



Työntekijöiden altistuminen tukiasemien radiotaajuisille kentille

Tutkimusraportti

Tommi Alanko, Maila Hietanen, Patrick von Nandelstadh

TYÖYMPÄRISTÖTUTKIMUKSEN RAPORTTISARJA 19
TYÖTERVEYSLAITOS 2006

Julkaisutiedot

Julkaisu: Työympäristötutkimuksen raporttisarja 19,
Työterveyslaitos, Helsinki 2006
ISBN 951-802-667-X, ISSN 1458-9311

Kirjoittajat: Tommi Alanko, Maila Hietanen,
Patrick von Nandelstadh

Otsikko: Työntekijöiden altistuminen tukiasemien
radiotaajuisille kentille

Vastuullinen tiimi: Työterveyslaitos, Uudet teknologiat ja riskit

Painopäivämäärä: 17.2.2006

Sivuja: 98

Painos: 1

Paino: Dark Oy, Vantaa 2006

Kansi
Arja Tarvainen

Kannen kuva
Patrick von Nandelstadh

Raportin julkaisuun on saatu tukea EU:n 6. puiteohjelmaan
sisältyvästä hankkeesta EMF-NET (Effects of the Exposure to
Electromagnetic Fields: from Science to Public Health and
Safer Workplace)



ISBN 951-802-667-X
ISSN 1458-9311

Tiivistelmä

Matkapuhelinten käytön ja langattoman viestinnän tiedonsiirtotarpeiden kasvu edellyttää samanaikaista tukiasemaverkoston tihentymistä. Tukiasemien antennit pyritään sijoittamaan siten, että ns. suuri yleisö ei pääse antennien lähelle. Työntekijöiden on kuitenkin joissakin työtehtävissä ja -tilanteissa työskenneltävä antennien lähellä, vaikka turvallinen etäisyys antenneista on epäselvä. Tämän tutkimusprojektin tarkoituksena oli tutkia radiotaajuisia sähkömagneettisia kenttiä kolmen eri matkapuhelinverkon tukiasema-antennien läheisyydessä. Tutkitut tukiasemat kuuluivat GSM-, UMTS- tai TETRA-verkkoon. Tulokset osoittivat, että kiinteistöjen katoille sijoitettujen tukiasema-antennien lähellä tarvittavat suojaetäisyydet ovat lyhyitä. Työntekijöitä koskevan direktiivin mukaiset suojaetäisyydet olivat suurimmillaan noin 1 m pääkeilan suunnassa. Väestörajojen perustella määritetyt turvalliset etäisyydet olivat vastaavasti suurimmillaan 1.7 m. Tutkimuksen perusteella voidaan todeta, että työntekijöiden altistuminen kiinteistöihin sijoitettujen tukiasemien RF-kentille on vähäistä ja toiminta-arvot voivat ylittyä ainoastaan pääkeilassa lähellä antennia.

Asiasanat: Tukiasemat, matkapuhelinverkot, antennit, työntekijät, sähkömagneettiset kentät, GSM, TETRA, UMTS

Tutkimusprojektiin on saatu rahoitusta Sosiaali- ja terveysministeriön Työsuojeluosastolta.

Sisällys

1	JOHDANTO	7
2	ALTISTUMISRAJAT JA NIIDEN SOVELTAMINEN	8
2.1	TYÖNTEKIJÖIDEN JA VÄESTÖN ALTISTUMISTA KOSKEVAT SÄÄDÖKSET	8
2.2	TERMINOLOGIA	8
2.3	ALTISTUMISEN RAJA-ARVOT JA PERUSRAJOITUKSET	9
2.4	TOIMINTA-ARVOT JA VIITEARVOT	10
2.5	KOKONAISALTISTUMISEN MÄÄRITTÄMINEN	12
2.6	ALTISTUMISRAJOITUSTEN SOVELTAMINEN	12
3	MATKAPUHELINJÄRJESTELMÄT	14
3.1	TUKIASEMIEN TEKNISIÄ OMINAISUUKSIA	14
3.2	ANTENNI JA SUUNTAKUVIOT	16
3.3	TUKIASEMIEN JAOTTELU	18
4	MITTAUSKOHTEET JA –MENETELMÄT	22
4.1	TUTKIMUSKOHTEIDEN VALINTA	22
4.2	MITTAUKSET TUKIASEMA-ANTENNIEN LÄHELLÄ	22
4.3	MITTAUSLAITTEET	23
4.3.1	<i>Laajakaistaiset ilmaisimet</i>	23
4.3.2	<i>Spektrimittaukset</i>	24
4.4	MITTAUSTAPA JA RAJOITUKSET	26
5	TULOKSET	29
6	PÄÄTELMÄT	33
7	VIITTEET	36
Liite A	Tukiasemien kohdekuvaukset ja mittaustulokset	39
A1	Kohde A	40
	A1.1 Kohdekuvaus	40
	A1.2 Tulokset	41
A2	Kohde B	43
	A2.1 Kohdekuvaus	43
	A2.2 Tulokset	44
A3	Kohde C	46
	A3.1 Kohdekuvaus	46
	A3.2 Tulokset	46
A4	Kohde D	50
	A4.1 Kohdekuvaus	50

	A4.2 Tulokset	51
A5	Kohde E	54
	A5.1 Kohdekuvaus	54
	A5.2 Tulokset	56
A6	Kohde F	58
	A6.1 Kohdekuvaus	58
	A6.2 Tulokset	59
A7	Kohde G	61
	A7.1 Kohdekuvaus	61
	A7.2 Tulokset	62
A8	Kohde H	63
	A8.1 Kohdekuvaus	63
	A8.2 Tulokset	64
A9	Kohde I	66
	A9.1 Kohdekuvaus	66
	A9.2 Tulokset	66
A10	Kohde J	70
	A10.1 Kohdekuvaus	70
	A10.2 Tulokset	71
A11	Kohde K	72
	A11.1 Kohdekuvaus	72
	A11.2 Tulokset	72
A12	Kohde L	73
	A12.1 Kohdekuvaus	73
	A12.2 Tulokset	74
	Liite B Tukiasemien tekniset tiedot	79
	Liite C Mittausepävarmuus	81
C1	Kapeakaistailmaisoin	81
C2	Laajakaistailmaisoin	83
	Liite D Matkapuhelinverkkojen tekniset ominaisuudet	85
D1	GSM	86
	D1.1 TDMA tekniikka	86
	D1.2 Teholuokat	87
	D1.3 Dynaaminen lähetystehonhallinta	88
	D1.4 Epäjatkuvaa lähetys	89
D2	UMTS	90

	D2.1	WCDMA tekniikka.....	90
	D2.2	Teholuokat.....	92
	D2.3	Dynaaminen lähetystehon hallinta.....	92
D3	TETRA	93
	D3.1	TDMA tekniikka.....	94
	D3.2	Teholuokat.....	95
	D3.3	Dynaaminen lähetystehon hallinta.....	95
Liite E	Diodi-ilmaisimen vaste voimakkaassa kentässä	96

1 Johdanto

Matkapuhelinten tarvitsema tukiasemaverkosto on tihentynyt nopeasti viime vuosina. Samalla huoli tukiasema-antennien lähettämien radiotaajuisten (RF) sähkömagneettisten kenttien mahdollisista terveyshaitoista on lisääntynyt sekä ns. suuren yleisön että työntekijöiden keskuudessa. Väestön altistuminen on yleensä merkityksettömän vähäistä, koska tukiasemat sijoitetaan yleensä siten, että väestö ei pääse tukiasema-antennien lähelle. Sen sijaan työntekijät voivat joutua työskentelemään lähellä tukiasemien antennia, jolloin RF-kenttiä koskevat altistumisrajat saattavat ylittyä.

Sähkömagneettisten kenttien voimakkuuksista tukiasemien antennien välittömässä läheisyydessä on vain vähän aikaisempaa tutkimustietoa. Suurin osa tutkimuksista on kohdistunut väestön altistumiseen kaukana tukiasemien antennista (1,2,13,15). Yleistettävää tietoa työntekijöiden altistumisesta tarvitaan kuitenkin sekä työpaikkojen että valvontaviranomaisten käyttöön.

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli arvioida työntekijöiden altistumistasoja työskenneltäessä lähellä tukiasemien lähettin-antenneja. Antennien asennus- ja huoltotyöntekijöiden lisäksi pyrittiin arvioimaan erityisesti sellaisten työntekijäryhmien altistumista, jotka työskentelevät antennien välittömässä läheisyydessä, mutta joiden työ ei varsinaisesti liity tukiasemiin. Tällaisia ovat esimerkiksi kattotyöntekijät, pelastustyöntekijät, ikkunanpesijät ja taloyhtiöiden huoltomiehet.

Huhtikuussa 2004 vahvistetussa EU-direktiivissä (2004/40/EY) määritellään vähimmäisvaatimukset työntekijöiden suojelemiseksi riskeiltä, jotka aiheutuvat sähkömagneettisille kentille altistumisesta työssä (10). Direktiivi saatetaan voimaan Suomessa viimeistään vuonna 2008. Tämän tutkimuksen tuloksia voidaan hyödyntää direktiivin käyttöönotossa ja riskinarviointien teossa.

2 Altistumisrajat ja niiden soveltaminen

2.1 Työntekijöiden ja väestön altistumista koskevat säädökset

Euroopan Unionin (EU) neuvoston antoi v. 1999 suosituksen (1999/519/EY), joka koskee väestön sähkömagneettisille kentille (0-300 GHz) altistumisen rajoittamisesta (9). Suositus vahvistettiin Suomessa Sosiaali- ja terveysministeriön asetuksena (294/2002) ("SM-asetus"). Vastaava EU:n Parlamentin ja neuvoston direktiivi työntekijöiden suojelemiseksi sähkömagneettisille kentille altistumisesta aiheutuville riskeille ("SM-direktiivi") vahvistettiin vuonna 2004, ja se tulee saattaa voimaan kansallisesti viimeistään huhtikuussa 2008 (10).

SM-direktiivissä annetut raja-arvot perustuvat kansainvälisen ionisoimattoman säteilyn komission (ICNIRP, International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) suositukseen. ICNIRP:n antamat ohjearvot työntekijöiden ja väestön altistumisen perusrajoiksi ja viitearvoiksi on julkaistu Health Physics -lehdessä vuonna 1998 (12).

2.2 Terminologiaa

Sekä SM-asetuksessa että SM-direktiivissä annetaan kaksitasoiset altistumisrajat sähkömagneettisille kentille. Väestön altistuminen ei saa missään tilanteessa ylittää SM-asetuksessa vahvistettuja *perusrajoituksia* eikä työntekijöiden altistuminen SM-direktiivissä vahvistettuja *altistumisen raja-arvoja*. Näitä rajoja noudattamalla varmistetaan, että väestöä ja työntekijöitä suojellaan kaikilta tunnetuilta terveyshaitoilta.

Käytännön altistumismittauksiin tarkoitetut *viitearvot* (asetus) ja *toiminta-arvot* (direktiivi) on määritetty suoraan mitattavissa olevina suureina. Viitearvojen ja toiminta-arvojen alittaminen varmistaa vastaavien perusrajoitusten ja altistumisen raja-arvojen noudattamisen.

2.3 Altistumisen raja-arvot ja perusrajoitukset

SM-direktiivissä esitetyt altistumisen raja-arvot ja väestöasetuksen perusrajoitukset perustuvat osoitettuihin terveysvaikutuksiin ja biologisiin tekijöihin. Altistumisen määrittämiseen käytetyt suuret matkapuhelinverkkojen käyttämällä taajuusalueella (10 MHz-10 GHz) ovat ominaisabsorptionopeus (SAR) ja tehotiheys (S). Rajoitusten tarkoituksena on estää koko kehoon kohdistuva lämpörasitus sekä kudosten liiallinen kuumeneminen. Väestön perusrajoitukset ovat viidesosa vastaavista työntekijöiden altistumisen raja-arvoista. Väestöä ja työntekijöitä koskevat altistumisrajat on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Altistumisen raja-arvot ja perusrajoitukset taajuusalueella 10 MHz - 10 GHz.

Taajuus 10 MHz- 10 GHz	Koko vartalon keskimääräinen SAR (W/kg)	Paikallinen SAR (pää ja vartalo) (W/kg)	Paikallinen SAR (raajat) (W/kg)
väestöä koskeva perusrajoitus	0.08	2	4
työntekijöitä koskeva altistumisen raja-arvo	0.4	10	20

Kaikki SAR-arvot ilmoitetaan keskimääräisinä 6 minuutin jaksoa kohti. Paikallinen SAR-arvo lasketaan 10 gramman yhtenäistä kudospainoa kohti. Altistumisen arvioinnissa käytetään näin saatua maksimi SAR-arvoa.

Taajuuksilla 10 - 300 GHz määritetään SM-kentän tehotiheys. Väestön perusrajoitus näillä taajuuksilla on 10 W/m² ja työntekijöiden altistumisen raja-arvo 50 W/m².

2.4 Toiminta-arvot ja viitearvot

Työntekijöitä koskevat toiminta-arvot ja väestöä koskevat viitearvot on esitetty suoraan mitattavissa olevina suureina, jotka ovat sähkökentän voimakkuus (E), magneettikentän voimakkuus (H), magneettivuon tiheys (B) ja tehotiheys (S). Taajuuksilla 100 kHz - 10 GHz suuret määritetään 6 minuutin aikakeskiarvoina.

Altistumisrajat yli 10 MHz taajuisille sähkö- ja magneettikentille on esitetty taulukoissa 2 ja 3 ja kuvissa 1 ja 2.

Taulukko 2. Väestön altistumista koskevat viitearvot

Taajuus	Sähkökentän voimakkuus, E (V/m)	Magneettikentän voimakkuus, H (A/m)	Tasoaaltoa vastaava tehotiheys, S (W/m ²)
10-400 MHz	28	0.073	2
400-2000 MHz	1.375 f ^{1/2}	0.0037 f ^{1/2}	f/200
2-300 GHz	61	0.16	10

f on taajuus (MHz)

Taulukko 3. Työntekijöiden altistumista koskevat toiminta-arvot

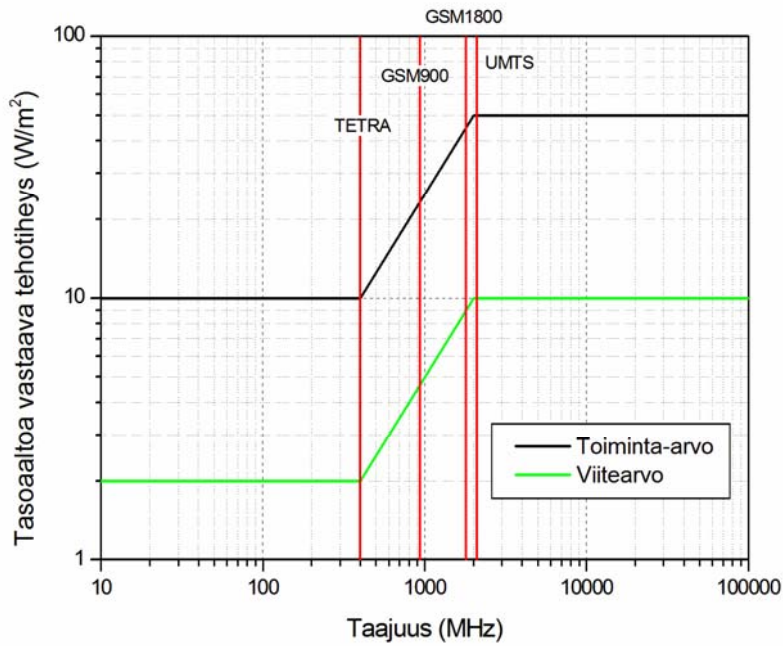
Taajuus	Sähkökentän voimakkuus, E(V/m)	Magneettikentän voimakkuus, H (A/m)	Tasoaaltoa vastaava tehotiheys, S (W/m ²)
10-400 MHz	61	0.16	10
400-2000 MHz	3 f ^{1/2}	0.008 f ^{1/2}	f/40
2-300 GHz	137	0.36	50

f on taajuus (MHz)

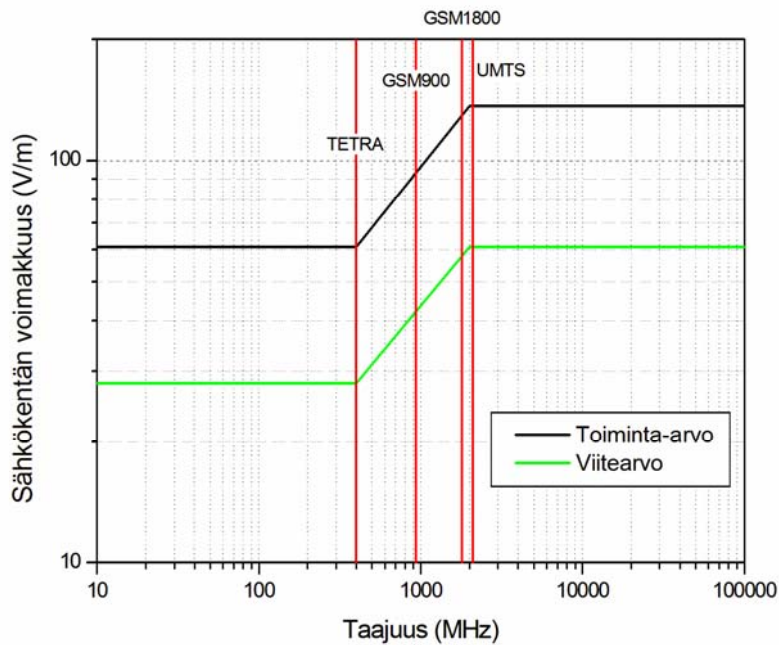
Eri matkapuhelinverkkojen taajuuksia vastaavat viite- ja toiminta-arvot sähkökentille ja tehotiheyksille on esitetty taulukossa 4.

Taulukko 4. Viite- ja toiminta-arvot eri matkapuhelinverkkojen taajuuksilla.

Verkko ja taajuus	Väestö		Työntekijä	
	E (V/m)	S (W/m ²)	E (V/m)	S (W/m ²)
TETRA, 400 MHz	28	2	61	10
GSM900, 935 MHz	42	4.6	92	23.4
GSM1800, 1800 MHz	58	9	127	45
UMTS, 2100 MHz	61	10	137	50



Kuva 1. Tehotiheyteen perustuvat toiminta- ja viitearvot



Kuva 2. Sähkökentän voimakkuuteen perustuvat toiminta- ja viitearvot

2.5 Kokonaisaltistumisen määrittäminen

Altistuttaessa eri taajuisille SM-kentille kokonaisaltistumiselle lasketaan suhdeluku, joka saadaan jakamalla mitatut tehotiheydet vastaavalla toiminta- tai viitearvolla ja summaamalla ne yhteen. Altistuminen on alle ohjearvojen suhdeluvun ollessa korkeintaan 1:

$$\sum_i^N \frac{S_{mitattu,i}}{S_{ohjearvo,i}} \leq 1, \quad (1)$$

missä $S_{mitattu,i}$ on mitattu tehotiheys ja $S_{ohjearvo,i}$ on kyseistä taajuutta vastaava toiminta- tai viitearvo. N on mitattujen taajuuksien lukumäärä.

Vastaavasti suhdeluku voidaan laskea myös mitatuista sähkökentän voimakkuuksista:

$$\sum_i^N \left(\frac{E_{mitattu,i}}{E_{ohjearvo,i}} \right)^2 \leq 1 \quad (2)$$

Suhdeluku voidaan myös ilmoittaa prosentteina (tai promilleina) sallitusta tasosta, jolloin suhdeluku 1 vastaa 100 % (tai 1000 ‰).

Näin laskettu suhdeluku perustuu pahimpaan mahdolliseen altistumistilanteeseen, jossa eri taajuuksille altistumisen oletetaan kumuloituvan.

2.6 Altistumisrajoitusten soveltaminen

Teleoperaattoreiden työntekijöiden sekä tukiasema-paikkojen huoltohenkilöstön altistumisarviointiin sovelletaan SM-direktiiviä. Ulkopuolisten työntekijöiden altistumista arvioitaessa on useissa tilanteissa vaikeutena päättää tulisiko arvioinnissa soveltaa SM-direktiiviä vai SM-asetusta. Tukiasemien antennit on usein sijoitettu talojen katoille, jonne työntekijät voivat päästä muissa kuin tukiasemiin liittyvissä työtehtävissä. Tällaisia työntekijöitä ovat mm. talonmiehet, kattotyöntekijät, ikkunanpesijät ja rakennusmiehet.

Tässä tutkimusprojektissa työntekijöiden katsottiin kuuluvan SM-direktiivin kohderyhmään, mikäli he täyttivät seuraavat ehdot:

I. Altistuminen liittyy työntekijän suorittamaan työtehtävään

II. Työntekijä tietää altistuvansa sähkömagneettisille kentille

III. Työntekijä ymmärtää näihin kenttiin liittyvät riskit

Näillä perusteilla esim. tukiaseman vierestä katolta lunta pudottava huoltomies kuuluu väestösuosituksen piiriin.

3 Matkapuhelinjärjestelmät

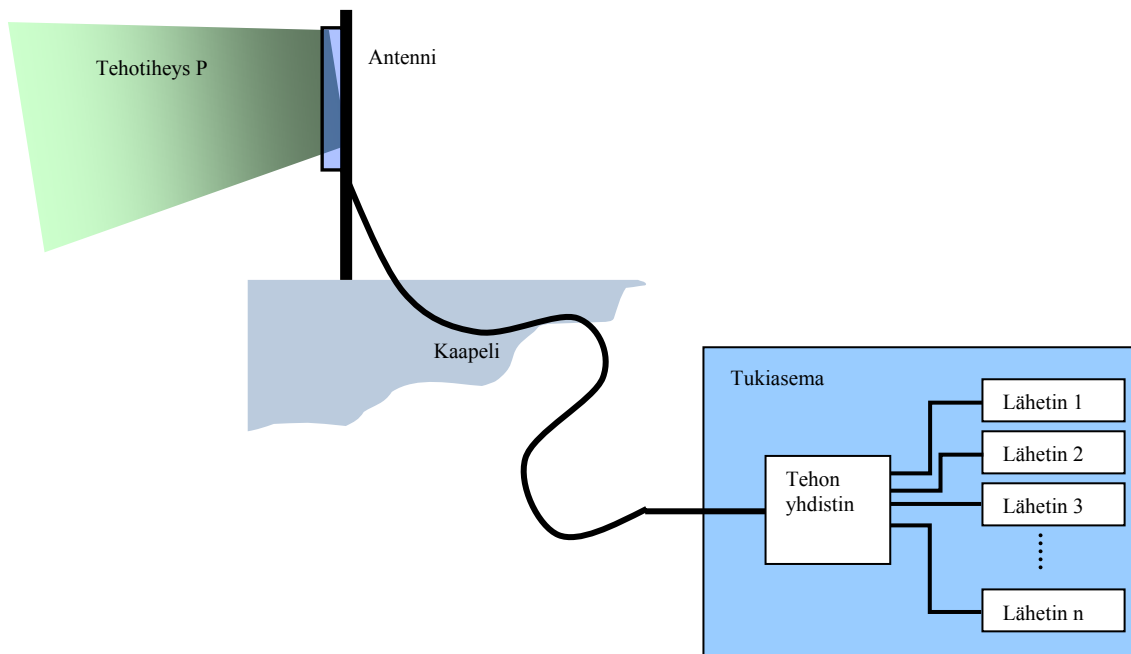
Tällä hetkellä yleisin digitaalinen matkapuhelinjärjestelmä Suomessa on GSM (Global System of Mobile Communications) , joka toimii 900 ja 1800 MHz taajuuksilla. GSM on toisen sukupolven järjestelmä samoin kuin TETRA (Terrestrial Trunked Radio), joka on erityisesti työntekijöille tarkoitettu systeemi. TETRA toimii Suomessa 400 MHz taajuusalueella. Viranomaisien käyttämä VIRVE-verkko perustuu TETRA-järjestelmään. TETRA-puhelimet ovat joko kannettavia tai kiinteästi ajoneuvoihin asennettuja, jolloin antenni on sijoitettu ajoneuvon ulkopuolelle. Kolmannen sukupolven järjestelmä UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) on yleistymässä Suomessakin ja se toimii taajuuksilla 1900 - 2200 MHz.

Tässä projektissa tutkittujen GSM-, TETRA- ja UMTS- matkapuhelinverkkoihin ja tukiasemiin liittyviä teknisiä ominaisuuksia on kuvattu tarkemmin liitteessä D.

3.1 Tukiasemien teknisiä ominaisuuksia

Tukiasema koostuu useasta osasta: yksinkertaistettuna lähettimestä, niiden tehon yhdistimestä ja antennista (Kuva 3). Tukiaseman radiotaajuinen signaali lähetetään antennien avulla haluttuun suuntaan. Antennin ja tukiaseman ominaisuudet vaikuttavat saavutettuun kuuluvuusalueeseen.

Tukiasemassa on yksi tai useampi lähetin, joiden yhdistetty teho syötetään antenniin. Lähetysteho pienenee systeemissä tapahtuvien tehohäviöiden takia. Häviöitä tapahtuu mm. lähettimien tehon yhdistimessä sekä varsinkin lähettimien ja antennin välisissä kaapeleissa. Antennin pääkeilan suuntaan ja voimakkuuteen vaikutetaan antennin mekaanisella suuntauksella ja antennien suunnittelulla. Koska tukiasemien antennit ovat useimmiten hyvin suunnattuja sektoriantenneja, tehotiheydet muualla kuin antennien edessä ovat pieniä.



Kuva 3. Yksinkertaistettu kaaviokuva tukiasemasta.

Antennin suuntauksen tehokkuutta vertailuantennin suhteen kutsutaan *antennin vahvistukseksi* (antenna gain). Mitä suurempi antennin vahvistus on, sitä suuremman osa tehosta antenni lähettää pääkeilan suuntaan. Antennin vahvistus on vertailuluku, joka ilmoitetaan desibeleinä (dB). Vertailu tapahtuu vastaavalla teholla lähettävään isotrooppiseen anteeniin, joka säteilee yhtä voimakkaasti joka suuntaan. Suuntaavan antennin pääkeilan tehotiheys saadaan kaavasta:

$$S = \frac{P \cdot 10^{\frac{G}{10}}}{4\pi r^2} \quad (3)$$

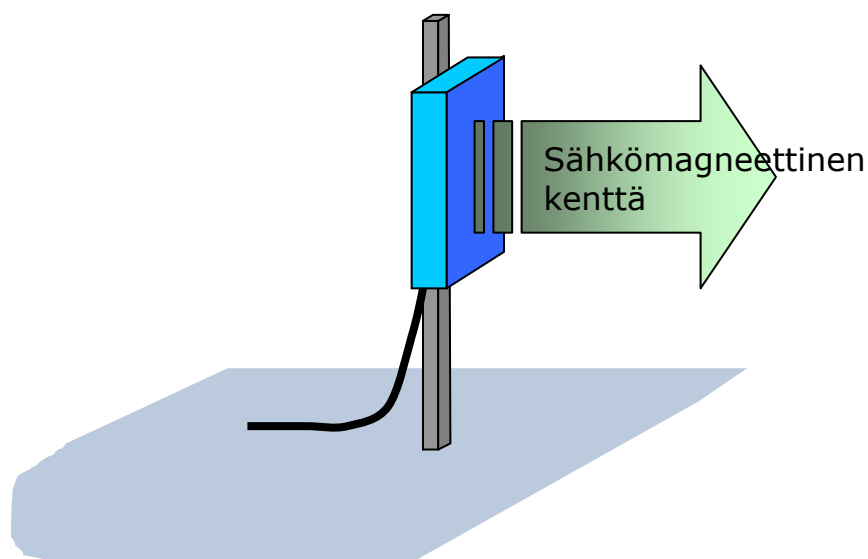
missä P on anteeniin syötetty kokonaisteho, G antennin vahvistus desibeleinä ja r etäisyys antennista.

Tehollinen isotrooppinen lähetysteho (Effective isotropically-radiated power, EIRP) ($= P \cdot 10^{\frac{G}{10}}$) on teho, jolla isotrooppinen antenni saa aikaan saman tehotiheyden kuin suuntaavan antennin pääkeilan tehotiheys on kyseisellä etäisyydellä. EIRP ottaa huomioon systeemin vaimennukset ja vahvistukset ja se ilmoitetaan usein desibeleinä milliwattien suhteen, jolloin 0 dBm on 1 mW. Tehollinen lähetysteho

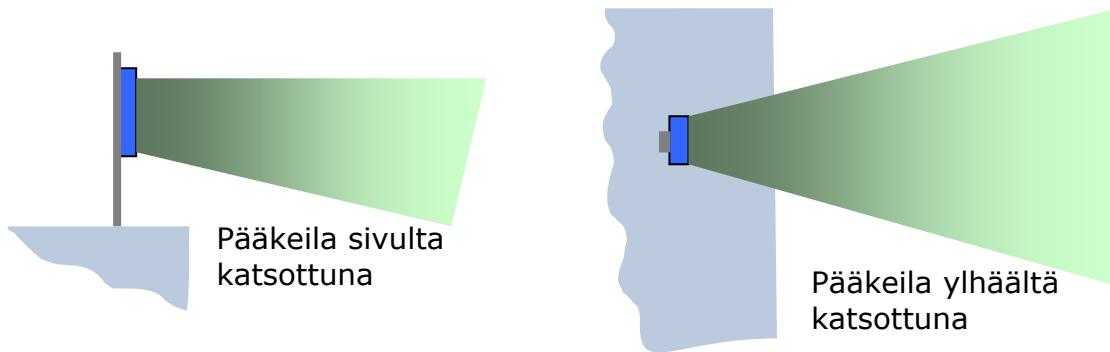
(Effective radiated power, ERP) ($=EIRP/1.64$) on määritelty vertaamalla suuntaavaa antennia puoliaaltodipoliin, jonka vahvistus on 2.15 dB (1.64). Käsitteitä EIRP ja ERP käytetään mm. lähettimien lupakäytännöissä. Esimerkiksi TETRA-teknologiaa käyttävän viranomaisradioverkon (VIRVE) tukiasemien tehollinen lähetysteho on pääsääntöisesti enintään 25 W ERP (22).

3.2 Antennit ja suuntakuviot

Nykyään lähes kaikki matkapuhelinverkkojen antennit ovat sektoriantenneja. Sektoriantennit on suunniteltu siten, että ne lähettävät radiotaajuista säteilyä ainoastaan tiettyyn suuntaan (Kuva 4). Kiinteistöissä olevat antennit kiinnitetään joko seinärakenteisiin tai talon katolle sijoitettavaan pylvääseen. Molemmissa tapauksissa sijoituspaikan tarkoituksena on saada antennille mahdollisimman hyvä peittoalue. Lähetysantennista näkyy ulospäin ainoastaan antennin suojakupu, radomi, josta lähetysteho suuntautuu eteenpäin. Antennin taakse, sivuille, ala- tai yläpuolelle ei suunnata lähetyksiä (Kuva 5). Korkeilla paikoilla olevien antennien suuntausta kohdistetaan yleensä hieman alaspäin, jotta kuuluvuus maantasolla olisi mahdollisimman hyvä. Tällöin pääkeila osuu maanpinnalle noin 50 - 300 m etäisyydellä antennista. Täten sähkömagneettiset kentät pääkeilan kohdalla ovat maantasolla erittäin pieniä. Pienempi-tehoisten matalalle sijoitettujen antennien pääkeilat osuvat maantasolle yleensä lähempänä antennia.

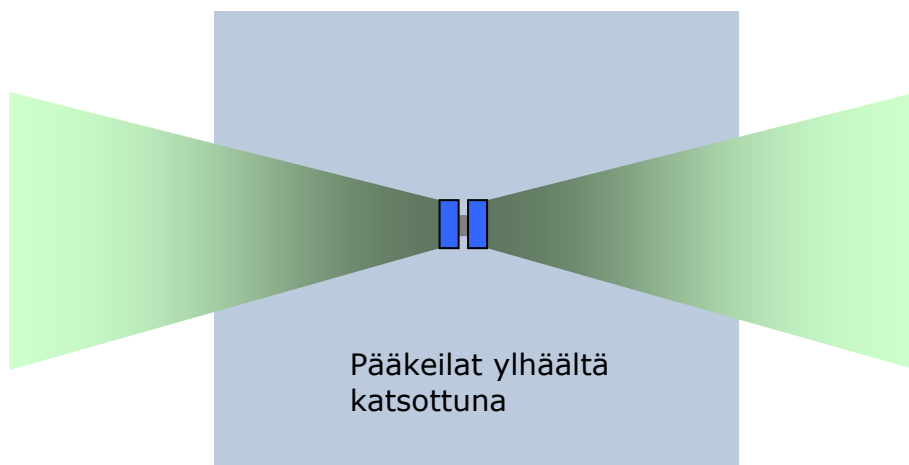


Kuva 4. Yksinkertaistettu kuva tukiasema-antennista.



Kuva 5. Antennin lähetyksen suuntaus.

Yksittäisen antennin lisäksi samaan pylvääseen voidaan kiinnittää useita antennia. Useamman antennin kentät toimivat kuten yhden antenninkin, eli ne suuntautuvat suoraan poispäin radomin pinnasta (Kuva 6).



Kuva 6. Kaksi antennia pylväässä. Lähetyksen suuntaus.

Kaikki antennit eivät lähetä jatkuvasti signaaleja, vaan osa antenneista on pelkästään vastaanottoa varten tai signaalit lähetetään vuorotellen useammasta antennista. Yleensä vastaanotto- ja lähetyksenantennit ovat samannäköisiä ja sijaitsevat vierekkäin (Kuva 8). Tällä järjestelyllä operaattorit pyrkivät parantamaan kuuluvuutta ja tehostamaan verkon käyttöä.

3.3 Tukiasemien jaottelu

Tukiasemat luokitellaan solukokoihin niiden tuottaman kuuluvuusalueen perusteella. Solun koko riippuu useasta tekijästä, kuten ympäröivästä maastosta, antennin suuntakuviosta ja tehosta, signaalin taajuudesta sekä antennin sijoituksesta. Tukiasemat luokitellaan makro-, mikro- ja pikosoluihin ja luokittelutapoja on useita erilaisia (Taulukko 5). Esimerkkejä eri solukokojen antennista on kuvissa 7-9.

Taulukko 5. Tukiasemien tyypillisiä solukokoja.

Solu	Kuuluvuusalue	Sijainti	Teho
Makrosolu	kilometrejä	Kattojen yläpuolella, mastoissa	kymmeniä watteja
Mikrosolu	100 - 1000 m	Katoilla ja seinillä	muutamia watteja
Pikosolu	< 100 m	Sisätiloissa, katutasolla	milliwatteja

Iso-Britanniassa toimiva matkapuhelinverkko-operaattoreiden etujärjestö MOA (Mobile Operators Association) määrittelee tukiasemien solukoot seuraavasti (14):

Makrosolut tuottavat matkapuhelinverkoille peruskattavuuden. Näiden solujen antennit on sijoitettu suuriin antennimastoihin, talojen katoille ja muihin korkeisiin rakennelmiin. Makrosolujen antennin sijoitetaan niin korkealle, että ympäröivät rakennelmat tai maasto eivät estä lähetyksiä.

Mikrosolut antavat lisää toimintakapasiteettia ja parantavat peittoaluetta, kun makrosolun alueella on katvealueita tai paljon käyttäjiä. Antennit sijoitetaan kattotasojen alapuolelle, katutasolle esimerkiksi rakennusten seiniin, lyhtypylväisiin tai muihin sopiviin kohteisiin. Tyypillisesti mikrosolujen toiminta-alue on makrosoluja pienempi ja ne sijoitetaan 300 - 1000 m välein.

Pikosolut toimivat mikrosoluja paikallisemmin ja ne sijoitetaan yleensä rakennusten sisälle sekä paikkoihin, joissa kuuluvuus on huono tai missä on paljon matkapuhelinverkkojen käyttäjiä. Tällaisia paikkoja ovat mm. lentokentät, juna-asemat ja ostoskeskukset.



Kuva 7. Matkapuhelinverkon antennija, makrosolu.



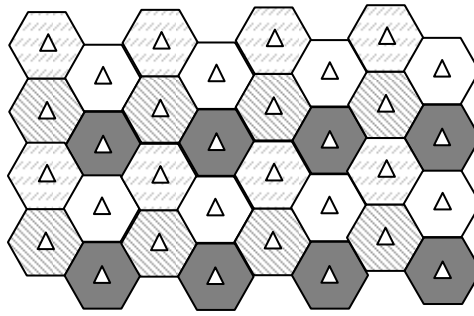
Kuva 8. Matkapuhelinverkon antennija, mikrosolu.



Kuva 9. Matkapuhelinverkon antenni, pikosolu.

Yksittäisen tukiaseman kuuluvuusalue voi parhaimmillaan olla muutamia kymmeniä kilometrejä. Toisaalta näin kattavia soluja ei kannata rakentaa kaupunkeihin tai muihin tiheästi asutettuihin keskuksiin, koska käyttäjien määrä voi ylittää verkon välityskapasiteetin. Samoin voi käydä hetkellisesti esimerkiksi suurissa yleisötapahtumissa matkapuhelimen käyttäjien määrän ollessa poikkeuksellisen suuri. Lisäksi kymmenien kilometrien päästä tukiasemalle tuleva signaali on yleensä liian heikko yhteyden muodostamiseen, vaikka matkapuhelin toimisi maksimitehollaan.

Soluja suunniteltaessa on myös otettava huomioon naapurisolun käyttämä taajuus. Koska kullekin verkolle on varattu rajallinen taajuusalue, liian voimakkaat GSM- tai TETRA-tukiasemat voivat häiritä naapuritukiasemien lähetyksiä. Yleensä taajuuksia kierrätetään siten, että vierekkäisillä tukiasemilla on eri taajuudet käytössä, jolloin päästään mahdollisimman tehokkaaseen taajuusalueen käyttöön. Yksinkertaistetussa esimerkissä (Kuva 10) esitetään neljän taajuuskaistan käyttöä matkapuhelinverkossa siten, että naapurisolut eivät käytä samaa kaistaa (2). UMTS eroaa GSM:stä ja TETRA:sta siten, että tukiasemat käyttävät samaa taajuuskaistaa ja signaalit erotellaan toisistaan koodauksella.



Kuva 10. Esimerkki taajuuskaistojen käytöstä matkapuhelinverkossa. Saman sävyiset solut käyttävät samaa taajuuskaistaa.

4 Mittauskohteet ja –menetelmät

4.1 Tutkimuskohteiden valinta

Matkapuhelinoperaattorilta saatujen yhteystietojen perusteella valittiin 12 tutkimukseen soveltuvaa kohdetta, joissa oli sijoitettuna yksi tai useampia GSM-, TETRA- tai UMTS-tukiasemia. Kyseisten tukiasemien antennit oli sijoitettu siten, että työntekijöillä on mahdollisuus joutua suoraan antennin pääkeilaan. Tukiasema-antennit sijaitsivat rakennusten katoilla tai seinillä. Tutkimukseen sisältyi myös kaksi telemastoa, joissa mittaukset tehtiin maston eri korkeuksilla.

Yksityiskohtaiset tiedot tutkimuskohteista on esitetty liitteessä A.

4.2 Mittaukset tukiasema-antennien lähellä

Tukiasemien antennien radiotaajuuskenttien aiheuttamaa altistumista mitattaessa etäisyys lähteestä kohteeseen on tärkeä tekijä. Kaukokentässä E- ja H-komponentit ovat kohtisuorassa toisiaan ja säteilyn etenemissuuntaa vastaan. Etäisyyden ollessa lyhyt verrattuna aallonpituuteen ollaan lähikentässä. Lähikenttä voidaan jakaa *reaktiiviseen lähikenttään* ja *säteilevään lähikenttään*. Tukiasemien taajuuksilla reaktiivinen lähikenttä on ainoastaan parin senttimetrin etäisyydellä antennista. Säteilevä lähikenttä on reaktiivisen lähikentän ja kaukokentän välissä. Sen komponenttien suhde toisiinsa riippuu etäisyydestä antennista.

Kaukokentässä tehotiheys (S) riippuu sähkökentän voimakkuudesta (E) ja magneettikentän voimakkuudesta (H) seuraavan kaavan mukaan:

$$S = \frac{E^2}{377} = 377H^2, \quad (4)$$

missä 377 Ω on tyhjän aaltoimpedanssi. Tehotiheys voidaan siis määrittää mittaamalla pelkästään sähkö- tai magneettikentän voimakkuus. Tällöin tehotiheys vastaa tasoallon ekvivalenttia tehotiheyttä.

4.3 Mittauslaitteet

Mittauksissa käytettiin sekä laajakaistaisia että kapeakaistaisia mittauslaitteita. Laajakaistaisilla ilmaisimilla tehtiin tehotiheyksien kartoitukset antennien ympärillä sekä mittaukset hyvin lähellä antennreja. Kaksoiskartioantennein varustetulla spektrianalysaattorilla määriteltiin eri taajuuksien osuus kokonaisaltistumisesta.

4.3.1 Laajakaistaiset ilmaisimet

Laajakaistaisten ilmaisimien hyvänä puolena on pieni koko ja mittausten nopeus. Mittaria on helppo käyttää yhdellä kädellä ja sillä voi kartoittaa nopeasti laajoja alueita. Heikkoutena on alhainen herkkyys, eli mittari ei pysty havainnoimaan pieniä kenttiä. Tässä tutkimuksessa käytetyt laitteet olivat kuitenkin riittävän herkkiä väestörajojen määrittämiseen. Laajakaistaista ilmaisinta käytettäessä mitattavan signaalin taajuutta ei tiedetä eikä laitteella voida myöskään mitata yksittäisiä taajuusalueita.



Kuva 11. Laajakaistamittari EMR-300.

Katoilla sijaitsevia tukiasemien antennreja mitattaessa käytettiin termoparimittapäätä (Narda tyyppi 33c), jonka taajuusalue on 300 MHz - 50 GHz ja mittausalue $0.17 - 1000 \text{ W/m}^2$ ($8 - 614 \text{ V/m}$). Mastomittauksissa käytettiin diodi-ilmaisinta (Narda tyyppi 8c), koska osa maston lähettimistä toimii alle 300 MHz taajuudella. 8c mittapään taajuusalue on 100 kHz - 3 GHz ja mittausalue $1 \text{ mW/m}^2 - 1700 \text{ W/m}^2$ ($0.6 - 800 \text{ V/m}$). Kentät mitattiin yksiköissä V/m, josta ne muutettiin ekvivalentiksi tehotiheydeksi.

Diodi-ilmaisimia käytettäessä on otettava huomioon niiden käyttäytyminen voimakkaissa kentissä. Ilmaisimien voi tällöin näyttää merkittävästi todellisuutta suurempia lukemia. Liitteessä E kuvataan tarkemmin diodi-ilmaisimien ominaisuuksia. Termopari-ilmaisimien kanssa vastaavaa ongelmaa ei ole, ja ne soveltuvatkin paremmin pulssitettujen kenttien mittaukseen.

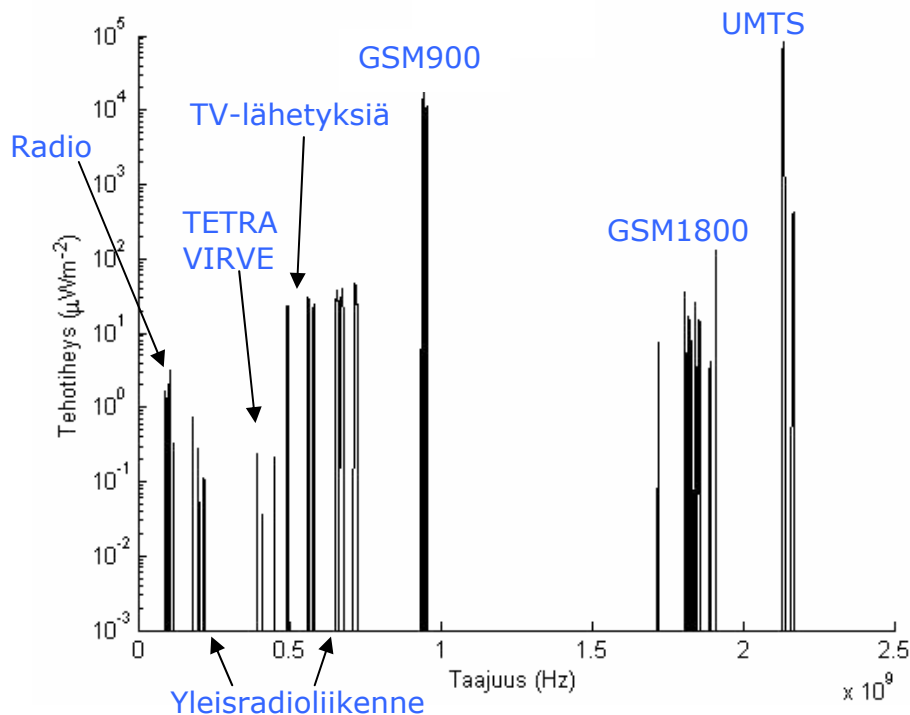
4.3.2 Spektrimittaukset

Kapeakaistaisissa mittauksissa käytettiin spektrianalysaattoria, johon oli liitetty erilaisia kaksoiskartioantenneja (Kuva 12). Laitteistoa ohjattiin kannettavan tietokoneen kautta. Kokoonpanon hyvänä puolena on sen suuri herkkyys, joka mahdollisti hyvin pienten signaalien havaitsemisen. Lisäksi mittaustilanne voitiin automatisoida täysin lukuun ottamatta antennin kääntämistä. Huonona puolena voidaan pitää laitteiston kokoa ja painoa, pelkkä analysaattori painaa noin 25 kg, minkä vuoksi laitteistoa ei voitu viedä kaikille mittauspaikoille. Lisäksi herkkyyden takia mittaussuuntaantenneja ei ole mahdollista viedä suoraan antennin eteen, koska analysaattori voi vahingoittua voimakkaasta sisääntulotehosta. Mittausten tekeminen koko taajuusalueella on hidasta, joten analysaattori ei sovellu laajojen kartoitusten tekemiseen.



Kuva 12. Kapeakaistamittauksia tukiasema-antennin vieressä.

Käytetty kapeakaistainen ilmaisinaliteisto koostui Agilent E4440A PSA spektrianalysoitsattorista ja kahdesta antennista. Analysoitsattorin taajuusalue on 3 Hz - 26.5 GHz. Antenneina käytettiin Schwarzbeck Mess kaksoiskartioantenneja SBA-9113 (0.5 - 3 GHz) ja VUBA-9117 (30 - 1000 MHz). Antennit ovat suuntaavia, joten kokonaiskentän mittaamiseksi oli tehtävä kolme mittausta toisiaan kohtisuoriin suuntiin. Antennit olivat kiinnitetty puiseen kolmijalkaan ja ne liitettiin spektrianalysoitsattoriin kalibroidun kaapelin kautta. Koko mittaus-tapahtumaa ohjattiin tietokoneen kautta. Tietokoneeseen syötettiin mitattavat taajuusalueet ja niille erikseen mm. resoluutio- ja videokaistanleveydet. Koska tallentavana muistina käytettiin tietokoneen kovalevyä, ei mittauksen määrällä ollut käytännössä ylärajaa. Antennien ja kaapeleiden kalibroitukertoimet syötettiin suoraan spektrianalysoitsattoriin, jolloin tietokoneeseen tallennettavat tulokset olivat valmiiksi kalibroituja. Resoluutio-kaistanleveytenä käytettiin 30 kHz TETRA-signaaleille, 200 kHz GSM-signaaleille ja 5 MHz UMTS-signaaleille. Muiden signaalien (Kuva 13) mittauksessa käytettiin resoluutiokaistanleveyttä, joka vastasi parhaiten ko. signaalin lähetyskaistanleveyttä.



**Kuva 13. Esimerkki mitatusta taajuusspektristä alueella
75 MHz - 2.5 GHz.**

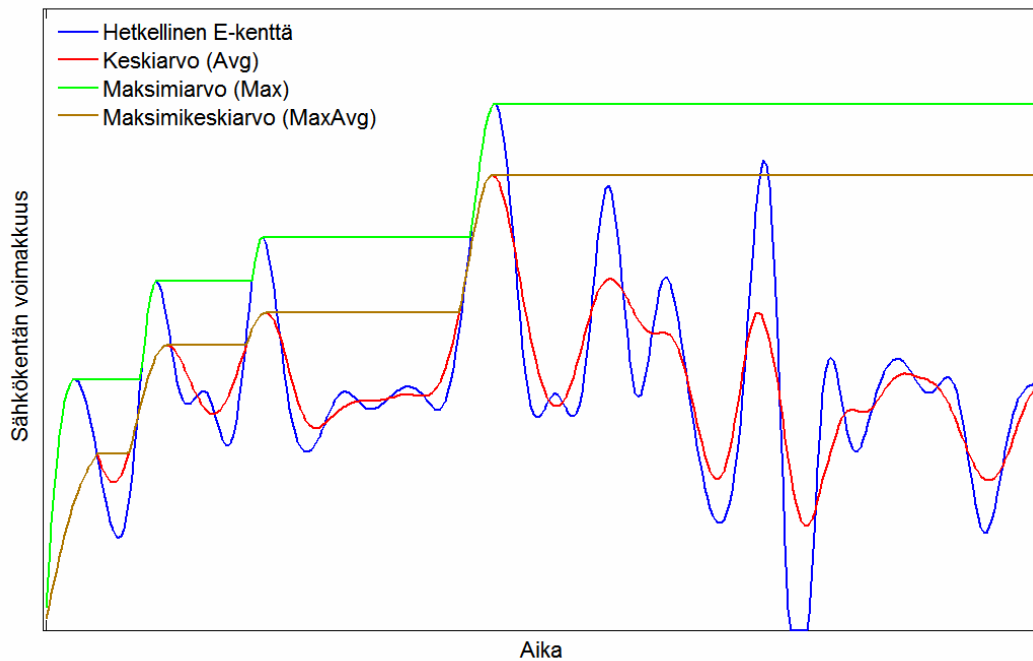
Tietokoneen ohjauksessa mitattiin analysaattorin *MaxHold*-asetuksella tietty ajanjakso, jonka jälkeen siirryttiin seuraavaan taajuusalueeseen. Yleensä kukin taajuusalue mitattiin 1000 pisteen tarkkuudella. Ohjelmassa oli lisäksi mahdollisuus yksittäisiin mittauksiin, joissa mitattiin hetkittäisiä spektrejä nopeudella noin 12 spektriä/sekunti. Lisäksi ohjelma pystyi mittaamaan tietyn taajuuden signaaleja ajan suhteen (nolla-kaistanleveys). Kentät mitattiin yksiköissä V/m, josta ne muutettiin ekvivalentiksi tehotiheudeksi (W/m^2).

4.4 Mittaustapa ja rajoitukset

Mittaukset suoritettiin soveltuvin osin ECC:n (Electronic Communication Committee) suosituksen mukaan (3). Yleensä pyrittiin käytännöllisiin mittaustilanteisiin, joiden pohjalta olisi mahdollista laatia kunkin antennipaikan riskiarviointi. Laajakaistailmaisinta käytettiin kartoittamaan tehotiheydet antennin ympärillä. Tavoitteena oli määrittää väestön ja työntekijöiden viite- ja toiminta-arvojen mukaiset suojaetäisyydet antennista. Mittalaitteen asetuksena käytettiin yleensä *Max*-asetusta, joka näyttää hetkellisen maksimiarvon mittausajalta. Mittari asetettiin mittauskohtaan ja lukema nollattiin. Mittaria pidettiin sen jälkeen 10-15 s paikallaan, jonka jälkeen mitattu arvo merkittiin muistiin. Direktiivin mukaan mittaukset tehdään kuuden minuutin keskiarvomittauksina. Tässä tutkimuksessa päädyttiin lyhyempiin jaksoihin, koska joissain tilanteissa mittaukset olisivat kestäneet jopa 13 tuntia (Kohde F). Maksimiarvon mittaaminen soveltuu riskinarviointiin, kun varovainen arvio on hyväksyttävä. Mittalaitteen keskiarvostus-toimintaa testattiin eräessä kohteessa (Kohde I), jolloin erot eri ajanjaksojen välillä osoittautuivat pieniksi. Mittauksiin liittyvät epävarmuudet on esitetty liitteessä C.

Laajakaistaisen EMR-300 mittarin eri asetusten vaikutusta lopputulokseen voidaan havainnollistaa yksinkertaistetulla kuvalla (Kuva 14). Kuvassa esitetään kuvitteellinen tilanne, jossa sähkökenttä vaihtelee satunnaisesti ajan mukaan (sininen viiva, normaali mittausasetus). EMR-300:n *MAX* asetusta antaa koko mittausajan suurimman hetkellisen arvon. *AVG* asetusta antaa asetetun ajanjakson keskiarvon jatkuvalla päivityksellä (punainen viiva) ja *MAXAVG* antaa mittausajanjakson suurimman keskiarvon. Ero maksimiarvon ja keskiarvon välillä riippuu mitattavasta signaalista. Jos GSM-tukiasemalla on vain vähän liikennettä ja ainoastaan BCCH-kanava on käytössä, maksimiarvo ja keskiarvo ovat lähes samat.

Toisaalta UMTS-tukiaseman lähetyssignaali vaihtelee hyvin paljon, jolloin maksimin ja keskiarvon ero on suuri. Jos mitataan lähdettä, joka ei lähetä jatkuvaa signaalia, kuten esimerkiksi TETRA-lähetin, voi MAX asetuksella mittaaminen aiheuttaa myös suuren eron keskiarvoon.



Kuva 14. EMR-300 mittarin asetusten vaikutus tulokseen. Sininen viiva on hetkellinen E-kenttä, joka muuttuu ajan mukaan.

Tukiasemapaikan eri taajuiset signaalit määritettiin spektri-analysointilaitteella. Kahdella kaksoiskartioantennilla mitattiin taajuusalue 75 MHz - 2500 MHz. Koko taajuusalue mitattiin yhteensä 16 eri kokoisina taajuuskaistoina. Kaistojen leveyteen vaikuttivat eri taajuuksilla lähetettävien signaalien ominaisuudet, lähinnä signaalin kaistanleveys. Kaikissa paikoissa pyrittiin tekemään 30 s MaxHold-mittaus koko taajuusalueelle. Mittauspaikaksi valittiin kohta, jossa analysointilaitteeseen tulevan signaalin teho ei ylittänyt analysointilaitteen ylintä sallittua sisääntulotehoa. Mittausantennin korkeus valittiin kunkin mittauspaikan mukaisesti, ja se vaihteli välillä 1.3 - 1.7 m. Spektri-mittauslaitteiston suuren koon vuoksi sitä ei voitu viedä kaikkiin kohteisiin. Tällaisissa kohteissa tehtiin vain laajakaistamittaukset.

Mittaukset tehtiin kolmessa toisiaan vastaan kohtisuorassa suunnassa. Valitut taajuusalueet mitattiin peräkkäin, jonka jälkeen antennin mittaussuuntaa vaihdettiin ja mittaukset toistettiin. Mittaustulokset tallennettiin V/m yksiköissä ja mittauksen lopussa ortogonaalisista spektreistä laskettiin resultanttispektri seuraavan kaavan mukaan:

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2}, \quad (5)$$

missä alaindeksit x , y ja z kuvaavat mittaussuuntia. Tarpeelliset kalibroitikertoimet syötettiin spektrianalyzaattoriin, jolloin tulokset ilmaisevat sähkökentän voimakkuuden yksikkönä V/m.

GSM- ja TETRA-antennien aiheuttamat signaalit pystytään erottamaan spektrimittauksilla tukiasemittain. Saman operaattorin UMTS-tukiasemat toimivat sen sijaan samalla 5 MHz taajuuskaistalla. Mitattaessa UMTS-signaalia tavallisella spektrianalyzaattorilla havaitaan siten kaikkien lähialueen tukiasemien synnyttämä teho-tiheyssumma. Työntekijöiden altistumisen määrittämiseen menetelmä soveltuu, koska halutaan tietää kokonaisaltistuminen. Voimakkain signaali tulee yleensä lähimmästä tukiasema-antennista.

5 Tulokset

Tukiasemien RF-kenttiä mitattiin 11 kiinteistön katolla ja kahdessa telemastossa. Kohteiden valinnassa kriteerinä oli antennien sijoitus siten, että työntekijät saattavat joutua työskentelemään antennien lähellä. Kuvaukset mittaushaasteista, mitatut tehotiheydet ja taajuuspektrit on esitetty liitteessä A. Tehotiheydet on esitetty watteina neliömetriä kohti (W/m^2). Taulukossa 6 on mittausten perusteella määritetyt suojaetäisyydet eri mittaushaasteissa. Liitteessä B on esitetty operaattorilta saatujen teknisten tietojen perusteella lasketut suojaetäisyydet.

Mittauksissa käytettiin sekä kapeakaistaista spektrimittaria että laajakaistaisia mittareita. Kapeakaistaisella mittauksella määritettiin eri taajuuskomponenttien voimakkuudet, ja laajakaistaisella mittarilla tehtiin laajempi kartoitus antennien ympärillä. Hyvin lähellä antennia tehdyissä mittauksissa muiden lähteiden sähkömagneettisella kentällä ei ole merkitystä mittaustulokseen, joten laajakaistamittaus kuvaa hyvin mitattavan antennin lähetystehoa.

Mittauksissa kartoitettiin antennien sijoittamisen vaikutusta tehotiheyksiin mahdollisilla työskentelyalueilla. Antennit voidaan jakaa kolmeen ryhmään katolla olevan sijoituspaikan mukaan. Ensimmäiseen ryhmään kuuluvat kattotasolle matalaan (<1.5 m) pylvääseen tai kulkureittien kohdalle seinään kiinnitetyt antennit. Esimerkkejä ovat kohteet B, C, D ja I. Toiseen ryhmään kuuluvat antennit on kiinnitetty katolla olevaan korkeaan pylvääseen (antennin alaosa yli 2 m korkeudella). Esimerkkejä ovat kohteet A, H ja I. Kolmanteen ryhmään kuuluvat antennit on kiinnitetty suoraan rakennusten seinärakenteisiin. Kolmannen ryhmän esimerkkejä ovat kohteet F ja K.

Monessa kohteessa ei pystytty määrittämään etäisyyttä, jolla työntekijöiden tai väestön suojaamiseen tarkoitetut tehotiheydet ylittyisivät. Näissä tapauksissa antennit oli useimmiten sijoitettu siten, että niiden eteen ei ole mahdollista päästä. Antennit olivat joko niin korkealla, että niiden lähetyskeila oli suunnattu mahdollisen työskentelyalueen yli tai ne oli kiinnitetty seinärakenteisiin kattotason alapuolelle. Kaikki taulukossa 6 esitetyt suojaetäisyydet vastaavat siten altistumista ensimmäisen ryhmän antennille.

Taulukko 6. Toiminta-arvojen ja viitearvojen mukaiset suojaetäisyydet antennien edessä.

Kohde	SM-direktiivi	SM-asetus	Kommentti
A	-*	-*	Antennit sijoitettu korkealle pylvääseen
B	1 m ‡	yli 1.5 m †	Antennit sijoitettu kehon korkeudelle keskellä tasakattoa
C	0.5 m	1.7 m	Antenni suunnattu katon yli pään korkeudella
D	0.3 m ‡	1.0 m	Antenni sijoitettu kehon korkeudelle lähelle tasakaton reunaa
E	-*	-*	Antenni sijoitettu pylvääseen 4.5 m korkeudelle
F	-*	-*	Antennien alaosat 2.45 m korkeudella.
G	0.5 m	yli 0.95 m †	Kalteva peltikatto
H	-*	-*	Lähetysantennit katolla olevassa korkeassa mastossa
I	0.3 m ‡	0.4 m	Useita eri tavoin sijoitettuja antennoja
J	-*	-*	Osa antenneista ei käytössä
K	-*	-*	Antennit sijoitettu ulkoseinälle kattotason alapuolelle
L	-*	ei sovelleta	Rajoitettu pääsy ainoastaan työntekijöillä

Huomautuksia: * Mittauslukemat olivat sallittuja tehotiheyksiä pienempiä.

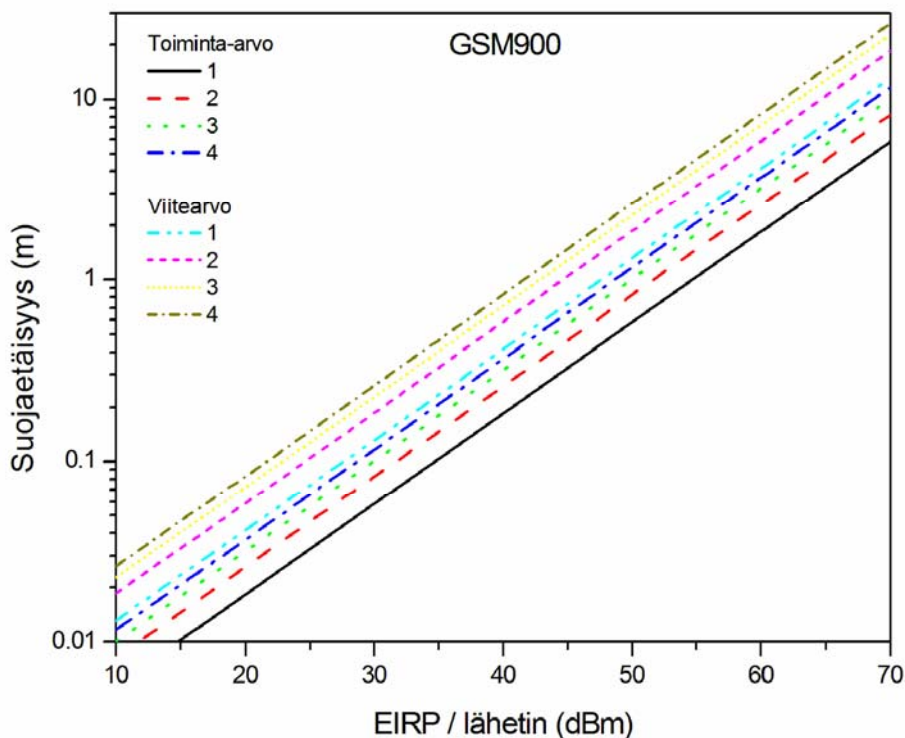
† Suurin etäisyys, jolla mittaukset pystyttiin suorittamaan.

‡ Pienin etäisyys, jolla mittaukset suoritettiin.

Taulukossa 6 on useassa kohdassa ilmoitettu työntekijöiden suojaetäisyydeksi pienin etäisyys, jolla mittaukset suoritettiin. Näissä tilanteissa mittauksia ei tehty kyseistä etäisyyttä lähempänä, koska haluttiin suojella mittalaitetta mahdollisilta ylijännitteiltä tai antennin sijoituksen takia se ei ollut tarpeen. Vastaavasti kahden suojaetäisyyden on ilmoitettu ylittävän mittausetäisyyden. Näissä tilanteissa kauimmainen mittauspiste oli katon reunalla.

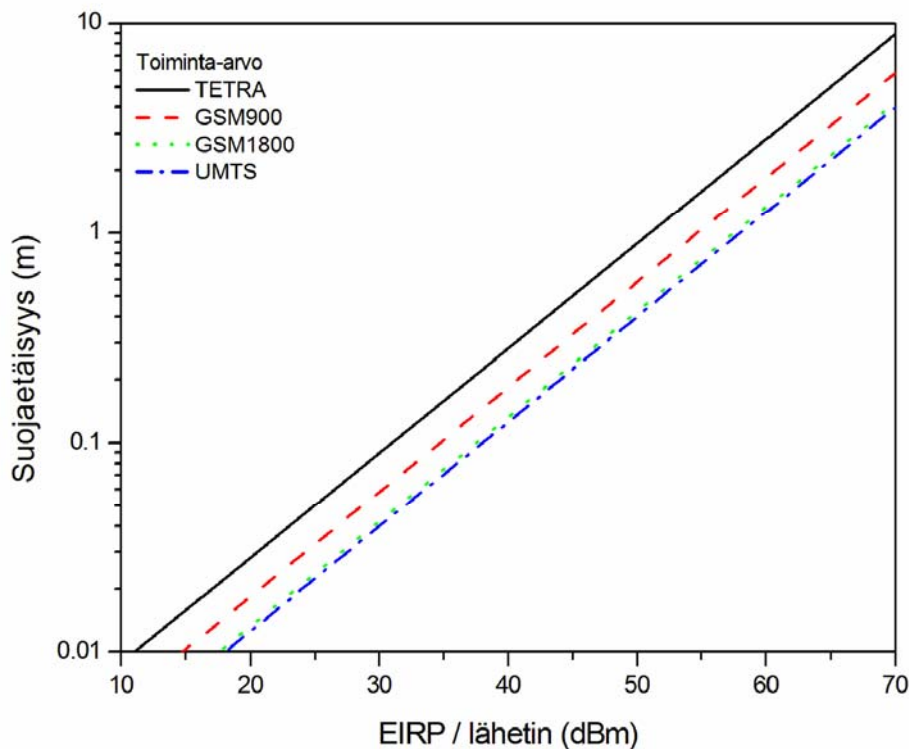
Mittaustulosten perusteella tukiasemien antennien pääkeilat ovat hyvin suunnattuja, ja radiotaajuisten kenttien tehotiheys muihin suuntiin on pieni. Mittaustulokset osoittivat tehotiheyksien jäävän selvästi väestön viitearvojen alapuolelle suoraan antennin alapuolella, antennien sivuilla, takana ja yläpuolella.

Useat tukiasemapaikat ovat eri operaattoreiden yhteiskäytössä, eikä yksittäisissä antennissa ole merkintää operaattorista. Koska mitattuja antennia ei voida yksiselitteisesti liittää operaattoreilta saatuihin teknisiin tietoihin, niiden perusteella laskettuja ja tässä tutkimuksessa mitattuja suojaetäisyyksiä ei voida suoraan verrata keskenään. Kuvassa 15 on esitetty GSM900-antennin edessä eri lähetintehoilla laskettuja suojaetäisyyksiä, joita lyhyemmillä etäisyyksillä työntekijöille asetetut toiminta-arvot ja väestön viitearvot ylittyvät. Etäisyydet on laskettu liitteen B kaavan 6 mukaisesti.



Kuva 15. Eri lähetintehoja vastaavat lasketut suojaetäisyydet GSM900-antennin edessä.

Kuvassa 16 on esitetty eri matkapuhelinverkoille lasketut toiminta-rajojen mukaiset suojaetäisyydet.



Kuva 16. Lasketut suojaetäisyydet antennista toiminta-arvojen mukaan.

Mastokohteissa (kohde L) tehotiheys mitattiin tikapuiden kohdalta 4 s keskiarvona. Mittausten perusteella mastoissa olevien lähettimien aiheuttamat tehotiheydet ovat selvästi alle työntekijöiden toiminta-arvojen. Myöskään huippuarvot eivät ylittäneet toiminta-arvoja. Mittaus kuvaa kuitenkin lähettimien tehotiheyksiä ainoastaan mastojen nousureitin kohdalla. Huoltomiehet liikkuvat kuitenkin muuallakin mastossa, jolloin altistuminen saattaa olla merkittävästi suurempaa. Tällainen tilanne saattaa tulla esimerkiksi tarkastettaessa maston pulttien kireyttä, jolloin huoltomiesten on liikuttava maston kaikissa osissa.

6 Päätelmät

Tähän tutkimukseen sisältyneiden tukiasemien voidaan katsoa edustavan hyvin nykyistä rakennusten katoille sijoitettua tukiasemaverkostoa. On kuitenkin mahdollista, että käytössä on myös huomattavasti suuritehoisempia tukiasemia. Siten tässä raportissa esitetyt suojaetäisyydet koskevat vain mitattujen antennien teholuokkia eikä niitä voi sellaisenaan suoraan rinnastaa koskemaan suuritehoisempia tukiasemia.

Mitattujen GSM- ja UMTS-tukiasema-antennien edessä suojaetäisyys työntekijöille on noin 1 m ja väestölle noin 2 m. Erityisesti on huomioitava, että suojaetäisyydet tarkoittavat etäisyyttä antennin pääkeilan suuntaan. Muihin suuntiin suojaetäisyys molemmille ryhmille on alle 0.5 m.

Tutkitut TETRA-antennit oli sijoitettu niin korkealle tai muuten vaikeasti saavutettavaan paikkaan, että niille ei voitu määrittää suojaetäisyyksiä mittausten perusteella.

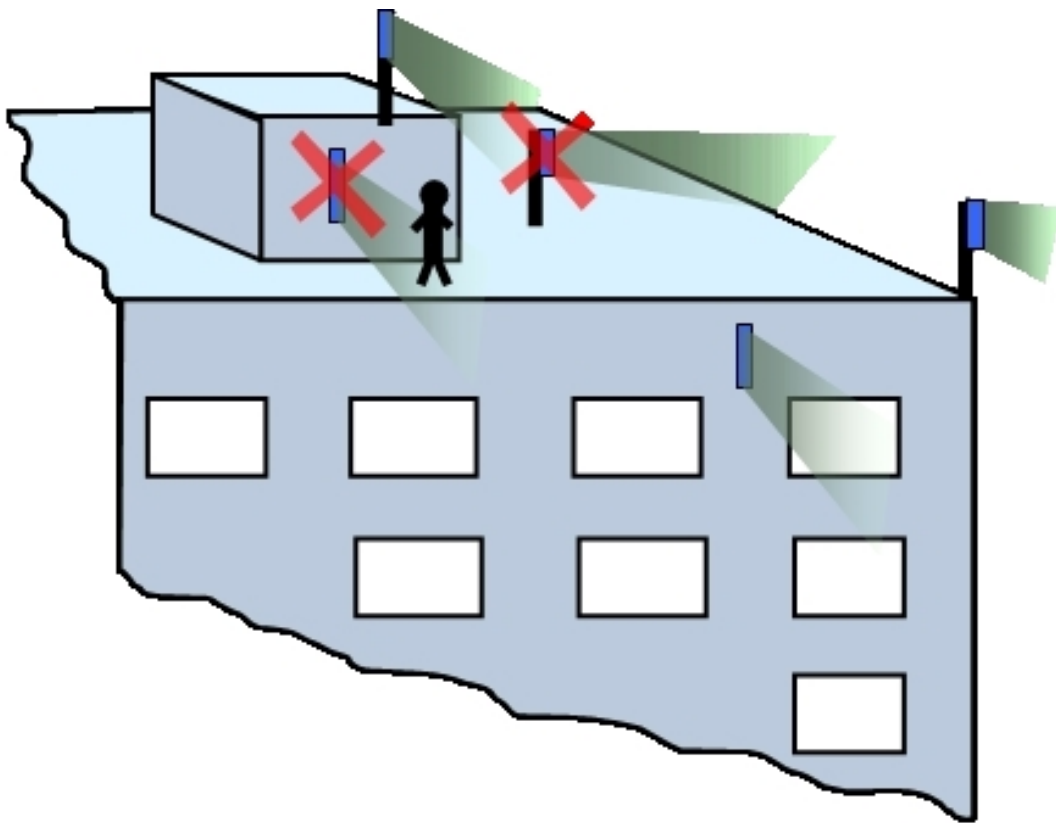
Mittaukset suoritettiin arkipäivisin kello 9.00 - 15.00, joten tulokset vastaavat normaalia työaikaa. Tukiasemien antennien läheisyydessä mitattiin hetkellinen maksimiteho, joka antaa suuremman arvon kuin kuuden minuutin keskiarvostettu mittausta. Toisaalta tukiasemien liikenteen määrästä ei ole tietoa mittaushetkellä, joten mittaukset on saatettu tehdä hiljaisena hetkenä. Maksimiarvon mittaaminen antaa siten varovaisen arvion altistumisesta. Tukiasemien antennit on yleensä sijoitettu lähelle toisiaan, joten mittaustulokset kuvaavat enemmän kokonaisaltistumista kuin yksittäisen antennin aiheuttamaa tilannetta eikä teoreettisia laskelmia voida suoraan verrata mittaustuloksiin.

Sähkömagneettisten kenttien viite- ja toiminta-arvot riippuvat kenttien taajuudesta, joten mittaustilanteessa on tiedettävä mihin verkkoon tutkittava antenni kuuluu. Mittaustilanteissa sitä tietoa on usein vaikea saada, eikä GSM900/1800- tai UMTS-antenneja voida tunnistaa rakenteen perusteella. Laajakaistaisella mittarilla tehtyihin mittaustuloksiin sovellettiin mahdollisia lähetystaajuuksia vastaavaa pienintä viite- tai toiminta-arvoa. Useimmiten tämä tarkoitti GSM900-verkon taajuudelle esitettyjä rajoja.

Mastokohteiden tulokset kuvaavat kentänvoimakkuuksia maston tikkaiden kohdalla eri korkeuksilla. Työntekijän liikkuesssa maston eri osissa huoltotehtävien takia altistumistasot voivat vaihdella merkittävästi. Suoritetuissa kahdessa mastomittauksessa mittarin rekisteröimä tehotiheyden maksimiarvo oli yli kaksi kertaa suurempi kuin tikkailla paikallisesti mitattu maksimiarvo. Mastotyössä tapahtuvan altistumisen selvittämiseksi olisi tarpeellista suorittaa lisätutkimuksia.

Teleteknologian jatkuvan kehityksen myötä antennija tukiasemia rakennetaan yhä enemmän. Antennien oikealla sijoittamisella voidaan välttää työntekijöiden tai sivullisten henkilöiden altistuminen toiminta- tai viitearvot ylittävälle kentille. Antennin sijoittamiseen vaikuttavia seikkoja on useita, mm. solun haluttu kuuluvuusalue, rakennus ja sen ympäristö sekä rakennuksen omistajan vaatimukset antennin näkymättömyydestä. Turvallisen solusuunnittelun pääsääntö on suunnata ja sijoittaa antennit siten, että pääsy niiden eteen on estetty. Käytännössä tämä tarkoittaa antennien sijoittamista korkealle pylväisiin, katon reunaan suunnattuna poispäin kattotasolta tai rakennusten seinille kattotasoa matalammalle. Antenneja ei tulisi sijoittaa keskelle kattoa matalaan tankoon, koska katolla liikkuvien henkilöiden kulkureitit voivat osua näin sijoitettujen antennien eteen (Kuva 17). Hetkellinen altistuminen raja-arvot ylittävälle kentille ei kuitenkaan aiheuta 6 minuutin keskiarvon ylittymistä, jos kentän voimakkuudet ovat pääosin sallittuja arvoja pienempiä.

Tietyissä tehtävissä työntekijä voi kuitenkin joutua olemaan tukiasema-antennien edessä. Tällaisiin tilanteisiin voivat joutua esimerkiksi palomiehet, ikkunanpesijät ja rakennustyöntekijät. Jos työntekijä on tietoinen antennista, hän voi pyrkiä rajoittamaan oleskeluaan antennien välittömässä läheisyydessä. Sen sijaan jos antennit on häivytetty taustaan maalaamalla ne seinän väriseksi, niitä on vaikea havaita.



Kuva 17. Tukiaseman antennien suositeltava sijoittaminen rakennuksissa.

7 Viitteet

- 1 Bornkessel C, Wuschek M. Results of a Measurement Campaign in the Vicinity of GSM and UMTS Base Stations in the City of Berlin. In Proceedings of the COST281 Workshop on RF Exposure Assessment, Paris. 2004.
- 2 Cooper T G , Mann S M , Khalid M, and Blackwell R P. Exposure of the General Public to Radio Waves near Microcell and Picocell Base Stations for Mobile Telecommunications, NRPB-W62. Chilton, UK, NRPB, 2000.
- 3 European Conference of Postal and Telecommunications Administrations (CEPT). Measuring non-ionising electromagnetic radiation (9 kHz - 300 GHz), Edition October 2003, Revised ECC recommendation (02)04.
- 4 European Telecommunications Standards Institute. Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); Base Station (BS) radio transmission and reception (FDD) (3GPP TS 25.104 version 6.5.0 Release 6). Technical Specification ETSI TS 125 104 V6.5.0 (2004-03). Sophia Antipolis, France, ETSI.
- 5 European Telecommunications Standards Institute. Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); Radio transmission and reception (3GPP TS 45.005 version 5.7.0 Release 5). Technical Specification ETSI TS 145 005 V5.7.0 (2003-02). Sophia Antipolis, France, ETSI.
- 6 European Telecommunications Standards Institute. Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); Radio subsystem link control (3GPP TS 45.008 version 6.14.0 Release 6) Technical Specification ETSI TS 145 008 V6.14.0 (2005-09). Sophia Antipolis, France, ETSI.
- 7 European Telecommunications Standards Institute. Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); Physical layer - general description (3GPP TS 25.201 version 6.2.0 Release 6) Technical Specification ETSI TS 125 201 V6.2.0 (2005-06). Sophia Antipolis, France, ETSI.

- 8 European Telecommunications Standards Institute. Terrestrial Trunked Radio (TETRA); Voice plus Data (V+D); Part 2: Air Interface (AI). Technical Specification ETSI TS 100 392-2 V2.5.1 (2005-07). Sophia Antipolis, France, ETSI.
- 9 Euroopan Unionin neuvosto. Neuvoston suositus väestön sähkömagneettisille kentille (0 Hz - 300 GHz) altistumisen rajoittamisesta, Euroopan yhteisöjen virallinen lehti L199/59.
- 10 Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2004/40/EY. Terveyttä ja turvallisuutta koskevista vähimmäisvaatimuksista työntekijöiden suojelemiseksi altistumiselta fyysikaalisista tekijöistä (sähkömagneettiset kentät) aiheutuville riskeille. Euroopan unionin virallinen lehti L184/1.
- 11 GSM, GPRS, and edge performance: evolution towards 3G/UMTS. Edited by Timo Halonen, Javier Romero, Juan Melero, 2nd ed., John Wiley & Sons Ltd, Chichester, West Sussex, England, 2003.
- 12 Guidelines for limiting exposure to time-varying electric-, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz). Health Physics 74(4):494-522.
- 13 Line, P., et al. Levels of Radiofrequency Radiation from GSM Mobile Telephone Base Stations. Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency, Technical Report 129, 2000.
- 14 Mobile Operators Association. Base Stations and Masts, www.mobilemastinfo.com, 2005.
- 15 Mann, S M, Cooper T G, Allen S G, Blackwell R P, Lowe A J. Exposure to Radio Waves Near Mobile Phone Base Stations, NRPB-R321. Chilton, UK, NRPB, 2000.
- 16 Possible Health Effects from Terrestrial Trunked Radio (TETRA). Report of an Advisory Group on Non-Ionising Radiation. National Radiation Protection Board, Docs NRPB 12(2), 2001.
- 17 Sosiaali- ja terveysministeriön päätös ionisoimattoman säteilyn altistuksen enimmäisarvoista. 1474/1991.

- 18 Sosiaali- ja terveysministeriön asetus ionisoimattoman säteilyn väestölle aiheuttaman altistumisen rajoittamisesta. 294/2002.
- 19 United Kingdom Accreditation Service. LAB34 Edition 1, The expression of Uncertainty in EMC Testing, Teddington, Middlesex, UK, August 2002.
- 20 United Kingdom Accreditation Service. M3003 Edition 1 The expression of Uncertainty and Measurement, Teddington, Middlesex, UK, December 1997
- 21 Uddmar, T. RF Exposure from Wireless Communication. Dept of Electromagnetics. Chalmers University of Technology, Göteborg, 1999.
- 22 Viestintävirasto. Radiotaajuusmääräys 4 F/2005 M ja liitteenä oleva taajuusjakotaulukko (9 kHz–400 GHz), www.ficora.fi, 8. maaliskuuta 2005.

Liite A Tukiasemien kohdekuvaukset ja mittaustulokset

Liitteessä on yhteenveto tukiasemilla tehdyistä RF-kenttien mittauksista ja tukiasemien teknisistä tiedoista. Kustakin kohteesta on piirretty kartta, johon on merkitty antennien ja mittauspisteiden sijainnit ja laajakaistailmaisimella tehtyjen mittausten järjestysnumerot. Tulokset on esitetty taulukoissa tai tehotiheydet on merkitty suoraan luonnoskarttoihin. Mittaustulokset ilmoitetaan pääsääntöisesti yksikkönä W/m^2 .

Jokaisessa kohteessa mitattiin kentänvoimakkuuksia laajakaistamittareilla. Laajakaistamittausten tulokset ovat hetkellisiä huippuarvoja ellei toisin mainita. Useissa kohteissa tehtiin myös spektrianalyysi taajuusalueella 75 - 2500 MHz. Spektrianalyysissä käytettiin analysaattorin ns. maxhold-ominaisuutta, jolloin analysaattori rekisteröi tietyn ajanjakson aikana suurimmat signaalit mitatuilla taajuuksilla. Useimmiten käytettiin 30 s mittausaikaa.

Saatuja tuloksia verrattiin Euroopan Unionin SM-direktiivissä annettuihin toiminta-arvoihin ja Euroopan neuvoston suositukseen väestön altistumisrajoista. Laajakaistamittarilla tehtyjä mittauksia verrattiin suoraan edellä mainittuihin raja-arvoihin. Sen sijaan spektrianalysaattorilla tehtyjen mittausten perusteella laskettiin suhteellinen altistumiskerroin.

A1 Kohde A

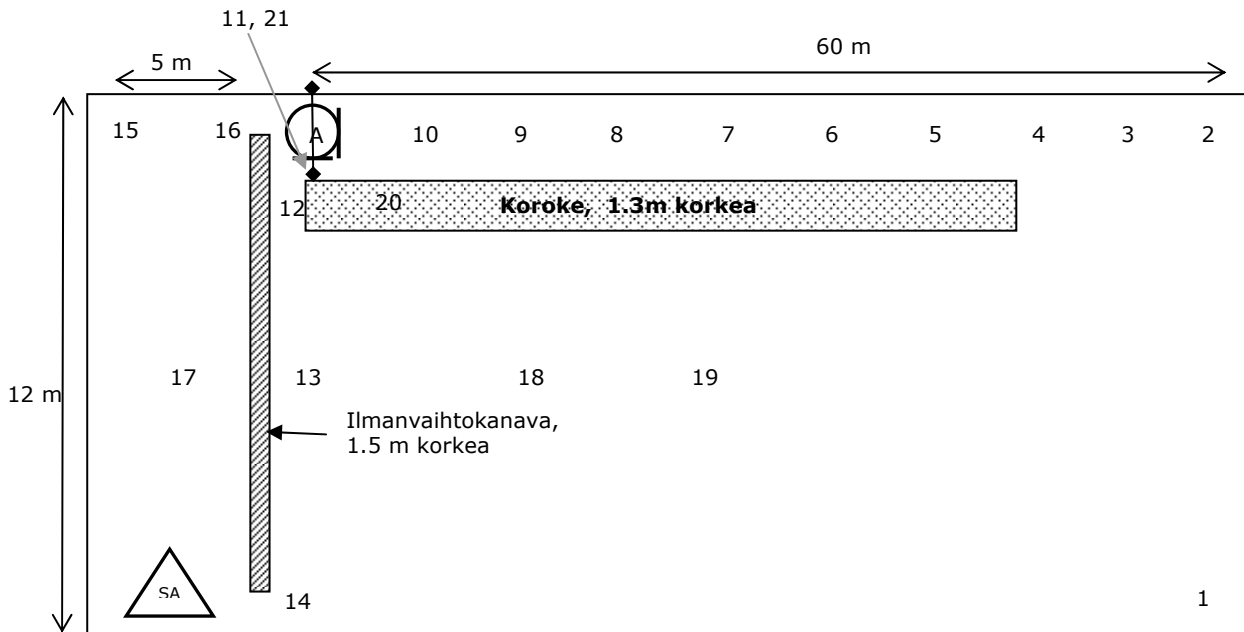
A1.1 Kohdekuvaus

Tukiaseman antennit oli sijoitettu teollisuusalueella sijaitsevan tasakattoisen rakennuksen katon reunalla olevaan pylvääseen. Pylvääseen oli sijoitettu neljä antennia, joista alimman alaosa oli 3.5 m korkeudella katon tasosta suunnattuna katon ylitse. Kaksi muuta antennia oli sijoitettu alemman antennin yläpuoliseen, vaakatasossa olevaan putkeen suunnattuna 90° kulmaan katon yli (Kuva 18). Rakennuksen katolle johtava ovi oli lukittu.

Kentänvoimakkuusmittaukset suoritettiin laajakaistamittarilla 1.7 m korkeudella katosta. Spektrianalysaattorilla mittaukset tehtiin noin 14 m etäisyydellä antenneista katon toisella puolella. Mittausantenni oli tällöin 1.7 m korkeudella.



Kuva 18. Tukiaseman antenni kohteessa A.



A= tukiasema antenni, SA = spektrianalysaattorin antenni

Kuva 19. Luonnoskartta kohteen A kattotasanteesta. Numeroitujen mittauspaikkojen tulokset ovat taulukossa 7.

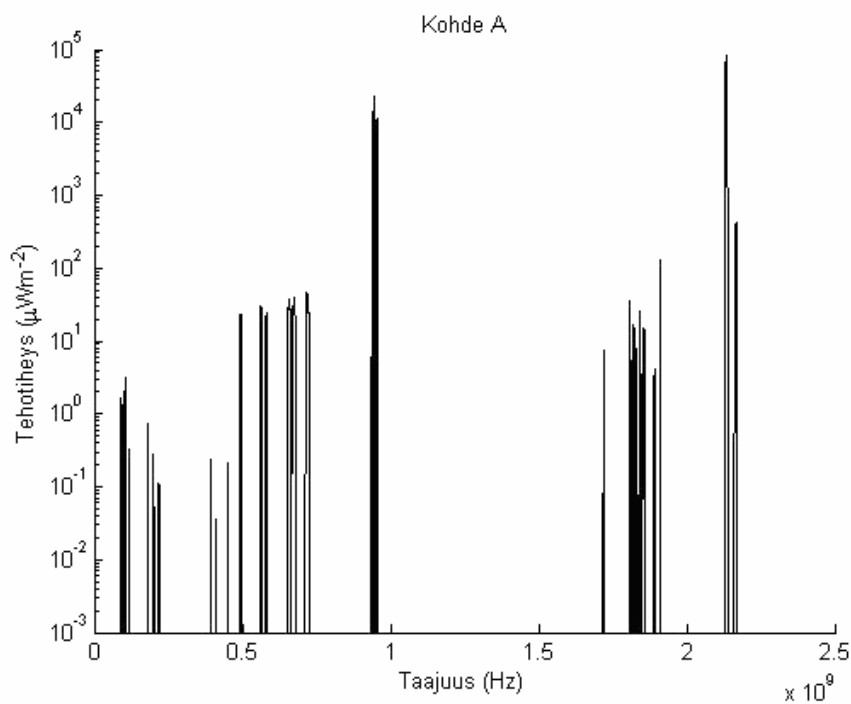
A1.2 Tulokset

Spektrimittaukset taajuusalueella 75 - 2500 MHz tehtiin yhdessä paikassa noin 14 metrin etäisyydellä antennipylvästä. Spektrissä näkyvä voimakas UMTS-signaali johtui todennäköisesti viereisen talon katolla olleesta tukiasemasta. Koko taajuusalueen yli laskettu kokonaisaltistuminen oli työntekijöille 0.5 % ja väestölle 2.5 % sallituista kentänvoimakkuuksista.

Normaalin 1.7 m mittauskorkeuden lisäksi paikoissa 20 ja 21 (Kuva 19) mittauksia tehtiin eri korkeuksilla. Paikassa 20 mittaus tapahtui korokkeen päältä noin 5 m etäisyydellä antennista. Mittaus tehtiin lähetyksantennin tasolla, jolloin tulos oli 0.68 W/m^2 . Paikassa 21 mittaus tehtiin 0.5 m lähetyksantennin alapuolelta, jolloin tulos oli 0.77 W/m^2 . Laajakaistamittaukset osoittivat kentänvoimakkuuksien olevan selvästi alle yleisön viitearvojen kaikkialla katolla. Tämä johtuu antennien sijoituksesta korkeaan pylvääseen, jolloin säteilykeila suuntautuu kattotasanteen ylitse.

Taulukko 7. Kohteen A laajakaistamittausten tulokset.

Paikka	Tehotiheys (Wm^{-2})
1	0.07
2	0.07
3	0.17
4	0.21
5	0.21
6	0.32
7	0.27
8	0.21
9	0.24
10	0.27
11	0.27
12	0.27
13	0.28
14	0.28
15	0.32
16	0.34
17	0.38
18	0.22
19	0.18



Kuva 20. Mitattu spektri kohteessa A.

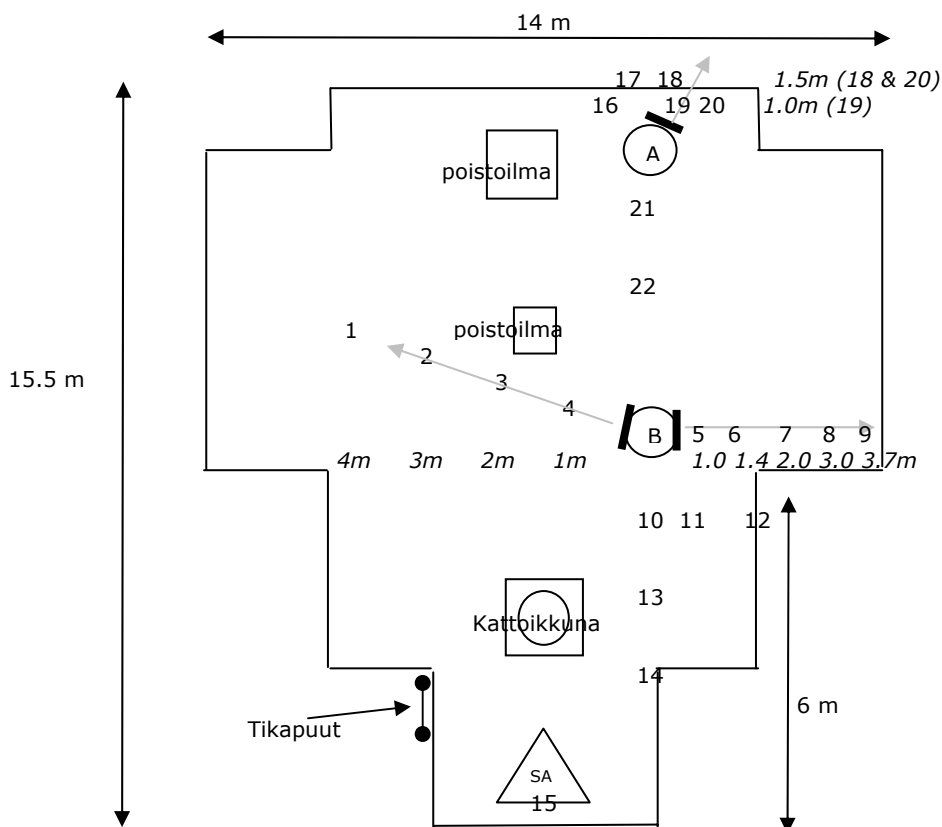
A2 Kohde B

A2.1 Kohdekuvaus

Tukiaseman antennit oli sijoitettu asuinrakennuksen katolle lyhyeen pylvääseen (Kuva 21). Rakennuksen katto oli kaksitasoinen, ja päästäkseen korkeammalle tasolle, jossa antennit sijaitsivat, oli käytettävä tikkaita. Kohde oli ympäristön korkein rakennus. Kaksi antennista oli keskellä kattoa ja katon reunalle sijoitettu kolmas antenni oli suunnattu poispäin katolta. Antennit olivat noin 1.2 m korkeita. Paikalla suoritettiin laajakaistamittauksia useissa kohdissa ja koko taajuusalueen spektrikartoitus noin kuuden metrin etäisyydellä pylväästä, jossa oli kaksi antennia. Katolle johtava ovi oli lukittu.



Kuva 21. Tukiaseman antennit kohteessa B.



Kuva 22. Luonnoskartta kohteen B kattotasanteesta. Numeroitujen mittauspisteiden tulokset ovat taulukossa 8 .

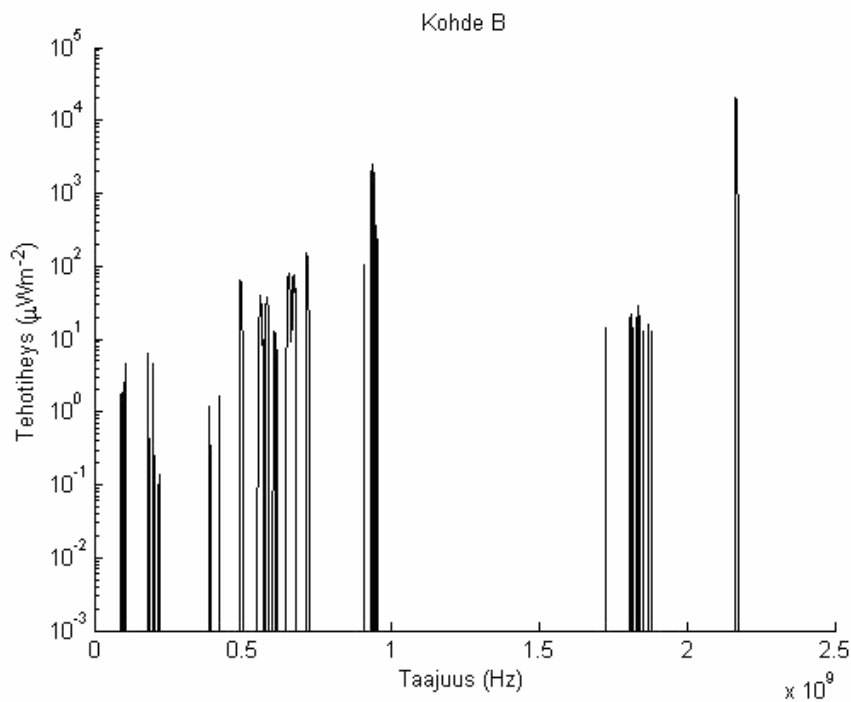
A2.2 Tulokset

Työntekijöille sovellettavat toiminta-arvot eivät ylittyneet yli 1 metrin etäisyyksillä antennista laajakaistamittausten perusteella. Antennin A (Kuva 22) aiheuttamat tehotiheydet ylittivät väestön viitearvot katon reunalla 1.5 m etäisyydellä antennista.

Spektrianalyysi tehtiin paikassa, joka ei ollut antennien lähetyскеilan edessä. Etäisyys lähimpään antenniin oli noin 6 m. Koko taajuusalueen yli laskettu kokonaisaltistuminen oli työntekijöille 0.09 % toiminta-arvoista ja yleisölle 0.4 % viitearvoista.

Taulukko 8. Kohteen B laajakaistamittausten tulokset.

Paikka	Tehotiheys (Wm^{-2})
1	0.50
2	0.72
3	1.23
4	1.88
5	3.07
6	2.82
7	2.05
8	1.11
9	0.97
10	0.12
11	0.11
112	0.15
13	0.15
14	0.18
15	0.14
16	0.56
17	1.53
18	7.59
19	12.56
20	5.86
21	0.12
22	0.18



Kuva 23. Mitattu spektri kohteessa B.

A3 Kohde C

A3.1 Kohdekuvaus

Tukiaseman antenni oli sijoitettu asuintalon katon reunalle lyhyeen pylvääseen. Pylväässä oli kaksi antennia, joista toinen oli suunnattu pois katolta ja toinen katon yli. Katolle johtava ovi oli lukittu.

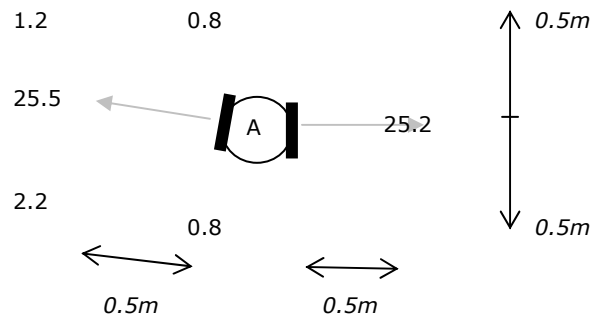
Tässä kohteessa mittauksia suoritettiin vain laajakaistamittarilla. Mittauksia tehtiin usealla eri korkeudella, joista laajimmat 1.7 m korkeudella (Kuvat 27 ja 28).



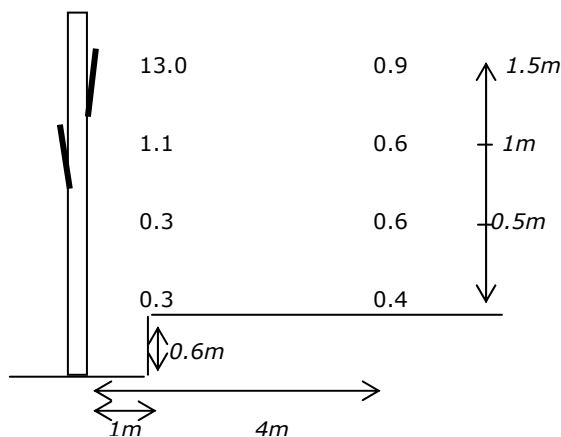
Kuva 24. Tukiaseman antennit kohteessa C.

A3.2 Tulokset

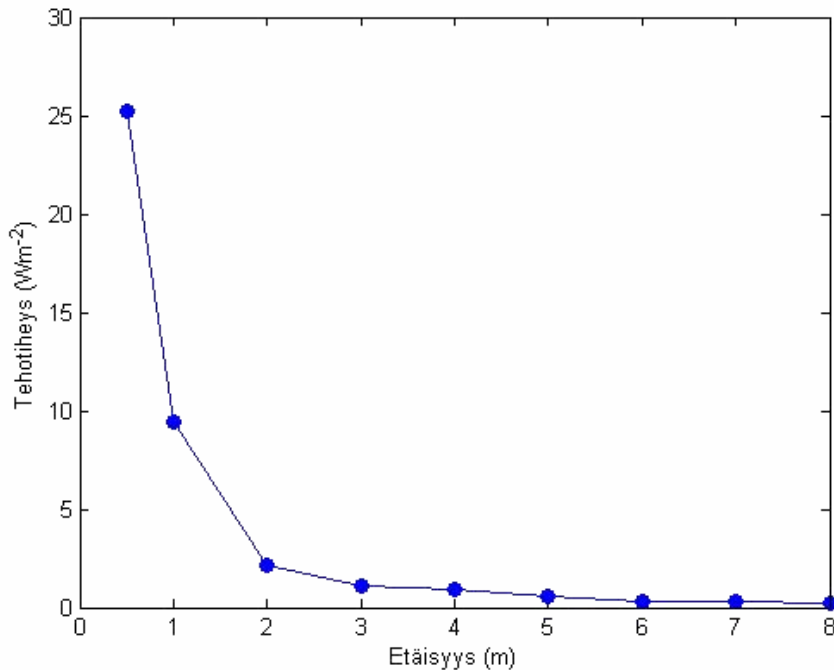
Mittausten tulokset on esitetty kuvissa 25-28. Kuvista voidaan havaita selvästi antennin suuntaavuuden vaikutus tehotiheyksiin lähellä antennia. Suurin osa antennin tehosta suuntautui suoraan eteenpäin, jolloin antennin sivuilla ja alapuolella tehotasot olivat huomattavasti pienempiä kuin edessä. Lisäksi tehotiheystasot laskivat nopeasti etäisyyden myötä (Kuvat 26 ja 27).



Kuva 25. Kaaviokuva antennien lähellä sijaitsevista mittauspisteistä ja niissä mitatuista tehotiheyksistä (W/m^2). Katon reuna on vasemmalla puolella ja mittauskorkeus on antennien keskikohtien korkeus.

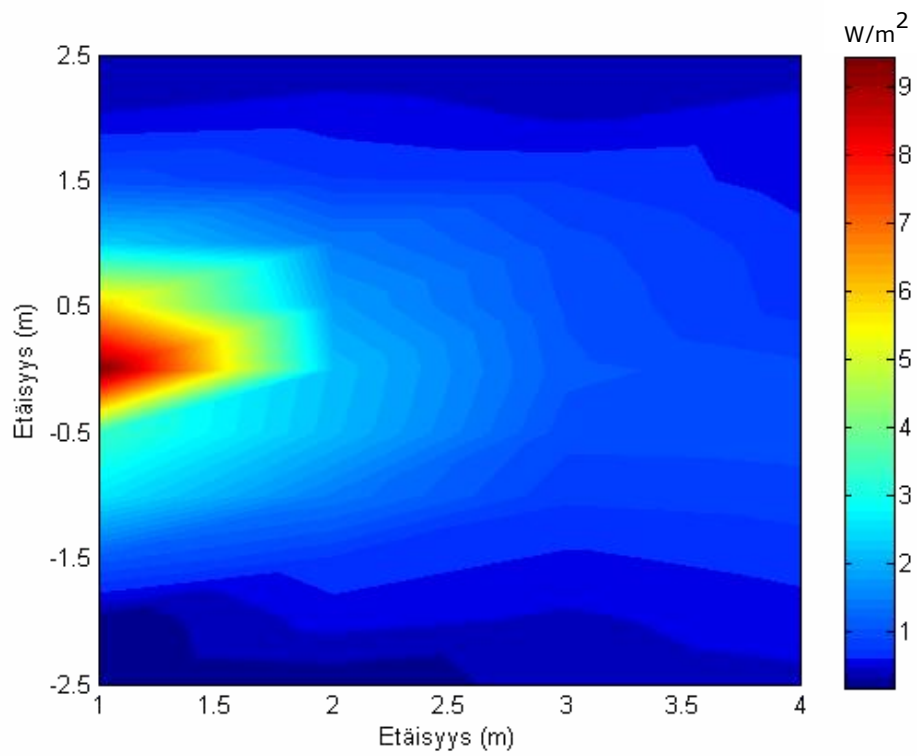


Kuva 26. Kaaviokuva mittauspisteistä ja -tuloksista eri korkeuksilla ja etäisyyksillä ylemmästä antennista. Yksikkö W/m^2 .



Kuva 27. RF-kentän ekvivalentti tehotiheys etäisyyden suhteen antennista 1.7 m korkeudella.

Mittausten perusteella työntekijöiden toiminta-arvot ylittyivät noin 0.5 m etäisyydellä antennista. Vastaavasti väestörajat ylittyivät noin 1.7 m etäisyydellä antennista. Mitatut arvot olivat hetkellisiä huippuarvoja, joten pidemmän ajan yli keskiarvostetut tehollisarvot olisivat pienempiä. Toisaalta tukiasema ei välttämättä toiminut maksimitehoilla, joten koko lähetyksen kapasiteetin ollessa käytössä kentänvoimakkuudet ovat suurempia.



Kuva 28. Mitattu tehotiheys 1.7 m korkeudella suhteessa etäisyyteen tukiaseman antennista.

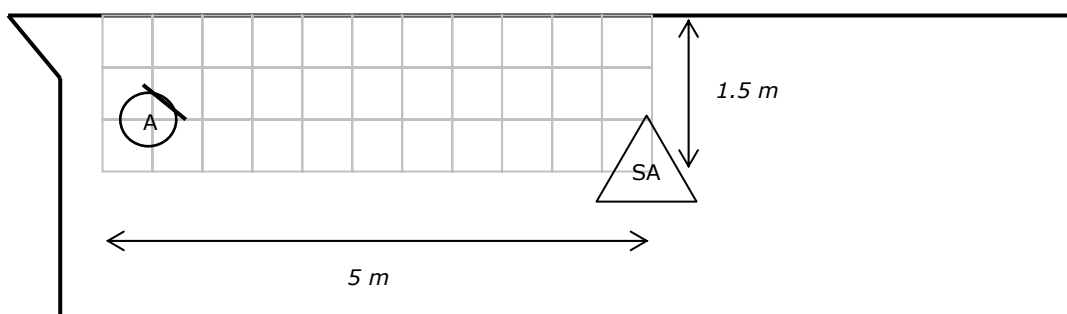
A4 Kohde D

A4.1 Kohdekuvaus

Toimistorakennuksen katolla sijaitsevan UMTS-tukiaseman antenni (korkeus 0.7 m) oli sijoitettu lähelle katon reunaa 1.5 m korkeaan pylvääseen ja suunnattu katolta poispäin. Katolle johtava ovi oli lukittu. Mittauksia suoritettiin laajakaistamittarilla eri korkeuksilla ja spektrianalysaattorilla yhdessä pisteessä.



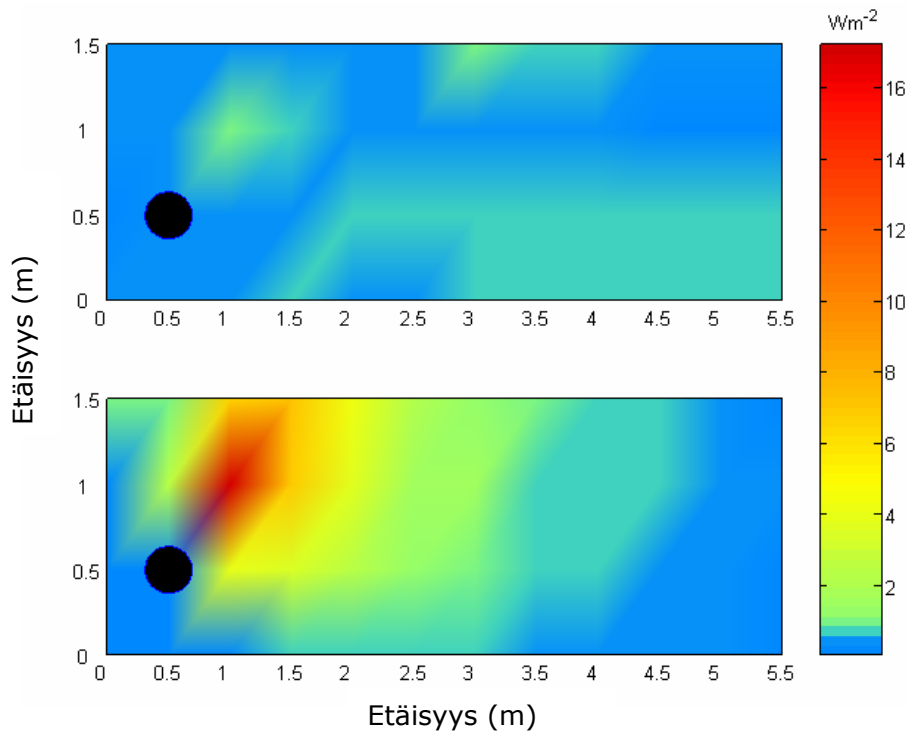
Kuva 29. Tukiasema-antenni kohteessa D.



Kuva 30. Pohjapiirros mittauspisteistä antennin ympärillä. Mittaukset tehtiin neliöiden risteyksissä.

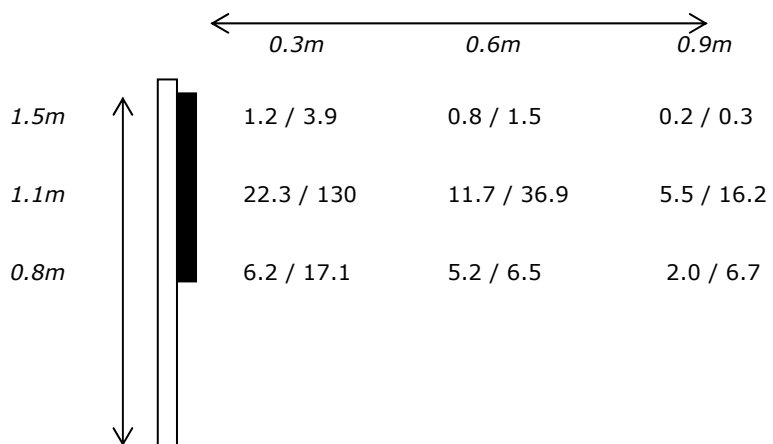
A4.2 Tulokset

Laajakaistamittaukset tehtiin kahdella eri korkeudella, 1.5 m ja 1.1 m. Ylemmällä tasolla ekvivalenttitehotiheys oli väestön viitearvojen alapuolella. Alemmalla tasolla väestörajat ylittyivät noin 1 m etäisyydellä antennista. Työntekijöiden toiminta-arvot eivät ylittyneet alemmallakaan mittauskorkeudella, kun pienin mittausetäisyys antennista oli 30 cm (Kuva 31).



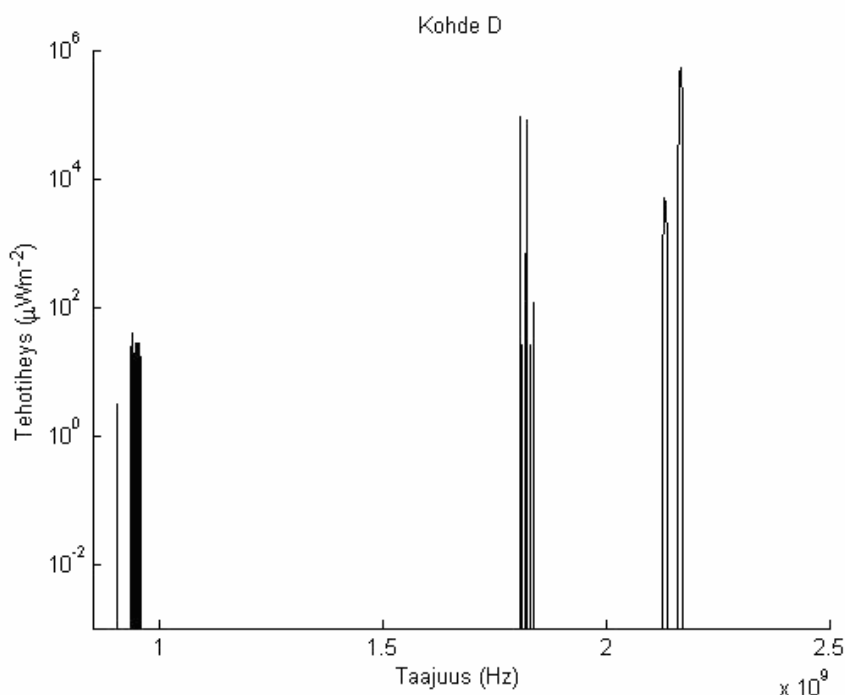
Kuva 31. Mitattu tehotiheys suhteessa etäisyyteen tukiaseman antennista. Ylemmässä kuvassa mittauskorkeus on 1.5 m ja alemmassa 1.1 m. Antennin paikka on kuvattu mustalla ympyrällä.

Tässä kohteessa käytettiin myös diodi-ilmaisinta, jolla saatuja tuloksia verrattiin termopari-ilmaisimella mitattuihin arvoihin (Kuva 32). Mitatut arvot olivat hetkellisiä huippuarvoja, joten ne eivät ole täysin vertailukelpoisia keskenään. Tuloksista kuitenkin nähdään, että diodi-ilmaisin yliarvioi tehotiheyksiä voimakkaassa, pulssimaisessa kentässä.



Kuva 32. Diodi- ja termopari-ilmaisimen vertailu. Ensimmäiset lukemat mitattiin termopari- ja toiset diodi-ilmaisimella. Yksiköt W/m^2 .

Spektri mitattiin taajuusalueella 860 - 2500 MHz (Kuva 33). Laskettaessa kokonaisaltistuminen tämän taajuusalueen yli saatiin väestön altistumiseksi 7.4 % viitearvoista ja työntekijöille 1.5 % toiminta-arvoista. Mittaukset tehtiin noin 5 m etäisyydellä antennista poissa antennin pääkeilasta.



Kuva 33. Mitattu spektri kohteessa D.

Spektrianalysaattorin asetuksilla on suuri merkitys UMTS-signaalin kentänvoimakkuuden määrittämisessä (Taulukko 9). Mitattaessa 5 MHz resoluutiokaistanleveydellä saadaan huippuarvoksi noin 5-kertainen tehotiheys todelliseen arvoon verrattuna. Lähelle todellista tehotiheyttä päästään käyttämällä kanavatehomittausta ja rms-ilmaisinta. Teoreettisesti peak-ilmaisimen tulisi antaa 10-kertainen lukema.

**Taulukko 9. UMTS-signaalin mittaaminen
spektrianalysaattorin eri asetuksilla.**

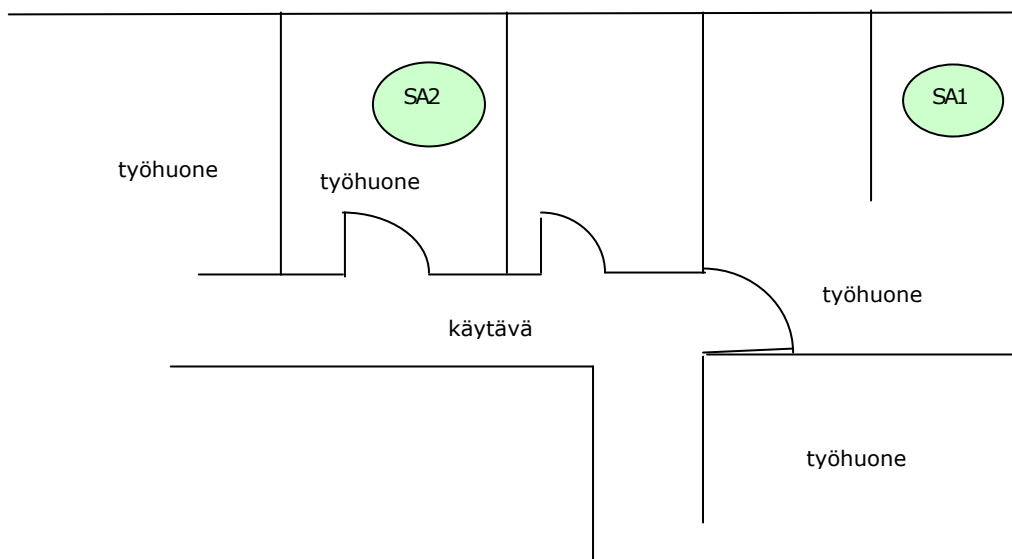
Taajuus (GHz)	RMS-ilmais 30s keskiarvo (W/m²)	Peak-ilmais 30s huippuarvo (W/m²)	Kanavateho hetkellinen (W/m²)
2.1327	0.0004	0.0051	-
2.1679	0.0543	0.5387	0.0809

A5 Kohde E

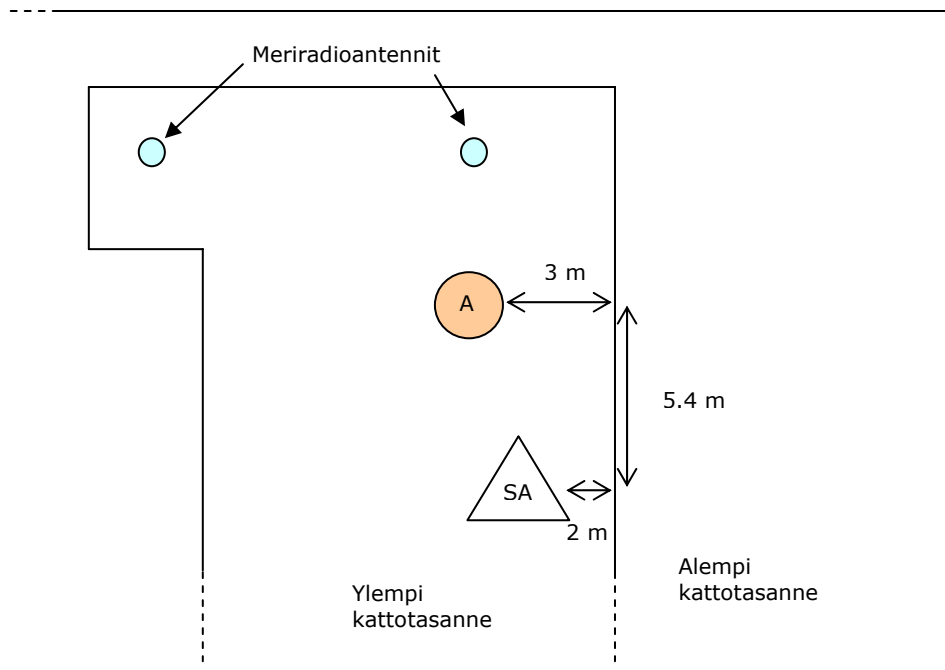
A5.1 Kohdekuvaus

Tässä kohteessa mittauksia tehtiin sekä sisä- että ulkotiloissa. Sisätiloissa kohteena oli kaksi 4. kerroksen toimistohuonetta (Kuva 34). Rakennuksen ulkoseinällä puolitoista kerrosta mittaushuonetta korkeammalla oli GSM900-antenni. Mittaukset tehtiin kahdessa toimistohuoneessa työntekijöiden työpisteiden kohdalla 1.5 m korkeudella.

Katolle (6. kerros) oli sijoitettu TETRA-antenni ja kaksi meriradio-antennia (piiskatyypisiä). TETRA-antenni oli pylvään päähän sijoitettu monopoliantenni, jonka pituus oli noin 1.3 m ja alaosa oli 4.5 m korkeudella. Spektrianalysaattorimittaukset tehtiin noin 5.5 m etäisyydellä TETRA-antennista 1.3 m korkeudella (Kuva 35).



Kuva 34. Kaaviokuva toimistohuoneiden mittauspisteistä.



Kuva 35. Pohjapiirros katon mittaustilanteesta.

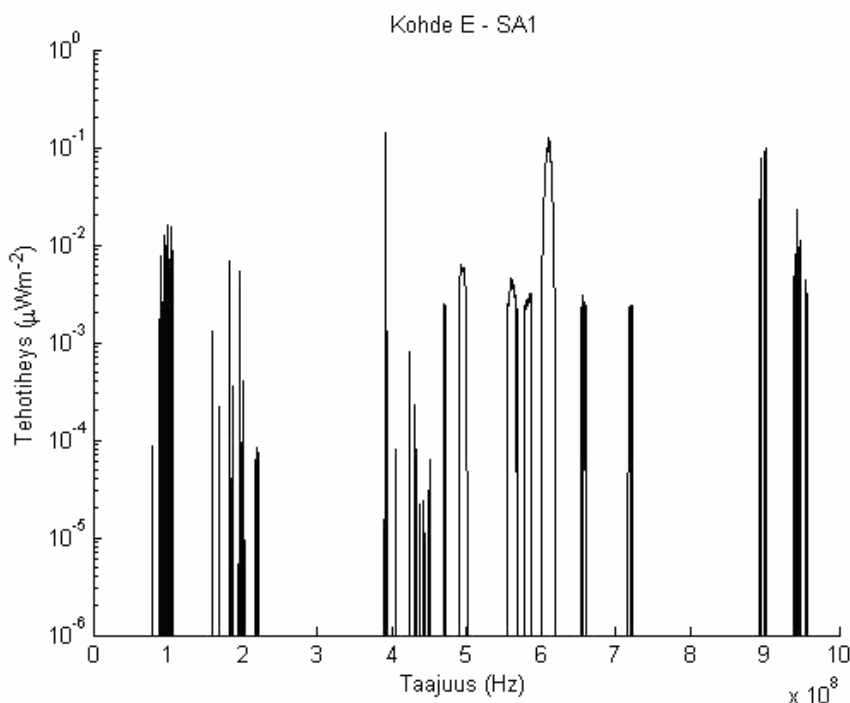


Kuva 36. TETRA-antenni katolla.

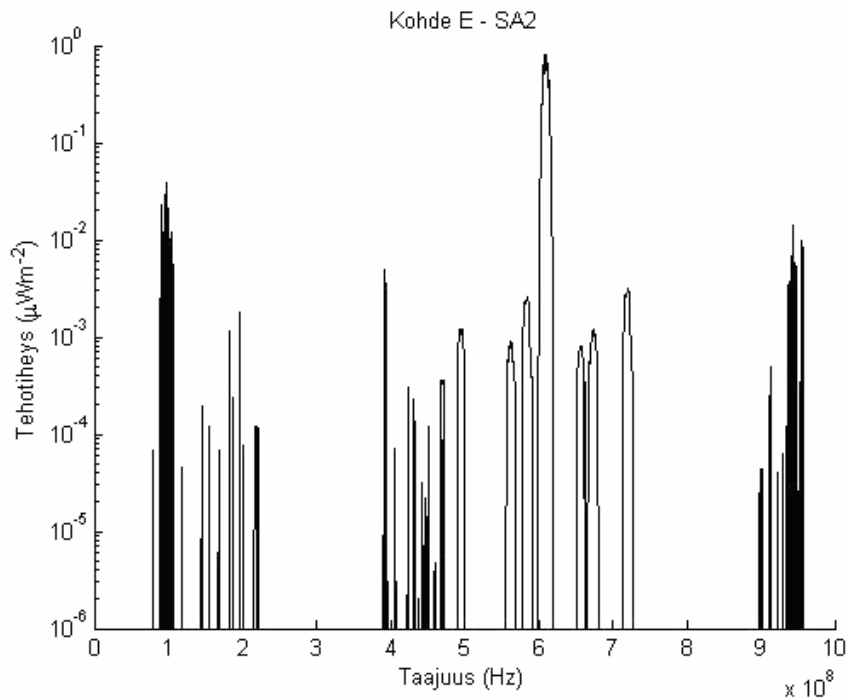
A5.2 Tulokset

Kaikki mittaustulokset olivat selvästi alle väestön altistumisrajojen. Toimistotiloissa tehottiheydet olivat miljoona tai miljardi kertaa pienempiä kuin väestön viitearvot tai työntekijöiden toiminta-arvot.

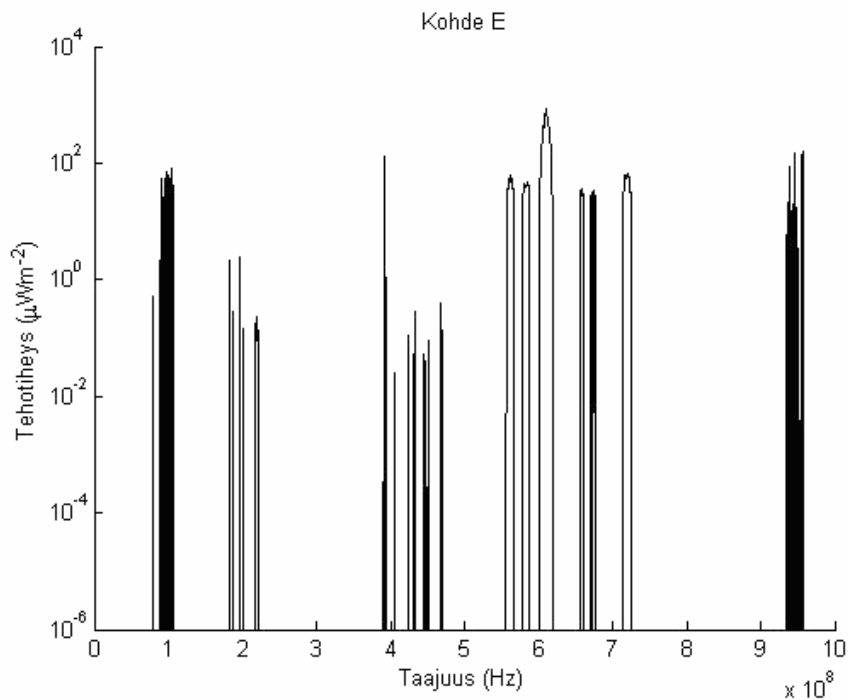
TETRA-antenni oli sijoitettu niin korkealle, että sen aiheuttamat RF-kentät olivat hyvin pieniä: 0.08 % työntekijöiden altistumisen toiminta-arvoista ja 0.02 % väestön viitearvoista.



Kuva 37. Mitattu spektri kohteessa E, SA1 toimistohuone. Väestön altistuminen 0.00002 % ja työntekijöiden 0.000005 % sallituista viite- ja toiminta-arvoista.



Kuva 38. Mitattu spektri kohteessa E, SA1 toimistohuone. Väestön altistuminen 0.00004 % ja työntekijöiden 0.000008 % sallituista arvoista.



Kuva 39. Mitattu spektri TETRA-antennin vierestä. Väestön altistuminen 0.082 % ja työntekijöiden 0.017 % sallituista arvoista.

A6 Kohde F

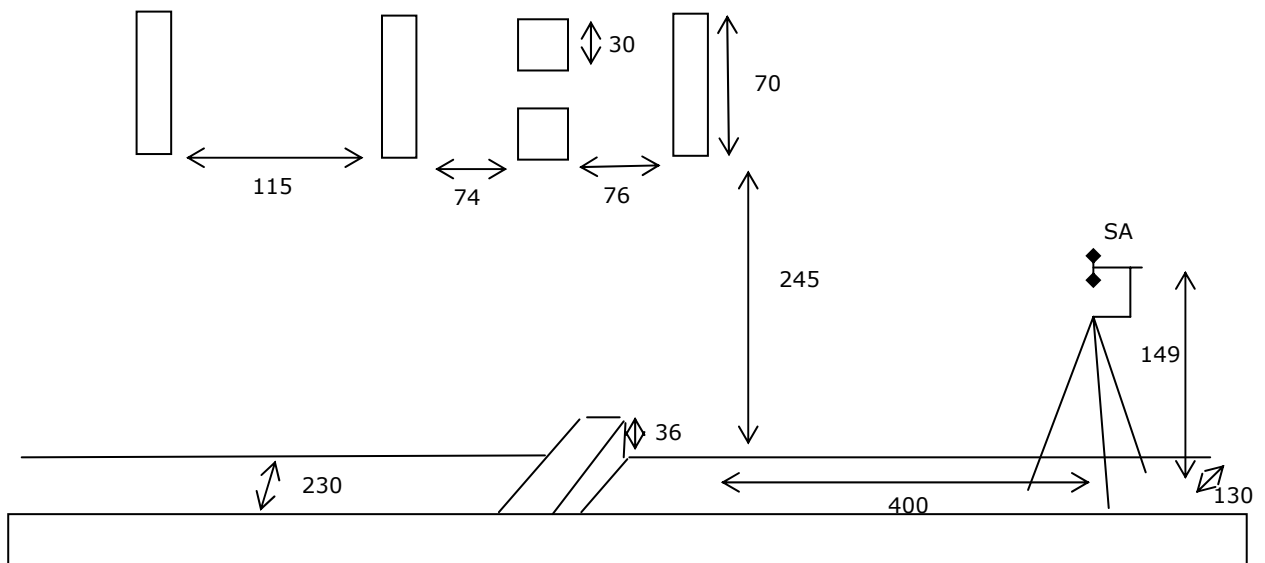
A6.1 Kohdekuvaus

Tukiaseman antennit oli sijoitettu 7-kerroksisen toimistotalon ylimmän kerroksen seinälle (Kuva 40). Antennien alareunat olivat 2.45 m korkeudella alemmalta kattotasanteelta. Katolle pääsi lukitun oven kautta.

Antennien aiheuttama tehotiheys mitattiin laajakaistamittarilla kolmella eri korkeudella (2.35 m, 1.9 m ja 1.3 m) ja myös ylemmällä kattotasanteella lähellä antennien yläreunaa. Mittauspisteiden välinen etäisyys seinän suunnassa oli 0.38 m. Ensimmäisten mittauspisteiden etäisyys seinästä oli 30 cm, jonka jälkeen kukin rivi oli 50 cm kauempana. Viimeinen mittauspisterivi oli katon reunalla. Spektri mitattiin yhdessä pisteessä noin 4 m etäisyydellä antennien sivulla (Kuva 41).



Kuva 40. Tukiasema-antennit kohteessa F.



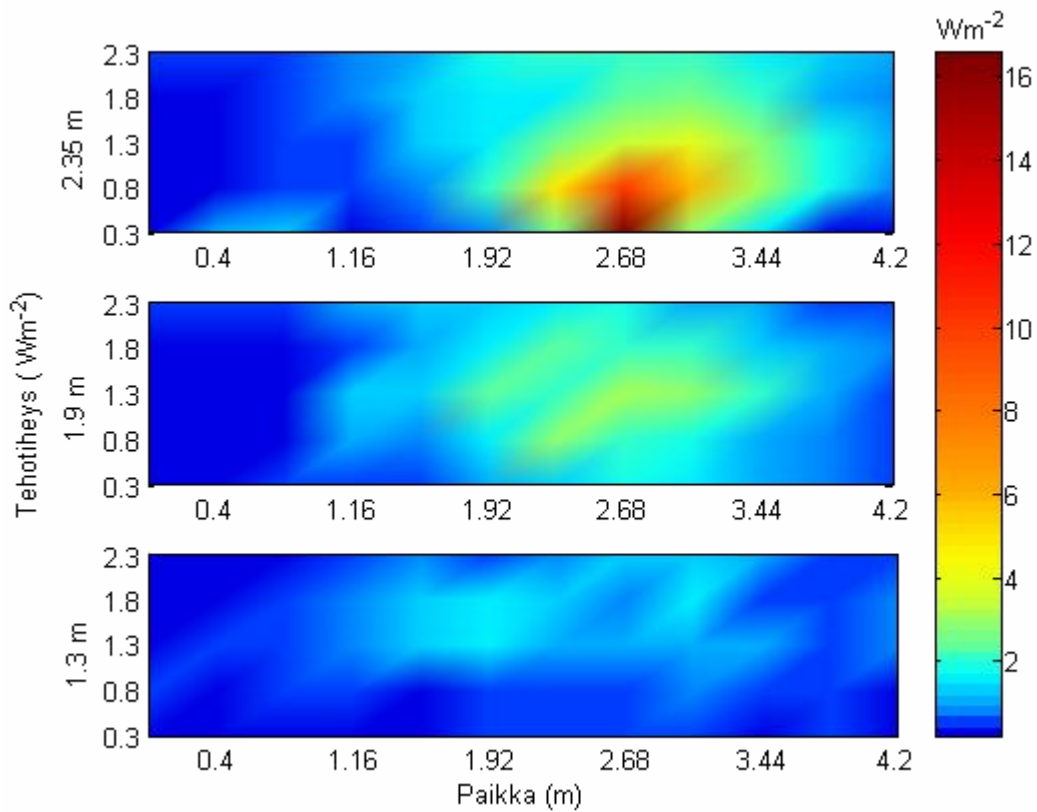
Kuva 41. Pohjapiirros kohteen F kattotasanteesta ja antenneista. Kuvan mitat ovat senttimetreinä.

A6.2 Tulokset

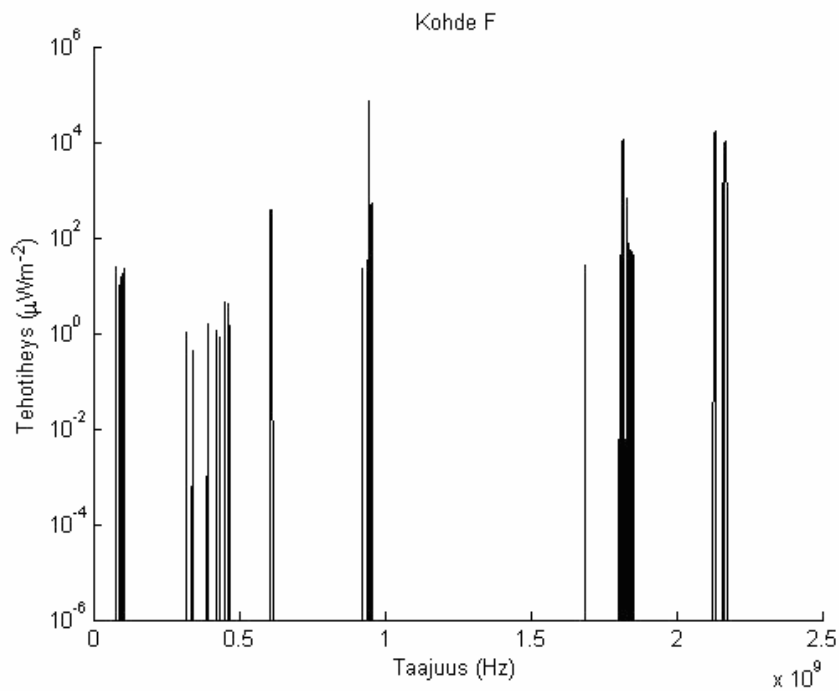
Työntekijöiden toiminta-arvot eivät ylittyneet millään mittauskorkeudella mittausetäisyyden ollessa vähintään 30 cm antennista (Kuva 42). Väestön viitearvot (900 MHz: 4.6 Wm^{-2}) ylittyivät 2.35 m korkeudella noin 1.1 m etäisyydellä suuritehoisimmasta antennista. Alemmilla mittaustasoilla (1.9 m ja 1.3 m) tehotiheydet olivat alle väestön viitearvojen.

Ylemmällä kattotasanteella tehtiin mittauksia antennien edessä. Mittausten mukainen ekvivalenttitehottiheys oli $0.25 - 0.6 \text{ Wm}^{-2}$, mikä on alle väestön viitearvojen kaikkien matkapuhelinten taajuusalueilla.

Spektrianalyysi tehtiin mittauspaiassa, josta etäisyys lähimpään antenniin oli noin 4 m. Taajuusalueen yli laskettu kokonaisaltistuminen oli työntekijöille 0.6 % ja väestölle 3.0 % sallituista tehottiheyksistä (Kuva 43).



Kuva 42. Eri korkeuksilla mitatut tehotiheydet.



Kuva 43. Mitattu spektri kohteesta F. Väestön altistuminen 3.0 % ja työntekijöiden 0.6 % sallituista.

A7 Kohde G

A7.1 Kohdekuvaus

Harjakattoisen kerrostalon kahden kattotason väliselle seinälle oli sijoitettu kolme antennia (Kuva 44) siten, että jalat koskettivat antennieja kuljettaessa niiden ohi alemmalla kattotasanteella. Katto oli niin jyrkkä, että siellä liikuttaessa oli käytettävä turvavaljaita ja -köysiä.

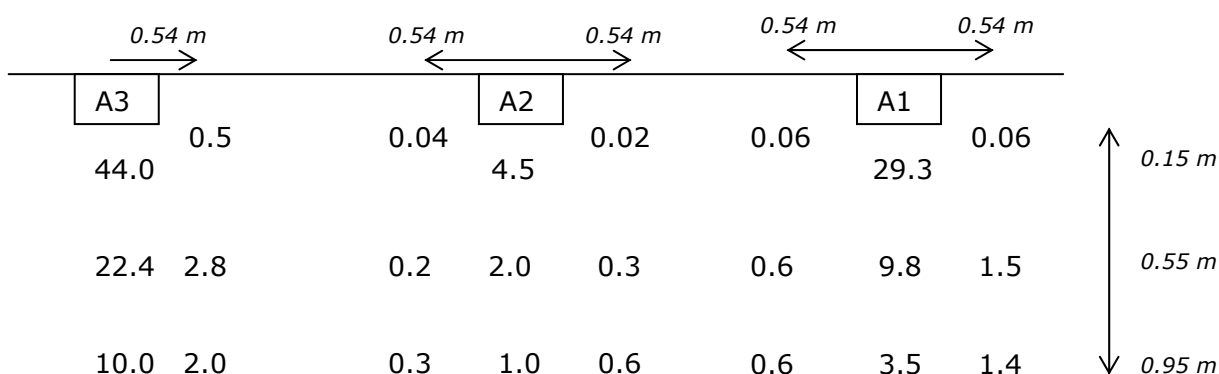


Kuva 44. Kohde G antennien sijainnit.

RF-kenttien tehotiheydet mitattiin laajakaistamittarilla kunkin antennin edessä. Lähin mittapiste oli 15 cm antennista ja sitä seuraavat kukin 40 cm edellistä kauempana. Antennin sivulla mitatut ensimmäiset pisteet olivat antennin kuoren tasalla ja seuraavat muiden mittauspisteiden tasalla (Kuva 45).

A7.2 Tulokset

Tässä kohteessa ei voitu yksiselitteisesti määrittää mihin verkkoon antennit kuuluivat. Altistumisen arvioimiseksi kaikkien antennien oletettiin kuuluvan GSM900-verkkoon, jolla on pienimmät viite- ja toiminta-arvot. Väestön viitearvo (4.6 W/m^2) ylittyi vielä 0.95 m etäisyydellä, joka oli kauimmainen mittauspiste. Työntekijöiden toiminta-arvo (23.4 W/m^2) ylittyi yhden antennin kohdalla noin 0.5 m etäisyydellä.



Kuva 45. Kaaviokuva mittauspisteistä ja -tuloksista antennien lähellä. Mittayksikkö on W/m^2 . Mittauskorkeutena on antennien keskikohtien korkeus.

A8 Kohde H

A8.1 Kohdekuvaus

Tukiasemien antennit oli sijoitettu paloaseman tornin huipulla olevaan mastoon. Maston lisäksi kattotasanteella oli Virve-verkkoon kuuluvia antennoja (Kuva 46). Mastoon oli sijoitettu sekä Virve-antenneja että tavallisia matkapuhelinverkkojen antennoja. Mittausten aikana paloasemalle tuli hälytys, jolloin Virve-verkko oli käytössä.

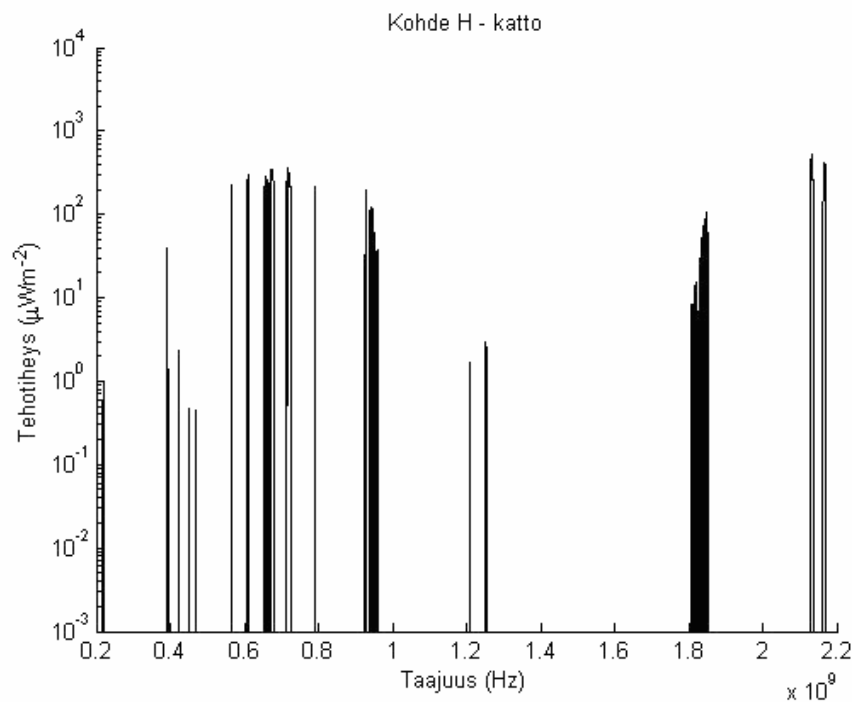
Kattotasanteella tehotiheydet olivat liian pieniä laajakaistamittarilla mitattavaksi, joten tässä kohteessa käytettiin ainoastaan spektri-analysointia. Katon lisäksi mittaukset suoritettiin ylimmän kerroksen toimistohuoneessa. Spektrianalysointin antenni sijoitettiin keskelle kattotasannetta 4.8 m etäisyydelle mastosta. Toimistohuoneessa tehdyissä mittauksissa antenni sijoitettiin työpisteen kohdalle. Antennin korkeus oli 1.3 m.



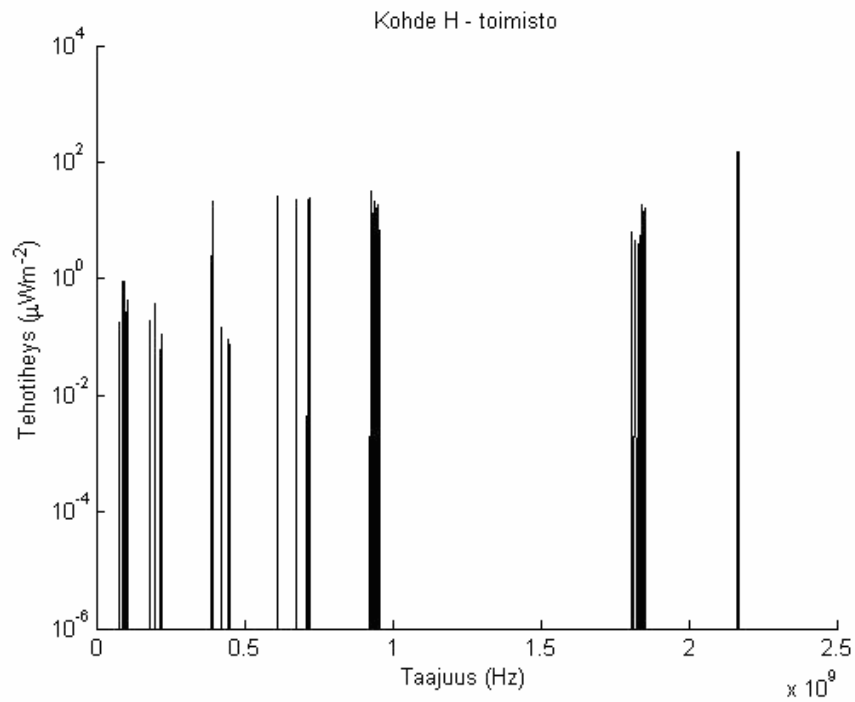
Kuva 46. Kohde H.

A8.2 Tulokset

Mitatut spektrit on esitetty kuvissa 47 ja 48. Molemmissa paikoissa mitatut tehotiheydet olivat selvästi alle altistumisrajojen. Katolla oli Virve- antennija myös kattotasanteen reunalla, mutta ne toimivat ainoastaan lähetyksen vastaanotin-antenneina. Mastoon sijoitetut antennit olivat niin korkealla ja suunnattu katon yli, että tehotiheydet tasanteella olivat merkityksettömän pieniä.



Kuva 47. Katolla mitattu spektri kohteessa H. Väestön altistuminen 0.14 % ja työntekijöiden 0.03 % sallituista viite- ja toiminta-arvoista.



Kuva 48. Mitattu spektri toimistosta kohteesta H. Väestön altistuminen 0.01 % ja työntekijöiden 0.003 % sallituista viite- ja toiminta-arvoista.

A9 Kohde I

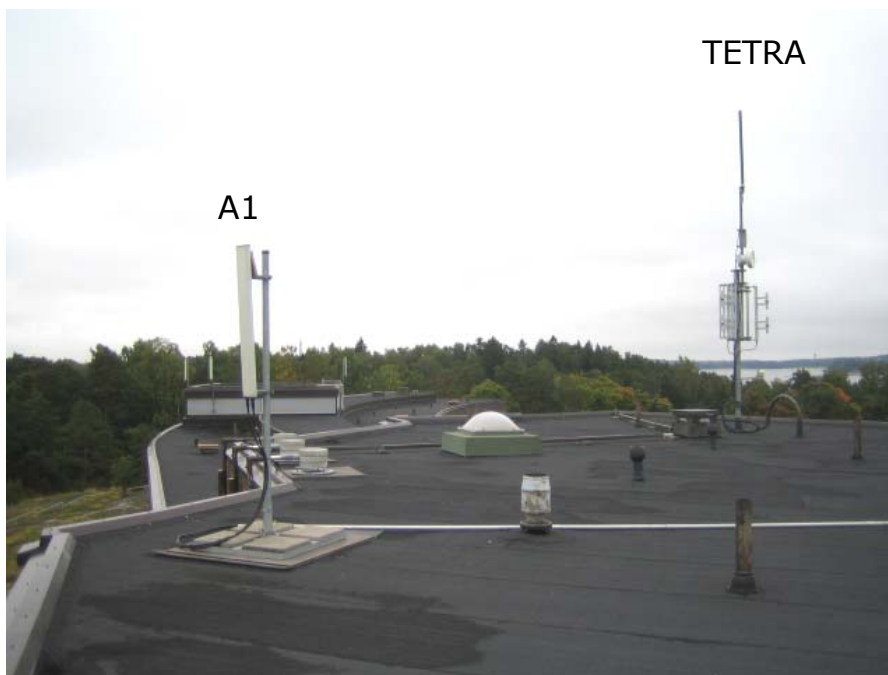
A9.1 Kohdekuvaus

Rakennuksen katolla oli useita antenniryhmiä. Ylimmällä kattotasolla oli kaksi antennia (Kuva 49). Katolle johtava ovi oli lukittu.

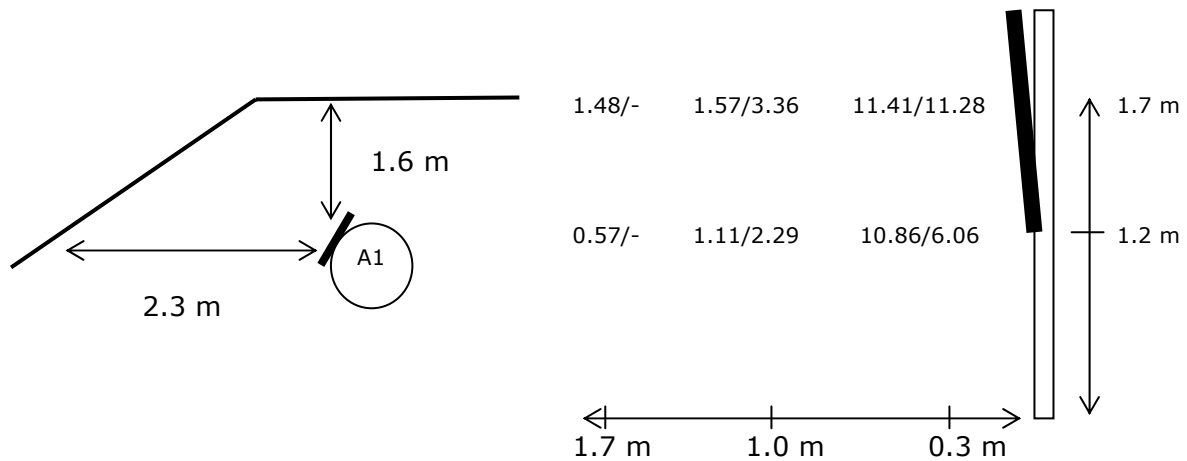
Mittaukset suoritettiin laajakaistailmaisimella.

A9.2 Tulokset

TETRA-antennin alapuolella mitattaessa ei laajakaistailmaisimella saatu merkittävää signaalia, koska lähetystehot olivat hyvin pieniä tai tukiasema ei mittaushetkellä lähettänyt signaalia. Antennilla A1 mitattiin normaalien tehosiheyksien (Kuva 50) lisäksi yhdessä pisteessä keskiarvoja eri ajanjaksoilla (Taulukko 10). Maksimiarvon ja keskiarvostettujen arvojen ero oli kohtalaisen pieni ja aiheutui lähinnä pienestä puhelinliikenteestä, sillä käytössä oli ilmeisesti vain BCCH-kanava.



Kuva 49. Kaksi antennia kattotasanteella.



Kuva 50. Kaaviokuva antennista A1 ja mittaustulokset mittaussasetuksilla Max/MaxAvg antennin pääkeilassa. Mittayksikkönä on W/m².

Taulukko 10. Mittaus MaxAvg asetuksella 1.7 m korkeudella ja 25 cm etäisyydellä antennin A1 kuoresta.

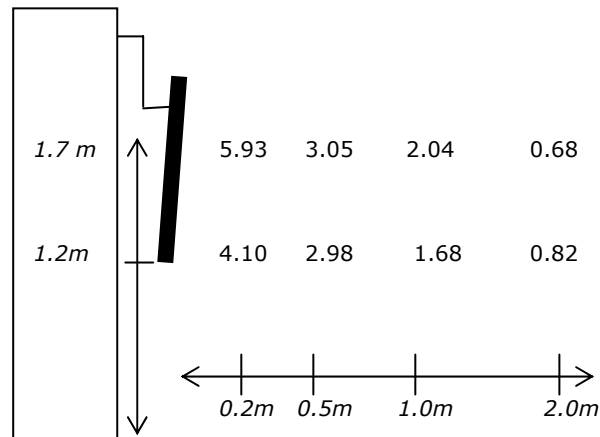
Keskiarvoistus aika (s)	Tehotiheys (W/m ²)
0 (=Max)	15.12
4	11.24
8	8.56
12	12.78
20	12.09
32	13.30



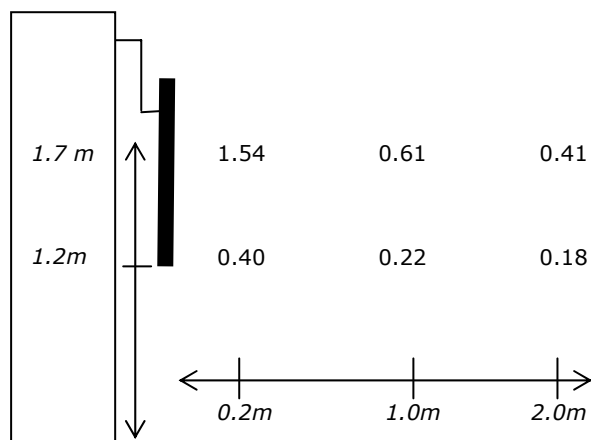
Kuva 51. Antenni A2. Mitattu tehotiheyden maksimiarvo 20 cm etäisyydestä antennin kuoresta oli 2.0 W/m^2 .



Kuva 52. Katolla olleet antennit A3 ja A4. Kolmas kuvassa näkyvä antenni oli asennettu niin korkealle, ettei siitä aiheutunut merkittäviä SM-kenttiä kattotasanteelle.



Kuva 53. Kaaviokuva mittauspisteistä ja -tuloksista eri korkeuksilla ja etäisyyksillä antennista A3. Yksiköt W/m^2 .



Kuva 54. Kaaviokuva mittauspisteistä ja -tuloksista eri korkeuksilla ja etäisyyksillä antennista A4. Yksiköt W/m^2 .

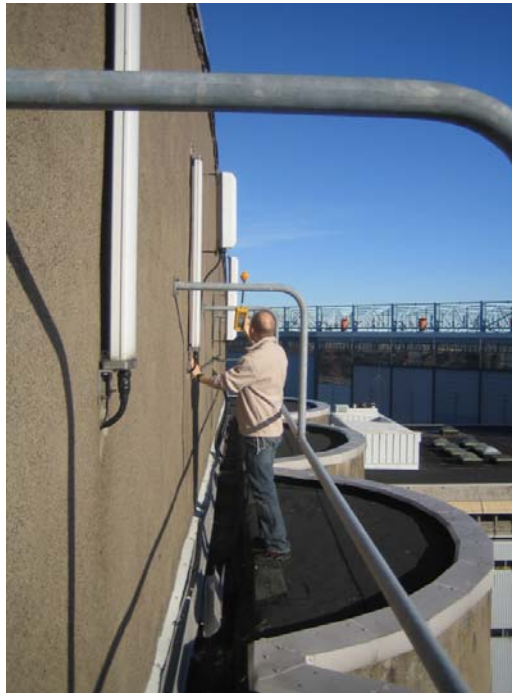
A10 Kohde J

A10.1 Kohdekuvaus

Antennit oli sijoitettu korkean varastorakennuksen katolla olevaan pylvääseen (Kuva 55) ja rakennuksen seinään. Pylväässä oli myös mikroaaltolinkki. TETRA-antenni oli asennettu alemmalla kattotasolla olevan pitkän pylvään päähän, joten sen viereen ei päässyt ylemmältä kattotasolta. Seinään kiinnitetyt antennit olivat pään korkeudella ja ainoan kulkureitin varrella sijoitettuna siten, että ne oli ohitettava hyvin läheltä. Antennien aiheuttamat tehotiheydet mitattiin laajakaistailmaisimella.



Kuva 55. Katolla sijainneet tukiasema-antennit kohteessa J.



Kuva 56. Seinälle kiinnitetyt tukiasema-antennit kohteessa J.

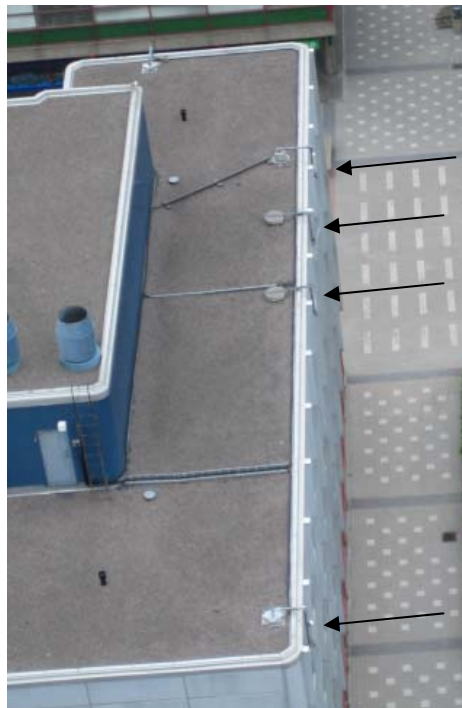
A10.2 Tulokset

Katolla mitatut tehotiheydet olivat pieniä, alle 0.25 W/m^2 . Antennit olivat mastossa niin korkealla, että niiden pääkeila suuntautui kattotasanteen yli. Mikrolinkkiantennin aiheuttamaksi hetkelliseksi maksimiarvoksi mitattiin 0.6 W/m^2 noin puolen metrin etäisyydellä antennista. Seinälle kiinnitetyistä antenneista ei saatu mittaus-tuloksia, ja on epävarmaa olivatko nämä antennit mittaushetkellä lainkaan käytössä. Antennin sijoitus seinälle oli huono ohikulun kannalta. Turvakaiteen ja antennin väliin jäävä etäisyys oli puolen metrin luokkaa. Tällä etäisyydellä antennin kentät voivat ylittää toiminta-arvot.

A11 Kohde K

A11.1 Kohdekuvaus

Kohteessa oli useita tukiasema-antenneja sijoitettuna viisikerroksisen rakennuksen seinälle, hieman katon reunan alapuolelle (Kuva 57). Katolle johtavat ovet oli lukittu.



Kuva 57. Kohteen K antennit.

A11.2 Tulokset

Mittaukset kattotasolla osoittivat, että tehottiheydet olivat erittäin pieniä aivan katon reunallakin. Antennit oli sijoitettu ja suunnattu siten, että katolla ei ollut suuria tehottiheyksiä.

A12 Kohde L

A12.1 Kohdekuvaus

Mastotyöntekijöiden altistumista telemastoissa oleville erilaisille lähettimille tutkittiin kahdessa kohteessa. Mittaukset tehtiin EMR-300 mittarilla, jossa oli diodiantenni tyyppiä 8. Tämän antennin mittausalue on taajuusalueella 100 kHz - 3 GHz. Mittaukset tehtiin neljän sekunnin keskiarvoina. Mittaajina toimivat antennien huollosta vastaavat mastotyöntekijät, sillä mastoihin saavat kiivetä ainoastaan mastotyökortin omaavat huoltoyhtiön työntekijät.

Ensimmäinen masto oli sisältä kiivettävää tyyppiä VU-1200 (Kuva 58). Masto oli 82 m korkea ja mittaukset suoritettiin kolmen metrin välein keskeltä maston kiipeämistilaa. Mastoon oli sijoitettu GSM900-, GSM1800-, paikallisradio- ja radioamatöörilähettimiä.



Kuva 58. Sisältä kiivettävä VU-1200 tyyppinen masto.

Toinen masto oli 62 m korkea ja ulkopuolelta kiivettävää tyyppiä (Kuva 59). Mittaukset suoritettiin 2.5 m välein noin 30 cm etäisyydellä tikasrakenteista. Mastossa oli GSM1800-lähetin-antenneja.

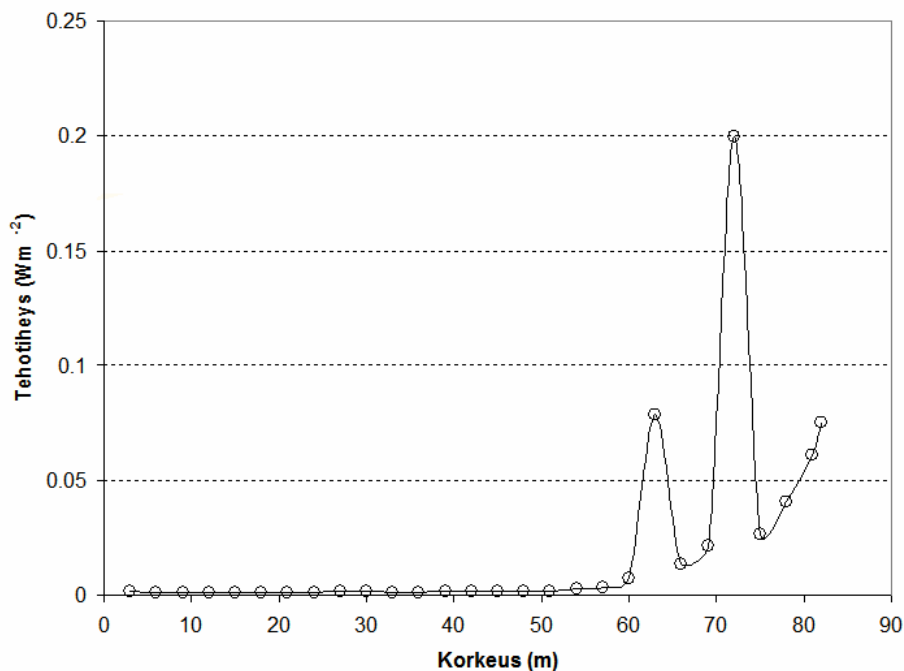


Kuva 59. Ulkoa kiivettävä masto ja huoltomiehet työssään.

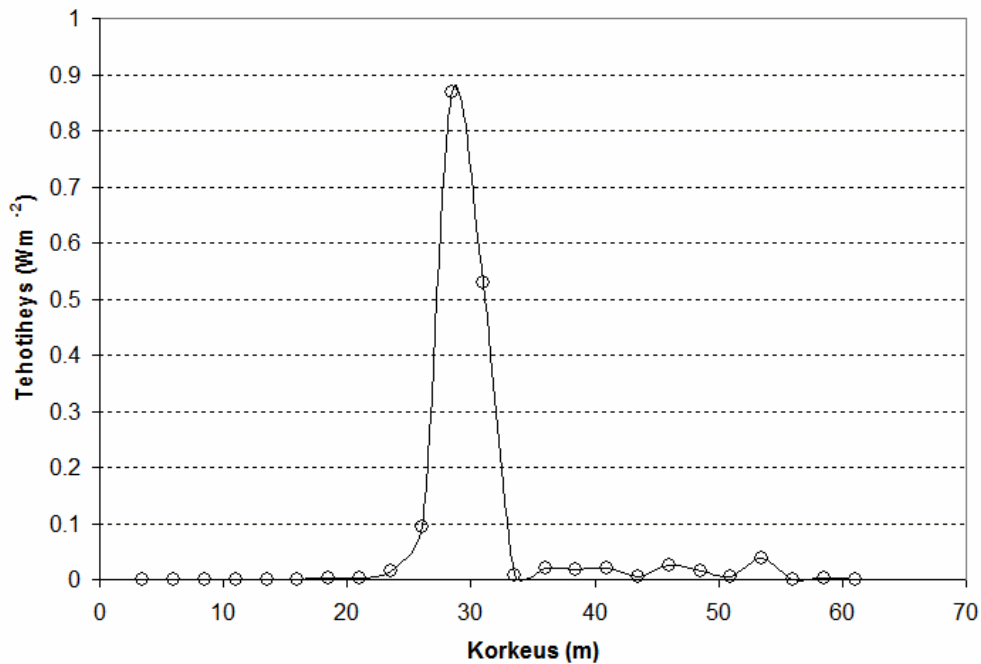
A12.2 Tulokset

Sisältä kiivettävässä mastossa tehotiheyksien huippuarvot mitattiin mastossa olevien antennien kohdalla (Kuva 60). Mastossa 63 metrin korkeudella oli useita GSM900-verkon antennia ja 70 metrin korkeudella oli GSM1800-verkon antenniryppäs. Tehotiheyden nousu maston huippua kohti mentäessä aiheutui maston kärjessä olevasta paikallisradiolähtimestä ja radioamatööri-laitteistoista. Rekisteröity hetkellinen huippuarvo maston sisällä olevassa kiipeämistilassa oli 0.4 Wm^{-2} .

Ulkoa kiivettävän maston mittauksissa tehotiheyden suurin arvo mitattiin mastossa olevan antenniryppään kohdalla (Kuva 61). Mastossa korkeuksilla 28 m ja 30 m oli kahden eri GSM1800-verkon antennija, jotka aiheuttivat 0.9 Wm^{-2} tehotiheyden tikkaiden kohdalle. Rekisteröity hetkellinen huippuarvo mastossa suoritettujen mittausten aikana oli 2.3 Wm^{-2} . Tällöin mittaajana toiminut huoltomies teki samalla myös maston huoltotöitä ja liikkui muuallakin kuin vain tikkaiden kohdalla.



Kuva 60. Ekvivalentit tehotiheydet sisältä kiivettävän maston sisällä.



Kuva 61. Ekvivalentit tehotiheydet ulkoa kiivettävässä mastossa tikkaiden kohdalta.

Mitatut ekvivalentit tehotiheydet olivat alle direktiivin toiminta-arvojen. Mittaukset suoritettiin vain tikasrakenteiden kohdalta. Sisältä kiivettävissä mastoissa lähetintehot oli suunnattu poispäin maston metallirakenteista, mikä havaittiin myös mittaustuloksissa. Kuva 62 on esitetty sisältä kiivettävän maston mittaustapahtuma. Näissäkin mastoissa huoltomiesten on kuitenkin kiivettävä myös maston ulkopuolelle suorittamaan huoltotoimenpiteitä, jolloin tehotiheydet voivat olla suurempia kuin maston sisäpuolella (Kuva 63).

Ulkoa kiivettävässä mastossa tikkaat voivat sijaita antennien sivukeilassa, jolloin työntekijä saattaa altistua kohtalaisen suurille tehotiheyksille (Kuvat 60 ja 61). Ulkoa kiivettävät mastot ovat myös halkaisijaltaan pienempiä kuin sisältä kiivettävät, joten työntekijät joutuvat kulkemaan läheltä antennija (Kuva 64). Molempien tyyppisissä mastoissa työntekijät voivat siten altistua toiminta-arvot ylittävälle kentille.



Kuva 62. Mittaustilanne VU-1200 mastossa.



Kuva 63. Sisältä kiivettävän maston huoltoa ulkopuolelta.



Kuva 64. Ulkoa kiivettävässä mastossa huoltomiesten on kuljettava läheltä antenneja.

Liite B Tukiasemien tekniset tiedot

Taulukossa 11 on esitetty GSM900- ja GSM1800-tukiasemien tekniset tiedot ja niiden perusteella määritetyt suojaetäisyydet antenneista. Useat kohteet olivat eri operaattoreiden yhteiskäytössä, jolloin antenneja ei voinut yksiselitteisesti yhdistää tietyn operaattorin antamiin teknisiin tietoihin. Tiedot esitetään suojaetäisyyden mukaan laskevassa järjestyksessä.

Suojaetäisyydet laskettiin käänteisen neliöjuurilain mukaan (ks. kaava 3). EIRP arvojen ollessa yksiköissä dBm suojaetäisyys voidaan laskea seuraavasti:

$$r_{se} = \sqrt{\frac{10^{EIRP/10} / 1000 \cdot n_L}{4 \cdot \pi \cdot S_{raja}}} \quad (6)$$

missä n_L on tukiaseman lähettimien lukumäärä ja S_{raja} lähetystaajuuden toiminta-arvo työntekijöille tai viitearvo väestölle, yksiköissä W/m^2 .

Taulukko 11. GSM-tukiasemien tekniset tiedot ja laskennalliset suojaetäisyydet laskevassa järjestyksessä. Suojaetäisyydet ja kokonaislähetysteho laskettu operaattorien ilmoittamien dBm arvojen perusteella.

Verkko	EIRP (dBm)	Lähettimien lukumäärä	Antenni- vahvistus (dBi)	Kokonais- lähetysteho (W)	Suojaetäisyys, väestö (m)	Suojaetäisyys, työntekijät (m)
GSM900	43	4	14	3.2	1.2	0.5
GSM900	43	3	15	1.9	1.0	0.5
GSM900	43	3	10	6	1.0	0.5
GSM900	43	3	12	3.8	1.0	0.5
GSM900	43	3	10+12	6	1.0	0.5
GSM900	40	4	10+10	4	0.8	0.4
GSM900	43	2	12	2.5	0.8	0.4
GSM900	40	4	12+12	2.5	0.8	0.4
GSM900	43	2	9	5	0.8	0.4
GSM900	40	3	12+12	1.9	0.7	0.3
GSM900	40	2	12+16	1.3	0.6	0.3
GSM900	40	2	12+12	1.3	0.6	0.3
GSM1800	39	3	15	0.75	0.5	0.2
GSM1800	39	2	14	0.6	0.4	0.2
GSM1800	39	2	13	0.8	0.4	0.2
GSM1800	39	2	14	0.6	0.4	0.2
GSM1800	39	2	18	0.25	0.4	0.2
GSM1800	36	2	15+15	0.25	0.3	0.1
GSM1800	36	2	13+13	0.40	0.3	0.1
GSM1800	36	1	15+15	0.13	0.2	0.1

Liite C Mittausepävarmuus

Mittalaitteille laskettiin epävarmuusarvio viitteiden (3, 19 ja 20) mukaisesti. *Standardiepävarmuus* $u(x_i)$ (standard uncertainty) määritellään keskihajontana jakamalla muuttujan epävarmuus x_i sen oletettuun todennäköisyysjakaumaan liittyvällä kertoimella k :

$$u(x_i) = \frac{x_i}{k} \quad (7)$$

missä k riippuu todennäköisyysjakauman muodosta ja on esimerkiksi 1 (standardiepävarmuus), 2 (normaalijakauma luottamusväli 95 %, $k=2$) tai $\sqrt{3}$ (suorakulmainen jakauma). Kun kullekin muuttujalle x_i on laskettu standardiepävarmuus (yksi keskihajonta), ne yhdistetään neliösummakaavan mukaan *yhdistetyksi standardiepävarmuudeksi* $u_c(y)$:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (c_i \cdot u_{(x_i)})^2} \quad (8)$$

missä c_i on herkkyyskerroin (sensitivity factor), joka on käytännössä muunnoskerroin yksiköistä toiseen. Yhdistetty standardiepävarmuus kerrotaan *peittävyyskertoimella* k (coverage factor), jolloin saadaan *laajennettu epävarmuus* u_e . Yleensä käytetään peittävyyskerrointa $k=2$ (tarkemmin $k=1.96$), joka antaa noin 95 % luottamusvälin:

$$u_e = 1.96 \cdot u_c \quad (9)$$

C1 Kapeakaistailmaisin

Spektrianalysaattorin valmistajan antamien tietojen mukaan analysaattorin absoluuttinen amplituditarkkuus on ± 0.24 dB 95 % luottamusvälillä. Lisäksi epävarmuuteen vaikuttaa taajuusvaste, jonka epävarmuus analysaattorin vaimennuksilla 20, 30 tai 40 dB on ± 0.53 dB.

Kaapelin vaimennus kalibroitiin diskreeteillä taajuusarvoilla epävarmuuden ollessa ± 0.08 dB. Antennikertoimissa molemmilla käytetyillä antennilla oli sama valmistajan toimittaman kalibrointi-todistuksen mukainen ± 0.7 dB epävarmuus. Kaapelin tai antennien

tapauksessa interpolointi tunnettujen taajuuksien väliin ei lisää epävarmuutta merkittävästi.

Suurin epävarmuuden lähde oli antennin ja ympäristön kytkeytyminen ja antennin paikka. Antenni pyrittiin sijoittamaan mahdollisimman kauas häiritsevistä rakenteista. Vastaavasti mittaajan ja antennin välillä pidettiin mahdollisimman suurta etäisyyttä, vähintään kolmea metriä. Mittausantennin sijainti verrattuna tukiaseman antenniin oli myös epävarmuuden lähde. Toinen antennin paikkaan liittyvä epävarmuus aiheutui antennin suuntauksesta tehtäessä kolme kohtisuoraa mittausta. Sekä kytkeytymisestä että antennin sijainnista ja suuntauksista aiheutuneeksi epävarmuudeksi arvioitiin ± 1 dB.

Spektrianalysointilla tehtyjen mittausten laajennettu epävarmuus oli ± 1.65 dB (Taulukko 12), kun kaikille epävarmuuksille oletettiin normaali todennäköisyysjakauma. Tulos perustuu standardi-epävarmuuteen kerrottuna peittävyyskertoimella $k=2$ (1.96), jolloin epävarmuudelle saadaan noin 95 % luottamusväli.

Taulukko 12. Kapeakaistailmaisimen epävarmuusarvio

	Epävarmuus (dB)	Standardi-epävarmuus (dB)
Absoluuttinen amplituditarkkuus	0.24	0.12
Taajuusvaste (3 Hz - 3 GHz)	0.53	0.19
Antennikerroin VUBA-9117 & SBA-9113	0.7	0.35
Kaapeli	0.04	0.02
Kytkenä ympäristöön	1	0.5
Paikka	1	0.5
Yhdistetty standardiepävarmuus		$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (c_i \cdot u_{(x_i)})^2}$
Laajennettu epävarmuus $k=2$		$u_e = 1.96 \cdot u_c$
		1.65

C2 Laajakaistailmaisim

Laajakaistailmaisimessa käytettiin kahta mittapäätä. Kummankin epävarmuusarvio perustuu valmistajan ilmoittamiin epävarmuuksiin (Taulukko 13 ja Taulukko 14). Molemmassa tapauksissa merkittävin epävarmuus aiheutui mitta-anturin paikasta ja kytketymisestä ympäristön rakenteisiin ja mittajaan. Kaikille muuttujien epävarmuuksille oletettiin normaali todennäköisyysjakauma.

Ilmaisinten mittauserpävarmuudet olivat ± 3.54 dB (33c) ja ± 3.46 dB (8c). Tulos perustuu standardiepävarmuuteen kerrottuna peittävyyskertoimella $k=2$ (1.96), jolloin epävarmuudelle saadaan noin 95 % luottamusväli.

Taulukko 13. Laajakaistailmaisimen (33c-mittapää) epävarmuusarvio

	Epävarmuus (dB)	Standardi-epävarmuus (dB)	
Kalibrointi	1.5		0.75
Taajuusvaste	1.25		0.625
Lineaarisuus	0.5		0.25
Isotrooppisuus	1		0.5
Lämpötila	0		0
Paikka	2		1
Kytkenä	2		1
Yhdistetty standardiepävarmuus		$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (c_i \cdot u_{(x_i)})^2}$	1.81
Laajennettu epävarmuus $k=2$		$u_e = 1.96 \cdot u_c$	3.54

Taulukko 14. Laajakaistailmaisimen (8c-mittapää) epävarmuusarvio.

	Epävarmuus (dB)	Standardi-epävarmuus (dB)	
Kalibrointi	1.0		0.5
Taajuusvaste	1.4		0.7
Lineaarisuus	0.5		0.25
Isotrooppisuus	1		0.5
Lämpötila	0.5		0.25
Paikka	2		1
KytKentä	2		1
Yhdistetty standardiepävarmuus		$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (c_i \cdot u_{(x_i)})^2}$	1.76
Laajennettu epävarmuus k=2		$u_e = 1.96 \cdot u_c$	3.46

Liite D Matkapuhelinverkkojen tekniset ominaisuudet

Tässä tutkimusprojektissa tutkittiin kolmen eri matkapuhelinverkon (GSM, UMTS, TETRA) tukiasemien RF-lähetinantennien aiheuttamia sähkömagneettisia kenttiä. Tukiasemat toimivat matkapuhelinten välisinä linkkeinä lähettämällä ja vastaanottamalla radiosignaaleja. Matkapuhelimet ovat yhteydessä tukiasemaan kahden eri taajuuskanavan kautta (Taulukko 15). UMTS-järjestelmä voi käyttää samaa taajuuskaistaa sekä lähetys- että vastaanottotilaan.

Taulukko 15. Matkapuhelinverkkojen käyttämiä taajuusalueita Suomessa.

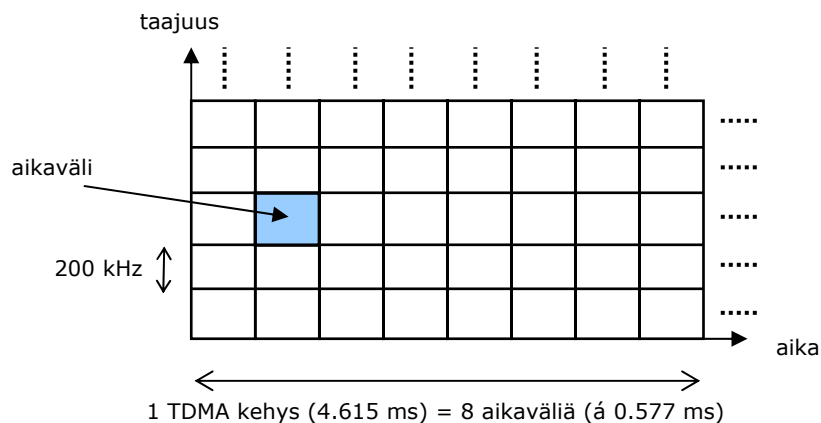
	Taajuusalue (MHz)	
	Tukiaseman vastaanottotila	Tukiaseman lähetystila
TETRA	380 - 420	390 - 430
GSM900	890 - 915	935 - 960
GSM1800	1710 - 1785	1805 - 1880
UMTS	1900 - 2200	

D1 GSM

Global System for Mobile Communications (GSM) on Suomen kattavin ja eniten käytetty matkapuhelinverkko. Suomessa GSM-verkot toimivat joko 900 MHz tai 1800 MHz taajuusalueilla. GSM kuuluu ns. toisen sukupolven matkapuhelinjärjestelmiin.

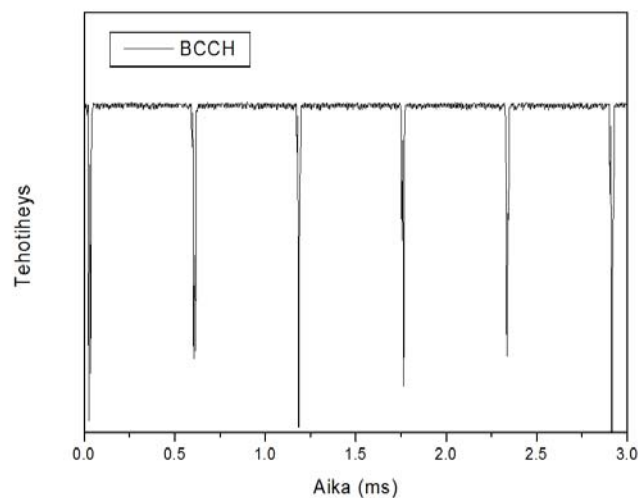
D1.1 TDMA tekniikka

GSM standardi perustuu monikantaaaltoiseen, aikajakoiseen moniliittymä-tekniikkaan (multi-carrier, time-division multiple access, TDMA), jossa kullekin samalla kanta-aallolla lähetettävistä signaaleista osoitetaan oma aikavälinsä (11). Kanta-aaltojen väli on 200 kHz, jolloin esimerkiksi GSM900-verkolle saadaan 124 kanta-aaltoa, jos taajuusalueen reunoille jätetään 200 kHz suojakaistat. Jokainen kanta-aaltotaajuus on jaettu ajassa 4.615 ms TDMA kehiksiin ja jokainen kehys vastaavasti kahdeksaan aikaväliin (Kuva 65). Käyttäjä saa yhden kanta-aaltotaajuuden käyttöönsä yhden aikavälin pituiseksi ajaksi. Yksi kanta-aalto voi siis ylläpitää kahdeksaa puhelinyhteyttä samanaikaisesti.



Kuva 65. TDMA tekniikka.

GSM-tukiasemat lähettävät signaalia jatkuvasti yhdellä taajuudella vaikka tukiasemalla ei olisi puhelinliikennettä. Kyseessä on lähetyksen hallintakanava (Broadcast Control Channel, BCCH), joka pystyy lähettämään myös seitsemän puhelua samanaikaisesti. Vaikka BCCH kanavan sanotaan lähettävän signaalia jatkuvasti, voidaan mitatussa spektrissä nähdä pieniä signaalin voimakkuuden laskuja (Kuva 66). Tehon laskut johtuvat siitä, että kunkin aikavälin lähetyksen muodostetaan yksittäisenä purskeena. Ylimääräisiä kanavia otetaan käyttöön sitä mukaa, kun puheluiden määrä kasvaa.



Kuva 66. GSM-tukiaseman lähettämä BCCH signaali 3 ms ajanjakson aikana.

D1.2 Teholuokat

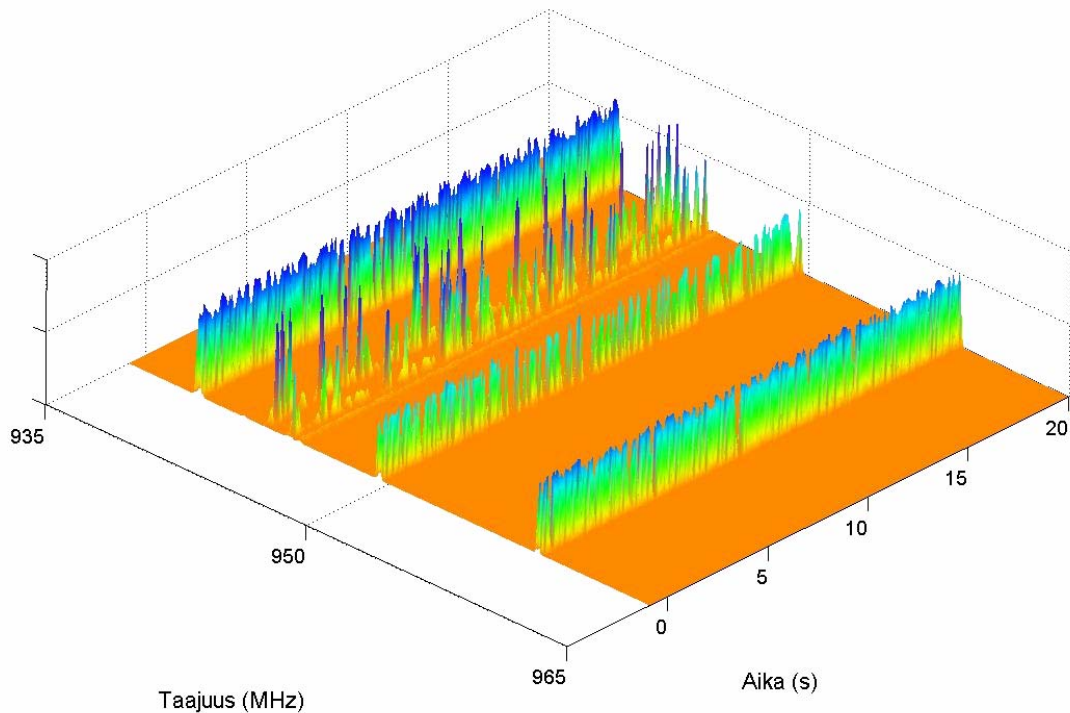
GSM-tukiasemien lähetystehot on määritelty Euroopan telealan standardointilaitoksen standardissa (5). Tukiasemat jaetaan tavallisiin tukiasemiin (makrosolu) sekä mikro- ja pikotukiasemiin. Eri teholuokille on annettu maksimilähetystehot ja niiden mittauspäikat (Taulukko 16). Makrosolujen tukiasemista kokonaistehonmittaus tapahtuu tehonyhdistimen sisääntulosta. Mikro- ja pikosolujen tukiasemien tehot määritetään antenniliittimestä *yhtä kantoaaltoa* kohden. Standardi ilmoittaa mikro- ja pikoasemille tehorajat muodossa dBm, mutta ne on taulukossa 16 muutettu suoraan wateiksi.

Taulukko 16. GSM-tukiasemien maksimilähetystehot.

GSM900		GSM1800	
Lähetysteho- luokka	Maksimi lähetysteho (W)	Lähetysteho- luokka	Maksimi lähetysteho (W)
Makro		Makro	
1	320 - (<640)	1	20 - (<40)
2	160 - (<320)	2	10 - (<20)
3	80 - (<160)	3	5 - (<10)
4	40 - (<80)	4	2.5 - (<5)
5	20 - (<40)		
6	10 - (<20)		
7	5 - (<10)		
8	2.5 - (<5)		
Mikro		Mikro	
M1	(>0.08) - 0.25	M1	(>0.5) - 1.6
M2	(>0.025) - 0.08	M2	(>0.16) - 0.5
M3	(>0.08) - 0.025	M3	(>0.05) - 0.16
Piko		Piko	
P1	(>0.02) - 0.01	P1	(>0.04) - 0.2

D1.3 Dynaaminen lähetystehonhallinta

GSM-tukiasemat pyrkivät käyttämään mahdollisimman pientä lähetystehoa siten, että radioyhteyden laatu säilyy kuitenkin hyvänä. Samalla mahdolliset häiriöt samaa taajuusaluetta käyttäville yhteyksille pienenevät. Tukiaseman tehoa voidaan vähentää 2 dB askelvälillä kokonaisuudessa 30 dB maksimilähetystehosta. Tehonhallinta näkyy käytännössä vertaamalla BCCH kanavan tehoja tavallisten, vain puheluiden välitykseen käytettävien kanavien, lähetystehoihin (Kuva 67). Käytettävät lähetystehot sekä tukiasemalla että matkapuhelimella riippuvat verkon käyttämästä tehonhallintastrategiasta. Tehoarvoihin vaikuttavat tukiaseman ja matkapuhelimen välisen yhteyden laatu sekä useat solulle asetetut parametrit. Lopullisen tehonhallintastrategian päättää kuitenkin matkapuhelinverkon operaattori. Normaalisissa tehonhallinnassa 2 dB tehomuutoksia voidaan tehdä 13 TDMA kehyksen välein (60 ms). Jos verkko käyttää nopeaa tehonhallintaa muutokset tapahtuvat 4 TDMA kehyksen välein (18.5 ms) (6).



Kuva 67. Mitattuja GSM900-verkkojen signaaleja ajan suhteen. BCCH kanavat voi erottaa muista lähetyskanavista jatkuvan tehotason avulla.

D1.4 Epäjatkuva lähetys

Epäjatkuva lähetys (discontinuous transmission, DTX) on GSM-verkkojen ominaisuus, jolla lähetys voidaan katkaista hiljaisten hetkien ajaksi. Tämä optimoi verkkojen käytön kokonaistehokkuutta, sillä normaalissa puhelinkeskustelussa kumpikin osapuoli puhuu noin puolet puhelun ajasta. Jos lähetyssignaali katkaistaan vastaanoton ajaksi puhelimen lähetyksen käyttöjakso voidaan laskea alle 50 %. Lähetyskanavalle vapautuva aika voidaan käyttää TDMA järjestelmällä muiden käyttäjien puheluiden välittämiseen.

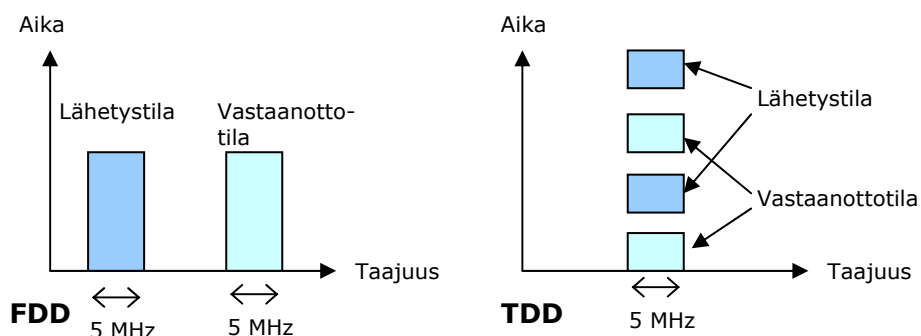
D2 UMTS

Universal Mobile Telecommunications System (UMTS) on 3GPP:n spesifioima kolmannen sukupolven matkaviestinjärjestelmä. 3GPP on usean standardointijärjestön yhteistyöorganisaatio. Suomessa UMTS-verkot otettiin käyttöön syksyllä 2004. Teleoperaattoreiden UMTS-toimilupa edellyttää, että teleyrityksen oma verkko kattaa vähintään 35 prosenttia siitä väestöpeitosta, jolle teleyritys tarjoaa televerkkopalvelua UMTS -matkaviestinverkossa. Tällä hetkellä UMTS-verkkojen peittoalue on varsin pieni, keskittyen lähinnä suurempiin asutuskeskuksiin.

D2.1 WCDMA tekniikka

Suomessa käytettävä UMTS-standardi perustuu suorasekvenssi koodijako moniliittymätekniikkaan (Direct Sequence Code Division Multiple Access, DS-CDMA), jossa lähetettävä informaatio levitetään noin 5 MHz taajuuskaistalle. Leveästä taajuuskaistasta johtuen DS-CDMA:sta käytetään usein myös nimitystä laajakaistainen koodijakoinen moniliittymätekniikka (Wideband Code Division Multiple Access, WCDMA) (7).

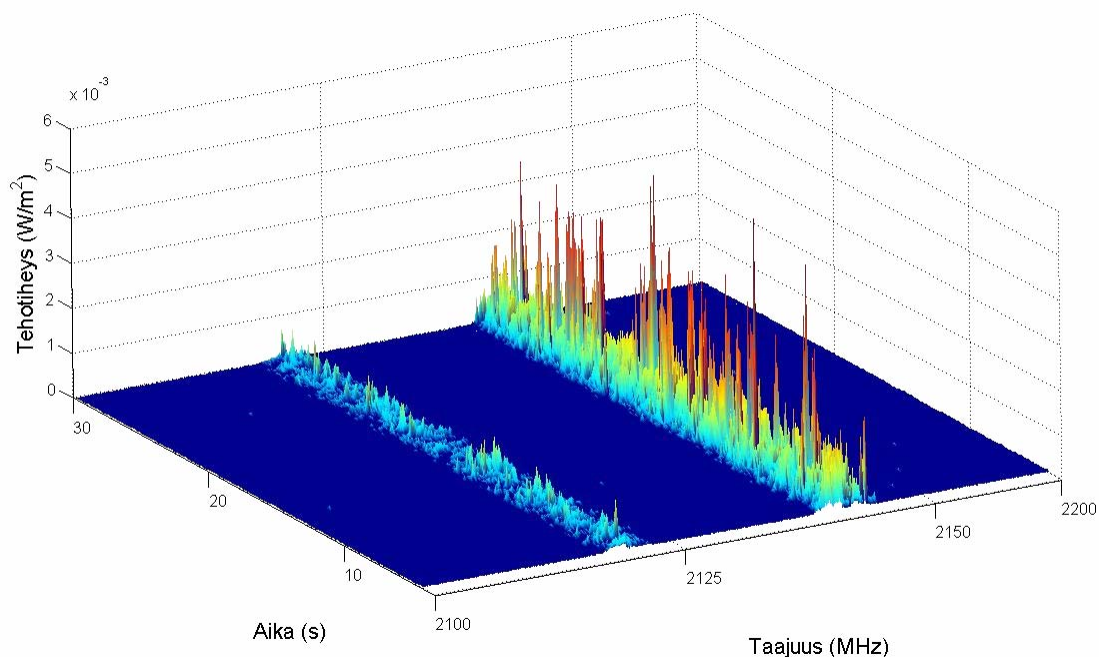
WCDMA tukee kahta toimintatapaa, joissa voi käyttää joko parillisia (TDD, Time Division Duplex) tai parittomia (FDD, Frequency Division Duplex) taajuusalueita (Kuva 68). FDD tilassa lähetykseen ja vastaanottoon käytetään erillisiä 5 MHz taajuuskaistoja. TDD mallissa sekä lähetykset että vastaanotto tapahtuu samalla taajuusalueella vastavuoroisesti. Tällöin vastaanoton ja lähetyksen välillä on lyhyt aika, jolloin ei tapahdu liikennettä (11). Suomessa TDD mallille on varattu taajuuskaista 1900 - 1920 MHz taajuuksilta.



Kuva 68. UMTS FDD ja TDD lähetystavat.

WCDMA systeemissä kaikki käyttäjät ovat aktiivisia samanaikaisesti samalla taajuusalueella ja heidät erotetaan toisistaan erityisten koodien avulla. Eri käyttäjien hajautetut signaalit yhdistetään tukiaseman lähetyssignaaliin, jonka tehotaso vaihtelee suuresti (Kuva 69). Vaihtelu johtuu useasta tekijästä, mm. käyttäjien lukumäärästä.

Lähetettävät signaalit on WCDMA koodauksessa jaettu ajassa 10 ms pituisiin kehyksiin, joissa on 15 aikaväliä. UMTS-tukiasema lähettää pilottikanavaa (Common Pilot Channel, CPICH) jatkuvasti vakioteholla. Pilottikanavaa lähetetään, vaikka tukiasemalla ei olisi lainkaan puhelinliikennettä. Jos pilottikanavan käyttämä koodi on tiedossa, voidaan soveltuvalla mittauslaitteistolla arvioida tukiaseman maksimitehoa. Teleoperaattorit voivat asettaa pilottikanavan ja tukiaseman kokonaistehon suhteen haluamalleen tasolle. Tyypillisesti tehosuhte on luokkaa 10 %. Suurempi suhde vähentää teleliikenteeseen käytettävissä olevaa tehoa, mutta kasvattaa samalla tukiaseman solun toiminta-alueita. CPICH-kanavien lisäksi on joukko muita kanavia, jotka lähettävät, vaikka tukiaseman kautta ei olisi liikennettä. Tukiaseman 'tyhjäkäyntiteho' on noin 15 % luokkaa maksimitehosta.



Kuva 69. Esimerkki mitatuista UMTS-signaaleista ajan suhteen.

D2.2 Teholuokat

UMTS-tukiasemien lähetystehot on määritelty Euroopan telealan standardointilaitoksen standardissa (4). Tukiasemat jaotellaan suuralue-tukiasemiin (Wide Area Base Station), keskikantaman tukiasemiin (Medium Range Base Station) ja lähialueen tukiasemiin (Local Area Base Station) ja niillä on vastaavuus GSM-verkon tukiasemien makro-, mikro- ja pikosolukokoihin (Taulukko 17). Tukiasemien tehot ilmoitetaan nimellisinä lähtötehoina (Rated Output Power, PRAT), mikä tarkoittaa valmistajan ilmoittamaa yhden kantoaallon keskimääräistä tehotasoa antenniliittimessä. Standardissa tehot on ilmoitettu muodossa dBm, mutta ne on muutettu taulukossa 17 suoraan wateiksi. Suuralue-tukiasemien teholle ei ole ETSI dokumentissa annettu ylärajaa.

Taulukko 17. UMTS-tukiasemien maksimilähetystehot.

Lähetysteholuokka	PRAT (W)
Suuralue / Makro	-
Keskikantama / Mikro	≤ 6.3
Lähialue / Piko	≤ 0.25

D2.3 Dynaaminen lähetystehon hallinta

Myös UMTS-verkoissa tukiasemat pyrkivät käyttämään mahdollisimman pientä lähetystehoa siten, että radioyhteyden laatu säilyy kuitenkin hyvänä. Samalla mahdolliset häiriöt samaa taajuusaluetta käyttäville yhteyksille pienenevät. UMTS-tukiasemien tehonsäätö on huomattavasti GSM-verkkoja tarkempaa, sillä tehotaso tarkistetaan 1500 kertaa sekunnissa. Vähimmäisvaatimuksena tehonsäätöön on 1 dB säätöaskel, mutta tukiasemat voivat käyttää myös 0.5, 1.5 ja 2 dB säätötarkkuuksia. Tehonsäätö mahdollistaa vähintään 25 dB tehonsäädön lähetettävään signaaliin. Vastaavasti tukiaseman kokonaistehoa voidaan vähentää vähintään 18 dB maksimilähetystehosta. Käytännössä tehonsäädön laajuus on suurempi.

D3 TETRA

Terrestrial Trunked Radio (TETRA) on Euroopan telealan standardointilaitoksen spesifioima matkapuhelinverkko (8), joka on tarkoitettu lähinnä viranomais- ja ammattikäyttöön. Suomessa käytössä oleva viranomaisverkko VIRVE on toteutettu TETRA-tekniikalla. VIRVE-verkkoa käyttävät mm. poliisi, palo- ja pelastustoimi, sosiaali- ja terveystoimi, tullilaitos ja puolustusvoimat. Pääkaupunkiseudulla toimii myös yksityinen TETRA-verkko HelenNet, jonka asiakkaita ovat mm. osa julkisen liikenteen toimijoista ja turvallisuusalan yrittäjistä. TETRA-puhelimia voi äänipuhelujen lisäksi käyttää mm. tekstiviestien ja datan lähettämiseen sekä ryhmäpuheluihin. TETRA-puhelimilla voi lisäksi ottaa yhteyden toiseen puhelimeen ilman tukiasemaverkkoa. Alla olevissa kuvissa on esitetty kaksi eri tyyppistä TETRA-tukiaseman antennia.

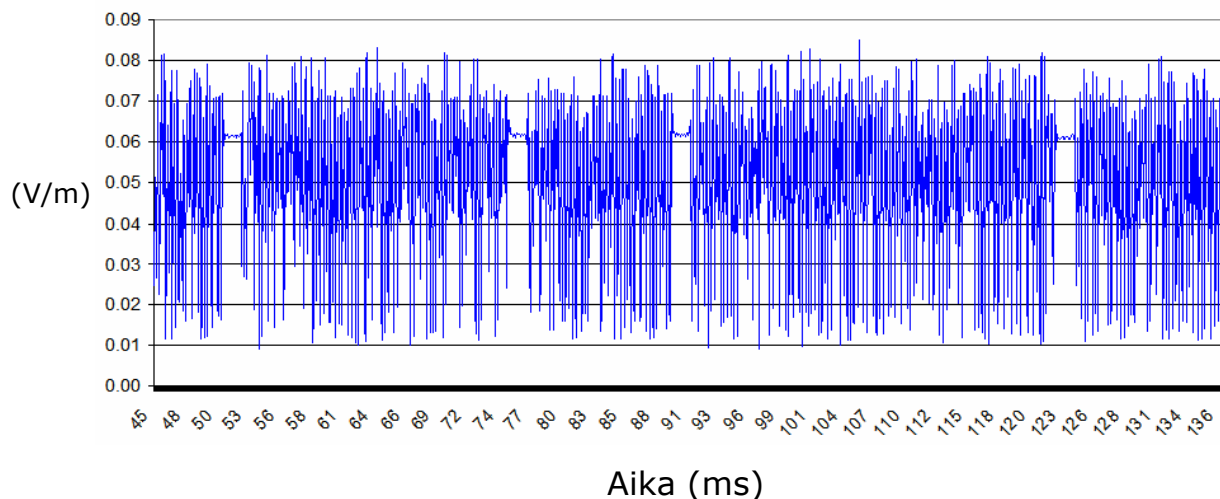


Kuva 70. Kaksi TETRA-antennia. Vasemmassa kuvassa on monopoli-antenni ja oikeassa kuvassa neljä päällekkäistä dipoli-antennia.

D3.1 TDMA tekniikka

TETRA-tekniikka käyttää tiedonvälitykseen GSM-verkkojen tavoin TDMA tekniikkaa. Erotuksena GSM-verkkoihin on pienempi kantoaaltojen väli ja leveys, joka on TETRA-standardin mukaan 25 kHz (8). TDMA kehys on 56.67 ms pituinen ja se on jaettu neljään 14.17 ms pituiseen aikajaksoon.

TETRA-standardi antaa tukiasemille mahdollisuuden käyttää joko jatkuvaa tai aikajakoista (epäjatkuvaa) lähetystapaa. Jatkuvassa lähetystavassa tukiasema lähettää signaalia vakioteholla ja jokaisella aikajaksolla. Epäjatkuvassa tilassa tukiasema lähettää vain joka neljännellä aikajaksolla, jolloin neljä tukiasemaa voi jakaa samanaikaisesti saman taajuusalueen. Puhelinliikenteen kasvaessa tukiasemat voivat ottaa käyttöön useampia kantoaaltoja.



Kuva 71. TETRA-tukiaseman lähetystä aikatasossa.

D3.2 Teholuokat

TETRA-tukiasemien maksimi lähetystehot teholuokittain on määritelty Euroopan telestandardointi-instituutin teknisessä spesifikaatiossa (Taulukko 18). Tehon maksimiarvo tarkoittaa yhden lähettimen tuottamaa tehoa tukiaseman tehoulостulosta. Tehohäviöt kaapelissa ja yhdistimessä vähentävät kokonaislähetystehon noin kolmannekseen alkuperäisestä. Neljän 25 W nimellisteholla toimivan lähettimen (lähetysteholuokka 2) todellinen teho on siis noin 33 W (16).

**Taulukko 18. TETRA-tukiasemien nimelliset
maksimilähetystehot yhtä lähetintä kohden.**

Lähetysteholuokka	Teho (dBm)
1 (40 W)	46
2 (25 W)	44
3 (15 W)	42
4 (10 W)	40
5 (6.3 W)	38
6 (4 W)	36
7 (2.5 W)	34
8 (1.6 W)	32
9 (1 W)	30
10 (0.6 W)	28

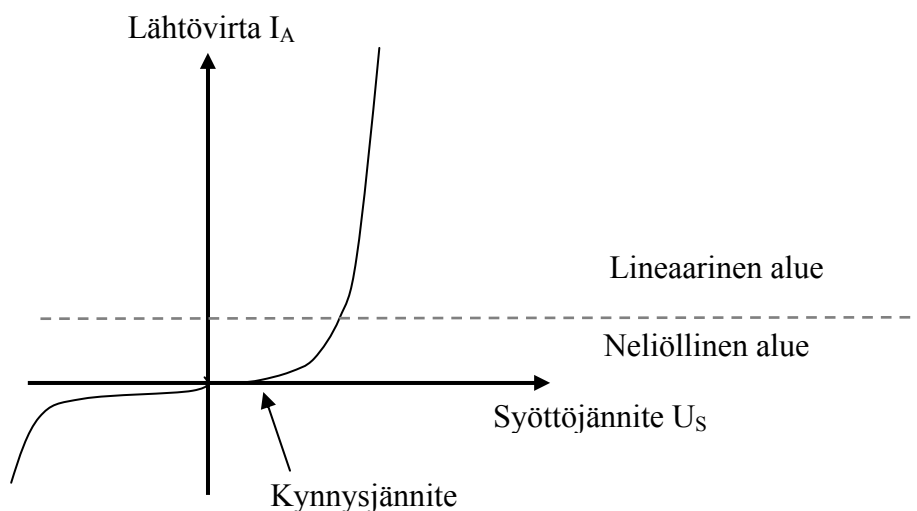
D3.3 Dynaaminen lähetystehon hallinta

GSM- ja UMTS-verkoista poiketen TETRA-tukiasemat eivät käytä dynaamista lähetystehon hallintaa. TETRA-käsi puhelimissa tehonhallinta on käytössä, kun puhelut välittyvät tukiasemien kautta. Käytettäessä suorapuhelutoimintaa puhelimesta toiseen tehonhallinta ei ole käytössä.

Liite E Diodi-ilmaisimen vaste voimakkaassa kentässä

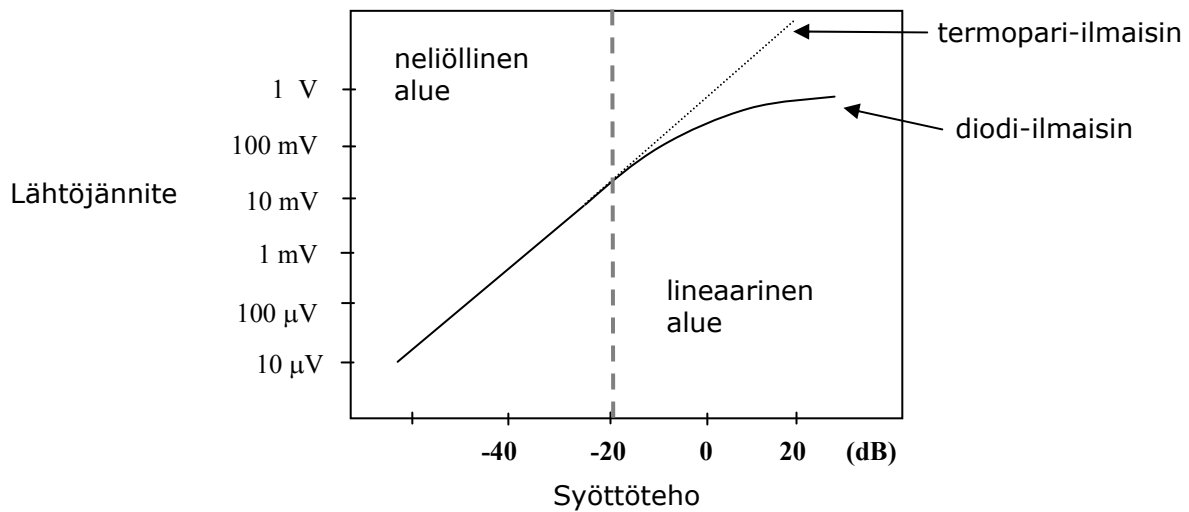
Kun mitattava jännite ylittää kynnyksjännitteen, päästösuuntaan kytketyn diodi alkaa johtaa virtaa (Kuva 72). Toimiessaan optimaalisella mitta-alueellaan diodi-ilmaisimet tuottavat epälineaarisen vasteen, joka on verrannollinen sähkökentän voimakkuuden neliöön. Tällöin ilmaisimen sanotaan toimivan *neliöllisesti*. Ilmaisimen antojännite (U_A) on verrannollinen syöttöjännitteen (U_S) neliöön: $U_A \propto U_S^2 \propto P_S$, eli antojännite on verrannollinen syöttötehoon (P_S), koska $P = U^2/R$,

Linearisella alueella antojännite on verrannollinen syöttöjännitteeseen: $U_A \propto U_S$ ja syöttötehon neliöjuureen $\sqrt{P_S}$.



Kuva 72. Diodin ominaiskäyrä

Diodi-ilmaisimet toimivat pienillä kentänvoimakkuuksilla neliöllisellä alueella. Voimakkaissa kentissä diodin ylitse syntyvä tasajännite on kuitenkin lineaarinen kentänvoimakkuuden suhteen. Tällainen tilanne voi olla esimerkiksi tukiasemien vieressä, joissa on voimakas pulssimainen lähde, jolloin diodi-ilmaisimien yliarvioi sähkökentän voimakkuutta (Kuva 73).



Kuva 73. Ilmaisimien toiminta-alueet.

Laajakaistaisten mittarien lukemaan vaikuttavat diodi-ilmaisimen lisäksi myös ilmaisimpiirin muut komponentit ja mahdollinen lineaarisuuskorjaus. Termopari-ilmaisim synnyttää keskimääräiseen tehoon verrannollisen tasajännitteen riippumatta signaalin muodosta. Diodi-ilmaisimelle tehdään usein lineaarisuuskorjaus yksitaajuisella sinimuotoisella signaalilla. Tällaisella signaalilla korjaus toimii hyvin myös korkeissa kentänvoimakkuuksissa. Signaalin ollessa pulssimainen ilmaisimpiiri toimii eräänlaisena huippuarvoilmaisimena, jolloin mittari näyttää suurempaa arvoa kuin pitäisi. Yliarviointi lisääntyy kentänvoimakkuuden kasvaessa ja mitattaessa yhtä aikaa useita signaaleja.

Työympäristötutkimuksen raporttisarja

1. Hongisto V, Helenius R, Lindgren M: Kaksinkertaisen seinärakenteen ääneneristävyys – laboratoriotutkimus. Helsinki 2002.
2. Hongisto V: Monikerroksisen seinärakenteen ilmaääneneristävyiden ennustemalli. Helsinki 2003.
3. Työhygienian koulutuspäivät 2003. (Imatra 20.–21.5.2003.)
4. Kaarlela A, Jokitulppo J, Keskinen E, Hongisto V: Toimistojen ääniympäristökyselymenetelmän kehitys.
5. 6th European Seminar on Personal Equipment Seminar Report. Ed. Eero Korhonen.
6. Larm P, Keränen J, Hongisto V: Avotoimistojen akustiikka. Helsinki 2004.
7. Työhygienian koulutuspäivät 2004. (Helsinki 25.–26.5.2004.) Toim. Mirja Kiilunen.
8. Valkeapää A, Anttonen H, Niskanen J: Liike- ja palvelurakennuksien tuulikaappien vedontorjunta. Helsinki 2004.
9. Kaarlela A, Jokitulppo J, Helenius R, Keskinen E, Hongisto V: Meluhaitat toimistotyössä – pilottitutkimus.
10. Toppila E, Laitinen H, Starck J, Pyykkö I: Klassinen musiikki ja kuulonsuojelu. Saatavilla myös pdf-versio (www.ttl.fi > Aihesivut > Työhygenia > Melu > Tiedonlähteet).
11. Hirvonen A, Kiilunen M, Valkonen S: Biologisen monitoroinnin palveluanalytiikan vuositilasto 2003.
12. Heikkilä P, Saalo A, Soosaar A: Työpaikkojen ilman epäpuhtausmittaukset 1994–2003
13. Työhygienian koulutuspäivät 2005. (Tampere 15.–16.6.2005.) Toim. Starck J ja Laitinen R.
14. Hietanen M, von Nandelstadh P, Alanko T: Sähkömagneettiset kentät työympäristössä. Opaskirja työntekijöiden altistumisen arvioimiseksi.
15. Biologisen monitoroinnin palveluanalytiikan vuositilasto 2004.
16. Elo A-R, Korhonen E, Starck J (Eds.): 7th European Seminar on Personal Protective Equipment. Seminar report. (Work Environment Research Report Series nro 16.) Helsinki 2005.
17. Puuntyöstöpölyn hallinnan kehittäminen (FineWood). Lappeenrannan aluetyöterveyslaitos, Fysiikan osasto ja VTT Tuotteet ja tuotanto. 2005.
18. Hautalampi T, Henriks-Eckerman M-L, Engström K, Koskela H, Saarinen P & Välimaa J: Kemikaalialtistumisen rajoittaminen automaalia-moissa. Työterveyslaitos, Turku 2006.
19. Alanko T, Hietanen M, von Nandelstadh P: Työntekijöiden altistuminen tukiasemien radiotaajuisille kentille. Työterveyslaitos, Helsinki 2006.