

Opinnäytetyö (AMK)
Elektroniikan koulutusohjelma
Tietoliikennejärjestelmät
2013

Ilpo Taulio

LIKKUVAT KENTÄNVOIMAKKUUS- MITTAUKSET TURUN ALUEELLA



TURUN AMMATTIKORKEAKOULU
TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

OPINNÄYTETYÖ (AMK) | TIIVISTELMÄ

TURUN AMMATTIKORKEAKOULU

Elektroniikan koulutusohjelma | Tietoliikennejärjestelmät

Joulukuu 2013 | Sivumäärä 52

Ohjaaja: DI, yliopettaja Reijo Ekman

Ilpo Taulio

LIKKUVAT KENTÄNVOIMAKKUUSMITTAUKSET TURUN ALUEELLA

Tässä työssä suoritettiin liikkuvia kentänvoimakkuusmittauksia Turun alueella autolla sekä kävellen. Mittauksia tehtiin kaupungin keskustassa sekä sen ulkopuolelta. Tarkkailussa oli radioaallon sähkökentänvoimakkuus.

Työssä on tehty mittauksia sekä sisä- että ulkotiloissa. Mittauskohteet on valittu niiden keskeisen eroavuuden takia, ja mittauksia on tehty sekä kävellen että autolla. Työssä käytetyt kentänvoimakkuusmittarit ovat sähkömagneettisten kenttien altistumiselle suunnattuja laitteita. Näiden laitteiden mittaamaa dataa analysoitiin ja visualisoitiin.

Saavutetut tulokset osoittavat matkapuhelinjärjestelmien kentänvoimakkuuksien olevan pääsääntöisesti voimakkaimpia radioaaltoja käyttävistä tietoliikennejärjestelmistä. Analysoinnissa huomattiin että mitatut kentänvoimakkuudet eivät fysikaalisena ilmiönä ole täysin yksiselitteisiä.

Saavutetut tulokset havinnollistavat eri tietoliikennejärjestelmien esiintyvyyttä ja kentänvoimakkuuksien suuruutta Turun alueella. Samankaltaista informaatiota ei ole julkisesti tällä hetkellä saatavilla.

ASIASANAT:

langattomat verkot, kentänvoimakkuus, radioaallot, radioverkot, sähkömagneettinen säteily

BACHELOR'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Electronics | Telecommunication systems

December 2013 | Total number of pages 52

Reijo Ekman, M.Sc.EE, Principal Lecturer

Ilpo Taulio

MOBILE FIELD STRENGTH MEASUREMENTS IN THE TURKU REGION

This Bachelor's thesis deals with mobile field strength measurements performed by car and by foot in the region of Turku. The measurements were performed both in the center of the city and outside it as well. The examined subjects in these measurements were the electric field strengths of radio waves.

The measurements were performed both indoors and outdoors. The measured locations were chosen in terms of diversity and different methods of measurements were used. The field strength meters used generally measure human exposure to electromagnetic fields, but measuring human exposure was not the main subject of this thesis. The measured data was later analyzed and visualized.

The obtained results show that mobile phone systems using wireless technology have primarily the greatest field strengths of radio waves. In the analyzing process, the complexity of radio waves as a physical phenomenon was noticed.

The obtained results demonstrate the occurrence of wireless telecommunication systems as well as the magnitude of field strengths in the Turku region. This sort of data is not available for the public at this moment.

KEYWORDS:

Wireless networks, field strength, radio waves, radio networks, electromagnetic radiation

SISÄLTÖ

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

| | |
|---|-----------|
| 1 JOHDANTO | 1 |
| 2 RADIOAALLON ETENEMINEN | 2 |
| 2.1 Sähkömagneettinen aalto | 2 |
| 2.2 Sähkökentän voimakkuus ja tehotiheys | 3 |
| 2.3 Radioaallon eteneminen | 4 |
| 2.3.1 Vapaan tilan eteneminen | 4 |
| 2.3.2 Aallon heijastuminen pinnasta | 6 |
| 3 MITTALAITTEET JA MITTAUSMETODIIKKA | 7 |
| 3.1 Narda NBM-550 -kentänvoimakkuusmittari | 7 |
| 3.1.1 NBM-550-mittariyksikkö | 7 |
| 3.1.2 Mittapäät | 7 |
| 3.1.3 Nardan mittalaitteen kalibrointi EMC-laboratoriossa | 8 |
| 3.2 SATIMO EME SPY 140 -dosimetri | 8 |
| 3.3 Mittalaitteiden eroavuus | 10 |
| 3.4 Mittausmenetelmät | 11 |
| 4 MITTAUKSET JA TULOKSET | 14 |
| 4.1 Kaarinankatu | 15 |
| 4.1.1 Geneerinen mittaus | 15 |
| 4.1.2 Stationaarinen mittaus autolla | 18 |
| 4.2 Linnankatu | 21 |
| 4.3 Eerikinkatu | 25 |
| 4.4 Yliopistonkatu | 27 |
| 4.5 Kauppakeskus Hansa | 31 |
| 4.6 Turun Kauppatori | 36 |
| 4.7 Kauppakeskus Skanssi | 40 |
| 4.8 Turun ja Kaarinan välinen mittaus | 44 |
| 5 MITTAUSTULOSTEN ANALYSOINTI | 47 |
| 5.1 Mittalaitteiden vaikutukset tuloksiin | 47 |
| 5.2 Mittaustulosten yleiset vaikuttavat tekijät | 48 |

5.3 Mittaustulosten merkitys 49

6 YHTEENVETO 51

LÄHTEET 52

LIITTEET

Liite 1. Narda NBM-550 -mittapäiden spesifikaatiot

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

| | |
|-----------|--|
| c | valon nopeus |
| E | sähkökenttä |
| F | voima |
| f | taajuus |
| H | magneettikenttä |
| P_0 | säteilijän lähetysteho |
| q | hiukkasen varaus |
| S | tehotiheys |
| Z_0 | vapaan tilan impedanssi |
| λ | aallonpituus |
| 3G | kolmannen sukupolven matkapuhelinteknologia (third generation) |
| 5G | viidennen sukupolven langaton- tai matkapuhelinteknologia (5th generation mobile networks tai 5th generation wireless systems) |
| DECT | langattomien puhelinten standardi (Digital Enhanced Cordless Telecommunications) |
| DL | matkapuhelinverkoissa yhteyden siirtotie tukiasemalta mobiililaitteelle (downlink) |
| EMC | sähkömagneettinen yhteensopivuus (Electro Magnetic Compatibility) |
| GSM 900 | toisen sukupolven matkapuhelinjärjestelmä 900 MHz:n taajuusalueella |
| GSM 1800 | toisen sukupolven matkapuhelinjärjestelmä 1800 MHz:n taajuusalueella |
| ICNIRP | kansainvälisen ionisoimattoman säteilyn toimikunta (International Commission on Non-Ionizing Radiation) |
| LOS | lähetys- ja vastaanottoaseman välinen näköyhteys (Line Of Sight) |

| | |
|-------|---|
| TETRA | viranomaisille suunnattu digitaalinen puheradioverkko (Terrestrial Trunked Radio) |
| UL | matkapuhelinverkoissa yhteyden siirtotie mobiililaitteelta tukiasemalle (uplink) |
| UMTS | kolmannen sukupolven matkapuhelinjärjestelmä (Universal Mobile Telecommunications System) |
| VIRVE | Suomen viranomaisradioverkko. Ensimmäinen valtakunnallinen TETRA –radioverkko. |
| WiFi | WLAN –tekniikan kaupallinen nimitys |
| WiMAX | langaton datasiirron laajakaistatekniikka (Worldwide Interoperability for Microwave Access) |
| WLAN | langaton lähiverkkotekniikka (wireless local area network) |

1 JOHDANTO

Tässä opinnäytetyössä tutkittiin radioaaltojen kentänvoimakkuuksia eri taajuusalueilta, maantieteellisesti eri ympäristöissä sekä eri mittausmenetelmin. Työssä perehdyttiin radioaallon sähkökentänvoimakkuuksiin fyysikaaliselta näkökulmalta eikä radioteknisesti jonkin laitteen vastaanottamaan tehoon. Opinnäytetyö on tehty Turun AMK:n radiolaboratorion toimeksiannosta.

Kentänvoimakkuusmittauksia on suoritettu monessa opinnäytetyössä joko työn primäärisenä aiheena tai sivuaiheena. Töissä on analysoitu sekä yhtä että useaa radioyhteyttä, ja mittauksia on suoritettu niin mobiilisti kuin stationaarisesti. Tämän työn mitattu data on kuitenkin poikkeuksellinen siinä mielessä, että vastaavanlaisia kentänvoimakkuusarvoja ei Turun alueelta ole julkisesti saatavilla.

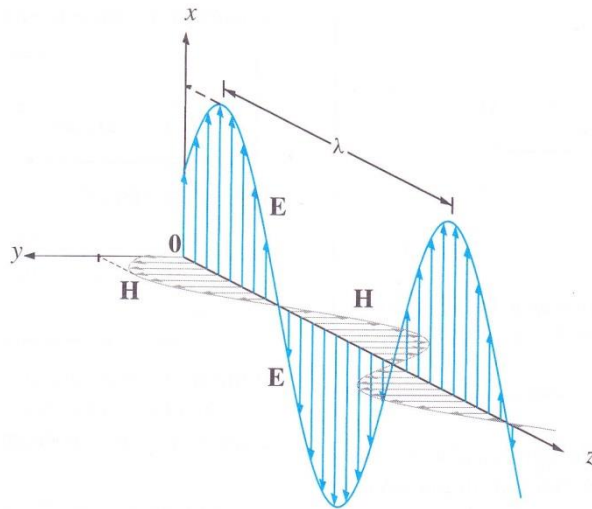
Työn vaatimuksena oli luotettavat mittaustulokset sekä korrekrit menetelmät suorittaa kentänvoimakkuusmittauksia. Työssä ei pyritty välttämään lähetysten vääristymiseen liittyviä tekijöitä. Näin ollen mittaustuloksien analysoinnissa pohditaan kentänvoimakkuuksien muutoksiin liittyviä ilmiöitä.

Työn kahdessa ensimmäisessä luvussa käsitellään kentänvoimakkuuksiin liittyviä olennaisia käsitteitä, mittalaitteistoa ja mittausmetodiikka. Viimeiset luvut käsittelevät mittaustuloksia sekä niiden analysointia eri näkökulmista.

2 RADIOAALLON ETENEMINEN

2.1 Sähkömagneettinen aalto

Sähkömagneettisella aallolla viitataan sähkömagneettiseen säteilyyn joka etenee aaltoliikkeenä (Kuva 1.). Aalto koostuu muuttuvasta sähkö-, eli E -kentästä ja magneetti-, eli H -kentästä, jotka ovat riippuvia toisistaan, sillä ne generoivat toisiaan. [1]



Kuva 1. Radioaallo, joka etenee z -akselin suuntaan. x -akseli kuvaa sähkökentän vaihtelua ja y -akseli magneettikentän vaihtelua. [2]

Sähkömagneettinen aalto etenee tyhjiössä valon nopeudella taajuudesta riippumatta. Aaltoliikkeen taajuuden f ja aallonpituuden λ välinen yhteys havaitaan yhtälöstä:

$$\lambda = \frac{c}{f}, \quad (1)$$

jossa c on valon nopeus väliaineessa. Valon nopeus ilmassa on $2,998 \cdot 10^8$ m/s. [3]

Sähkömagneettinen säteily jaetaan aallonpituuden ja taajuuden perusteella taajuusspektrissä osa-alueisiin. Spektrin alkuosan muodostavat

matalataajuisimmat aallot eli radioaallot, jotka kattavat 3 kHz – 300 GHz alueen. Radioaallot jaetaan dekadeittain taajuuden ja aallonpituuden perusteella osaluueisiin (Taulukko 1.).

Taulukko 1. Radioaaltojen taajuusalueet. [3]

| Taajuusalue | Taajuus f | Aallonpituus λ |
|--------------------------------|--------------|------------------------|
| VLF Very Low Frequencies | 3-30 kHz | 100 km - 10 km |
| LF Low Frequencies | 30-300 kHz | 10 km - 1 km |
| MF Medium Frequencies | 300-3000 kHz | 1 km - 100 m |
| HF High Frequencies | 3-30 MHz | 100 m - 10 m |
| VHF Very High Frequencies | 30-300 MHz | 10 m - 1 m |
| UHF Ultra High Frequencies | 300-3000 MHz | 1 m - 100 mm |
| SHF Super High Frequencies | 3-30 GHz | 100 mm - 10 mm |
| EHF Extremely High Frequencies | 30-300 GHz | 10 mm - 1 mm |

Taajuusalueilla on eri käyttötarkoitukset ja niiden käytöstä on sovittu kansainvälisin sopimuksin. Tämän työn mitatut taajuuskaistat ulottuvat LF-alueelta jopa SHF-alueelle asti. [3]

2.2 Sähkökentän voimakkuus ja tehotiheys

Sähkökenttä, kuten magneettikenttä, on vektorisuure jonka voimakkuudella on suuruus sekä suunta. Sähkökentän voimakkuus E määritellään seuraavasti:

$$E = \frac{F}{q}, \quad (2)$$

jossa F on sähköisesti varattuun hiukkaseen kohdistuva voima ja q on hiukkasen varaus. Erimuotoisten pintojen aiheuttamat sähkökenttien voimakkuudet ovat määriteltävissä soveltamalla Gaussin tai Coulombin lakia, mutta tässä työssä niihin ei perehdytä. Sähkökentän voimakkuutta kuvaa joko yksikkö N/C tai V/m, joista käytännössä käytetympi on V/m. Ilmassa nämä yksiköt ovat yhtä suuria. [1][4]

Sähkökenttää E ja magneettikenttää H yhdistää tehotiheys S , joka havaitaan Poyntingin vektorin noudattamasta yhtälöstä:

$$S = E \times H . \quad (3)$$

Tehotiheys kuvaa sähkömagneettisen säteilyn kuljettamaa energiamäärää jonka yksikkö on W/m^2 . Sähkömagneettisen sinimuotoisen aallon tehotiheys voidaan kaukokentässä (kun etäisyys säteilijästä on $< \lambda/2$) yksinkertaistaa muotoon:

$$S = E \cdot H , \quad (4)$$

jossa E ja H ovat kenttien tehollisarvoja (aallon amplitudi jaettuna $\sqrt{2}$ kanssa). Kun vapaan tilan impedanssi Z_0 noudattaa kaavaa:

$$Z_0 = \frac{E}{H} , \quad (5)$$

voidaan kaavat (4) ja (5) yhdistää, josta huomataan tehotiheyden ja sähkökentän voimakkuuden välinen yhteys:

$$S = \frac{E^2}{Z_0} , \quad (6)$$

Z_0 (120π) on vapaan tilan impedanssi kaukokentässä.

2.3 Radioaallon eteneminen

2.3.1 Vapaan tilan eteneminen

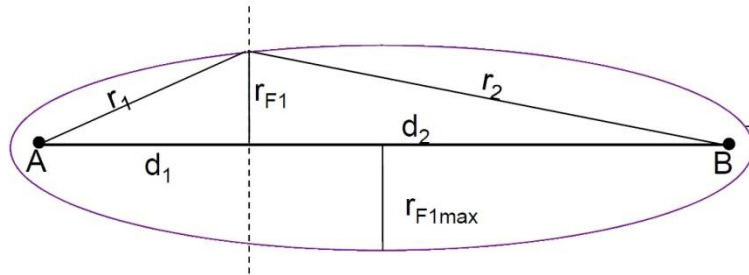
Radioaallon etenemisen yksinkertaisin malli on vapaan tilan eteneminen. Malli perustuu kuvitteelliseen tilanteeseen, jossa isotrooppinen säteilijä (antenni) on asetettu täysin vapaaseen avaruuteen. Isotrooppinen antenni säteilee ympärilleen tasaisesti synnyttäen yhtä suuren tehotiheyden joka suuntaan. [4]

Isotrooppisen säteilijän tehoitiheys S jossakin pisteessä etäisyydellä r säteilijästä, saadaan ratkaistua kaavasta:

$$S = \frac{P_0}{4\pi r^2}, \quad (7)$$

jossa P_0 on säteilijän lähettämä teho. Sähkökentän voimakkuus samassa pisteessä saadaan laskettua kaavalla (6). [4]

Jotta vapaan tilan kaavoja voidaan hyödyntää, tarvitaan lähetys- ja vastaanottoaseman välille näköyhteys (Line Of Sight, LOS), jota ympäröi fyysisesti esteetön alue. Tätä aluetta kutsutaan nimellä 1. Fresnelin ellipsoidi tai vyöhyke (Kuva 2.). [3][5]



Kuva 2. 1. Fresnelin ellipsoidi. [6]

Fresnelin vyöhykkeen koko laajenee aallon pituuden kasvaessa, mikä havaitaan ellipsoidin lausekkeesta:

$$r_1 + r_2 - (d_1 + d_2) = \lambda/2. \quad (7)$$

Vyöhykkeen säde r_{F1} saadaan laskettua kaavasta:

$$r_{F1} = \sqrt{\frac{\lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2}} \quad (8)$$

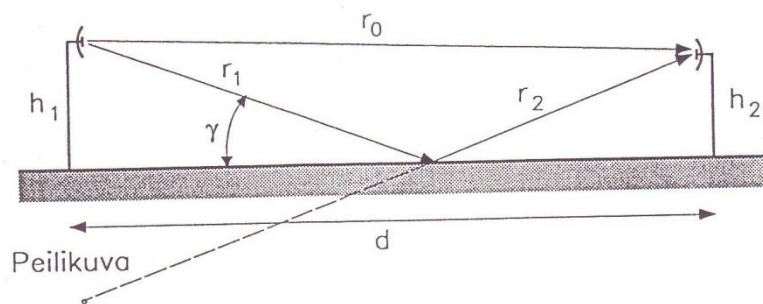
Vyöhykkeen maksimisäde r_{F1max} lasketaan ellipsoidin keskeltä, mikä noudattaa kaavaa:

$$r_{F1max} = \frac{\sqrt{\lambda d}}{2}, \quad (9)$$

jossa d on signaalin lähetys- ja vastaanottopisteiden yhteenlaskettu välimatka ($d_1 + d_2$). [6]

2.3.2 Aallon heijastuminen pinnasta

Etenevä radioaalto heijastuu osuessaan johonkin fyysiseen pintaan kuten rakennukseen tai maanpintaan. Radiotien vastaanottopäähän saattaa suoraan edenneen aallon lisäksi saapua heijastuneita aaltoja. Tätä ilmiötä kutsutaan monitie-etenemiseksi (Kuva 3.). [3]



Kuva 3. Monitie-eteneminen kahden antennin välillä. Kuvassa suoraan edennyt aalto sekä tasaisesta pinnasta heijastunut aalto. [3]

Kun radioaalto heijastuu tasaisesta pinnasta kuten kuvassa 3, on aallon tulokulma pintaan nähden yhtä suuri kuin sen lähtökulma. Heijastunut aalto saapuu vastaanottopäähän myöhemmin kuin suoraan edennyt aalto, aiheuttaen aaltojen välille vaihe-eron. Tämä vaikuttaa kentänvoimakkuuteen vastaanottopäessä. Pahimmassa tapauksessa aallot ovat täysin vastakkaisessa vaiheessa jolloin vastaanottimeen ei saada signaalia lainkaan. [5]

3 MITTALAITTEET JA MITTAUSMETODIIKKA

3.1 Narda NBM-550 -kentänvoimakkuusmittari

3.1.1 NBM-550-mittariyksikkö

NBM-550-mittalaitteen ensisijaisena käyttötarkoituksena on antaa luotettavia mittaustuloksia sähkö- ja magneettikenttien voimakkuuksista, jotka voivat olla ihmisen terveydelle haitallisia. Mittalaitteella (Kuva 4.) saadaan tarkkoja ionisoimattoman säteilyn mittatuloksia korkeilla taajuuksilla, laajalta taajuusalueelta. [7]



Kuva 4. Narda NBM-550 -kentänvoimakkuusmittari.

Mittariyksikkö mahdollistaa kentänvoimakkuusmittauksia 100 kHz – 60 GHz alueelta. Kentänvoimakkuuden herkkyysrajat ovat 0,02 V/m ja 320,0 V/m. [7]

3.1.2 Mittapäät

Mittalaitteeseen liitettävien mittapäiden spesifikaatiot vaihtelevat käyttötarkoitusten mukaan. Mittapäät asettavat tämän kokonaisuuden mittaustuloksille raja-arvot, kuten kentänvoimakkuuden herkkyysrajoille ja taajuusalueelle (Liite 1).

Tässä työssä käytetty mittapä EF-0391 sisältää kolme ilmaisinta diodilla varustettua, ortogonaalisesti asetettua dipolia. Dipolit mittaavat

kentänvoimakkuutta yhtäjaksoisesti, joiden tuloksista laitteen mittariyksikkö laskee isotrooppisen kentänvoimakkuuden. Eli mittapäähän indusoituva jännite on riippumaton sähkömagneettisen säteilyn tulosuunnasta. [8][1]

3.1.3 Nardan mittalaitteen kalibrointi EMC-laboratoriossa

Narda NBM-550-kentänvoimakkuusmittari kalibroidiin Turun ammattikorkeakoulun EMC (Electro Magnetic Compatibility) -laboratoriossa mittaustulosten luotettavuuden verifiointiseksi. Laboratorion EMC-testaushuone on täysin häiriösuojattu sekä radiovaimennettu tila, jossa pääsääntöisesti suoritetaan laitteille emissio- sekä sietomittauksia.

Nardan mittalaitteelle suoritettiin kalibrointi asettamalla laite EMC-huoneen pyörityspöydälle, jonka jälkeen laitteen mittaus käynnistettiin. Näytteenotonopeus oli 1 näyte/s. Huoneen säteilijän lähettämän signaalin voimakkuus oli 3 V/m. Mitattu taajuusalue sijoittui 80 MHz – 3 GHz:n välille ja taajuutta nostettiin 2 s:n välein 1 %:n verran.

Mittaustulokset osoittivat Nardan mittalaitteen toimivan oikein ja tuottavan luotettavia mittaustuloksia.

3.2 SATIMO EME SPY 140 -dosimetri

EME SPY 140 on SATIMO:n valmistama dosimetri, jonka käyttötarkoituksena on antaa tarkkoja mittatuloksia sähkömagneettisten kenttien voimakkuuksista (Kuva 5.). Dosimetri mahdollistaa jatkuvan kentänvoimakkuusmittauksen ennalta määrätyiltä 14 taajuuskaistoilta. Kaistoja käyttäviin sovelluksiin kuuluu: FM-radio, matkapuhelimet (GSM, UMTS), TV-lähetykset, viranomaisradioverkko (VIRVE/TETRA), DECT, WiFi ja WiMAX. [9]



Kuva 5. EME SPY 140 -dosimetri.

Mitattava taajuusalue sijoittuu 88 MHz:n ja 5 850 MHz:n välille ja laitteen kaistojen herkkyysrajat ovat 0,005 V/m ja 5,000 V/m. [9]

Dosimetrin ennalta määrätyt taajuuskaistat eivät raja-arvoiltaan täysin täsmää Suomen Viestintäviraston radiotaajuusmääräyksiä, eikä niitä ole nimetty Suomen vastaavien radiosovellusten mukaan.

Taulukossa 2 esitellään EME SPY 140 -laitteen mitattavien kaistat taajuusrajoineen, sekä kuvaus vastaavasta sovelluksesta suomessa.

Taulukko 2. EME SPY 140 -mittalaitteen taajuuskaistat.

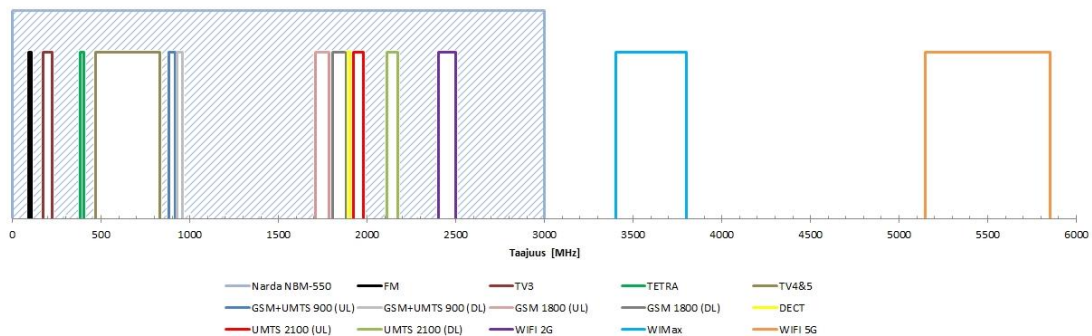
| EME SPY 140 -laitteen ilmoittama radiosovellus | Taajuusalue | Kaistan käyttö Suomessa* | Taajuusalue* |
|--|-------------------|---|--|
| <u>FM</u> | 88 - 108 MHz | Ääniyleisradio | 87,500 - 108,000 MHz |
| <u>TV3</u> | 174 - 223 MHz | Televisio ja ääniyleisradio | 174 - 230 MHz |
| <u>TETRA</u> | 380 - 400 MHz | Viranomaisverkko (VIRVE) | BS RX: 380,0125 - 384,9875 MHz BS TX: 390,0125 - 394,9875 MHz |
| | | Elinkeinoelämän TETRA | BS RX: 385,0125 - 389,9875 MHz BS TX: 395,0125 - 399,8875 MHz |
| <u>TV4&5</u> | 470 - 830 MHz | Televisio | 470 - 790 MHz |
| <u>GSM + UMTS 900(UL)</u> | 880 - 915 MHz | GSM 900 & IMT | BS RX: 880,100 - 914,900 MHz |
| <u>GSM + UMTS 900(DL)</u> | 925 - 960 MHz | GSM 900 & IMT | BS TX: 925,100 - 959,900 MHz |
| <u>GSM 1800 (UL)</u> | 1 710 - 1 785 MHz | GSM 1800 & IMT | BS RX: 1 710,100 - 1 784,900 MHz |
| <u>GSM 1800 (DL)</u> | 1 805 - 1 880 MHz | GSM 1800 & IMT | BS TX: 1 805,100 - 1 879,900 MHz |
| <u>DECT</u> | 1 880 - 1 900 MHz | DECT | 1 881,792 - 1 897,344 MHz |
| <u>UMTS 2100 (UL)</u> | 1 920 - 1 980 MHz | IMT | BS RX: 1 920 - 1 980 MHz |
| <u>UMTS 2100 (DL)</u> | 2 110 - 2 170 MHz | IMT | BS TX: 2 110 - 2 170 MHz |
| <u>WIFI 2G</u> | 2 400 - 2 500 MHz | (SRD) Laajakaistaiset datasiirtolaitteet (WAS/RLAN) | 2 400,0 - 2 483,5 MHz |

| | | | |
|---------|-------------------|---|---|
| WiMax | 3 400 - 3 800 MHz | Kiinteän langattoman liityntäverkon radiojärjestelmät (FWA), Sähköisten viestintäpalveluiden tarjontaan soveltuvat maanpäälliset radiojärjestelmät, Radiolinkit (SRD) Laajakaistaiset datasiirtolaitteet (WAS/RLAN) | 3 400 - 3 850 MHz |
| WiFi 5G | 5 150 - 5 850 MHz | | 5 150 - 5 250 MHz 5 250 - 5 350 MHz 5 470 - 5 725 MHz |
| | | | * Viestintäviraston Radiotaajuusmääräys 4:n mukainen. |

3.3 Mittalaitteiden eroavuus

Työssä käytetyissä mittalaitteissa on ulkomuodon lisäksi merkittäviä eroja, vaikka niiden käyttötarkoitukset ovat hyvin samanlaiset.

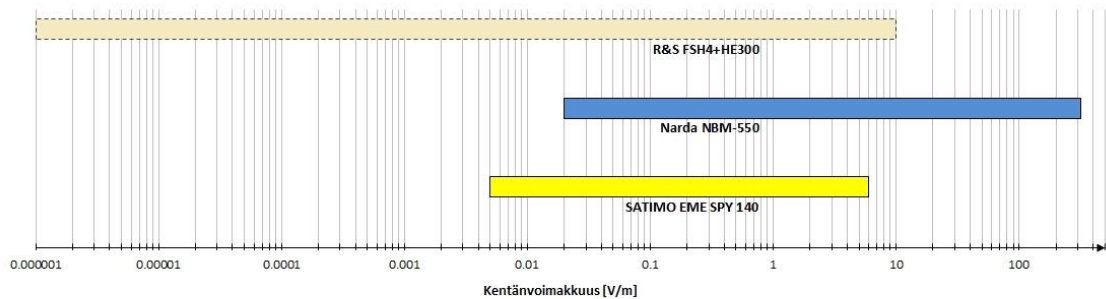
Narda NBM-550 -kentänvoimakkuusmittari mittaa mittapäätä riippuvan taajuuskaistan yhteenlaskettua kenttää. Tässä työssä mittapään taajuuskaista oli 100 kHz – 3 GHz. EME SPY 140 -dosimetri sen sijaan mittaa ennalta määrättyjen kapeampien kaistojen kentänvoimakkuuksia (Kuva 6.). Dosimetrin TOTAL-tulokset kuvastavat mitattujen kaistojen yhteenlaskettua kentänvoimakkuutta.



Kuva 6. Mittalaitteiden mittaamat taajuuskaistat. Vaaleansininen (raidallinen) kaista esittää Nardan mittalaitteen mittaamaa taajuuskaistaa ja kapeammat kaistat kuuluvat dosimetrin mitta-alueeseen.

Nardan mittalaitteen kaista kattaa taajuuksia joita dosimetri ei tunnista. Dosimetrin WiMax ja WiFi 5G -kaistat sitä vastoin ulottuvat Nardan kaistan ulkopuolelle.

Mittalaitteilla on laitekohtaiset herkkyysrajat jotka asettavat maksimi- ja minimirajan mitattavalle kentänvoimakkuudelle. Nardan mittalaitteen ja dosimetrin herkkyysrajat ovat esitettyinä kuvassa 7.



| Mittalaitte | Min. [V/m] | Max. [V/m] |
|--------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Narda NBM-550 | 0.02 (86.02dB μ V/m) | 320.00 (170.10dB μ V/m) |
| SATIMO EME Spy 140 | 0.005 (73.98dB μ V/m) | 6.00 (135.56dB μ V/m) |
| R&S FSH4+HE300 | 0.000001 (0.00dB μ V/m) | 10.00 (140.00dB μ V/m) |

Kuva 7. Dosimetrin (keltainen) ja Nardan kentänvoimakkuusmittarin (sininen) herkkyysrajat mitatulle kentänvoimakkuudelle. Kuvaan on liitetty R&S FSH4 -spektrianalysaattorin (beige) herkkyysrajat vertailun vuoksi. Minimi- ja maksimirajat ovat esitettyinä myös dB μ V/m:n yksikköinä joita usein käytetään pienemmillä herkkyysarvoilla.

EME SPY 140 -dosimetri kykenee ilmaisemaan Nardan mittalaitetta huomattavasti pienempiä kentänvoimakkuuksia. Sitä vastoin Nardan mittalaitteen maksimi herkkyysraja on yli 50-kertainen dosimetriin nähden.

3.4 Mittausmenetelmät

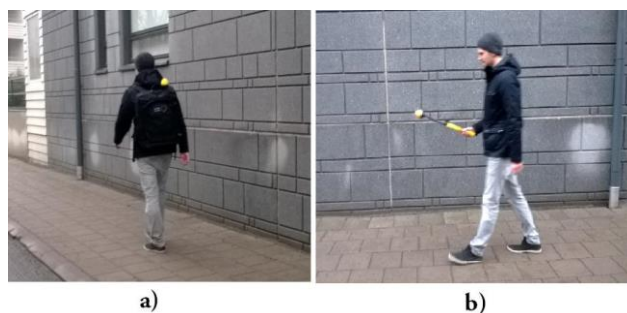
Mittausmenetelmästä riippumatta mittalaitteet ovat jatkuvasti ottaneet näytteitä sähkökentänvoimakkuudesta laitekohtaisilla maksiminopeuksilla. Laitteiden näytteenottonopeudet olivat seuraavat:

- Narda NBM-550: 1 näyte/s
- EME SPY 140: 1 näyte/4 s

Mittaustulokset ovat mittalaitteiden PC-ohjelmistojen avulla konvertoitu Excel- taulukoiksi jolloin mitattua dataa oli helpompi käsitellä. Taulukoista on koostettu kuvaajia jotta mitattu data olisi havainnollisempaa. Kuvaajista ilmenee kentänvoimakkuus mittalaitteen näytteenoton funktiona. Useaan kuvaajaan on

liitetty molempien mittalaitteiden tulokset, jolloin näytteenotot ovat jaettu kahdelle vaakatason akselille.

Tässä työssä tehdyt kentänvoimakkuusmittaukset ovat suoritettu suurimmalta osin kävellen tai autolla. Kävellen suoritettuja mittauksia tehtiin kahdella eri menetelmällä. Mittaitteet olivat joko sijoitettu niitä varten räätälöityyn reppuun, tai laitetta pidettiin yksinkertaisesti kädessä kohdistuen laitteen mittapäätä henkilöstä poispäin (metodia käytettiin vain Narda NBM-550 -mittarilla). Nämä menetelmät on esitetty kuvassa 8.



Kuva 8. Kävellen suoritettavat mittausmenetelmät. a) Mittaus reppukokoonpanolla. b) Mittaus Narda NBM-550 -mittari kädessä.

Kun mittauskohteen reitin pituus oli suuri, oli maantieteellisesti käytännöllisin kulkuneuvo henkilöauto. Näissä mittauksissa mittalaitteet asetettiin räätälöityyn reppuun, joka sijoitettiin kuljettajan viereiselle paikalle (Kuva 9.).



Kuva 9. Mittalaitteiden asetelma auton sisällä.

Kuljettajan viereiseltä paikalta poistettiin niskatuki Nardan mittalaitteen mittapään lähettäviltä häiriöiden minimoimiseksi, ja reppu kiinnitettiin penkkiin

turvavyöllä, jotta reppukokoonpano olisi mahdollisimman stationaarinen. Kun tässä työssä ilmoitetaan auton käytöstä mittauksien suorituksissa, viitataan tähän yllämainittuun menetelmään.

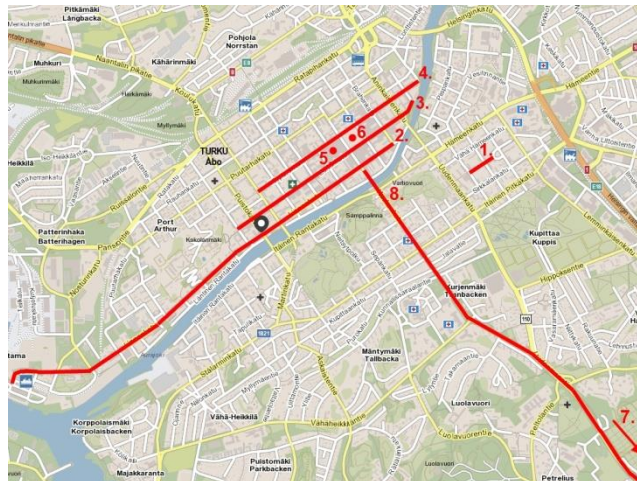
4 MITTAUKSET JA TULOKSET

Tässä työssä suoritettiin liikkuvia kentänvoimakkuusmittauksia useassa kohteessa Turun alueella, valitsemalla kohteet mahdollisimman monipuolisesti sekä sisä- että ulkotiloista. Tähän dokumenttiin valittiin kuitenkin vain 8 mittausta dokumentaation sivumäärärajoituksen vuoksi.

Tutkitut kohteet olivat:

1. Kaarinankatu
2. Linnankatu
3. Eerikinkatu
4. Yliopistonkatu
5. Kauppakeskus Hansa
6. Turun Kauppatori
7. Kauppakeskus Skanssi
8. Turun ja Kaarinan välinen mittaus

Tutkitut mittauskohteet ovat numeroituna merkattu karttaan kuvassa 10.



Kuva 10. Turun keskustan mittauskohteet numeroituna. [10]

Tässä luvussa esitetään mitattujen kohteiden tuloksia samassa numerojärjestyksessä kun aikaisemmassa luettelossa ja kuvassa 10.

4.1 Kaarinankatu

Kellonsoittajankadun koulutalon seinään on sijoitettu kaksi tukiasemaa, jotka on kohdistettu Kaarinankatua päin (Kuva 11.). Näiden tukiasemien aiheuttamat kentät dominoivat voimakkuudeltaan tämän kadun radiokenttää, minkä takia Kaarinankatu soveltuu mittauskohteena hyvin eri mittausmenetelmien vertailuun.



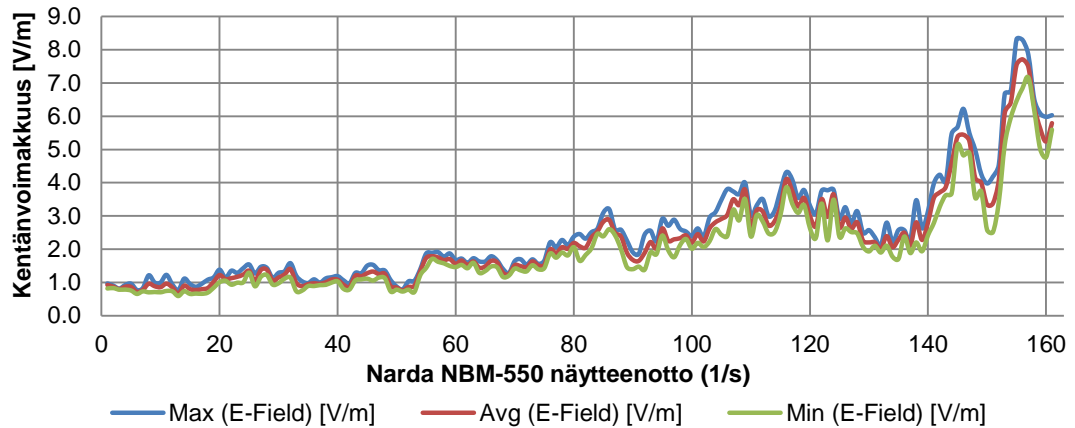
Kuva 11. Kellonsoittajankadun koulutalon tukiasemat.

Kaarinankadulla tehtiin kentänvoimakkuusmittauksia kävellen erikseen reppukokoonpanolla ja pitäen mittalaitetta kädessä. Autolla tehtiin mittauksia sekä geneerisesti että stationaarisesti vertaillen kentänvoimakkuutta auton sisältä ja sen ulkopuolelta.

4.1.1 Geneerinen mittaus

Ensimmäisessä mittauksessa mittalaitetta pidettiin kädessä ja katua edettiin alkupäästä loppuun tukiasemia kohti. Katua edettiin autotien oikealla puolella tavoitteena pitää maantieteellisesti sama linja kuin mittalaitteen ollessa autossa kuljettajan viereisellä paikalla. Tämän mittausalueen ympäristö koostui puistoalueesta sekä rakennuksista jotka ympäröi tukiasemien säteilykeiloja.

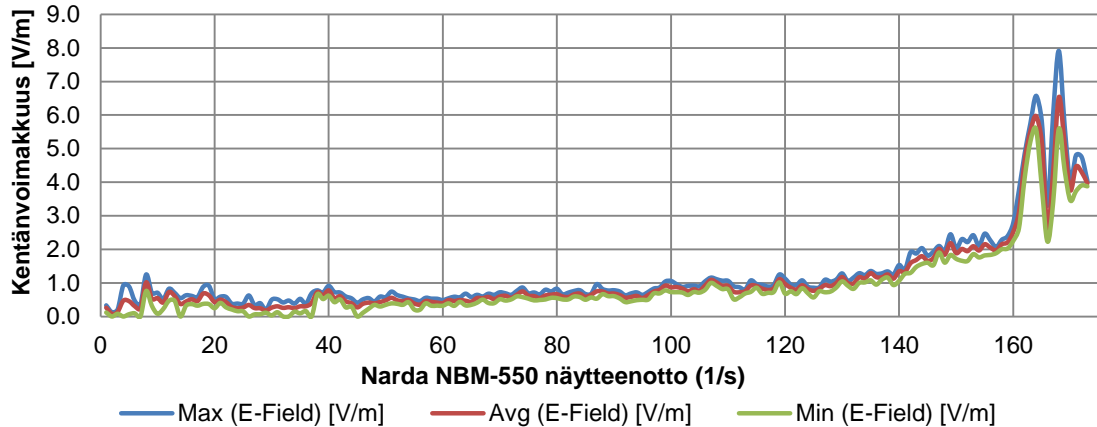
Tulokset osoittavat kentänvoimakkuuden nousevan tukiasemia lähestyessä, muttei täysin lineaarisesti. Graafinen kuvaaja (Kuva 12.) osoittaa kentänvoimakkuudessa suurinta muutosta mittauksen puolivälistä loppua kohti.



Kuva 12. Kaarinankadun Narda NBM-550 -mittaustulokset, kun mittalaitetta on pidetty kädessä.

Ensimmäisen mittauksen korkein mitattu kentänvoimakkuuden keskiarvo oli 7,71 V/m. Tässä kohtaa etäisyys tukiasemiin oli n. 20 m. Kentänvoimakkuuden heikentyminen 150. näytteenoton kohdalla sijoittuu n. 30 m päähän tukiasemista. Tässä kentänvoimakkuus saavuttaa lukeman 2,58 V/m.

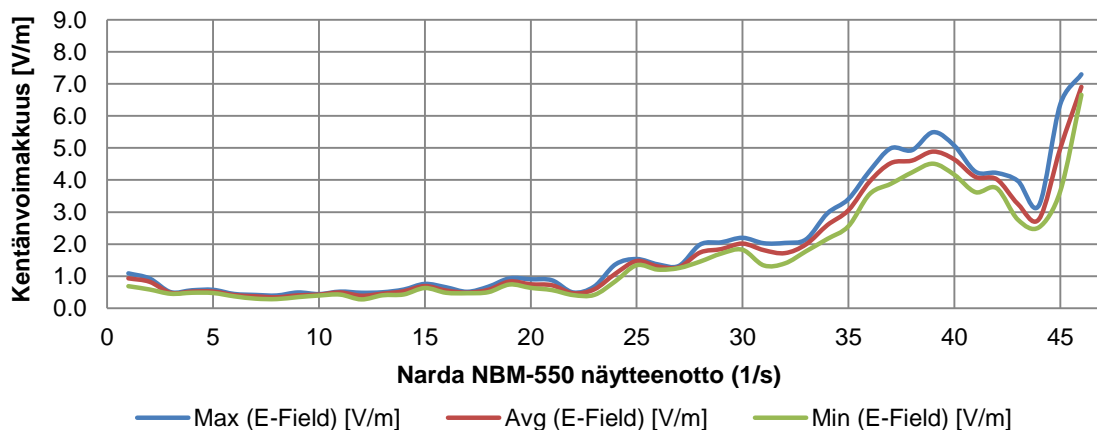
Kaarinankadun toisessa mittauksessa katua edettiin samalla tavalla kuin edellisessä mittauksessa, mutta mittalaite asetettiin reppuun. Tuloksista huomataan kentänvoimakkuuden nousun loppua kohti korreloivan lievästi ensimmäisen mittauksen kanssa, mutta selvästi heikentyneenä (Kuva 13.).



Kuva 13. Kaarinankadun Narda NBM-550 -mittaustulokset, kun mittalaite on sijoitettu reppuun.

Toisen mittauksen korkein mitattu kentänvoimakkuus oli arvoltaan 6,53 V/m. Loppupäässä havaitaan jälleen kentänvoimakkuuden vaimentuminen jossa kentänvoimakkuus on 2,63 V/m.

Kolmannessa mittauksessa mittalaite oli sijoitettu autoon. Auton etenemisvauhti oli n. 20 km/h, joten näytteenottoja kertyi huomattavasti vähemmän kun edellisissä tapauksissa. Siitä huolimatta kuvaaja osoittaa tämän sekä aikaisempien mittausten välillä samoja piirteitä (Kuva 14.).

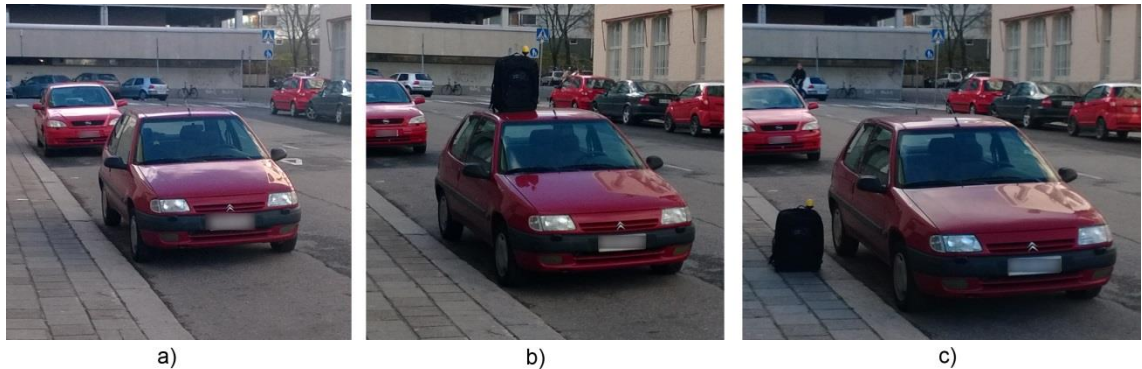


Kuva 14. Kaarinankadun Narda NBM-550 -mittaustulokset autolla.

Kolmannen mittauksen kentänvoimakkuus oli korkeimmillaan 6,91 V/m. Mittauksen loppupuolella heikentyneen kentänvoimakkuuden pohjalukema on 2,78 V/m.

4.1.2 Stationaarinen mittaus autolla

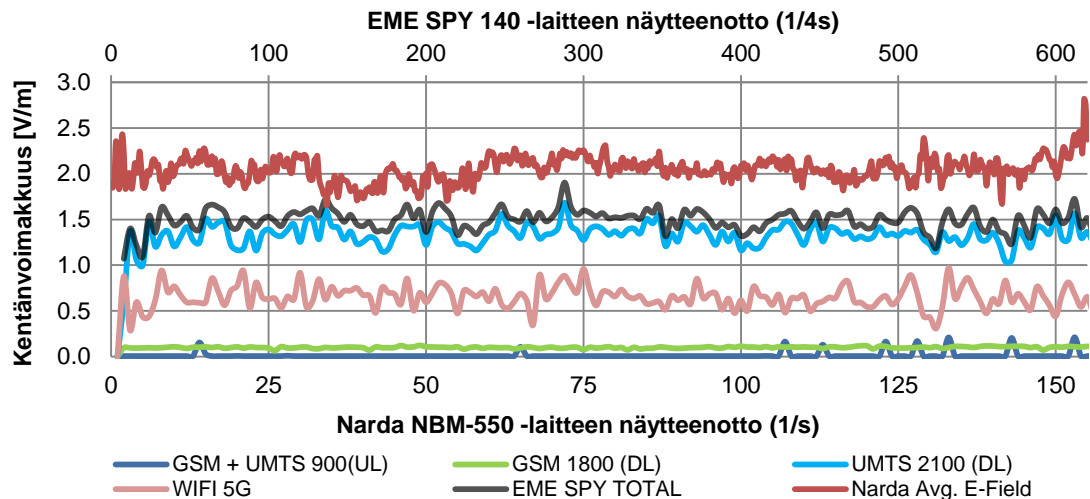
Tämän mittauksen tarkoituksena oli havainnollistaa auton approksimoitua vaikutusta kentänvoimakkuusmittauksissa. Auton ulkopuolelta suoritettiin 2 mittausta ja sisäpuolelta 1 (Kuva 15.).



Kuva 15. Mittalaitteiden asettelu Kaarinankadun stationaarisessa mittauksessa. a) Mittalaitteet auton sisällä kuljettajan vieressä. b) Mittalaitteet auton katolla. c) Mittalaitteet auton vieressä.

Jokaisen mittauksen pituus oli n. 10 min ja mittalaitteet oli sijoitettu reppuun. Tukiasemien ja auton välinen etäisyys oli n. 50 m, eikä autoa siirretty mittausten välissä.

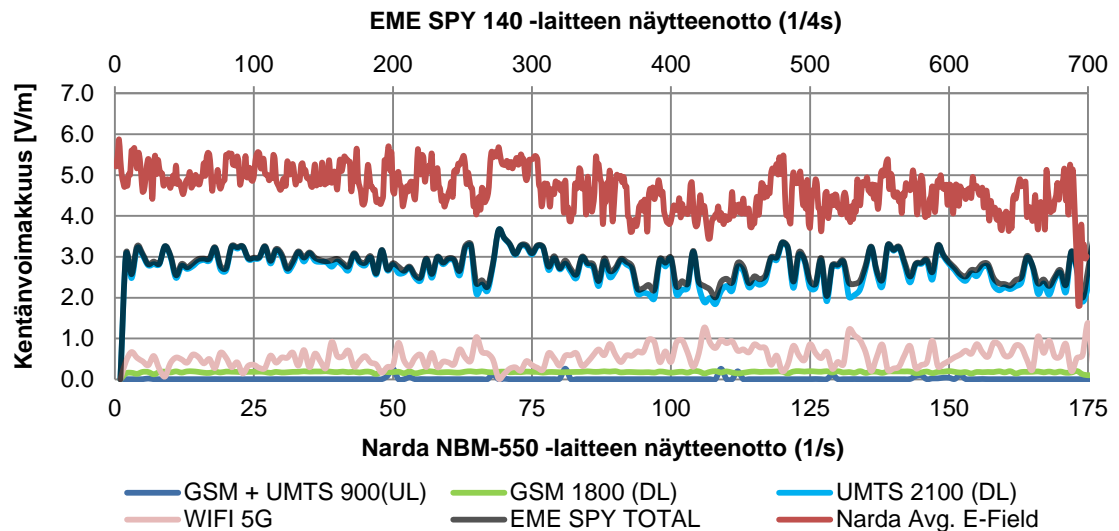
Ensimmäisessä mittauksessa mittalaitteet olivat kuljettajan viereisellä paikalla ja kuljettaja istui paikallaan koko mittauksen ajan. Kuva 16 esittää mittauksen tulokset. Kuva osoittaa UMTS-taajuusalueen dominoivan kentänvoimakkuudeltaan tätä mittausta.



Kuva 16. Stationaarisen mittauksen tulokset kun mittalaitteet sijoitettiin auton sisälle.

Kuvaajaan (Kuva 16.) on liitetty ainoastaan huomattavan suuret ($>0,2$ V/m) kentänvoimakkuudet EME SPY -mittalaitteen mitatuista kaistoista. Kuva sisältää myös Nardan mittalaitteen tulokset. Kyseinen asetelma toistuu myös kahden seuraavan mittauksen tuloksissa.

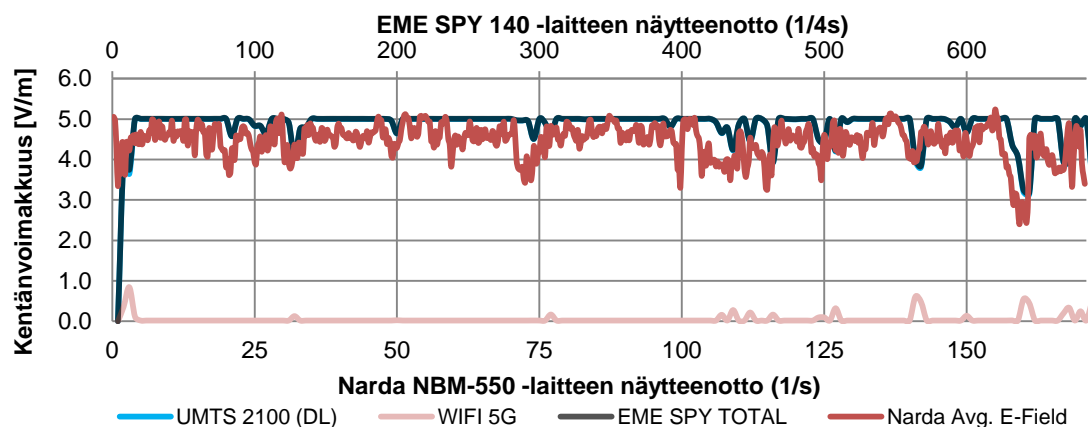
Toisessa mittauksessa reppu mittalaitteineen sijoitettiin auton katolle jolloin mittalaitteilla oli suora näköyhteys tukiasemiin. Mittauksen tulokset nähdään kuvassa 17.



Kuva 17. Stationaarisen mittauksen tulokset kun mittalaitteet sijoitettiin auton katolle.

Sekä NBM-550- että EME SPY -mittalaitteen näyttämät yhteenlasketut kentänvoimakkuudet osoittavat tulosten likimäärin kaksinkertaistuneen.

Kolmannessa mittauksessa reppu asetettiin auton viereen jalkakäytävälle. Mittauksen toisen puoliskon aikana usea henkilö ohitti repun hyvin läheltä tukkien absoluuttisen näköyhteyden tukiasemiin. Mittauksen tulokset on esitetty kuvassa 18.



Kuva 18. Stationaarisen mittauksen tulokset kun mittalaitteet sijoitettiin auton viereen.

Kuva 18 osoittaa kentänvoimakkuuksien jälleen voimistuneen hieman verrattuna edelliseen mittaukseen. Näissä tuloksissa havaitaan EME SPY -mittalaitteen saavuttaneen omien herkkyysrajojen maksimiarvon eli 5 V/m.

4.2 Linnankatu

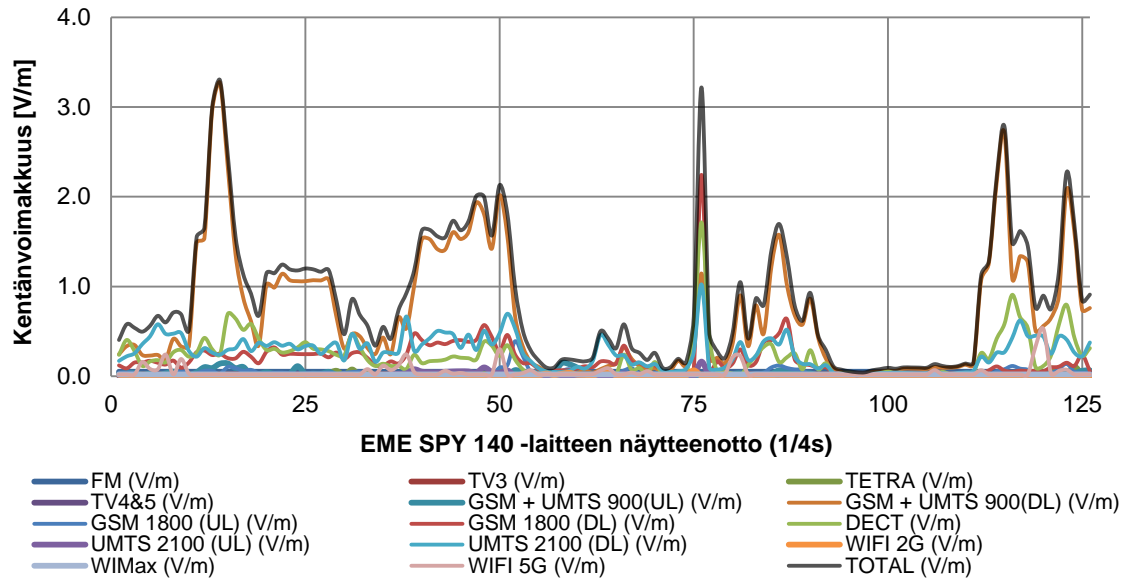
Linnankadulla suoritettiin 5 mittausta autolla. Tavoitteena oli tutkia tuloksia mittausten toistettavuuden kannalta. Pyrkimyksenä oli toistaa mittausprosessi mahdollisimman identtisesti jokaisella kerralla jotta mitattuja tuloksia voisi luotettavasti vertailla keskenään. Kuvassa 19 esitellään Linnankadun katukuva kadun alkupäästä.



Kuva 19. Linnankadun alkupää, josta Linnankadun mittausten kulkureitti alkoi.

Linnankatu ulottuu lähes keskustan laidasta aina Turun satamaan asti, joka tekee siitä Turun pisimmän kadun [11], joten kadulla ilmenee paljon liikennettä. Kadun vilkas liikenne ja useat liikennevalot rajoittivat mittaussuorituksia. Mittausten aikana syntyi useasti pysähdyksiä, joten niissä oli mahdotonta noudattaa mitään vakionopeutta.

EME SPY 140 -dosimetrin tulokset osoittavat matkapuhelinjärjestelmien kentänvoimakkuuksien olevan kadun mitattujen taajuuskaistojen voimakkaimpia (Kuva 20).

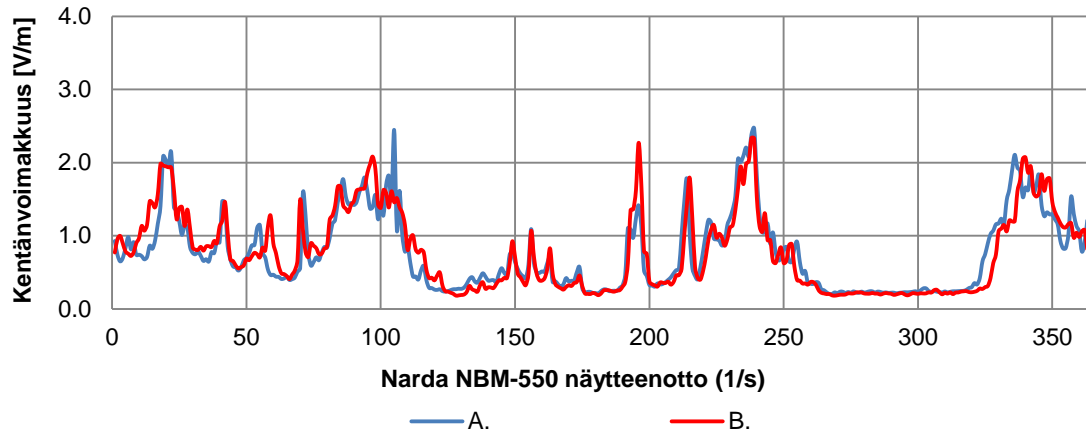


Kuva 20. EME SPY 140 -dosimetrin mittaustulokset Linnankadulta. Mittaus suoritettiin 6.11.2013.

GSM 900 DL -kaista (ruskea käyrä) on selvästi kadun voimakkain, mutta GSM 1800 DL (puna-ruskea) ja UMTS DL (sininen) -kaistat erottuvat myös voimakkaampina muiden sovellusten joukosta.

Nardan kentänvoimakkuusmittarin keskiarvotulokset (avg E-field) Linnankadulta ovat esitettyinä seuraavissa taulukoissa. Tuloksista on GPS-koordinaattien avulla poistettu mittauksen fyysisen etenemisen aikana tehdyt pysähdykset. Mittausten näytteenottojen määrä vaihtelee kuitenkin johtuen auton etenemisvauhdin eroavuudesta mittausten kesken. Tulokset on jaettu 3:een taulukkoon tulosten selkeyttämiseksi.

Narda NBM-550 -mittarin tuloksissa on huomattavia eroja dosimetrin tuloksiin. Kentänvoimakkuuden muutos on spesifisempi Nardan tuloksissa ja kentän pohjalukemat ovat dosimetrin arvoja voimakkaampia. Kuva 21 esittää Linnankadun 2 ensimmäistä mittausta.

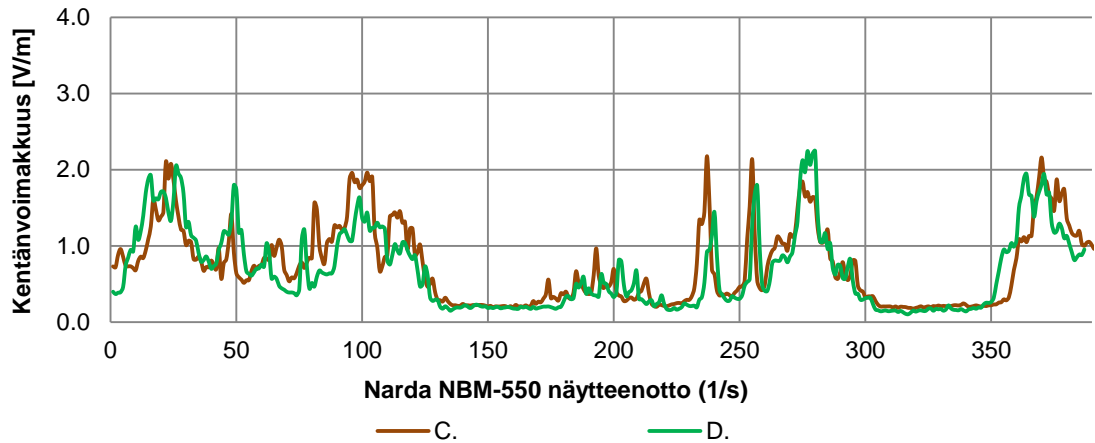


Kuva 21. Narda NBM-550 -mittalaitteen tulokset Linnankadulta. A.-mittaus suoritettu 23.10.2013 ja B.-mittaus suoritettu 6.11.2013.

1. mittaus suoritettiin täysin kuivalla kelillä ja 2. mittauksessa oli märkä keli. Molemmat mittaukset saavuttivat korkeimmat arvonsa mittauksen toisella puoliskolla. A.-mittauksen korkein mitattu kentänvoimakkuus oli arvoltaan 2,47 V/m ja B.-mittauksen vastaavasti 2,34 V/m. Maantieteellisesti tämä kohta sijaitsi Linnankadulla Varvintorin kohdalla n. 100 m:n etäisyydellä Turku Energia -rakennuksen katolla sijaitsevista tukiasemista.

Linnankadun korkeimmat kentänvoimakkuudet sijoittuvat kaikissa mittauksissa pääasiassa neljälle alueelle. 1. alue sijoittuu kadun alkupäähän Turun kaupunginkirjaston eteen. 2. alue ulottuu Kristiinankadun risteyksestä Marina Palace -hotellille asti. 3. alue ulottuu Kakolanmäeltä Turku Energian rakennukselle asti. 4. alue sijoittuu kadun loppupäähän satamaan. Linnankatu päättyy Turun Silja Line terminaalin eteen jonka katolla havaittiin useita tukiasemien säteilijöitä.

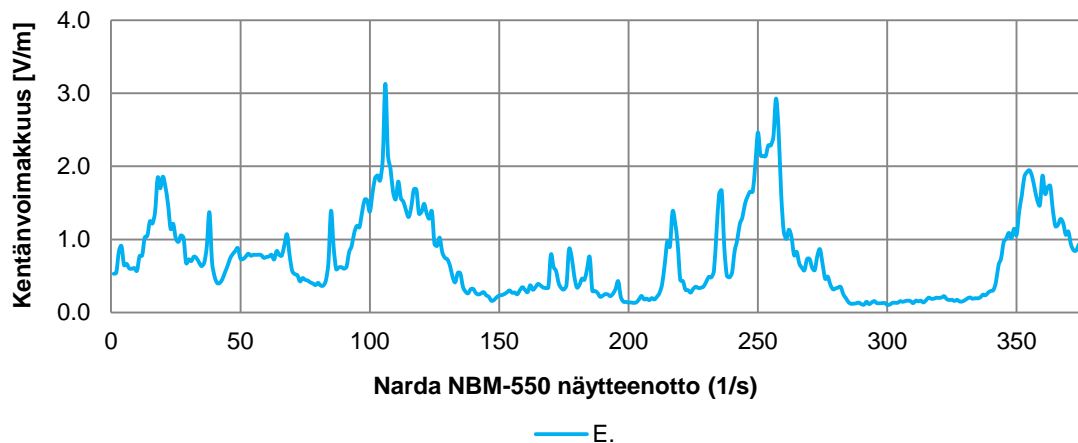
Kuva 22 esittää 3. (C.-mittaus) ja 5. (D.-mittaus) mittauksen tulokset Linnankadulta.



Kuva 22. Narda NBM-550 -mittalaitteen tulokset Linnankadulta. C.-mittaus suoritettu 13.11.2013 ja D.-mittaus suoritettu 28.11.2013.

Kuvan osoittamat mittaukset suoritettiin molemmat määrällä kelillä. Vesisadetta ei kuitenkaan mittauksien aikana esiintynyt. C.-mittauksen korkeimmaksi kentänvoimakkuudeksi mitattiin 2,18 V/m joka sijaitsee Kakolanmäen kohdalla. D.-mittauksen korkein mitattu kentänvoimakkuuden arvo oli 2,25 V/m jonka sijaintipaikka oli Varvintorin kohdalla, n. 100 m:n etäisyydellä Turku Energia -rakennuksen tukiasemista.

Kuvassa 23 nähdään Linnankadun 4. mittauksen tulokset. Kentänvoimakkuuksien maksimiarvot ovat selvästi edeltäviä mittauksia suurempia.



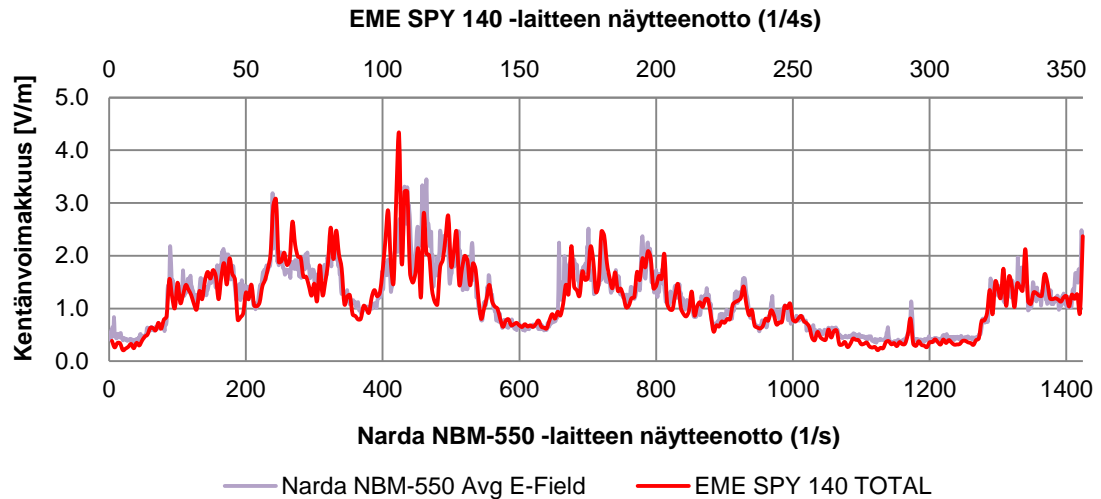
Kuva 23. Narda NBM-550 -mittalaitteen tulokset Linnankadulta. E.-mittaus suoritettu 20.11.2013.

Mittauksen suurimmaksi kentänvoimakkuudeksi mitattiin 3,13 V/m joka maantieteellisesti sijoittuu Eskelinkadun risteykseen. Kentänvoimakkuudet olivat myös huomattavan korkeita Varvintorin kohdalla. Mittaus suoritettiin kostealla, mutta ei sateisella kelillä.

4.3 Eerikinkatu

Eerikinkatu on n. 1,6 km pitkä katu joka ulottuu kaupungin ydinkeskustan laidasta toiseen ohittaen mm. Turun kauppatorin. Eerikinkadun mittaus suoritettiin kävellen sillä suuri osa kadusta on sallittu ainoastaan Turun joukkoliikenteelle. Mitattu reitti alkoi kadun alkupäästä ja päättyi kadun loppuun Turun pääpoliisiaseman eteen. Katua edettiin oikeanpuolen jalkakäytävällä. Mittauksessa pystyttiin silmämääräisesti havainnoimaan tämän työn kaikista mittaushetkistä suurimman määrän tukiasemia, joten tuloksissa voitiin olettaa näkyvän paljon radioliikennettä.

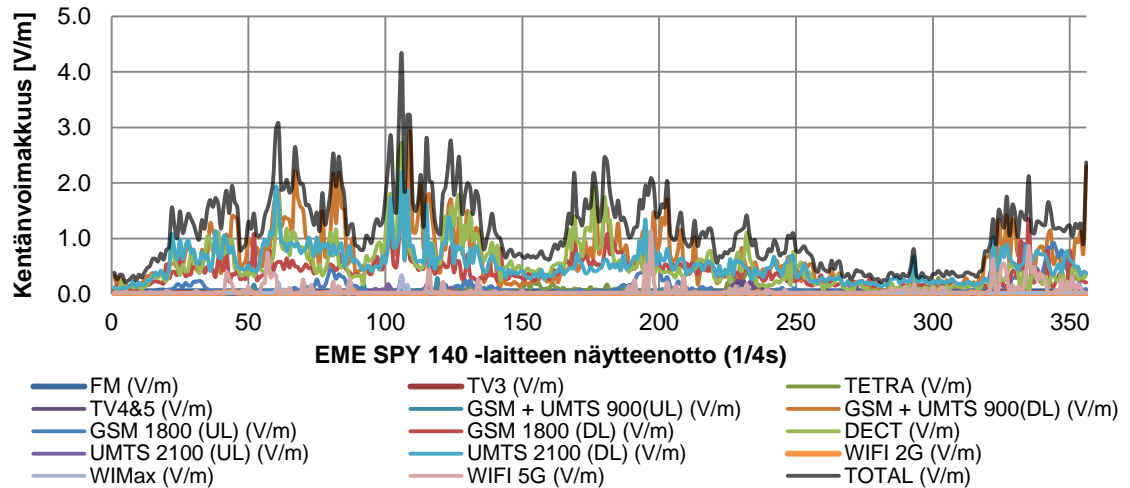
Nardan kentänvoimakkuusmittarin ja dosimetrin mittaustulokset Eerikinkadulta ovat hyvinkin samankaltaiset. Tulokset ovat esitettyinä kuvassa 24.



Kuva 24. Eerikinkadun mittaustulokset. Vertailussa Narda NBM-550 & EME-SPY 140 –mittalaitteiden tulokset.

Etenkin mittauksen ensimmäisellä puoliskolla huomataan mittalaitteiden tuloksissa selkeää eroavuus. Nardan mittalaitteen näytteenottoarvon ollessa 400-500 välillä, ilmenee tuloksissa suurimmat eroavuudet. Tämä osuus ulottuu maantieteellisesti Eerikinkadulla kauppatorin kulmasta torin toiseen kulmaan. Tähän kohtaan sijoittui mittauksen suurimmat kentänvoimakkuudet. Nardan mittalaitteen suurin mitattu kentänvoimakkuus oli 3,45 V/m ja dosimetrin korkein arvo oli 4,31 V/m.

EME SPY 140 -dosimetrin tuloksissa on havaittavissa usean langattoman tietoliikennejärjestelmän suuria kentänvoimakkuuksia. Keskeisimmissä asemassa ovat matkapuhelin järjestelmät: GSM 900 DL (ruskea), UMTS DL (sininen) ja GSM 1800 DL (puna-ruskea) (Kuva 25.).



Kuva 25. EME SPY 140 –dosimetrimin mittaustulokset Eerikinkadulta.

Kuvasta voidaan myös huomata DECT-kaistan (vihreä) kentänvoimakkuuksien olevan merkittävän suuria ja WIFI 5G -kaistan kentänvoimakkuus ylittää suurimmillaan jopa 1,14 V/m:iin.

4.4 Yliopistonkatu

Yliopistonkadun mittaukset suoritettiin poikkeuksellisesti kävellen sen pituudesta huolimatta. Kuten Eerikinkadulla, Yliopistonkatua ei pääse autolla kulkemaan päästä päähän. Kuva 26 esittää kohteen ympäristön sekä mittausten kävelysuunnat.

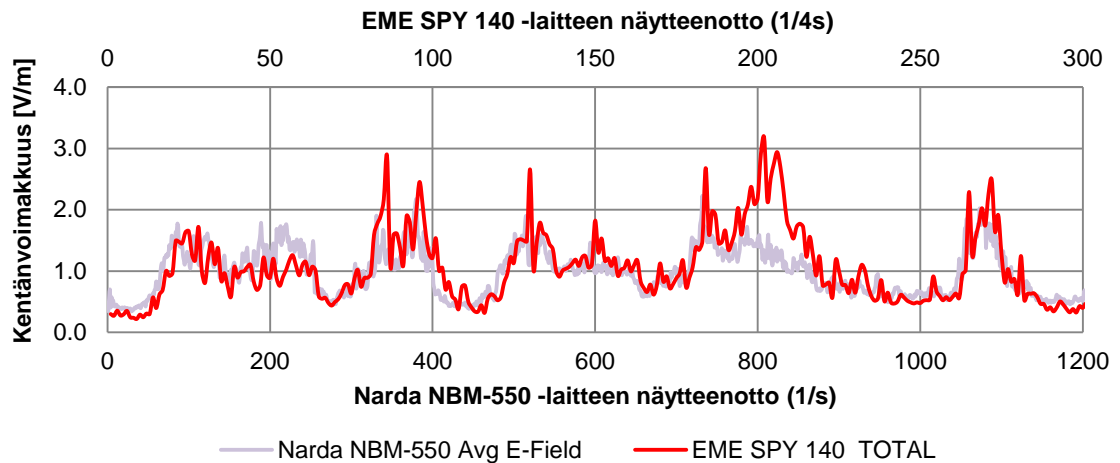


Kuva 26. Yliopistokadun katukuva ja kävelysuunnat mittauskohdessa. Ensimmäinen mittaus on osoitettu vihreällä nuolella ja toinen mittaus punaisella. [12]

Yliopistonkadulla on silmämääräisesti havaittavissa usea tukiasema, etenkin kadun kauppatori- ja kävelykatuosuuksissa, joiden suuntaavuudet vaihtelevat.

Katu on melko ruuhkainen autoilijoista ja jalankulkijoista iltaan saakka kellonajasta riippumatta.

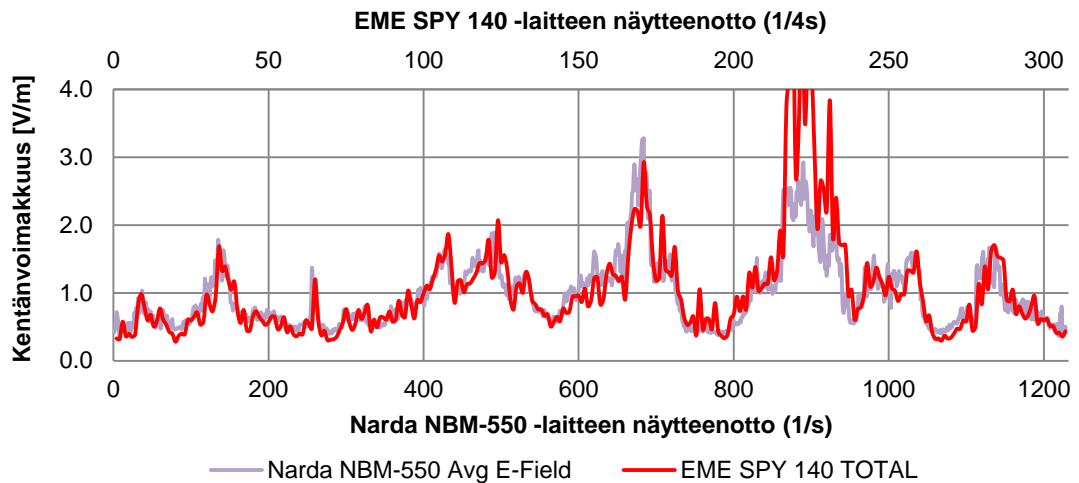
Ensimmäinen mittaus aloitettiin kadun alkupäästä jota edettiin kadun loppuun asti. Tuloksissa (Kuva 27.) nähdään sekä Nardan mittalaitteen että dosimetrin mittaustulokset vertailussa.



Kuva 27. Yliopistonkadun menosuunnan mittaus. Vertailussa Narda NBM-550 & EME-SPY 140 -mittalaitteiden tulokset.

Käyrät korreloivat keskenään melko tarkkaan, mutta tuloksissa on kuitenkin havaittavissa paikoittain merkittäviä eroja. Dosimetrin mitatut kentänvoimakkuudet ovat huomattavasti Nardan mittalaitteen arvoja suurempia. Dosimetrin suurin mitattu kentänvoimakkuus on arvoltaan 3,18 V/m ja Nardan mittalaitteen vastaavasti 2,23 V/m.

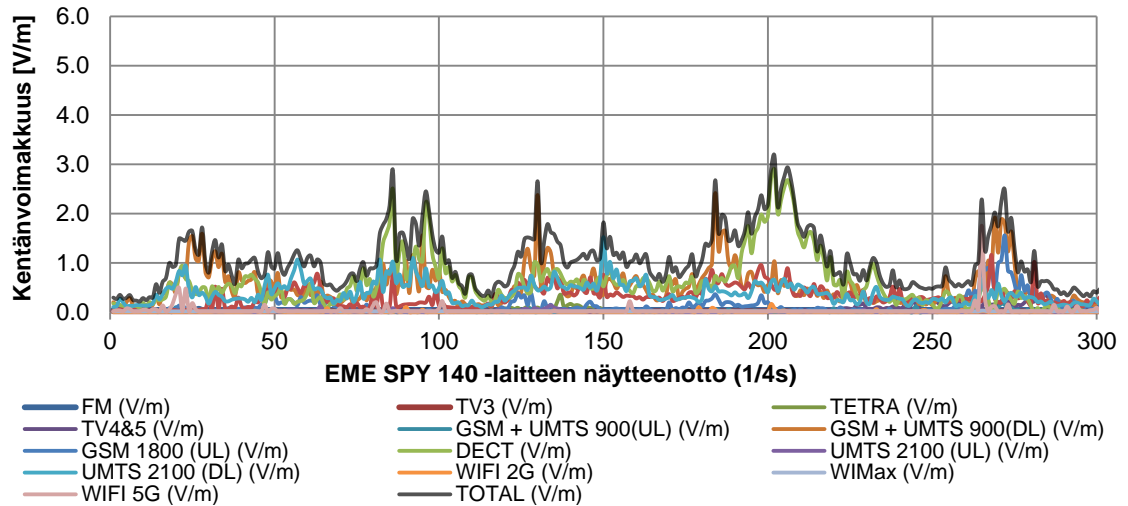
Toinen mittaus aloitettiin kadun loppupäästä edeten kadun alkua päin. Mittaus suoritettiin jalkakäytävällä toisella puolella katua kun edellisessä mittauksessa. Toisen mittauksen tuloksissa on edellisiin verrattuna samoja piirteitä (Kuva 28.).



Kuva 28. Yliopistonkadun paluusuunnan mittaus. Vertailussa Narda NBM-550 & EME-SPY 140 -mittalaitteiden tulokset.

Nardan mittalaitteen ja dosimetrin tulokset ovat hyvinkin samankaltaiset, pois lukien mittauksen viimeisen kolmanneksen suurimmat poikkeamat. Nardan kentänvoimakkuusmittarin suurin mitattu arvo on 3,13 V/m ja dosimetrin vastaavasti 5,45 V/m.

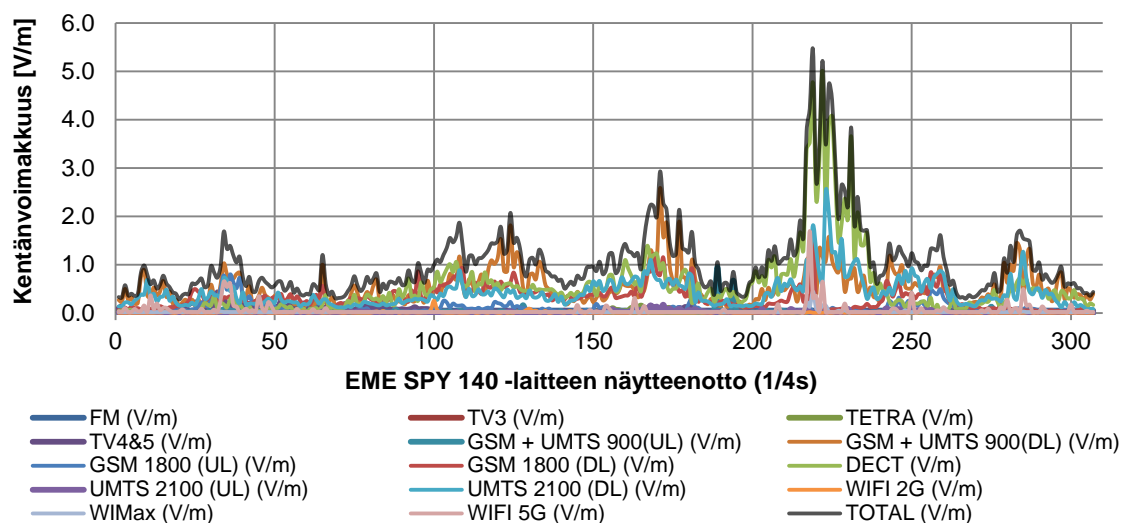
Kuvassa 29 nähdään dosimetrin mitattujen kaistojen kentänvoimakkuudet 1. mittauksesta. Tuloksista havaitaan matkapuhelinjärjestelmien (GSM 900, GSM 1800 ja UMTS) DL -kanavien kentänvoimakkuuksien dominoivan Yliopistonkadun kenttää.



Kuva 29. Yliopistonkadun menosuunnan mittaus. EME SPY 140 –dosimetrin tulokset.

Mittauksessa ilmenee myös hyvin voimakas (yli 3 V/m) DECT-kaistan kentänvoimakkuus.

Dosimetrin 2. mittauksen tulokset ovat esitettyinä kuvassa 30.



Kuva 30. Yliopistonkadun palusuunnan mittaus. EME SPY 140 –dosimetrin tulokset.

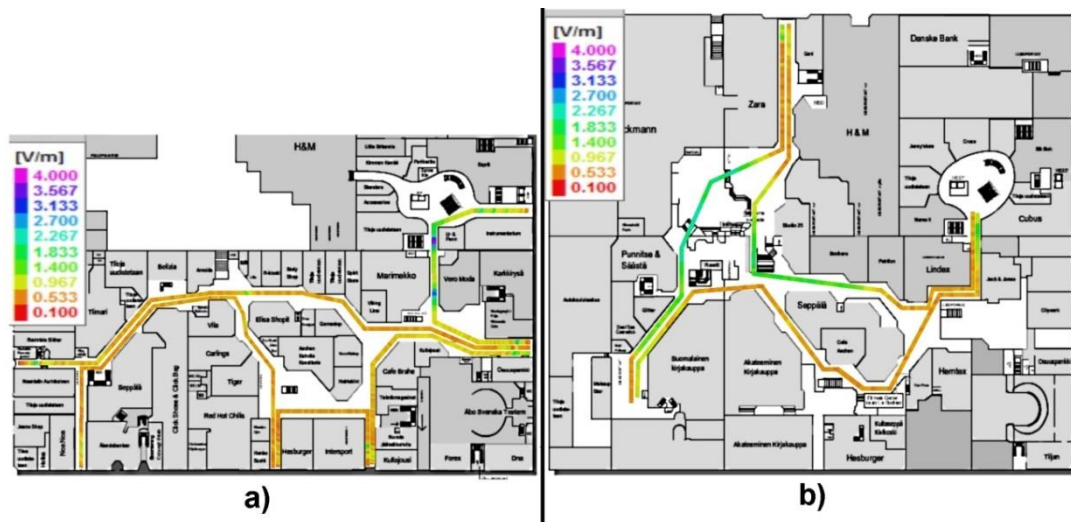
Kuten edellisessä mittauksessa DECT-kaistan kentänvoimakkuus nousee hyvin korkealle (5,00 V/m), ja matkapuhelinjärjestelmien kentänvoimakkuudet dominoivat muutoin pitkälti tätä katu.

4.5 Kauppakeskus Hansa

Kauppakeskus Hansassa pyrittiin kulkureitin valinnassa kattamaan vain kauppakeskuksen suurimmat käytävät. Kentänvoimakkuusmittaukset suoritettiin kauppakeskuksen katutasen kerroksessa sekä 1. kerroksessa. Mittaukset tehtiin juuri keskipäivän jälkeen joten kauppakeskus ei vielä ollut kovin ruuhkaisu.

Kukin mittaus aloitettiin Kultatalon aulasta. Katutasen kerroksessa edettiin Kristiinan katua kohti, josta kierrettiin takaisin lähtöpisteen suuntaan. 1. kerroksen mittauksessa edettiin Kristiinankadun suuntaan, josta jatkettiin Yliopistonkadun sisäänkäynnille ohittaen Hansatorin. Täältä mittauksen kulkureitti jatkui takaisin lähtöpisteeseen.

Kuvassa 31 nähdään mittausten kulkureitit sekä kentänvoimakkuudet merkattuna värikoodilla. Värikoodin punertavat värit esittävät heikompia kentänvoimakkuuksia ja sinertävät esittävät vahvempia.

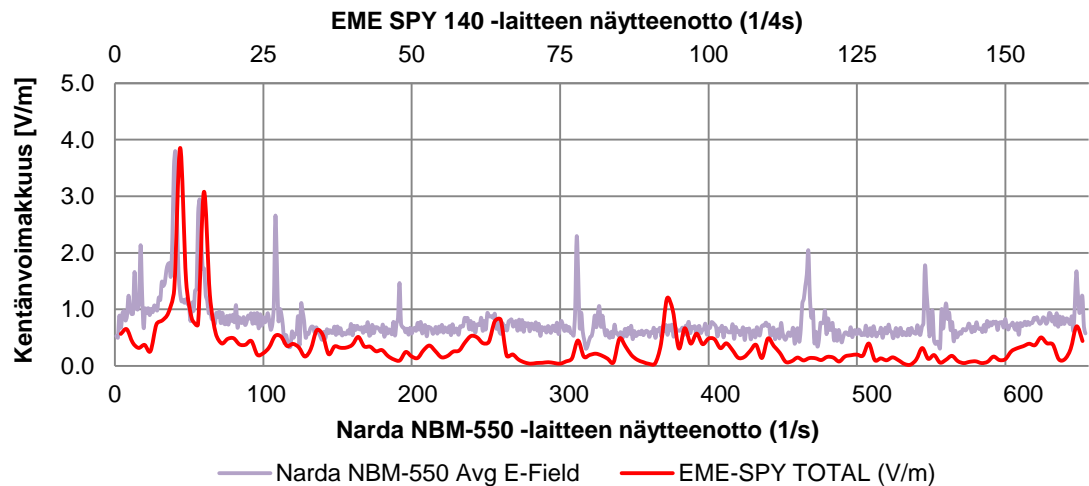


Kuva 31. Mittauksien kulkureitit kauppakeskus Hansassa. a) Katutasen mittaus. b) 1. kerroksen mittaus. [13]

Kuvasta ilmenee kentänvoimakkuuksien olevan pitkälti vahvimpia kauppakeskuksen avarilla alueilla josta voi arvioida mahdollisten tukiasemien sijainnin. On kuitenkin huomioitava että kuva on vain suuntaa antava, sillä

Nardan mittalaite ei saanut GPS-koordinaatteja paikannettua näissä sisätiloissa.

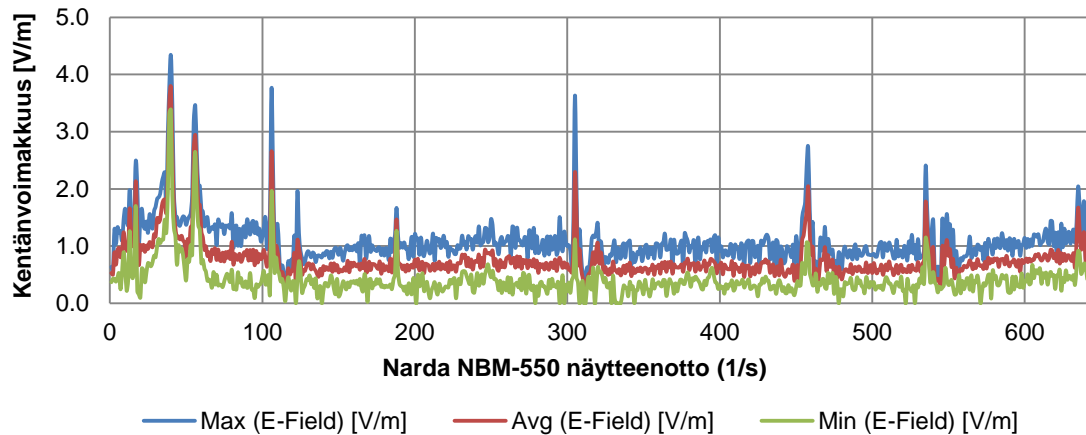
Vertaillessa Nardan mittalaitteen sekä dosimetrin mitattuja tuloksia Hansan katutason kerroksesta, huomataan niiden välillä selviä eroja (Kuva 32.).



Kuva 32. Kauppakeskus Hansan katutason mittaustulokset. Vertailussa Narda NBM-550 & EME-SPY 140 –mittalaitteiden tulokset.

Nardan mittalaitteen tulosten pohjataso on huomattavasti korkeammalla kuin dosimetrin. Dosimetrin tuloksissa ei myöskään näy yhtä suuria paikoittaisia kentänvoimakkuuden nousuja joita Nardan tuloksissa ilmenee. Dosimetrin korkeimmaksi arvoksi mitattiin 3,85 V/m ja Nardan mittalaitteen arvoksi 3,78 V/m.

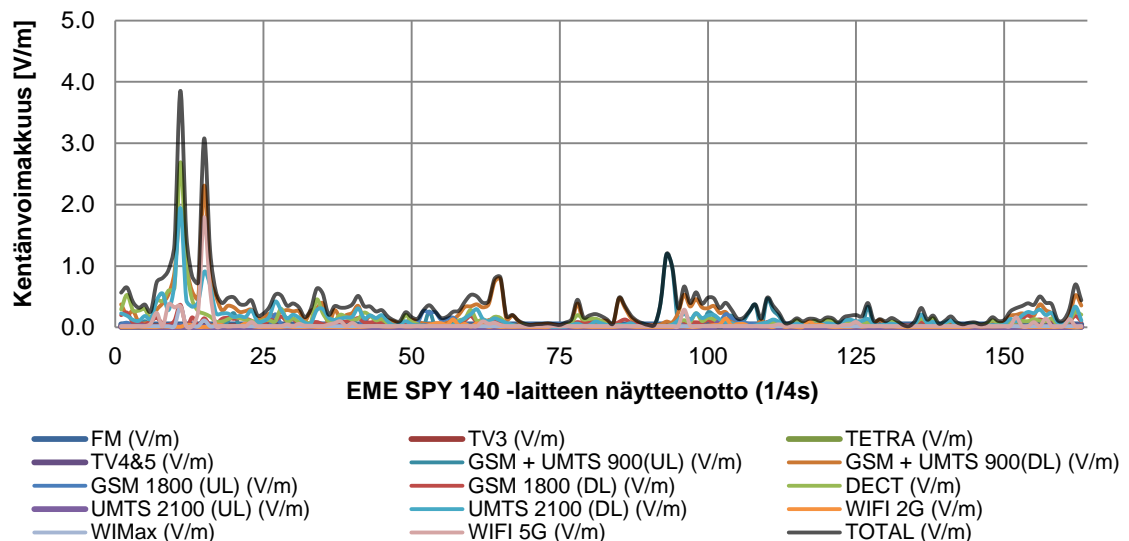
Kun tarkkaillaan Nardan kentänvoimakkuusmittarin tuloksia erikseen, huomataan minimi- keskiarvo- ja maksimikäyrän erotusten olevan melko suuria (Kuva 33.).



Kuva 33. Narda NBM-550 –mittalaitteen mittaustulokset Hansan katutason kerroksesta.

Nardan minimikäyrän arvot tippuvat jopa 0,0 V/m:iin ja maksimikäyrän korkein mitattu kentänvoimakkuus on arvoltaan 4,34 V/m.

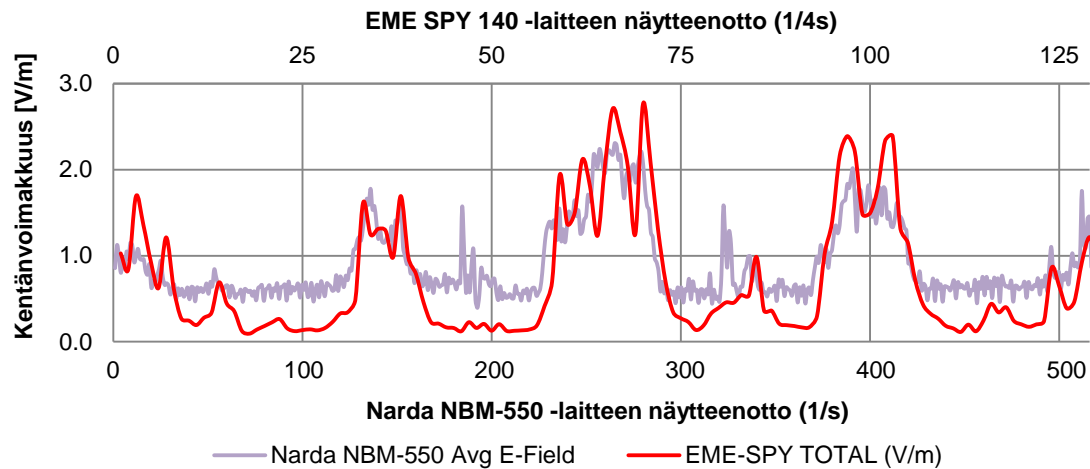
Dosimetrin mittaustuloksista nähdään Hansan katutason kerroksessa usean tietoliikennekaistan olevan kentänvoimakkuuksiltaan samaa suuruusluokkaa (Kuva 34.).



Kuva 34. EME SPY 140 –dosimetrin mittaustulokset Hansan katutason kerroksesta.

Mittauksen alkupäässä, eli Hansan kultatalossa on saavutettu suurimmat mittaustulokset. Tässä kohtaa voimakkaimmat sähkökentät aiheuttaa GSM 900 DL, DECT, UMTS DL sekä WIFI 5G -kaistat.

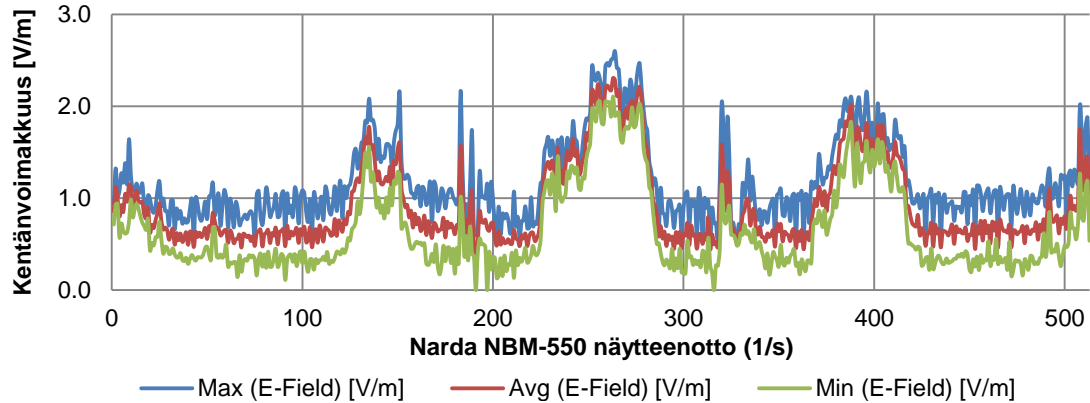
Hansan 1. kerroksen tuloksissa mittalaitteiden pohjalukemat ovat jälleen eri suuruisia likimäärin 0,5 V/m:n erotuksella (Kuva 35.).



Kuva 35. Kauppakeskus Hansan 1. kerroksen mittaustulokset. Vertailussa Narda NBM-550 & EME-SPY 140 -mittalaitteiden tulokset.

Mittalaitteiden tulokset korreloivat muutoin melko hyvin kentänvoimakkuuden muutosten kannalta. Tuloksissa huomataan selvästi 3:lla alueella suurimmat kentänvoimakkuudet. Nämä alueet sijoittuvat Hansatorin ympäristöön, joka on kauppakeskuksen suurin aukio. Mittauksen alku- ja loppupäässä huomataan myös kentänvoimakkuuden vahvistuvan hieman.

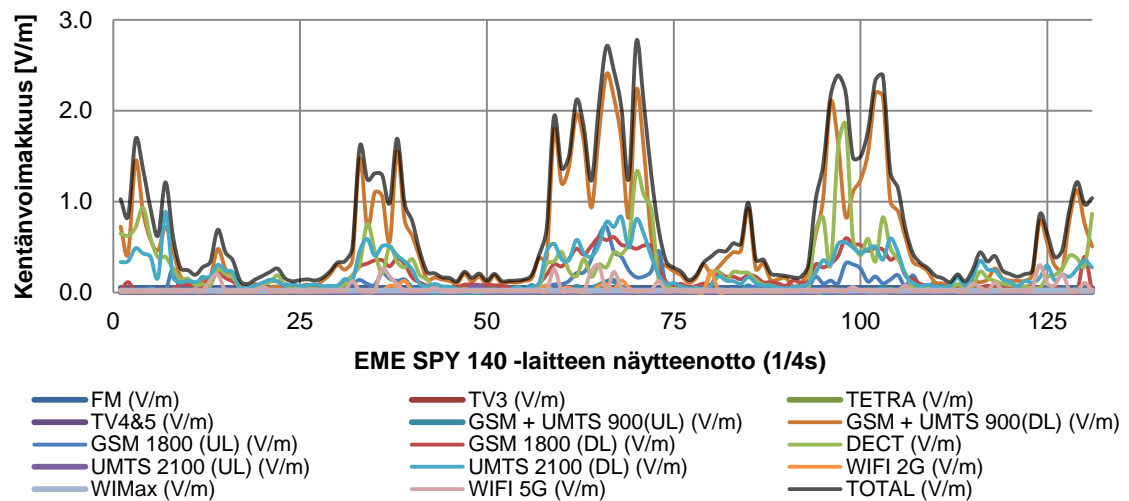
Kuten katutason kerroksen mittauksissa, on Nardan mittalaitteen keskiarvo- ja ääriarvokäyrien erotus huomattavissa (Kuva 36.).



Kuva 36. Narda NBM-550 -mittalaitteen mittaustulokset Hansan 1. kerroksesta.

Nardan mittalaitteen minimikäyrä saavuttaa jälleen 0,0 V/m:n pohjalukeman ja mittalaitteen maksimiarvot ulottuvat 2,51 V/m:iin asti.

EME SPY 140 -dosimetrin tulokset osoittavat GSM 900 -kaistan (ruskea) olevan Hansan 1. kerroksessa kentänvoimakkuudelta voimakkain radiosovellus (Kuva 37.).



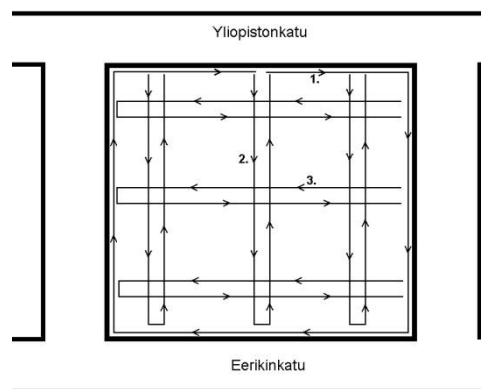
Kuva 37. EME SPY 140 -dosimetrin mittaustulokset Hansan 1. kerroksesta.

Tuloksista huomataan myös GSM 1800 (puna-ruskea) ja UMTS (sininen) -kaistojen olevan likimain keskenään yhtä suuret. DECT-kaistan (vihreä) kentänvoimakkuus nousee jälleen paikoittain korkeisiin lukemiin. Poikkeuksellinen havainto oli GSM 1800 UL -kaistan (tumman sininen) arvot, jotka ulottuvat 0,72 V/m:iin asti 66. näytteenoton kohdalla.

4.6 Turun Kauppatori

Turun kauppatorilla suoritettiin kentänvoimakkuusmittauksia kävelemällä. Mittauksia vaikeutti torikauppiaiden toiminta joka johtui mittauksen ajankohdasta. Mittaus suoritettiin joulukuun 11. päivä. Tosin kauppatorin ihmismäärä oli kuitenkin melko pieni.

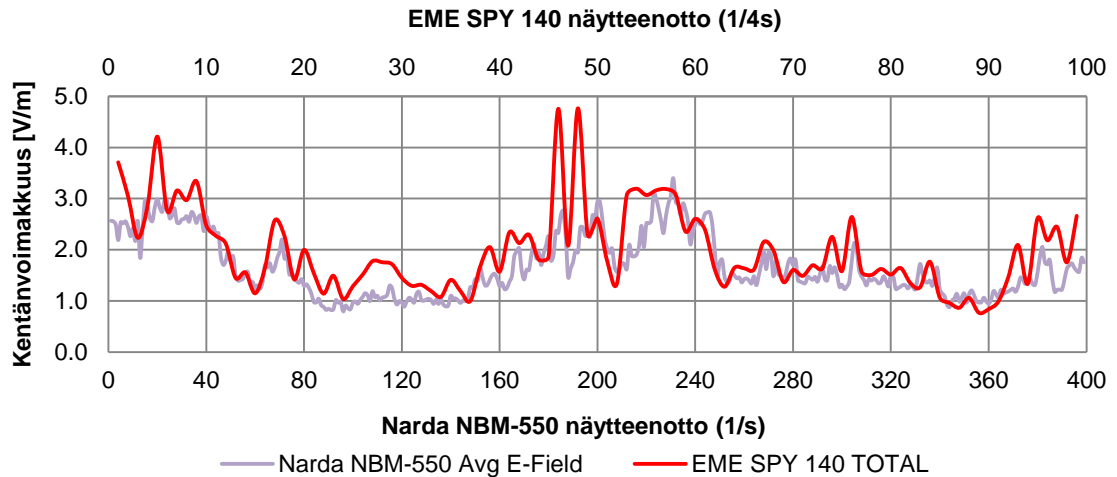
Kauppatorin mittaukset suoritettiin 8:ssa osassa jotka ovat demonstroituna kuvassa 38.



Kuva 38. Kävelyreitit Turun kauppatorin mittauksessa. Numeroitujen reittien mittaustulokset ovat esitettynä numerojärjestyksessä tässä luvussa.

Kauppatorin ympäristössä on silmämääräisesti havaittavissa useita tukiasemia, joten tuloksista on vaikea paikallistaa tarkkaa kentänvoimakkuuden aiheuttajaa. Kauppatorin esitetyt mittaustulokset on karsittu kolmeen osaan joista ensimmäinen on suoritettu kiertämällä tori.

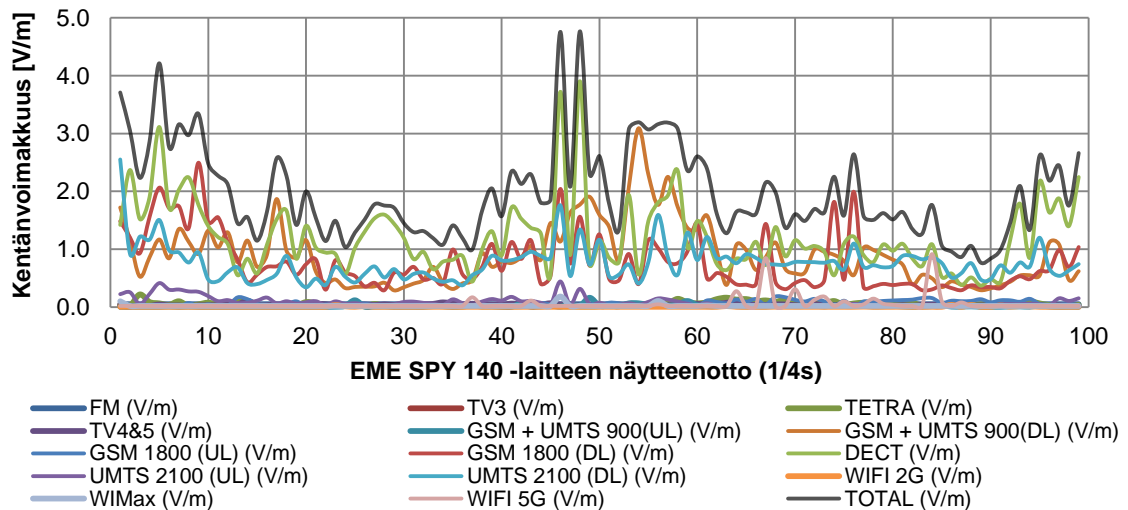
1. mittauksen tuloksissa nähdään sähkökentän olevan voimakas kiertäessä kauppatoria (Kuva 39.). Matalimmat kentänvoimakkuudet sijoittuvat jopa 1 V/m:n tasoon.



Kuva 39. Kauppatorin 1. mittauksen tulokset. Vertailussa Narda NBM-550 & EME SPY 140 -mittalaitteiden tulokset.

Mittalaitteiden tuloksien eroavuus on huomattava etenkin mittauksen maksimilukemissa. Dosimetrin suurin mitattu arvo on 4,77 V/m ja kentänvoimakkuusmittarille vastaava lukema on 3,40 V/m. Maantieteellisesti nämä mitatut arvot sijoittuvat kauppatorilla Eerikinkadun osioon.

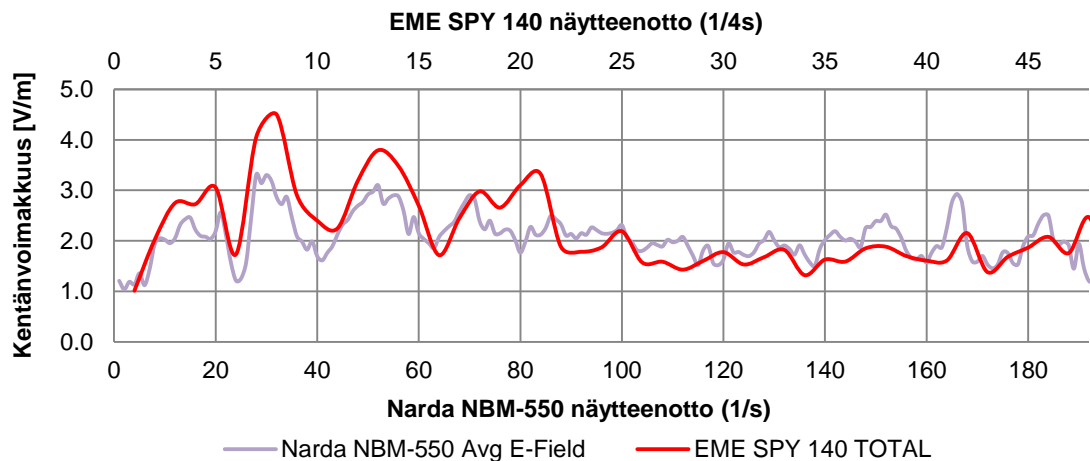
Dosimetrin tulokset osoittavat kaikkien matkapuhelinjärjestelmien DL-kanavien olevan kentänvoimakkuuksiltaan hyvinkin suuria (Kuva 40.).



Kuva 40. EME SPY 140 -dosimetrin tulokset kauppatorin 1. mittauksesta.

Sähkökentän voimakkuuksien suurimmat arvot aiheuttaa kuitenkin DECT-kaista (vihreä käyrä).

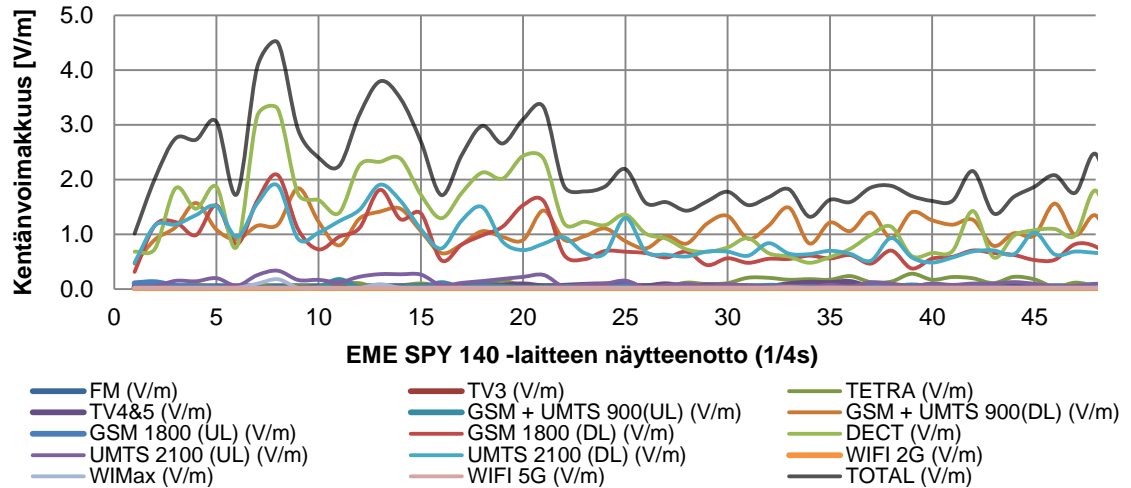
Kauppatörin mittauksen 2. osiossa toria edettiin laidasta laitaan ja takaisin. Paluusuunnan reitti ei kuitenkaan ollut täysin sama kuin menosuunnassa. Mittauksen lähtöpiste sijoittui torin Yliopistonkadun laidan keskelle. Mittauksen lähtöpiste sijoittuu n. 50 m:n päähän tukiasemista jotka sijaitsevat Kauppiaskadun ja Yliopistonkadun risteyksessä, Handelsbanken-rakennuksen katolla. Molempien mittareiden tulokset mittauksesta ovat esitettyinä kuvassa 41.



Kuva 41. Kauppatörin 2. mittauksen tulokset. Vertailussa Narda NBM-550 & EME SPY 140 -mittalaitteiden tulokset.

Kentänvoimakkuudet ovat selvästi matalampia mittauksen toisella puoliskolla joka kuvastaa mittauksen paluusuuntaa. Tämä saattaa johtua mittajaan aiheuttamasta vaikutuksesta sähkökenttään. Dosimetrin korkein mitattu kentänvoimakkuus sai arvon 4,50 V/m ja Nardan mittalaitteen maksimiarvo oli 3,31 V/m.

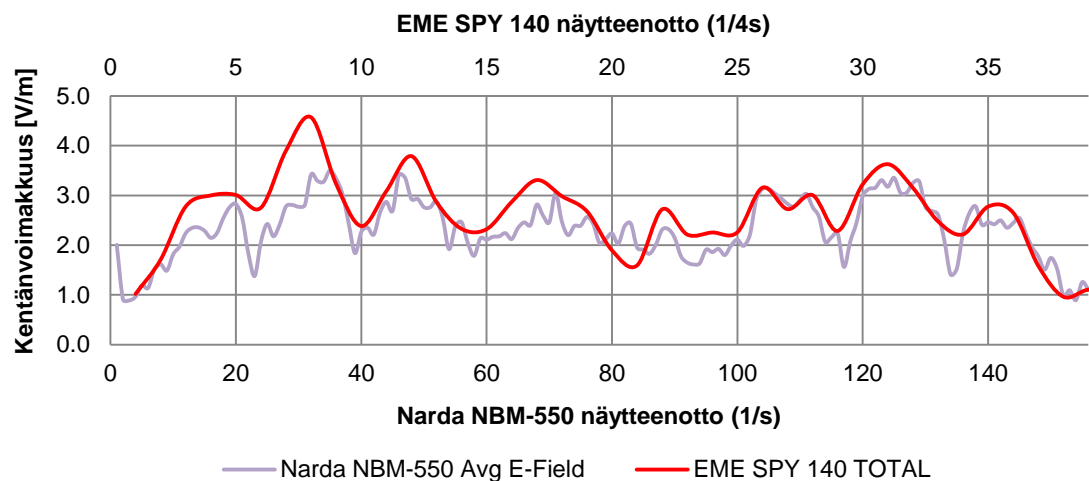
DECT-kaista (vihreä käyrä) saavutti jälleen mittauksen suurimmat kentänvoimakkuudet joka havaitaan dosimetrin mittaustuloksista kuvassa 42.



Kuva 42. EME SPY 140 –dosimetrin tulokset kauppatorin 2. mittauksesta

Tämän mittauksen matkapuhelinjärjestelmien DL-kaistojen eroavuus oli pienempi kuin edellisessä.

Kauppatorin mittauksen 3. osio suoritettiin samalla tavalla kun 2. osio. Poikkeuksena oli mittauksen lähtöpiste joka sijoittui torin Kauppiaskadun laidan keskelle. Molempien mittalaitteiden tulokset ovat esitettynä kuvassa 43.

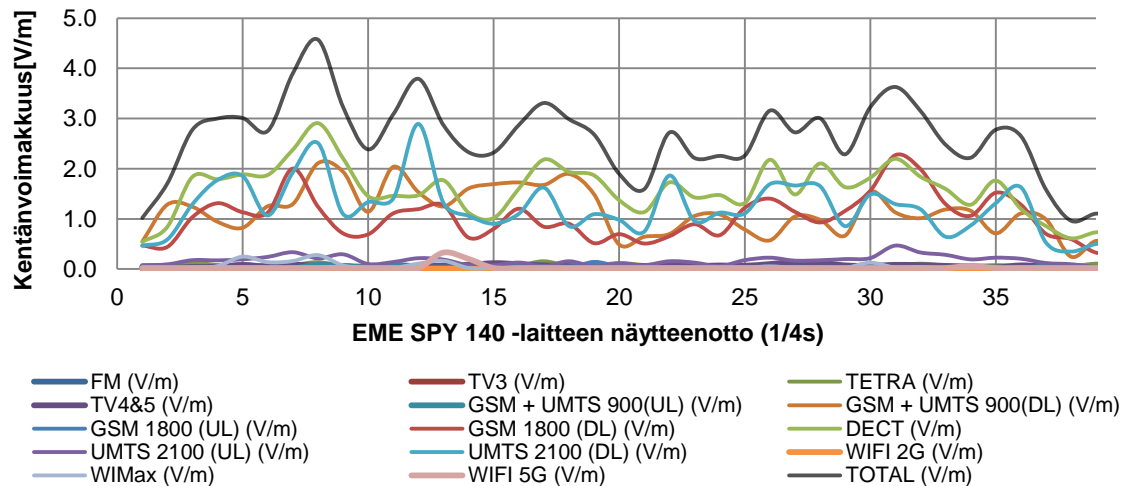


Kuva 43. Kauppatorin 3. mittauksen tulokset. Vertailussa Narda NBM-550 & EME SPY 140 -mittalaitteiden tulokset.

Kuvasta ilmenee mittauksen toisen puoliskon olevan lähes peilikuva ensimmäisestä. Tässä mittauksessa huomataan Nardan mittalaitteen ja dosimetrin näytteenottojen välillä selvä tarkkuusero. Nardalla suurimmaksi

sähkökentän arvoksi mitattiin 3,5 V/m ja dosimetrillä vastaavasti arvo oli 4,57 V/m.

Kuva 44 esittää dosimetrin taajuuskaistojen yksityiskohtaisemmat mittaustulokset.

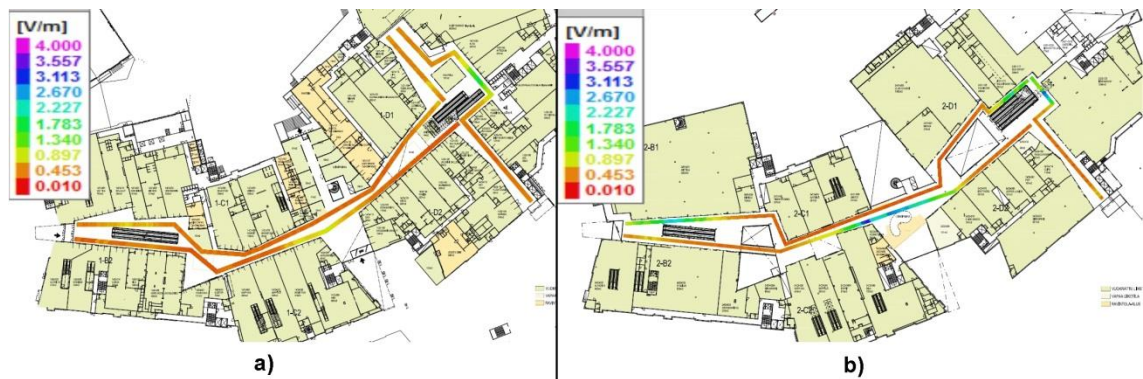


Kuva 44. EME SPY 140 -dosimetrin tulokset kauppatorin 3. mittauksesta.

Matkapuhelinjärjestelmien DL-kaistojen kentänvoimakkuuksien välillä on huomattava eroavuus vaikka ne kaikki ovatkin voimakkaita. Esim. mittauksen 12. näytteenoton kohdalla UMTS DL -kaista (sininen) saa arvon 2,89 V/m ja GSM 1800 DL -kaista (puna-ruskea) vastaavasti 1,19 V/m. DECT-kaistalle (vihreä) on jälleen mitattu korkea kentänvoimakkuus.

4.7 Kauppakeskus Skanssi

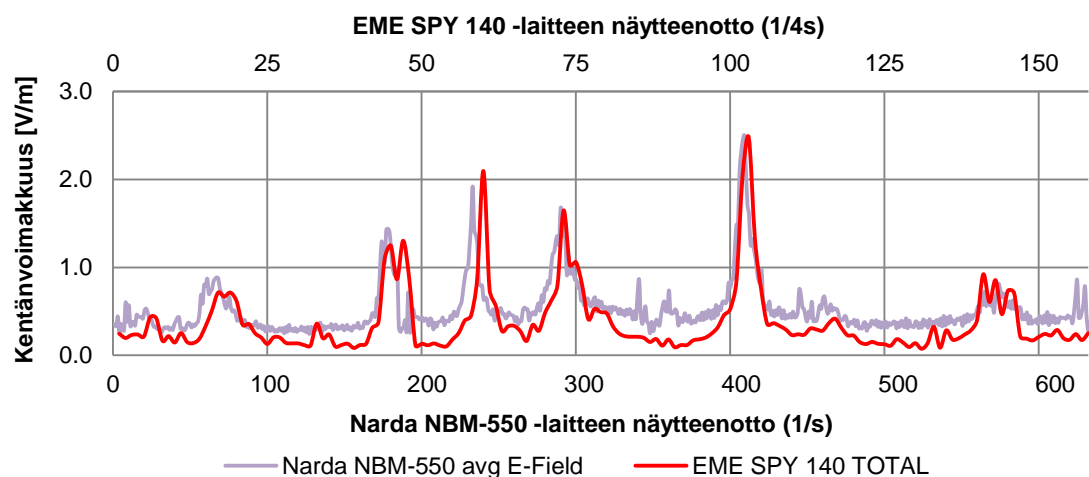
Skanssin kauppakeskuksessa tehtiin mittauksia sekä 1. että 2. kerroksessa. Skanssin 1. kerroksen mittaus suoritettiin kulkemalla pääkäytävillä rakennuksen pääovelta toiseen päähän ja takaisin. 2. kerroksen mittaus tehtiin samalla tavalla jossa lähtöpiste oli vastaavassa kohdassa. Kuva 45 visualisoi mittauksien kulkureittejä mitattuine kentänvoimakkuuksineen.



Kuva 45. Mittauksien kulkureitit kauppakeskus Skanssissa. a) 1. kerroksen mittaus. b) 2. kerroksen mittaus.

Kuvan värikoodissa punainen väri edustaa kentänvoimakkuuden matalampia arvoja, ja sinertävät korkeampia arvoja. Näin ollen kauppakeskuksen tukiasemien sijainnin pystyy likimäärin paikallistamaan. Tulee kuitenkin huomioida kuvan olevan ainoastaan suuntaa antava, tarkkojen GPS-koordinaattien puuttuvan mittauskohteesta.

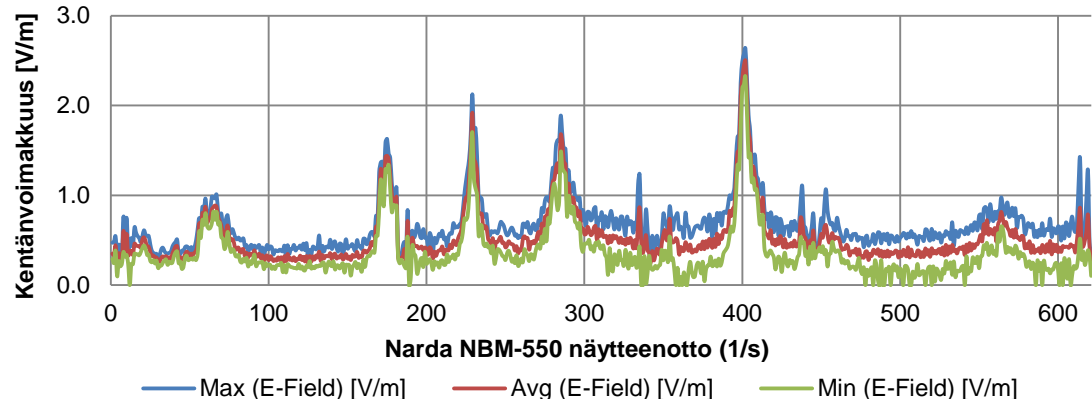
Kun molempien käytettyjen mittalaitteiden tulokset ensimmäisen kerroksen mittauksesta ovat vertailussa, huomataan tulosten olevan hyvin samanlaiset (Kuva 46.).



Kuva 46. Kauppakeskus Skanssin 1. kerroksen mittauksien tulokset. Vertailussa Narda NBM-550 & EME SPY 140 -mittalaitteiden tulokset.

Laitteiden korkeimmat mitatut arvot ovat likimäärin samat, mutta mittauksen pohjalukemat eroavat toisistaan karkeasti n. 0,2 V/m.

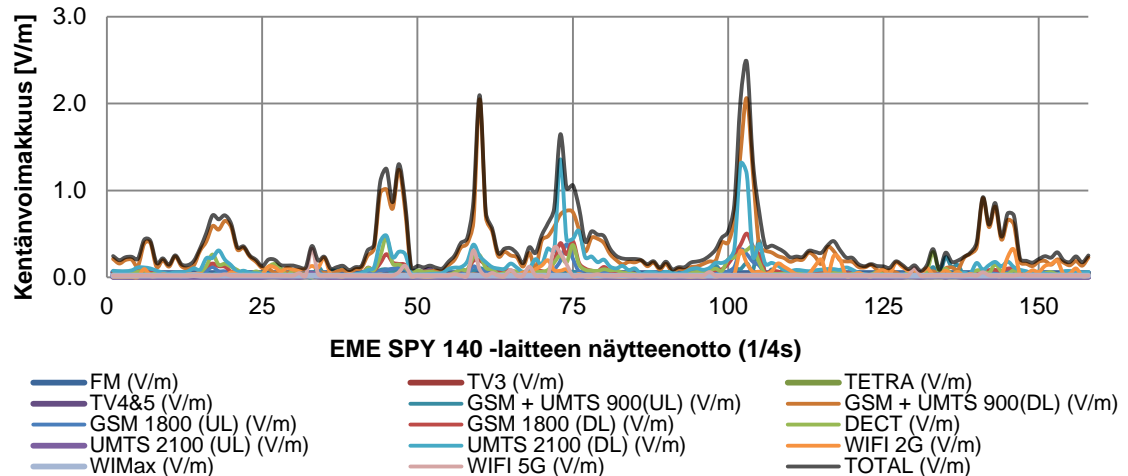
Nardan kentänvoimakkuusmittarin maksimi-, keskiarvo- ja minimilukemat eroavat toisistaan hieman. Käyrien välillä on lähes jatkuvasti n. 0,1 V/m:n ero (Kuva 47.).



Kuva 47. Narda NBM-550 -mittalaitteen mittaustulokset Skanssin 1. kerroksesta.

Tuloksen korkein keskiarvoinen kentänvoimakkuus on arvoltaan 2.49 V/m ja minimikäyrän arvot tippuvat paikoittain jopa 0,0 V/m:iin. Maksimi- ja keskiarvokäyrän välillä on useassa kohtaa huomattavia eroja (lopussa jopa > 0,5 V/m).

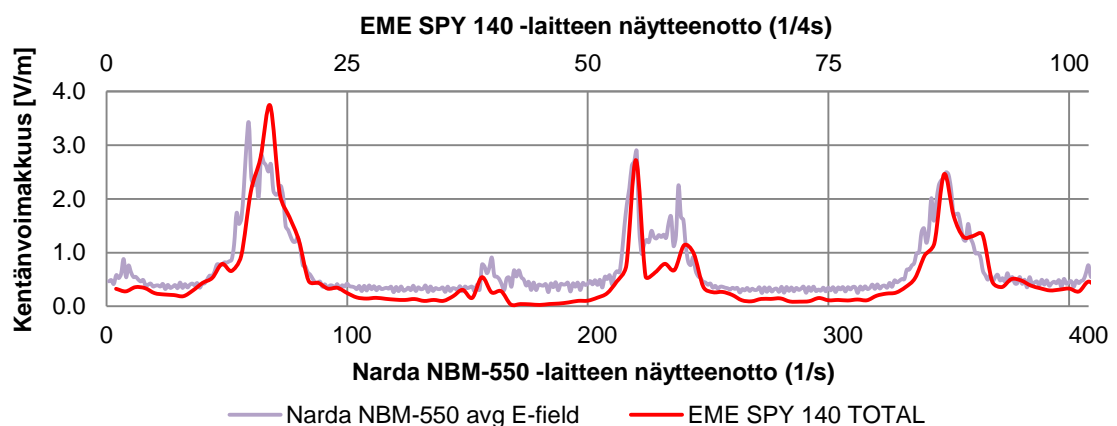
1. kerroksen EME SPY 140 -dosimetrin mittaustuloksissa ilmenee matkapuhelinsovellusten jälleen olevan kentänvoimakkuuksien dominoivassa osassa. Tuloksen vahvimmat kaistat ovat GSM 900 DL (ruskea) ja UMTS (sininen) (Kuva 48.).



Kuva 48. EME SPY 140 -dosimetrin mittaustulokset kauppakeskus Skanssin 1. kerroksesta.

Tuloksissa ilmenee myös paikoittain Skanssin oman WLAN-verkon [14] (oranssi käyrä) kentänvoimakkuuden voimistuvan. Dosimetrin yhteenlasketun kentänvoimakkuuden suurin arvo on 2,47 V/m.

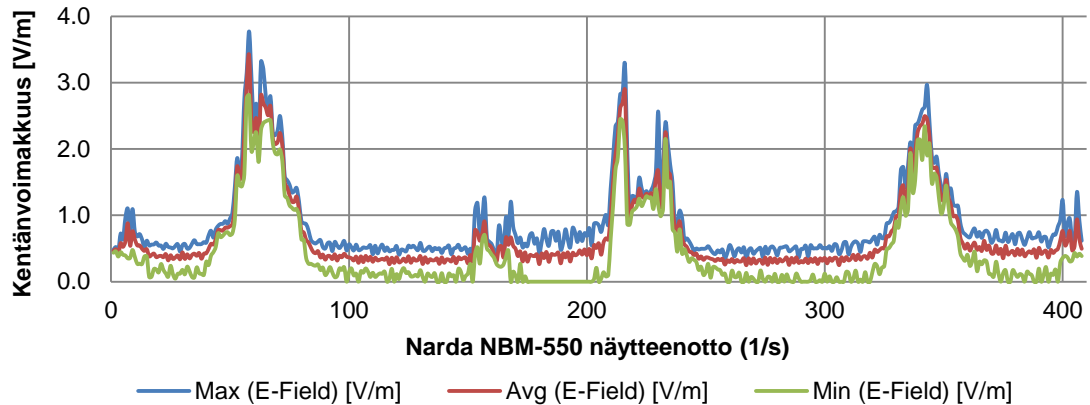
Kuten 1. kerroksen tuloksissa, niin 2. kerroksessa molempien mittalaitteiden tulokset korreloivat melko hyvin poislukematta pohjalukemien eroja (Kuva 49.).



Kuva 49. Kauppakeskus Skanssin 2. kerroksen mittaustulokset. Vertailussa Narda NBM-550 & EME-SPY 140 -mittalaitteiden tulokset.

Tuloksista voidaan arvioida että Skanssin 2. kerroksen mittauksessa ollaan ohitettu kolme tukiasemaa, joiden kohdalla myös ilmenee eroja mittalaitteiden tuloksien välillä.

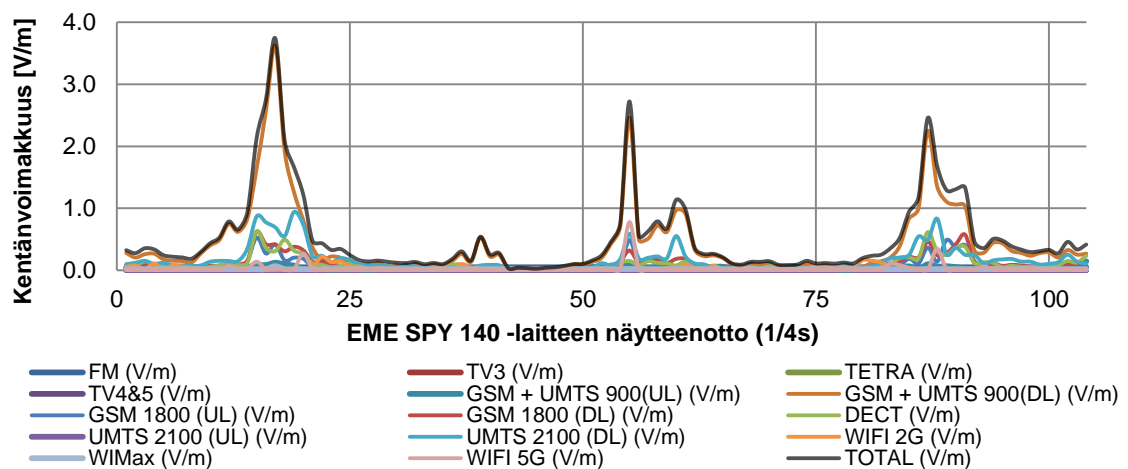
Narda-mittalaitteen tulokset kuljetulta reitiltä ovat esitettyinä kuvassa 50.



Kuva 50. Narda NBM-550 -mittalaitteen mittaustulokset Skanssin 2. kerroksesta.

Minimikäyrän alimmat lukemat ovat jälleen 0,0 V/m ja käyrien välillä on huomattavissa eroja.

Dosimetrin tulokset osoittavat GSM 900 -kaistan (ruskea käyrä) olevan Skanssin 2. kerroksessa vahvin kentänvoimakkuudeltaan (Kuva 51.).



Kuva 51. EME SPY 140 -dosimetrin mittaustulokset kauppakeskus Skanssin 2. kerroksesta.

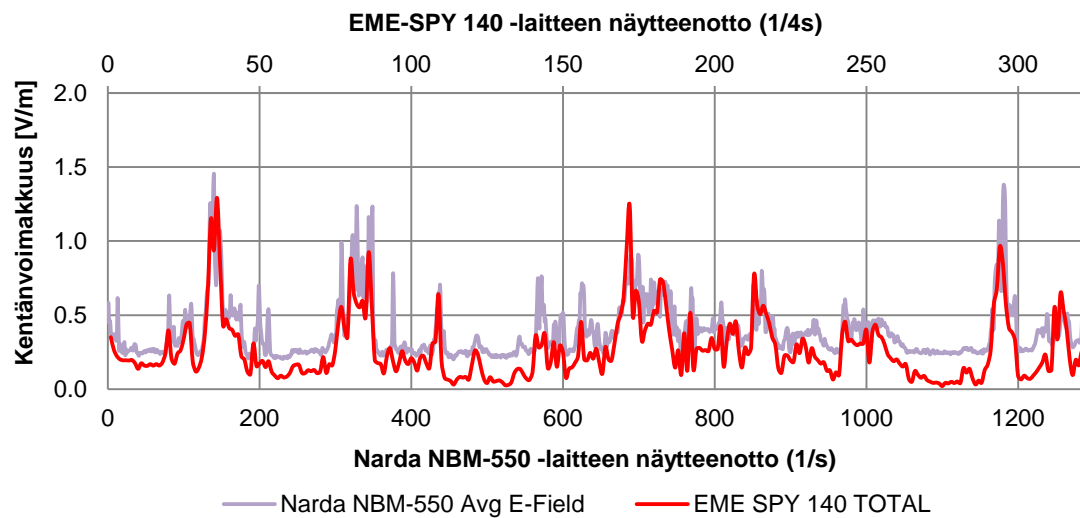
Yhteenlasketun kentänvoimakkuuden suurin arvo on 3.74 V/m.

4.8 Turun ja Kaarinan välinen mittaus

Tässä mittauksessa kulkureitti oli pisin opinnäytetyön tehdyistä mittauksista. Reittiä edettiin autolla Turun keskustasta Kaskenkadulta Uudenmaantielle, jota

jatkettiin Kaarinantielle asti. Kaarinantietä edettiin Hämeentien risteykseen asti. Reitin nopeusrajoitukset vaihtelivat 40–70 km/h välillä, jonka mukaan reittiä edettiin.

Dosimetrin ja kentänvoimakkuusmittarin tulokset eroavat hieman toisistaan. Kuvasta 52 ilmenee kuitenkin mittaustuloksissa korrelaatiota käyrien käyttäytymisten välillä.

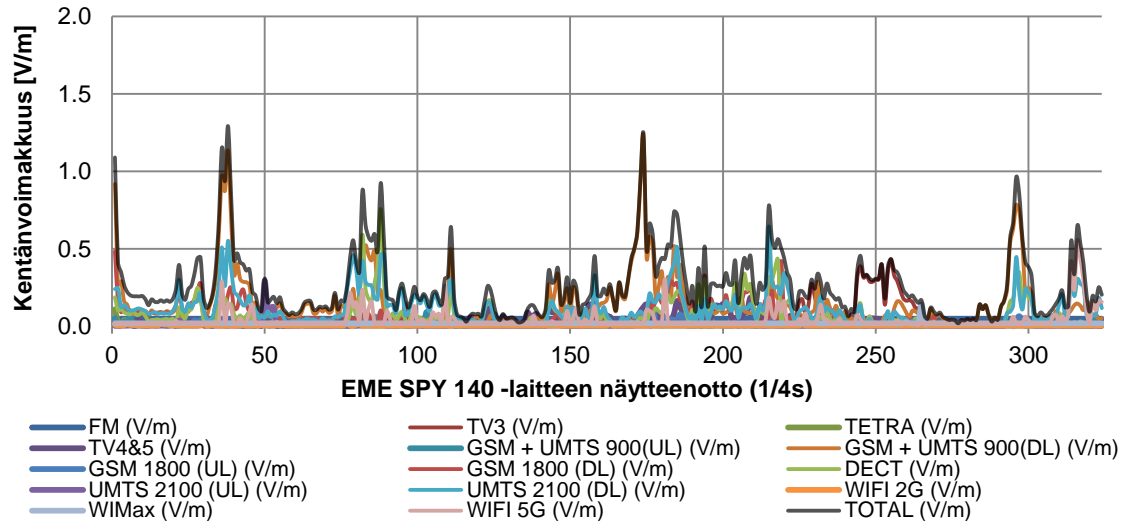


Kuva 52. Turun ja Kaarinan välisen mittauksen tulokset. Vertailussa Narda NBM-550 & EME SPY 140 -mittalaitteiden tulokset.

Dosimetrin mittaamat kentänvoimakkuusarvot ovat lähes koko mittauksen ajan matalampia kuin Nardan mittalaitteen. Kentänvoimakkuusmittarin korkein mitattu arvo oli 1,44 V/m ja dosimetrin maksimiarvo oli 1,29 V/m.

Mittaustuloksissa nähdään 4 aluetta joissa sähkökenttä on suurimmillaan. Turusta Kaarinaan edetessä nämä alueet ovat: Luostarin- ja Kaskenkadun risteys, Vähäheikkilän- ja Kaskentien risteys, Uudenmaan- ja Hovirinnantien risteys sekä reitin lopussa Littoisissa Kaarinantien ja Menninkäisenkadun risteys.

EME SPY 140 -dosimetrin tuloksia tarkastellessa huomataan GSM 900 DL -kaistan (ruskea) omaavan mittauksen suurimmat kentänvoimakkuudet (Kuva 53.).



Kuva 53. EME SPY 140 –dosimetrin mittaustulokset Turun ja Kaarinan välisellä reitillä.

WIFI 5G (pinkki) -kaistalla havaitaan kentänvoimakkuudella poikkeuksellisen paljon vaihtelua. Myös UMTS DL (sininen) ja DECT (vihreä) -kaistat saavuttavat paikoittain huomattavia kentänvoimakkuusarvoja.

5 MITTAUSTULOSTEN ANALYSOINTI

5.1 Mittalaitteiden vaikutukset tuloksiin

Vertaillen mittalaitteiden tuottamia tuloksia keskenään, on monesti huomattavissa niiden välillä merkittäviä eroja. Nardan mittalaitteen maksimi näytteenotonopeus on 1 näyte/1 s, kun taas dosimetrin nopein näytteenotto on 1 näyte/4 s. Näin ollen dosimetrin tulokset ovat mittattujen arvojen lukumäärältä suppeampia, joka voi näkyä tuloksissa eroavuutena.

Mittalaitteiden tuloksien keskeinen eroavuus toistuu tuloksissa lähes poikkeuksetta. Tulokset osoittavat dosimetrin kentänvoimakkuuksien olevan Nardan mittalaitteen arvoja matalampia sisätiloissa sekä mittauksissa joissa on käytetty autoa. Kuljettajan viereisellä paikalla penkin metalliosat saattavat vaikuttaa vain dosimetrin mittaustarkkuuteen, sillä laitteiden mittapäät eivät fyysisesti ole samassa kohtaa. Muutoin laitekohtaiset mittaustulokset ovat keskenään riittävän samankaltaiset.

3. luvussa todettiin että mittalaitteiden mitatut taajuuskaistat eroavat toisistaan. Nardan mittalaitteen mittaama taajuuskaista kattaa taajuusalueita joita dosimetri suodattaa pois, joka täten saattaa vaikuttaa tuloksiin. Toisaalta dosimetrin WiMax ja WiFi 5G -kaistat ulottuvat Nardan taajuusalueen ulkopuolelle. Tosin näiden kaistojen kentänvoimakkuudet olivat harvoin näissä mittauksissa merkittävän suuria.

Dosimetrin mittaustuloksissa on useasti havaittavissa DECT-kaistan omaavaan suuria kentänvoimakkuuksia. Kyseistä kaistaa käytetään DECT-lankapuhelimissa. Tätä järjestelmää voidaan pitää vanhanaikaisena ja olettamuksena on DECT-puhelimien olevan harvinaisia, joten dosimetrin mittaustuloksissa on oletettavasti tämän kaistan tuottamia virheitä. DECT-taajuuskaista sijoittuu tiivistä GSM 1800 ja UMTS -kaistojen välille, jotka todennäköisesti vuotavat dosimetrin DECT-kaistan suodattimen läpi väärinä

lopputuloksia. Ilmiö on huomattavissa etenkin Yliopistonkadun ja Turun kauppatorin mittaustuloksissa.

5.2 Mittaustulosten yleiset vaikuttavat tekijät

Kävellen suoritettuja mittauksia tehtiin sekä mittalaite kädessä että räätälöidyillä reppukokoonpanolla. Mittalaitteen sijainnilla todettiin mittauksissa merkitys riippuen tukiaseman sijainnista. Ihmiskeho absorboi radiotaajuista sähkömagneettista säteilyä ja toimi varjona vaimentaen mitattua sähkökenttää. Tämä havaittiin kun tukiasemaa lähestyttiin kohtisuoraan ja mittalaite oli kädessä tai repussa. Kyseinen havainto on huomattavissa esim. Kaarinankadun mittaustuloksissa.

Koska mittaavan henkilön kehon todettiin vaikuttavan mittaustuloksiin, tulisi myös huomioida ympäristön muut ihmiset. Ihmiset eivät ainoastaan kehollaan vaikuta mittaustuloksiin, vaan myös käyttämillään mobiililaitteillaan. Ruuhkaisilla alueilla kuten Turun kauppatorilla tai Yliopistonkadulla esiintyy paljon jalankulkijoita ja tieliikennettä, jotka saattavat esim. matkapuhelimillaan aiheuttaa hetkellisiä kentänvoimakkuuden muutoksia. Kauppatorin mittaustuloksissa ilmenee paikoittain UMTS 2100 UL -kaistalla kentänvoimakkuuden nousuja. Myös Hansan 1. kerroksen tuloksissa havaitaan GSM 1800 UL -kaistan kentänvoimakkuuksien suurenevan hetkittäin.

Autolla suoritetuissa mittauksissa havaittiin kentänvoimakkuuden heikkenevän merkittävästi verrattuna kentänvoimakkuuteen auton ulkopuolella. Tämän opinnäytetyön mittaustuloksissa kentänvoimakkuus auton sisällä todettiin olevan n. 50 % heikompi kuin auton ulkopuolella. Tämä havainto on nähtävissä luvussa 4.1.2 Stationaarinen mittaus autolla. Auton vaikutusta kentänvoimakkuuteen tulisi tutkia useammalla mittauksella jotta kyseisen havainnon voisi täysin vahvistaa. Auton vaikutus kentänvoimakkuuteen saattaa vaihdella eri autojen välillä.

Linnankadun kentänvoimakkuusmittauksissa tutkittiin toistettavuutta autolla. Mittauksia suoritettiin 5 kpl n. viikon välein. Linnankadun tulokset korreloivat

hyvin keskenään joka varmentaa mittaustulosten luotettavuuden. Tuloksissa ilmeni kuitenkin pieniä eroja, sillä mittausta on käytännössä mahdoton suorittaa identtisesti useita kertoja.

Muun muassa yllämainituista syistä on hyvin todennäköistä ettei kaupunkiympäristössä mittauksia toistamalla ikinä saavuteta täysin identtisiä mittaustuloksia. Jos oletetaan mittausmenetelmien ja mittalaitteiden toimivuudet olevan korrekkit, niin tulokset eivät koskaan ole vääriä. Sähkökentän voimakkuus kaupunkiympäristössä yksinkertaisesti on ajan suhteen muuttuva.

5.3 Mittaustulosten merkitys

Kentänvoimakkuuksien analysointi on tulkinnanvarainen kysymys. Kentänvoimakkuuden suuruuden tulkitseminen riippuu milta kannalta asiaa analysoidaan.

Tämän työn mittaustuloksissa kentänvoimakkuus nousi monesti useaan V/m:iin kun mittauksia suoritettiin kaupunkiympäristössä. Matkapuhelinjärjestelmien toimivuuden kannalta tämän suuruiset arvot ovat enemmän kuin riittoiset. Esimerkiksi Ruotsissa viestintäviranomaiset (Post- och telestyrelsen) ovat asettaneet puhelinoperaattoreille UMTS-puheluiden vaatimukseksi $50 \text{ dB}\mu\text{V/m:n}$ ($3,16 \cdot 10^{-4} \text{ V/m}$) kentänvoimakkuuden tarjonnan, mutta tutkimukset ovat osoittaneet pienempienkin kentänvoimakkuuksien riittävän puheyhteyden luomiseksi. [15][16]

Opinnäytetyön mitattuja kentänvoimakkuusarvoja voidaan myös tutkia ihmisen altistumisen kannalta sähkömagneettisille kentille. Kansainvälisen ionisoimattoman säteilyn toimikunta ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation) on laatinut kenttien turvallisuusrajoja käsitteleviä ohjearvoja, joita Euroopan unionin alueella noudatetaan. Ohjearvot ovat taajuusriippuvaisia jotka radiotaajuuksilla sijoittuvat 28–87 V/m:n välille. Tämä ohjearvo koskee yleisesti väestöä joka voi altistua sähkömagneettisille kentille 24 tuntia vuorokaudessa. [1]

On huomioitava että sähkömagneettisen säteilyn kentänvoimakkuus pienenee etäisyyden kasvaessa. Vaikka tämän työn mittauksissa etäisyys tukiasemiin oli suuri, esim. Turun ja Kaarinan välisessä mittauksessa, niin varsinaisia katvealueita ei mittaustuloksissa ilmennyt.

Kaupunkiympäristössä tukiasemat ovat usein sijoitettu rakennusten katoille tai korkealle seinille, ja niissä käytetään pienempää lähetystehoja kun haja-asutusalueilla. Tämän työn mittauksissa ohitettiin tukiasemia jopa 10 m:n etäisyydeltä, ylittämättä ICNIRP:in laatimia turvallisuusarvoja. Täten harvoin altistuu hälyttävän voimakkaalle radiotaajuiselle sähkömagneettisille säteilylle, joka olisi matkapuhelinjärjestelmien tukiasemien tuottama.

6 YHTEENVETO

Tässä opinnäytetyössä suoritettiin liikkuvia kentänvoimakkuusmittauksia Turun alueella. Tavoitteena oli kerätä kattava määrä dataa kentänvoimakkuuksista, luotettavilla ammattikäyttöön tarkoitetuilla laitteilla ja valitsemalla monipuolisesti mittausympäristöt myöhempää analyysiä varten.

Työ osoitti sähkökentänvoimakkuuksien vaihtelevan monella eri tavalla. Tiiviissä kaupunkiympäristössä sekä osittain muissakin ympäristöissä, on hyvin hankalaa teoreettisesti selittää mitatun kentänvoimakkuuden tarkkaa syytä. Silmämääräisesti ja asianmukaisilla mittalaitteilla on mahdollista verifioida radioaallon tukiaseman sijainti sekä radiotien etenemistä voidaan myös teoriassa arvioida. Muuttuvan ympäristön takia kentänvoimakkuutta on kuitenkin hankala yksiselitteisesti selittää.

Tämä opinnäytetyö oli tutkimuspohjainen ja kokeellinen. Työn tuloksien merkityksenä oli havainnollistaa kentänvoimakkuuksien esiintyvyyttä kaupunkiympäristössä. Työssä kertyi mitattua dataa runsaasti enemmän kuin mitä tämä dokumentti sisältää. Mitattua dataa voidaan mahdollisesti hyödyntää esim. Turun AMK:n radiolaboratorion kansallisissa ja kansainvälisissä projekteissa.

Mittausdatan keräämistä voisi jatkaa suorittamalla mittauksia saman periaatteen mukaan kuin tässä työssä. Mittauskohteita, mittausmenetelmiä ja mittalaitteita voisi vielä monipuolistaa, jolloin tuloksia voitaisiin verrata ja saataisiin kattavampi kuva kentänvoimakkuuksista.

LÄHTEET

- [1] Nyberg, H. ja Jokela, K.: IONISOIMATON SÄTEILY: Sähkömagneettiset kentät. Säteilyturvakeskus, 2006.
- [2] Ulaby, F.T.: Electromagnetics for Engineers, Pearson Education. 2005.
- [3] Räisänen, A. ja Lehto, A.: RADIOTEKNIikka. OTATIETO, 1998.
- [4] Smith, Jr. A.A.: Radio Frequency Principles and Applications: The Generation, Propagation, and Reception of Signals and Noise. IEEE PRESS, 1998.
- [5] Ekman, R.: Radiotekniikan perusteet, kurssimateriaali, 2007
- [6] Putkonen, J. ja Leikas, A.: Mikroaaltoradiolinkin jännemitoitus [www-dokumentti] saatavilla: https://noppa.aalto.fi/noppa/kurssi/s-26.3301/materiaali/S-26_3301_propagation2011_putkonen_5.pdf.pdf (luettu 24.11.2013)
- [7] "Electric and Magnetic Field Measurement, NBM-550 Broadband Field Meter datasheet", Narda Safety Test Solutions
- [8] "E-Field Probe, EF0391", Narda Safety Test Solutions, Sandwiesenstrasse 7 72793 Pfullingen, Germany.
- [9] "EME SPY 140 Datasheet", MVG, 2013.
- [10] "Fonecta kartat" [www-dokumentti] saatavilla: <http://www.fonecta.fi/kartat/tulosta/?where=turku&longitude=22.294810&latitude=60.443056&zoomLevel=13> (luettu 4.12.2013)
- [11] "Turun Sanomat EXTRA" [www-dokumentti] saatavilla: <http://www.ts.fi/teemat/extra/1074310178/Aimo+Massisen+kyselypalsta+Aimo+Annos+Miten+pyrakoidaan+hevoseet+parkkiruutuun> (luettu 5.12.2013)
- [12] "Google Maps, katukuva 2009" [www-dokumentti] saatavilla: <https://maps.google.fi/?ll=60.4538,22.27109&spn=0.006391,0.01929&t=m&z=16&layer=c&cbll=60.453748,22.270942&panoid=sF35ulKzffXUfvoCu3oxzw&cbp=12,231.26,,0,-4> (luettu 7.11.2013)
- [13] "Hansa sijaintikartta" [www-dokumentti] saatavilla: <http://www.hansainfo.fi/sijainnit.html> (luettu 4.12.2013)
- [14] "Skanssin palvelut" [www-dokumentti] saatavilla: <http://www.skanssi.fi/palvelut> (luettu 3.12.2013)
- [15] "UMTS-utbyggnaden - Slutlig rapport 2005", Post- och telestyrelsen, 2006
- [16] "Vägbrytaren Stockholm – tabeller" [www-dokumentti] saatavilla: <http://www.vagbrytarenstockholm.se/kunskapsbanken/tabeller/index.htm>

Narda NBM-550 -mittapäiden spesifikaatiot

| Isotropic Response ^e | CW Overload | Peak Overload ^b | Calibration Frequencies | Thermal Response | Humidity | Weight |
|--|-------------------------|----------------------------|---|--|----------------------|-------------------|
| ±1 dB for f > 1 MHz | 170 mW/cm ² | 17 W/cm ² | 0.1, 0.2, 0.3, 1.0, 3.0, 10, 27.12, 100, 200, 300, 500, 750, 1000, 1800, 2450, 2700, 3000 MHz | +0.2 / -1 dB | 5 to 95% RH @ ≤ 25°C | 3.2 oz., 90 gms. |
| ±1 dB | 1000 mW/cm ² | 100 W/cm ² | 0.1, 0.2, 0.3, 1.0, 3.0, 10, 27.12, 100, 200, 300, 500, 750, 1000, 1800, 2450, 2700, 3000 MHz | +0.2 / -1.5 dB (±0.025 dB/K @ 10 to 50° C) | 5 to 95% RH @ ≤ 25°C | 3.2 oz., 90 gms. |
| ±1 dB | 265 mW/cm ² | 26 W/cm ² | 0.1, 0.2, 0.3, 1.0, 3.0, 10, 27.12, 100, 200, 300, 500, 750, 1000, 1800, 2450, 2700, 3000, 4000, 5000, 6000 MHz | +0.2 / -1 dB | 5 to 95% RH @ ≤ 25°C | 3.2 oz., 90 gms. |
| ±1.5 dB (10 MHz to 8 GHz) ±2.0 dB (f > 8 GHz) | 700 mW/cm ² | 70 W/cm ² | 3, 10, 27, 100, 200, 300, 500, 750 MHz 1.0, 1.8, 2.45, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0, 7.0, 8.2, 9.3, 10, 11, 18 GHz | +0.2 / -1.5 dB (±0.025 dB/K @ 10 to 50° C) | 5 to 95% RH @ ≤ 28°C | 3.2 oz., 90 gms. |
| ±0.75 dB | 600 mW/cm ² | 200 W/cm ² | 300, 750 MHz, 1.0, 1.8, 2.45, 4.0, 8.2, 9.3, 10, 11, 18, 26.5, 40, 45.5 GHz | ±0.0 dB | 5 to 95% RH @ ≤ 25°C | 3.2 oz., 90 gms. |
| ±0.75 dB | 1500 mW/cm ² | 600 W/cm ² | 300, 750 MHz, 1.0, 1.8, 2.45, 4.0, 8.2, 9.3, 10, 11, 18, 26.5, 40, 45.5 GHz | ±0.0 dB | 5 to 95% RH @ ≤ 25°C | 3.2 oz., 90 gms. |
| ±1.0 dB | 680 mW/cm ² | 1 W/cm ² | 27, 50, 80, 100, 200, 300, 500, 750 MHz 1.0, 1.7, 2.45, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0, 7.0, 8.2, 10, 11, 18, 26.5, 40, 45.5, 60 GHz | ±0.9 dB (-0.03 dB/K) | 5 to 95% RH @ ≤ 25°C | 3.2 oz., 90 gms. |
| ±1.0 dB | > 35 A/m | > 350 A/m | 0.1, 0.15, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.2, 1.5, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 10, 15, 20, 25, 27.12, 30 MHz | +0.2 / -0.8 dB (±0.025 dB/K @ 10 to 50° C) | 5 to 95% RH @ ≤ 28°C | 6.7 oz., 190 gms. |
| ±1.0 dB | > 20 A/m | > 200 A/m | 10, 15, 20, 27.12, 30, 35, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 120, 150, 180, 200, 250, 300, 400, 433, 500, 600, 700, 800, 900, 1000 MHz | +0.5 / -0.8 dB (±0.025 dB/K @ 10 to 50° C) | 5 to 95% RH @ ≤ 28°C | 3.2 oz., 90 gms. |
| ±2.0 dB ^f | 3000% of Standard | 32 dB above Standard | 0.3, 3.0, 10, 30, 100, 300, 750 MHz, 1.0, 1.8, 2.45, 4.0, 8.2, 10, 18, 26.5, 40, 45.5 GHz | ±0.5 dB | 5 to 95% RH @ ≤ 25°C | 7.3 oz., 206 gms. |