kanssa osoittamaan viiveen vaihteluille herkkiä alueita ja kuinka antennien säädöt vaikuttavat tästä näkökulmasta.

Lopuksi koostetaan yhteeksi tarkistuslistaksi ne asiat, jotka esitän otettavaksi huomioon mittauksessa. Listauksen tarkoitus on antaa ehdotuksia jatkossa suoritettaviin mittauksiin ja toimii niiden jatkokehityksen pohjana. Esitetyt ehdotukset kerätään työn havainnoista. Tarkistuslista keskittyy ajomittauksen suorittavaan vaiheeseen (TAULUKKO 7).

TAULUKKO 7. Ajomittauksen tarkistuslista

TARKISTUSLISTAN KOHDAT	x
Kattaako ajoreitti mahdolliset, aikaisemmin havaitut mielenkiintoiset alueet?	
Ovatko laitteiden johdot ja liittimet tukevasti kiinnitettynä?	
Ovatko mittauslaitteet tukevasti kiinnitettynä ajoneuvossa?	
Saako mittauslaite virtaa, ovatko mittauksessa käytettyvät laitteet ladattuja ja virranhallinta-asetukset käännetty pois päältä?	
Onko mittaavilla UE:lla tarpeeksi vapaata tallennuskapasiteettia?	
Toimiiko GPS- ja mitattava verkkoyhteys?	
Onko antenni sijoitettu oikein ajoneuvon katolle, etenkin jos käytetään useaa antennia?	
Onko FTP-palvelin päällä ja saavutettavissa?	
Ovatko mittauksessa käytettyjen laitteiden kellot synkronoitu?	
Onko mittauspäivälle ennustettuna vaihtelevaa säätä, joka voi häiritä mittauksen tuloksia?	
Täyttääkö mittauspaikka vaatimusmäärittelyssä asetetut ehdot?	
Ovatko tukiasemien asetukset mittauksen mukaisia?	
Onko jokaisella mittaavalla Nemo Outdoor:lla sama komentosarja valittuna?	
Onko mittauksissa siirrettävä tiedosto/tiedostot mitoitettu verkon siirtonopeudelle ja ajoreitin kestolle?	
Onko mittauksiin osallistuneilla tiedossa mittauksien kulku?	
Onko ajettavan reitin kartta nopeasti nähtävillä tai muulla tavalla helposti ajettavissa?	
Onko ajoreitti ajettavissa? Tarkista tietyöt, tukokset tai muut haittaavat tekijät. Kirjaa ylös ajomittauksen aikana havaitut muutokset.	
Mittauksen päätyttyä nimeä se tavalla, jolla se on helppo erottaa useiden joukosta.	
Mittauksen päätyttyä merkitse ja tarkista mittausuunnitelman paikkaansapitävyys.	

## 8 POHDINTA

Työn tuloksena syntyi tämä dokumentti. Työhön tarttuessa WCDMA-verkon mittaukset olivat loppusuoralla. Kiinnostavin asia-alue oli simulaation suhteuttaminen testiverkkoon. Työstä tuli myös pitkä, vaikka asioissa raapaistiin vain pintaa. Vaikka olin varma ettei niin kävisi, lankesin ansaan ja työn lopputuloksen kannalta olisi edullisempaa rajata aihetta vielä tarkemmin. Tästä on syyttämisen puutteellisia tietoja, ennen työn aloittamista sekä vaillinaista käsitystä sen mahdollisesta pituudesta. Olen yhtäaikaan tyytyväinen ja pettynyt työssä käyttämiini menetelmiin. Lähdeaineisto ei tehnyt etenemistä turhan helpoksi ja varsinkin usein ajomittaus ei ollut lähteenä käytetyn teoksen pääpainona vaan yhtenä kappaleena. Sen lisäksi ongelmana oli uusien, käyttökelpoisten ideoiden vähyys. Johtuivatko ne aikaisemmista tutkimuksista ja mahdollisuuksien rajallisuudesta vai tutkimusmenetelmistäni? Siihen en voi antaa varmaa vastausta.

Työn loppuosassa esitin parannusehdotuksia ja kuvasin omia käsityksiäni mittauksen etenemisestä. Käytetty ohjelmisto näytti tarjoavan pinnan alla paljon kontrollia osaavalle. Mielestäni työ toimi ponnahduslautana seuraavalle työlle tai kehitykselle. Sopiva kehityskohde voikin löytyä Analyzella omien KPI-filttereiden luomisesta mittauksia (Nemo Analyze-ohjelman käyttöohjeet).

## LÄHTEET

- Bilal, O. 2005. Radio Network Tuning and Optimization for UMTS. Ppt-dokumentti. Saatavissa [https://www.netlab.tkk.fi/opetus/s38310/04-05/Kalvot\\_04-05/Bilal\\_010205-1.ppt](https://www.netlab.tkk.fi/opetus/s38310/04-05/Kalvot_04-05/Bilal_010205-1.ppt) . Luettu 7.4.2014.
- Brax ,V. 2011, TYIN206 Tietoliikenneverkot. Tuntimoniste. Centria Ammattikorkeakoulu. Ylivieska
- Cox, C. 2012. Introduction to LTE : LTE, LTE-Advanced, SAE and 4G Mobile Communications. 2., painos. Hoboken: Wiley.
- Dalhman, E., Parkvall, S. & Skold, J. 2007. 3G Evolution : Radio Access for Mobile Broadband. Kidlington: Academic Press.
- de la Roche, G., Glazunov, A. & Allen, B. 2012. LTE-Advanced and Next Generation Wireless Networks : Channel Modelling and Propagation. Somerset: Wiley.
- Disk Interchange. 2010. PC Large-File Limitations. Www-dokumentti. Saatavissa: <http://www.3480-3590-data-conversion.com/article-large-files.html> . Luettu 18.5.2014.
- Entelecom. 2011. Ec/No Vs RSCP Overview. Pdf-dokumentti. Saatavissa [http://www.entelecom.com.au/documents/Testing\\_Chart\\_overview\\_EcNo\\_vs\\_RSCP\\_V1.pdf](http://www.entelecom.com.au/documents/Testing_Chart_overview_EcNo_vs_RSCP_V1.pdf) . Luettu 7.4.2014.
- European Communications Engineering (ECE Oy). 2013. Pdf-dokumentti. Saatavissa: <http://elisa.fi/vertaaverkkoja/> . Luettu 26.3.2014
- Gustray, F. 2012. RF and Microwave Engineering : Fundamentals of Wireless Communications. 2. Painos. Hoboken: Wiley.
- Hudway. 2014. Www-dokumentti. Saatavissa <http://www.hudwayapp.com/> . Luettu 7.4.2014.
- Hämäläinen, S., Sanneck, H. & Sartori, C. 2011. LTE Self-Organising Networks (SON) : Network Management Automation for Operational Efficiency. 2.Painos. Hoboken: Wiley.
- Isabona, J., Koneyha, C,C. Chinule, B. & Isaiah, G.P. 2013. Radio field strength propagation data and pathloss calculation methods in UMTS network. Pdf-dokumentti. Saatavissa <http://www.iiste.org/Journals/index.php/APTA/article/view/6572> . Luettu 25.3.2014

Juutilainen, M. 2007. Radiotekniika perusteet: Signaalien eteneminen. Luentokalvot. Lappeenranta teknillinen yliopisto. Saatavilla <http://www2.it.lut.fi/kurssit/06-07/Ti5312600/luentokalvot/luento03.pdf> . Luettu 24.3.2014.

Kreher, R. & Gaenger, K. 2010. LTE Signaling : Troubleshooting and Optimization. Hoboken: Wiley.

McCullough, A. 2001. Designing a Wireless Network : Understand How Wireless Communication Works. Rockland: Syngress Publishing.

Microsoft. 2014. Naming files, paths and namespaces. Www-dokumentti. Saatavissa <http://msdn.microsoft.com/en-us/library/windows/desktop/aa365247%28v=vs.85%29.aspx> . Luettu 2.4.2014.

Motorola. Realistic LTE Performance. 2009. saatavissa: [http://www.motorolasolutions.com/web/Business/\\_Documents/static%20files/Realistic\\_LTE\\_Experience\\_White\\_Paper\\_FINAL.pdf](http://www.motorolasolutions.com/web/Business/_Documents/static%20files/Realistic_LTE_Experience_White_Paper_FINAL.pdf) . Luettu 14.10.2013

Niemelä, J., Borkowski, J. & Lempiäinen, J. 2005. Using idle mode Ec/N0 measurements for network plan verification. Pdf-dokumentti. Saatavilla [http://www.cs.tut.fi/tlt/RNG/publications/docs/topology/ecno\\_measurements.pdf](http://www.cs.tut.fi/tlt/RNG/publications/docs/topology/ecno_measurements.pdf) . Luettu 24.3.2014.

Nokia Solutions and Networks. 2012. Active Antenna Systems, A step-change in base station site performance. PDF-dokumentti. Saatavissa: [http://nsn.com/system/files/document/nokia\\_siemens\\_networks\\_active\\_antenna\\_system\\_white\\_paper\\_26\\_01\\_12\\_0.pdf](http://nsn.com/system/files/document/nokia_siemens_networks_active_antenna_system_white_paper_26_01_12_0.pdf) . Luettu 24.3.2013

Nemo Analyze 6.40-ohjeet. Anite Finland Ltd.

Nemo Outdoor 7.1-ohjeet. Anite Finland Ltd.

Penttinen, J. 2011. LTE/SAE Deployment Handbook. Hoboken: Wiley.

Poole, I. Free Space Path Loss: Details, Formula, Calculator. Www-dokumentti. Saatavilla <http://www.radio-electronics.com/info/propagation/path-loss/free-space-formula-equation.php> . Luettu 24.3.2014.

Poole, I. Multipath Fading. Www-dokumentti. Saatavilla <http://www.radio-electronics.com/info/propagation/multipath/multipath-fading.php> . Luettu 24.3.2014.

Rumney, M. 2013. LTE and the Evolution to 4G Wireless : Design and Measurement Challenges. 2. Painos. Somerset:Wiley.

Salous, S. 2013. Radio Propagation Measurement and Channel Modelling. Somerset:Wiley.

Sauter, M. 2010. From GSM to LTE : An Introduction to Mobile Networks and Mobile Broadband. Hoboken: Wiley.

Sedoyeka, E., Hunaiti, Z., Almasri, S., Cirstea, M & Rahman, A. 2008. Evaluation of HSDPA (3.5G) Mobile Link Quality. Pdf-dokumentti. Saatavilla [http://ieeexplore.ieee.org/xpl/abstractAuthors.jsp?tp=&arnumber=4676926&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs\\_all.jsp%3Farnumber%3D4676926](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/abstractAuthors.jsp?tp=&arnumber=4676926&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D4676926) . Luettu 26.3.2014.

Tapia, P., Liu, J & Feuerstein, M. 2009. HSPA Performance and Evolution : A Practical Perspective. Hoboken: Wiley.

TelecomHall. 2011a. What is RF Drive Test?. Www-dokumentti. Saatavilla <http://www.telecomhall.com/what-is-rf-drive-test-testing-.aspx> . Luettu 24.3.2014.

TelecomHall. 2011b. What is Antenna Electrical and Mechanical tilt. Www-dokumentti. Saatavilla <http://www.telecomhall.com/what-is-antenna-electrical-and-mechanical-tilt-and-how-to-use-it.aspx> . Luettu 24.3.2014.

TelecomHall. 2011c. What is Ec/Io (and Eb/No)?. Www-dokumentti. Saatavilla <http://www.telecomhall.com/what-is-ecio-and-ebno.aspx> . Luettu 25.3.2014.

Tilastokeskus. 2010. Kotitalouden käytössä olevia kiinteitä ja langattomia laajakaistaliittymiä 2010. Www-dokumentti. Saatavilla [http://www.tilastokeskus.fi/til/sutivi/2010/sutivi\\_2010\\_2010-10-26\\_tau\\_003\\_fi.html](http://www.tilastokeskus.fi/til/sutivi/2010/sutivi_2010_2010-10-26_tau_003_fi.html) luettu 24.3.2014

Tilastokeskus. 2011. Kotitalouden käytössä olevia kiinteitä ja langattomia laajakaistaliittymiä 2011 kotitalouden nettotulojen ja asuinpaikan kaupunkimaisuuden mukaan, %-osuus kotitalouksista. Www-dokumentti. Saatavilla [http://www.tilastokeskus.fi/til/sutivi/2011/sutivi\\_2011\\_2011-11-02\\_tau\\_003\\_fi.html](http://www.tilastokeskus.fi/til/sutivi/2011/sutivi_2011_2011-11-02_tau_003_fi.html) luettu 24.3.2014



Tilastokeskus. 2012. Kotitalouden kiinteät ja langattomat internetinliittymät kotitalouden nettotulojen ja asuinpaikan kaupunkimaisuuden mukaan 2012, %-osuus kotitalouksista. Www-dokumentti. Saatavilla [http://www.tilastokeskus.fi/til/sutivi/2012/sutivi\\_2012\\_2012-11-07\\_tau\\_005\\_fi.html](http://www.tilastokeskus.fi/til/sutivi/2012/sutivi_2012_2012-11-07_tau_005_fi.html) luettu 24.3.2014

Toskala, A. & Holma, H. 2010. WCDMA for UMTS : HSPA Evolution and LTE . 5. PAINOS. Hoboken:Wiley.

Zhang, J., Sun, J & Yang, D. 2003. Application of Drive Test for QoS Evaluation in 3G Wireless Networks. Pdf-dokumentti. Saatavissa <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/abstractAuthors.jsp?reload=true&arnumber=1209747> . Luettu 30.12.2013.