

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU
Tietotekniikan koulutusohjelma
Tietoliikennetekniikka

Opinnäytetyö

Jouni Häkkinen

Tietokoneverkkolaboratorion EMC-mittaukset

Työn ohjaaja
Työn teettäjä
Tampere 5/2009

Jorma Punju
TAMK, Ari Rantala

Tekijä	Jouni Häkkinen
Työn nimi	Tietokoneverkkolaboratorion EMC-mittaukset
Sivumäärä	49 sivua
Valmistumisaika	Toukokuu 2009
Työn ohjaaja	Jorma Punju
Työn tilaaja	TAMK

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulun laboratoriotila A3-17 muutettiin tietokoneverkkolaboratorioksi kesällä 2008. Tavallisen ATK-luokan kaluston lisäksi tilassa käytettiin reitittämiä ja muita tietoliikennelaitteita. EMC-mittauksilla oli tarkoitus selvittää tilan sähkömagneettisen säteilyn määrä.

Tuloksien mukaan suurimmat sähkömagneettisen säteilyn lähteet olivat tietokoneet ja GPS-järjestelmän koaksiaalikaapeleiden referenssisignaali. Tietokone aiheutti sekä voimakkaan, että laajakaistaisen häiriön GPS-järjestelmän referenssisignaalin aiheuttaessa vain yhden voimakkaan häiriöpiikin. Myös GSM-verkko, WLAN, radiolähteykset ja valaistus aiheuttivat omat kenttänsä.

Analysaattorista itsestään aiheutui melko suuri pohjakohina mitattuihin signaaleihin nähden, mutta tavoitteena ollut tilan yleisen sähkömagneettisten kenttien suuruusluokan selvittäminen onnistui kyllä. Kohinan suuri taso häytti lähinnä heikkojen signaalien havaitsemista.

Writer	Jouni Häkkinen
Thesis	EMC-measurements of the Network Laboratory
Pages	49 pages
Graduation time	May 2009
Thesis supervisor	Jorma Punju
Co-operating company	TAMK

ABSTRACT

The laboratory facility A3-17 at Tampere University of Applied Sciences was altered to a network laboratory at summer 2008. In addition to the standard equipment of a computer classroom, routers were used among other network equipment. The purpose of EMC-measurements was to figure out the quantity of electromagnetic fields of the site.

According to the results, the greatest causes of electromagnetic radiation were computers and the reference signal in the coaxial cables of the GPS-system. The computer emitted both a strong and wide-banded disturbance as the reference signal of the GPS-system caused only one strong disturbance spike. Also the GSM-network, WLAN, radio transmissions and lighting caused their own fields.

The analyzer itself caused a rather strong base noise, but the objective to figure out the general amount of electromagnetic fields at site was successful. The great amount of noise was a disadvantage mainly in measuring weak signals.

Esipuhe

Sähkömagneettiset kentät (EMF) ovat olleet allekirjoittaneelle erityisen mielenkiinnon kohteena jo ennen Tampereen Ammattikorkeakoulussa opiskelun alkua. Luin kirjan Sähköä ilmassa /3 ja itse asiassa siitä seurannut innostus oli yhtenä suurimmista syistä jatko-opiskeluun hakemiselle.

EMF on alana juuri sellainen mistä pidän: sopivan haastava, mielenkiintoinen ja se vaatii keskivertaista enemmän perehtymistä auetakseen. Olen itse valinnut EMF-aiheisia harjoitustöitä ja esitelmiä aina tilanteen salliessa ja tulipa sitä itseopiskeltua Maxwellin lakeja omalla ajallakin ennen opinnäytetyön aiheen valitsemista.

Aihe on laaja, eikä sitä voi oppia kunnolla pelkän teorian avulla. Nämä mittaukset ovat antaneet minulle mahdollisuuden saada käytännön tuntuman muuten niin teoreettiseen aiheeseen ja sitä kautta erittäin arvokasta työkokemusta. Koulun kannalta mittauksien tuloksien avulla saatiin selvitettyä tietokoneverkkolaboratorion sähkömagneettisten kenttien määrä ja mahdolliset jatkotoimet.

Aihe ja sivumäärä on ollut pakko rajata, joten täysin kattava tämä työ ei ole, mutta hyvään alkuun sillä varmasti pääsee. Lähteistä löytyy myös mielenkiintoista materiaalia. Toivottavasti mittauksista on hyötyä myös lukijoille.

Tampereella toukokuussa 2009

Jouni Häkkinen

SISÄLLYSLUETTELO

1	JOHDANTO	1
2	MITÄ EMC TARKOITTAÄ	2
2.1	EMC-häiriöiden tyypit	2
2.2	Yleisiä EMC-häiriöiden lähteitä.....	4
3	ELEKTROMAGNEETTINEN SÄTEILY	5
3.1	Maxwellin yhtälöt.....	5
3.2	Sähkökenttä	6
3.3	Magneettikenttä	6
3.4	Sähköstaattinen induktio	7
3.5	Sähkömagneettinen induktio	9
3.6	Sähkömagneettinen aalto.....	9
4	LUONNOLLINEN TAUSTASÄTEILY	12
4.1	Geomagneettinen kenttä ja muut luonnon magneettikentät	12
4.2	Staattinen sähkökenttä.....	13
4.3	Maan ja avaruuden mikrosäteily	13
5	SUOMESSA KÄYTETTÄVÄT EMC-DIREKTIIVIT JA ASETUKSET ..	14
5.1	EMC-komiteat eri standardointijärjestöissä	14
5.2	Sallitut säteilymäärät	16
6	KÄYTETYT MITTALAITTEET	17
6.1	EMC-antenni vertailu	18
6.2	Mittaustilanteessa huomioitavia asioita.....	19
6.3	Virhemarginaali.....	20
7	EMC-MITTAUKSET	21
7.1	Tietokoneverkkolaboratorion (A3-17) kuvaus.....	21
7.2	Mittausten kuvaus.....	21
7.3	Taustakohinan taso	22
7.4	Laboratoriotilan taustasäteily	23
7.5	Elektromagneettiset häiriölähteet	25
7.5.1	Tietoliikennekehikko	25
7.5.2	Tietokoneet	26
7.5.3	Valaistus	27
7.5.4	Sähköverkko	27
7.5.5	Videotykki	28
7.5.6	Muut kentät.....	28
7.5.7	Hyötysignaalit.....	29
7.6	Yhteenvedo häiriöiden spektristä	30
8	MITTAUSTEN TEOREETTINEN TARKASTELU	31
8.1	Mittaustulosten käsittely.....	31
8.2	Mittaustulosten tulkinta.....	32
9	YHTEENVETO	33
10	LÄHTEET	34
	Liite 1: Mittalaitteen aiheuttama taustakohina.....	35
	Liite 2: Tilan muiden lähteiden EMC-häiriöt.....	36
	Liite 3: PC:n emittoimat EMC-häiriöt	38
	Liite 4: Tietoliikenneväkin emittoimat EMC-häiriöt.....	39
	Liite 5: Kaikkien EMC-häiriöiden summa.....	40
	Liite 6: Tietokoneverkkolaboratorio A3-17:n layout-kuva.....	42

KÄYTETYT SUUREET JA LYHENTEET

E	Sähkökentän voimakkuus on vektorisuure, joka ilmenee varautuneeseen hiukkaseen kohdistuvana voimana, V/m.
D	Sähkövuon tiheys on sähkökentän tiheyttä kuvaava suure, C/m ² .
H	Magneettikentän voimakkuus on vektorisuure, A/m.
B	Magneettivuon tiheys on vektorisuure, T (tesla).
S	Tehotiheys on suure, jota käytetään suurilla taajuuksilla, W/m ² .
J	Virrantiheys on ihmiskehon tai sen osan kaltaisessa tilavuusjohtimessa kulkeva virta pinta-alayksikköä kohti. J on vektorisuure, A/m ² .
SAR	Ominaisabsorptionopeus, jota käytetään ilmaisemaan radiotaajuuksien kenttien absorboitumista kehoon, W/kg.
ϵ	Väliaineen permittiivisyys, F/m (Faradaytä metriä kohti). Tyhjiön permittiivisyys $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ F/m.
σ	Väliaineen johtavuus, S/m (Siemensiä metriä kohti).
μ	Väliaineen permeabiliteetti, H/m (Henryä per metri). Tyhjiön permeabiliteetti $\mu_0 = 1,2566 \cdot 10^{-6}$ H/m.
ρ	Varaustiheys. Varauksen määrä (mitataan Coulombeissa) suoraa, pintaa tai tilavuutta kohti. Yksikkönä on vastaavasti C/m, C/m ² tai C/m ³ .
AF	Antennikerroin (Antenna Factor), antenniin saapuvan sähkökentän E voimakkuuden suhde ulostulojännitteeseen V , dB($\frac{\mu A/m}{\mu V}$).
BW	Kaistan leveys. Mitatun signaalin taajuuskaistan leveys hertseinä, Hz.
$Res BW$	Resoluutiokaistanleveys, Hz.
VBW	Videokaistanleveys, Hz.
Log. per.	Logaritmisperiodinen antenni.

KÄYTETYT KAAVAT

Sähkökentän voimakkuus	E	$D = \epsilon E, J = \sigma E, S = EH$
Sähkövuon tiheys	D	$D = \epsilon E$
Magneettikentän voimakkuus	H	$B = \mu_0 H, S = EH$
Magneettivuon tiheys	B	$B = \mu_0 H$
Tehotiheys	S	$S = EH$
Virrantiheys	J	$J = \sigma E$

	Yhtälön		
Maxwellin yhtälö	derivaattamuoto	Kuvaus	#
Gaussin laki	$\text{div}(D) = \rho$	Kuinka sähkövaraus tuottaa sähkökentän	(1)
Gaussin laki magneettikentälle	$\text{div}(B) = 0$	Kuinka magneettisia monopoleja ei ole olemassa	(2)
Faradayn induktiolaki	$\text{rot}(E) = -\frac{dB}{dt}$	Kuinka muuttuva magneettikenttä tuottaa sähkökentän	(3)
Amperen laki + Maxwellin lisäys	$\text{rot}(H) = J + \frac{dD}{dt}$	Kuinka sähkövirta ja muuttuva sähkökenttä tuottavat magneettikentän	(4)

$$E = \frac{U}{d} \quad (5)$$

$$B = \mu_0 H \quad (6)$$

$$J = \sigma E \quad (7)$$

$$U = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (8)$$

$$Z_0 = \frac{E}{H} = 376,7 \, \Omega \quad (9)$$

$$c = \lambda f \quad (10)$$

$$E = U / h \quad (11)$$

$$H = U \cdot 10^{(AF/20)} \quad (12)$$

1 JOHDANTO

Tampereen ammattikorkeakoulun laboratoriotila A3-17 muutettiin tietokoneverkkolaboratorioksi kesällä 2008. Tavallisen ATK-luokan kaluston lisäksi tilassa käytettiin tietokoneverkkolaitteita, kuten kytkimiä ja reitittimiä. Laitteiden vaikutus tilan elektromagneettisen säteilyn määrään ei ollut täysin selvillä ja tämä oli tarkoitus selvittää EMC-mittauksilla. Mittaukset tehtiin keväällä 2009, jolloin laboratorion muu käyttö oli vähäistä.

EMC-häiriöiden määrälle on olemassa tietyt sallitut raja-arvot. Laboratoriosta mitattuja säteilymääriä haluttiin verrata näihin raja-arvoihin, jolloin saataisiin käsitys tilan sähkömagneettisen säteilyn suuruusluokasta. Lisäksi mukaan oli liitetty luonnon omien sähkömagneettisten kenttien voimakkuuksia vertailukohdaksi.

Tämän työn pääpaino oli magneettikentän emissiomittauksilla. Myös sähkökenttää mitattiin, mutta tämä tapahtui antennin sallimissa rajoissa. Immunitymittaukset ja johtuvien häiriöiden sekä staattisten kenttien mittaukset eivät kuulu aihealueeseen. Uusi mittalaite ja EMC-antenni olivat hankinnassa, mutta nämä mittaukset tehtiin vielä vanhoilla mittalaitteilla ja antenneilla (ks. Käytetyt mittalaitteet). Jää nähtäväksi, kuinka paljon tarkemmin uusilla laitteilla saadaan EMC-häiriöitä mitattua. Ero näkyy varmasti selvimmin pienempänä pohjakohinan tasona, mikä mahdollistaa heikompien signaalien mittaamisen ja siten säteilylähteiden havaitsemisen kauempaa.

2 MITÄ EMC TARKOITTAÄ

EMC (Electromagnetic Compatibility) tarkoittaa sähkömagneettista yhteensopivuutta. Sähkömagneettinen yhteensopivuus on saavutettu silloin, kun laitteisto toimii hyväksytyllä tavalla sen sähkömagneettisessa käyttöympäristössä ilman, että se itse aiheuttaa kohtuuttomia sähkömagneettisia häiriöitä millekään muulle tässä samassa ympäristössä /9/.

Häiriintyminen arvioidaan usein subjektiivisesti, joten mitään tarkkaa numeroarvoa ei EMC:lle voida antaa /1, s.11/. CE-merkintä osoittaa, että laite täyttää EMC-direktiivin olennaiset suojausvaatimukset ja että valmistaja on arvioinut vaatimusten mukaisuuden ja laatinut vaatimusmukaisuusvakuutuksen /6, chapter III, § 12/. Muun muassa telelaitteiden on täytettävä lain vaatimat /8, luku 20, § 2/ EMC-suojausvaatimukset.

Sähkölaitteet ja -laitteistot on suunniteltava, valmistettava ja niitä on käytettävä niin, että sähköisesti tai sähkömagneettisesti ei aiheudu kohtuutonta häiriötä /7, luku 2, § 5/. Häiriönpäästöstandardit määrittelevät, millaisia sähköisiä tai sähkömagneettisia häiriöitä laitteet saavat aiheuttaa ja kuinka ne mitataan /1, s.17/.

2.1 EMC-häiriöiden tyypit

EMC-häiriöitä on kolmea eri tyyppiä: galvaanisesti johtuvia–, sekä sähkökenttien ja magneettikenttien aiheuttamia häiriöitä.

Galvaanisesti johtuvat häiriöt tarkoittavat virta- ja/tai jännitehäiriöitä sähköverkossa. Häiritsevän laitteen aiheuttama johtuva häiriö voi rikkoa toisen laitteen pitkänkin matkan päässä, ellei johtuvilta häiriöiltä ole

suojauduttu. Tämä voidaan toteuttaa tapauskohtaisesti esimerkiksi optoerottimella tai kaistanpäästösuotimella.

Sähkökenttien aiheuttamilta häiriöiltä ei voida normaaliolosuhteissa täysin välttää. Tällöin häiriö siirtyy kapasitiivisesti johtimesta eri potentiaalissa olevaan toiseen johtimeen sähkökentän E välityksellä. Kondensaattorin toimintaperiaate perustuukin tähän ilmiöön. Esimerkiksi piirilevyllä on runsaasti johtimia, jotka muodostavat kapasitiivisia yhteyksiä toisiin johtimiin.

Magneettikenttien aiheuttamia häiriöitä muodostuu myös tahattomasti. Virrallinen johdin muodostaa aina normaaliolosuhteissa ympärilleen magneettikentän H , mikä indusoi läheisiin johtimiin induktiivisia häiriövirtoja.

Häiriön kaistanleveys on myös olennainen asia. Osa häiriöistä oli kapeakaistaisia yksittäisiä piikkejä, osa hyvinkin laajakaistaisia yksittäisiä piikkejä ja osa häiriöistä oli tasaisin välein esiintyviä piikkien sarjoja, eli laajakaistaisia häiriöitä.

Häiriöt voivat esiintyä eri taajuusalueilla. Ne löytyvät seuraavasta taulukosta. Myös niitä vastaavat aallonpituudet on ilmoitettu. Sähkömagneettiset kentät voidaan jakaa myös staattisiin kenttiin (< 1 Hz), pientaajuuskenttiin (1...300Hz), keskitaajuisiin kenttiin (300Hz...100kHz) ja radiotaajuisiin kenttiin (> 100 kHz).

Taulukko 1. Taajuusalueet /4.

Taajuusalue	Taajuus	Aallonpituus
VLF	3 kHz – 30 kHz	10 km – 100 km
LF	30 kHz – 300 kHz	1 km – 10 km
MF	300 kHz – 3 MHz	100 m – 1 km
HF	3 MHz – 30 MHz	10 m – 100 m
VHF	30 MHz – 300 MHz	1 m – 10 m
UHF	300 MHz – 3 GHz	10 cm – 1 m
SHF	3 GHz – 30 GHz	1 cm – 10 cm

2.2 Yleisiä EMC-häiriöiden lähteitä

Alla olevissa taulukoissa on esitetty yleisiä sähkömagneettisten kenttien lähteitä. Taulukon 2 taajuus on pienempi kuin näiden mittausten alarajataajuus 9 kHz, eli ne eivät kuuluneet mittausten piiriin.

Taulukko 2. Pientaajuuskenttien lähteitä (< 300Hz) /2, s.190/.

Teollisuus	Tasasuuntaajat, suuret muuntajat, hitsaus
Kuluttajat	Voimalinjat, sähköjunat
Sairaalat	Sähkökirurgiset laitteet, lääkintälaitteet

Taulukko 3. Keskitaajuisten kenttien lähteitä (300Hz...100kHz) /2, s.250/.

Teollisuus	Induktiokuumentimet, hitsaus, hakkuriteholähteet
Kuluttajat	Induktiokeittotasot, tuotesuojaportit, metallinpaljastimet, näyttöpäätteet, televisiot
Sairaalat	Magneettikuvaslaitteiden gradienttikentät, sähkömagneettiset hermostimulaattorit, magneettiterapialaitteet
Sotilaalliset sovellukset	Tutkien pulssimodulaattorit, vedenalaiset kommunikointijärjestelmät

Taulukko 4. Radiotaajuisten kenttien lähteitä (> 100kHz) /2, s.263/.

Teollisuus ja työntekijät	Muovinsaamaajat, liimankuivaajat, mikroaaltokuivaimet, suuritehoinen antenni yleisradiomastossa, tutkalähetin
Kuluttajat	Matkapuhelimet, mikroaaltouunit, langaton tiedonsiirto, etätunnistuslaitteet, kulunvalvontalaitteet
Sairaalat	MRI-kuvaukset, sähkökirurgiset laitteet, lyhytaaltohoito (UKW), hypertermiahoito

3 ELEKTROMAGNEETTINEN SÄTEILY

Sähkömagneettiset ilmiöt ovat varausten välisiä vuorovaikutuksia.

Staattinen sähkökenttä syntyy paikallaan olevista varauksista, magneettikenttä liikkuvista varauksista ja sähkömagneettinen säteily kiihtyvässä liikkeessä olevista varauksista. Periaatteessa kaikki varaukset vaikuttavat toisiinsa, mutta hyvin etäällä olevien varausten vaikutus toisiinsa on usein mitättömän pieni ja merkityksetön /1, s.33/.

Hyvin energeettinen sähkömagneettinen säteily ja hiukkassäteily ovat ionisoivaa säteilyä, jonka lähteitä ovat muun muassa radioaktiiviset aineet, röntgenlaitteet ja hiukkaskiihdyttimet. Näistä lähtevän fotonin tai hiukkasen energia on niin suuri, että vuorovaikutus materian kanssa synnyttää ioneja väliaineessa. Atomien ionisoituminen aiheuttaa kemiallisten sidosten katkoksia molekyyleissä kuten esimerkiksi DNA:ssa. Riittävän pienille taajuuksille tultaessa fotonin energia pienenee, ja kemiallisen sidoksen ionisoituminen ei enää ole mahdollista. Tästä alkaa ionisoimaton säteily, jolla fotonin energian suhteellisesta pienuudesta huolimatta on erilaisia vaikutuksia elävään kudokseen /2, s.16/.

Tämän työn osalta keskityttiin taajuuksiin välillä 9 kHz – 1 GHz, eli kyseessä oli ionisoimaton radiotaajuinen säteily.

3.1 Maxwellin yhtälöt

Maxwellin yhtälöt kuvaavat neljää sähkö- ja magnetismin perusominaisuutta. Ne voidaan esittää differentiaali muodossa seuraavasti:

Taulukko 5. Maxwellin yhtälöt.

Maxwellin yhtälö	Yhtälön derivaattamuoto	Kuvaus	#
Gaussin laki	$\text{div}(D) = \rho$	Kuinka sähkövaraus tuottaa sähkökentän	(1)
Gaussin laki magneettikentille	$\text{div}(B) = 0$	Kuinka magneettisia monopoleja ei ole olemassa	(2)
Faradayn induktiolaki	$\text{rot}(E) = -\frac{dB}{dt}$	Kuinka muuttuva magneettikenttä tuottaa sähkökentän	(3)
Amperen laki + Maxwellin lisäys	$\text{rot}(H) = J + \frac{dD}{dt}$	Kuinka sähkövirta ja muuttuva sähkökenttä tuottavat magneettikentän	(4)

3.2 Sähkökenttä

Sähkökenttä syntyy jännite-erojen välille ja sen voimakkuutta mitataan voltteina metriä kohti (V/m). Sähkökentän voimakkuus on sitä suurempi, mitä suurempi on jännite U /2, s.496/.

$$E = \frac{V_1 - V_2}{d}$$

$$E = \frac{U}{d} \quad (5)$$

Sekä sähkökentän että magneettikentän voimakkuus heikkenee nopeasti etäännyttäessä laitteen pinnalta kauemmas /2, s.496/.

3.3 Magneettikenttä

Liikkuvat varaukset esimerkiksi sähköjohdoissa luovat ympärilleen sähkökentän lisäksi magneettikentän. Magneettikentän vuoviivat ovat jatkuvia, ne kiertävät aina lähtöpisteeseensä takaisin. Magneettikenttiä esiintyy myös kestopagneettien ympärillä. Kestomagneetilla on kaksi napaa, ja samanmerkkiset navat hylkivät toisiaan, erimerkkiset vetävät toisiaan puoleensa. Toisin kuin sähkövarausten kohdalla magneettisia napoja ei voi erottaa toisistaan, vaan navat esiintyvät aina pareittain.

Magneettikenttää kuvaavia suureita ovat magneettikentän voimakkuus H ja magneettivuon tiheys B . Magneettikentän voimakkuus määräytyy vain lähteenä toimivista virroista, eikä siihen vaikuta väliaine. Mitä suurempi on virta, sitä voimakkaampi on kenttä. Tätä virran ja magneettikentän suoraan yhteyttä kutsutaan Ampèren laiksi ja sen avulla magneettikentän voimakkuus voidaan laskea, kun virta tunnetaan /2, s.35/.

Magneettikentän voimakkuuden H yksikkö on siten ampeeria metriä kohden (A/m).

Ei-magneettisilla materiaaleilla kuten biologisilla materiaaleilla magneettikentän voimakkuuden H ja magneettivuon tiheyden B välillä vallitsee suora yhteys

$$B = \mu_0 H \quad (6)$$

missä μ_0 on $4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m (Henryä per metri) on vapaan tilan magneettinen permeabiliteettisuus. Magneettivuon tiheys on mitattavissa ja sen yksikkö on tesla (T) /2, s.37/.

3.4 Sähköstaattinen induktio

Sähköisesti johtavat kohteet lähellä lähdettä vääristävät kenttää voimakkaasti. Kun sähköä johtava kappale viedään sähkökenttään, siinä olevat varaukset järjestäytyvät uudelleen kappaleen pinnalle. Ilmiötä kutsutaan sähköstaattiseksi induktioksi, joka perustuu Coulombin lain mukaiseen vuorovaikutukseen. Nämä pintavaraukset aiheuttavat edelleen sekundaarisen sähkökentän, joka summautuu alkuperäiseen lähdekenttään sekä kappaleen sisällä että sen läheisyydessä /2, s.33/.

Ulkoisen sähkökentän muuttuessa ajan funktiona myös sisäinen sähkökenttä muuttuu. Kentän muutos ilmenee kappaleen sisällä olevan varausjakauman muutoksena, jolloin kappaleen sisällä syntyy sähkövirtoja.

Sähkökentässä olevaan materiaaliin syntyvä virrantiheys J (A/m²) riippuu paitsi sähkökentän E voimakkuudesta myös väliaineen johtavuudesta σ siten, että

$$J = \sigma E \quad (7)$$

Johtavuuden σ yksikkö on (S/m) eli Siemensiä metriä kohti /2, s.34/.

Silloin, kun sähkökentän synnyttävät jännitteet muuttuvat tarpeeksi hitaasti (sähkökentän aallonpituus on merkittävästi suurempi kuin tarkasteltavan kohteen koko), sähkökenttä seuraa jännitteen vaihtelua. Tällöin puhutaan kvasistaattisesta sähkökentästä. Kvasistaattisessa tapauksessa voidaan käyttää sähköstatiikan yhtälöitä ja tämä yksinkertaistaminen helpottaa usein hyvinkin hankalien laskujen suorittamista. Tietyn kynnystaajuuden jälkeen kentän aaltoluonne tulee esiin ja sähkökenttää on tarkasteltava aaltona. Tällöin kenttää ei voida enää käsitellä kvasistaattisena ilmiönä, ja kenttien laskenta vaikeutuu merkittävästi.

Altistumisen kannalta kaikki alle 100 kHz sähkökentät ovat kvasistaattisia kenttiä, ja karkeissa altistumisarvoissa voidaan usein jopa 10 MHz kenttiä käsitellä kvasistaattisina kenttinä. Kvasistaattisten sähkökenttien laskennassa on kuitenkin mahdollisesti huomioitava magneettikenttä, joka voi aiheuttaa oman lisänsä indusoituneisiin virtoihin ja sähkökenttiin /2, s.34/.

3.5 Sähkömagneettinen induktio

Michael Faraday osoitti vuonna 1831, että magneettikentän muuttuminen indusoi sähkövirtoja metalliseen lankasilmukkaan. Tätä ilmiötä kutsutaan sähkömagneettiseksi induktioksi. Faradayn laki voidaan esittää muodossa

$$U = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (8)$$

jossa silmukan lävistävä magneettivuo Φ indusoi sähkömotorisen voiman (jännitteen) silmukkaan, ja laittaa sähkövaraukset kiertämään silmukkaa. Homogeenisessä kentässä magneettivuo $\Phi = BA$, jossa A on silmukan pinta-ala ja B sitä vastaan kohtisuora magneettikenttä. Mitä nopeammin magneettikenttä vaihtelee, sitä suuremman jännitteen se synnyttää. Toisaalta jännitteeseen liittyy aina sähkökenttä, joka kaavan (7) mukaan aiheuttaa sähkövirran johtavaan kappaleeseen. Magneettikenttä indusoi ensin sähkökentän ja johtavuudesta riippuen se synnyttää sähkövirran /2, s.38/.

Käytännössä Φ :n tilalle voidaan sijoittaa H , koska pinta-ala ja permeabiliteetti eivät muutu.

3.6 Sähkömagneettinen aalto

Muuttuva magneettikenttä synnyttää muuttuvan sähkökentän. Tämä pätee myös päinvastoin: mitä nopeammin sähkökenttä muuttuu, sitä voimakkaamman magneettikentän se synnyttää. Muuttuva sähkökenttä toimiikin sähkövirranomaisena magneettikentän lähteenä. Itse asiassa tällöin puhutaankin siirrosvirrasta, jollainen kulkee esimerkiksi kondensaattorilevyjen läpi, vaikka ne eivät ole galvaanisesti yhteydessä toisiinsa. Voidaan ajatella, että sähkö- ja magneettikentät generoivat toinen toisiaan ja tämä ilmiö etenee aaltoliikkeenä valon nopeudella.

Nopeasti muuttuvia sähkö- ja magneettikenttiä ei voida enää — toisin kuin kvasistaattisia kenttiä — tarkastella erillisinä ilmiöinä. Tämä on dynaaminen kenttäteorian lähtökohta.

Virtasilmukan lisäksi toinen yksinkertainen esimerkki radiotaajuisia sähkömagneettisia aaltoja säteilevästä antennista on aallonpituuteen nähden lyhyt dipoli. Se muodostuu kahdesta johtavasta sauvasta tai langasta, joiden väliin kytketään vaihtojännite. Lyhyt dipoli on tärkeä, koska sitä voidaan pitää alkeissäteilijänä (Hertzin dipoli), joita yhdistämällä saadaan monimutkaisempia antennirakenteita. Dipolin kentät voidaan laskea helposti, kun virta tunnetaan. Dipolin sauvojen välillä ei ole suoraa kytkentää, mutta antennin haarojen välisen kapasitiivisen kytkennän kautta syntyy suljettu virtapiiri, jossa varaukset värähtelevät jännitteen tahdissa. Varausten ja niiden liikkeen tuottama sähkö- ja magneettikenttä värähtelevät vastaavasti.

Kun etäisyys dipolista on riittävän suuri, alkaa kentistä muodostua säännöllinen sähkömagneettinen aalto. Sähkökentän suhde magneettikenttään on tällöin vakio, jota kutsutaan (vapaan tilan) aaltoimpedanssiksi

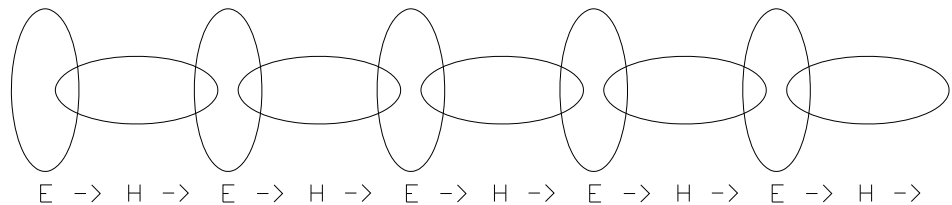
$$Z_0 = \frac{E}{H} = 376,7 \, \Omega \quad (9)$$

Aaltoimpedanssilla on vastuksen yksikkö ohmi (Ω). Vapaassa tilassa se saa arvon $376,7 \, \Omega$. Sähkömagneettinen aalto etenee vapaassa tilassa taajuudesta riippumatta aina valon nopeudella, joka ilmassa on $2,998 \cdot 10^8$ m/s. Aallonpituuden λ ja taajuuden f sitoo toisiinsa yhtälö

$$c = \lambda f \quad (10)$$

missä c on väliaineen taitekertoimesta riippuva valon nopeus.

Virtasilmukalla synnytetään värähtelevä magneettikenttä, joka synnyttää värähtelevän sähkökentän, joka edelleen synnyttää uuden värähtelevän magneettikentän. Lopputuloksena on itseään toistava sähkömagneettinen ilmiö — sähkömagneettinen aaltoliike.



Kuvio 1. Etenevä sähkömagneettinen aaltoliike.

Radiotaajuisten kenttien voimakkuus ilmoitetaan tehotiheytenä, jonka yksikkö on watti neliömetriä kohti (W/m^2). Radiotaajuisen lähteen, kuten matkapuhelimen, ollessa lähellä kehoa käytetään kuitenkin SAR-arvoa (Specific Absorption Rate), jonka yksikkö on $(\text{W}/\text{kg}) / 2$, s.496/.

4 LUONNOLLINEN TAUSTASÄTEILY

4.1 Geomagneettinen kenttä ja muut luonnon magneettikentät

Kaikkialla maapallolla vaikuttaa staattinen tai hyvin hitaasti muuttuva magneettikenttä. Geomagneettisen kentän suurimmat arvot ($60 \mu\text{T}$) esiintyvät magneettisilla navoilla, joissa kenttä kaareutuu kohtisuoraan maanpintaa vasten. Päiväntasaajalla kenttä on pienimmillään ($25 \mu\text{T}$) ja on maanpinnan suuntainen. Suomessa staattinen kokonaiskenttä on välillä $51,0 - 53,5 \mu\text{T}$ ja se on noin tuhannesosa väestöä koskevasta enimmäisarvosta 40 mT .

Maapallon aiheuttamaan kenttään summautuu pieni, mutta hyvin nopeasti muuttuva magneettinen häiriökenttä, joka on peräisin ionosfäärissä ja magnetosfäärissä $100 - 25\,000 \text{ km}$ korkeudella kulkevista sähkövirroista. Ne aiheutuvat auringon hiukkassäteilystä (aurinkotuuli) ja hyvin lyhytaaltoisesta ilmakehää ionisoivasta säteilystä /2, s.363/.

Lisäksi maan magneettikentässä on pientaajuisia vaihteluja, jotka ovat taajuudeltaan verrattavissa ihmisen aiheuttamiin 50 hertsin kenttiin. – Tyypillinen ihmisen aiheuttama pientaajuinen 50 Hz taustamagneettikenttä, esimerkiksi kodin laitteiden synnyttämä taustakenttä, on noin $0,1 \mu\text{T}$. /2, s.364/.

Ukkospilven läheisyydessä maan pinnalla on $1 - 10 \text{ kV/m}$ suuruinen sähkökentän voimakkuus. Salamaniskun aikana pilven varauksen purkautumisesta syntyvä sähkövirta generoi nopeasti muuttuvan magneettikentän. Lisäksi varauksen purkautuminen ja magneettikentän muutos aiheuttavat muutoksen sähkökenttään. Tämä emittoi RF-häiriöitä tyypillisesti $50 - 100 \text{ MHz:n}$ kaistanleveydellä /1, s.33/.

Kosminen säteily: Aurinko aiheuttaa muutoksia yläilmakehän heijastusominaisuuksissa 2 – 30 MHz:n kaistalla sekä häiritsee satelliittien kommunikointia 150 – 500 MHz:n taajuuksilla. Muut kosmiset lähteet aiheuttavat taustakohinaa lähinnä 100 – 1000 MHz:n kaistalla /1, s.33/.

4.2 Staattinen sähkökenttä

Maan pinnan ja johtavan ionosfäärin välissä on staattinen sähkökenttä, joka on voimakkuudeltaan 100 – 130 V/m ja suuntautuu kohtisuoraan maan pintaa vastaan. – Ukkospilven alla staattinen kenttä voi kuitenkin olla yli 10 kV/m. /2, s.364/.

4.3 Maan ja avaruuden mikrosäteily

Avaruudesta pääsee maanpinnalle vapaasti vain noin 10 MHz – 30 GHz taajuuksista säteilyä. Seisovaan ihmiseen kohdistuvan säteilyn tehotiheys alueella 30 MHz – 300 GHz on noin $1,5 \text{ mW/m}^2$. Valtaosa tästä säteilystä tulee maasta; taivaan ja auringon taustasäteily on vain alle kymmenen mikrowattia neliometriä kohden. Vertailun vuoksi mainittakoon, että vierellä seisovasta ihmisestä lähtevän laajakaistaisen mikroaaltosäteilyn tehotiheys on sekin noin 3 mW/m^2 . Nämä säteilytasot ovat hieman vähemmän kuin tuhannesosa väestöä koskevasta tehotiheysrajasta 10 W/m^2 taajuuksilla 10 – 300 GHz /2, s.367/.

5 SUOMESSA KÄYTETTÄVÄT EMC-DIREKTIIVIT JA ASETUKSET

EMC-direktiivejä ja lakeja löytyy useilta eri tahoilta. Suomessa on kansallinen lainsäädäntö, Euroopassa EU määrää omat direktiivinsä ja kansainvälisiäkin asetuksia löytyy.

Eurooppalaisia EMC-direktiivejä ovat muun muassa Euroopan parlamentin EMC-direktiivi (2004/108/EC) /5 sekä direktiivi radio- ja telepäätelaitteille (1999/5/EC) /6.

Suomen kansallisesta EMC-lainsäädännöstä mainittakoon Suomen sähkö-, radio- ja telealan lainsäädäntö: sähköturvallisuuslaki 410/1996) /7 sekä laki radiotaajuuksista ja telelaitteista (1015/2001) /8.

IEC toimii kansainvälisellä tasolla. IEC:n viralliset EMC-termien määritelmät löytyvät internetistä /9.

5.1 EMC-komiteat eri standardointijärjestöissä

EMC-alalla on maailmanlaajuisesti useita eri standardointijärjestöjä ja muita päättäviä elimiä.

Taulukko 6. Standardointijärjestöt.

	Sähkötekniikka	Teleala	Muut
Koko maailma	IEC, IEEE-SA	ITU, IEEE-SA	ISO
Eurooppa	CENELEC	ETSI	CEN
Suomi	SESKO	Viestintävirasto	SFS

Yhtenä suurimmista syistä usean eri organisaation olemassa ololle on, että maailmanlaajuisesti ei ole päästy yksimielisyyteen sähkö- magneettisen säteilyn hyväksyttävästä määrästä. Venäjä ei ole suostunut

yhtä alhaisiin säteilymääriin Euroopan ja Amerikan kanssa. Siellä on myös tutkittu paljon EMC:n vaikutuksia ja Venäjän ionisoimattoman säteilyn komitea (RNCNIRP) onkin ottanut esille lännen linjasta eroavia näkökantoja:

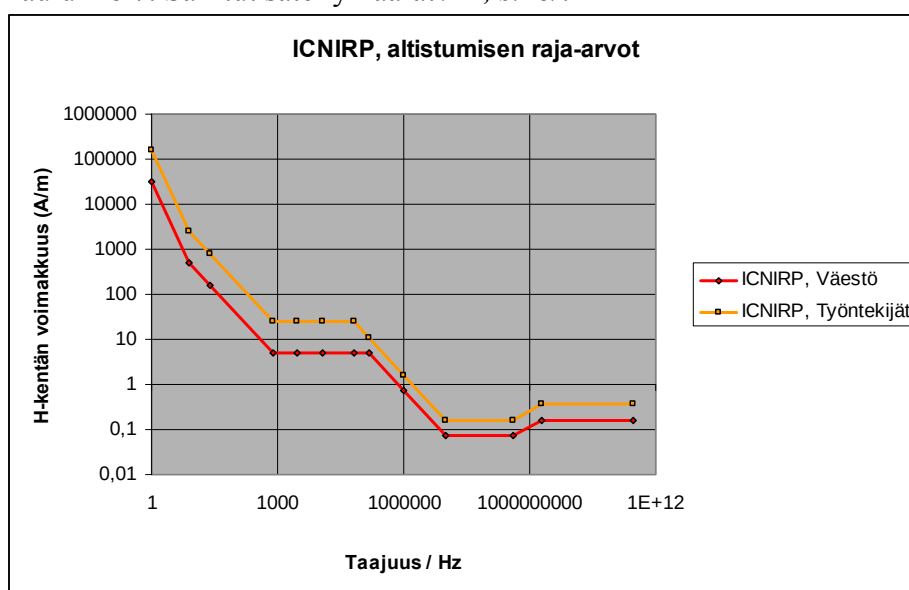
- Alle 16-vuotiaiden lasten ei ole suotavaa käyttää lainkaan matkapuhelinta.
- Raskaana olevien naisten ei pitäisi käyttää matkapuhelinta.
- Henkilöiden, jotka kärsivät neurologisista sairauksista, muistihäiriöistä tai esim. epilepsiasta, ei pitäisi käyttää matkapuhelinta lainkaan.
- Matkapuhelimella soitettujen puheluiden keston tulisi olla enimmillään kolme minuuttia ja puheluiden välillä pitäisi olla 15 minuutin tauko. Handsfree -laitteiden käyttö on suositeltavaa.

Mikroaaltosäteilyn turvanormit ovat Venäjällä noin 10 kertaa tiukemmat kuin meillä lännessä käytössä olevat ICNIRPin vastaavat. Kiinteiden tukiasemien raja-arvo on 100 kertaa pienempi kuin ICNIRPin /3, s. 37–38). Myös Italiassa Bitontin kaupungissa antennien kenttävoimakkuudet ovat alle 6 V/m, kun vastaava luku Suomessa 1.8 GHz:n taajuudella on 58 V/m. Tehosuhte on tällöin noin 1:100 /3, s. 71–72/.

5.2 Sallitut säteilymäärät

ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) on säätänyt väestöä ja työntekijöitä koskevat ei-ionisoivan säteilyn raja-arvot alle 300 GHz taajuuksilla, mitkä näkyvät alla olevasta taulukosta.

Taulukko 7. Sallitut säteilymäärät /II, s.18/.



6 KÄYTETYT MITTALAITTEET

Spektrianalysaattorina käytettiin HP E7402A EMC-analyzer:iä, jonka taajuusalue oli 9kHz – 3.0 GHz ja tuloimpedanssina 50Ω.

Lähikentän mittapäänä käytettiin HP11941A:tä (close field probe, antenni 1), jonka toiminta-alueena oli 9 kHz – 30 MHz. Desibeliset Antenna Factor -arvot on esitetty alla olevassa taulukossa. Mittaustuloksia saatiin kuitenkin aina 1 GHz:iin saakka, vaikka taajuusalue päättyy 30 MHz:iin. 30 MHz – 1 GHz alueelle AF:ksi arvioitiin 18.

Taulukko 8. Antenna Factor-arvot antennille 1.

Taajuus alue	AF
9 kHz – 100 kHz	89
100 kHz – 1 MHz	68
1 MHz – 10 MHz	49
10 MHz – 30 MHz	36
30MHz – 1GHz	18 (arvio)

Seuraavassa taulukossa on esitetty mittauksien resoluutio- ja videokaistan leveydet. Tulostinta lukuun ottamatta PC mitattiin muista mittauksista poikkeavilla kaistan leveyksillä.

Taulukko 9. Resoluutio- ja videokaistan leveydet.

Taajuus alue	Res BW	VBW
9 kHz – 150 kHz	200 Hz	300 Hz
150 kHz – 30 MHz	9 kHz	30 kHz
30 MHz – 300 MHz (PC)	9 kHz	30 kHz
30 MHz – 300 MHz	120 kHz	300 kHz
200 MHz – 1 GHz	120 kHz	300 kHz
1 GHz – 3 GHz	120 kHz	300 kHz

Tilan taustasäteilyn määrittämiseen käytettiin logaritmisperiodista antennia LOG 1220 / 3U Can 5-69 (antenni 2), mikä on 75Ω VHF/UHF TV-antenni.

6.1 EMC-antenni vertailu

Alla olevassa taulukossa on pienimuotoinen EMC-antennien vertailu.

Taulukko 10. Antennivertailu.

Tuote	Antennin tyyppi	Taajuusalue	AF
TDK LPDA-0801	Log. per. dipoli	80 MHz – 1 GHz	4...24
TDK LPDA-0801	Log. per. dipoli	80 MHz – 3 GHz	5...36
TDK VLA-8001	V-Log. per. array	80 MHz – 1 GHz	4...23
Frankonia BTA-H	Ultra-broadband	30 MHz – 2 GHz	7...31
Frankonia BTA-L	Ultra-broadband	26 MHz – 2 GHz	6...31
Frankonia BTA-M	Ultra-broadband	30 MHz – 3 GHz	7...36
R&S HL 562	Ultralog	30 MHz – 3 GHz	4...32
R&S HL 046E	High gain log. per.	80 MHz – 3 GHz	

Kaikkien edellä mainittujen EMC-antennien impedanssi on 50Ω. TDK LPDA-0801:lla, LPDA-0803:lla ja VLA-8001 saadaan lineaarinen Antenna Factor noin 2 dB tarkkuudella. Frankonia BTA-H on pienikokoinen, samoin Rohde&Schwarz HL 046E, jota käytetään immunitaettimittauksiin. HL 562:n jalusta myydään erikseen.

Käyttötarkoitus vaikuttaa huomattavasti antennin valintaan. Tietoliikennelaboratorioon tulevan EMC-antennin maksimi taajuus ei varmastikaan kannata olla alle 3 GHz. Mikäli pääpaino on emissiomittauksilla, Rohde&Schwarz HL 046E ei ole paras vaihtoehto. Näistä vaihtoehtoista jäisi alustavan karsinnan jälkeen jäljelle TDK LPDA-0801, Frankonia BTA-M ja R&S HL 562. Hinta on tietysti myös olennainen tekijä antennin valinnassa.

6.2 Mittaustilanteessa huomioitavia asioita

Sähkö- ja magneettikentän täydellinen määrittäminen mittaamalla on vaikea tehtävä. Se edellyttäisi sekä sähkö- että magneettikentän osalta amplitudien ja vaiheiden samanaikaista mittausta kolmessa ortogonaalisessa suunnassa eli jokaisella taajuudella olisi määritettävä 12 mittaussarvoa. Siksi on välttämätöntä rajata mittaustietoa ja käyttää sopivaa mittalaitetta ja -menetelmää. /2, s.456 – 457/

Mittarin vaste voi olla joissakin mittaustilanteissa virheellinen. Radiotaajuinen sähkö- tai magneettikenttä voi kytkeytyä anturin yhteydessä oleviin resistiivisiin johtoihin. Tämä on hyvin todennäköistä alle 1 MHz:n taajuuksilla, jolloin dipolin impedanssi on suunnilleen yhtä suuri kuin siirtojohtojen resistiivisyys. Kentästä siirtojohtoon indusoituva RF-virta kulkee RF-ilmaisimelle lisäten mittarin lukemaa. Tämä ilmiö on mahdollinen myös kaukana säteilylähteestä. Ratkaisuna tähän voitaisiin käyttää triaksiaalista koaksiaalikaapelia tai kaapelia, millä on hyvä suojausvaimennus.

Sähköstaattinen kenttä voi – kytkeytyä suoraan sähkökentän mittapäähän. – Nämä kytkeytymiset voidaan todeta mittariosan ja yhdysjohtojen liikuttamisesta johtuvana lukeman muutoksena, vaikka mittapää pysyykin paikallaan /2, s.475/.

Mittausetäisyyden tulisi olla vähintään 20 cm. Staattisen sähkövarauksen, esimerkiksi mittajan vaatetuksen, aiheuttama staattinen kenttä voi vaikuttaa mittarin lukemaan. Mitattava sähkömagneettinen kenttä voi kytkeytyä myös mittariosaan puutteellisen RF-suojauksen vuoksi. Häiriön osoittaa mittarin nolasta poikkeava lukema ilman mittariosaan kytkettyä mittapäätä tai yhdysjohtoa /2, s.476/.

Jos laitteessa voi olla useampia asetuksia, sen EMC-mittaukset tulee tehdä laitteen aiheuttaessa maksimi häiriötason /5, 17/.

6.3 Virhemarginaali

Sähkökentän voimakkuuksien mittauksien epävarmuudeksi arvioitiin ± 5 dB. Lähikentän mittausten epävarmuudeksi arvioitiin ± 3 dB. Mittarin kalibroinnista johtui korostettu epävarmuus ± 5 dB.

VHF/UHF-antennilla tehtyihin mittauksiin */liite 2, Muiden lähteiden EMC-häiriöpiikit (antenni 2)* ja *Muiden lähteiden laajakaistaiset EMC-häiriöt (antenni 2)/* saatiin virhemarginaaliksi ± 10 dB ja lähipään mittapäillä tehtyihin mittauksiin *(/liite 2, Muiden lähteiden EMC-häiriöpiikit/*, PC:n häiriöt */liite 3* sekä tietoliikenne-*räkin häiriöt /liite 4)* saatiin virhemarginaaliksi ± 8 dB.

Virhemarginaali on tarkoituksella suuri. Todellinen taustakohinan taso ei selvinnyt käytetyllä analysaattorilla sen suuresta sisäisestä kohinatasosta johtuen.

7 EMC-MITTAUKSET

7.1 Tietokoneverkkolaboratorion (A3-17) kuvaus

Laboratoriotila oli noin 140 m² kokoinen ja siellä oli kuusi tietoliikennekehikkoa (-räkkiä), 30 PC:tä opiskelijoille, opettajan pöytä tietokoneineen ja videotykki. Ilmanvaihto oli toteutettu kolmella järeällä Rhoss'in ilmastointilaitteilla ja valaistus loisteputkilla. Tilan laidalla oli EMC-eristetty GSM-mittauskoppi. Sähköverkko on tyypiltään TN-SC, eli maadoitus on hoidettu EMC:n näkökulmasta oikein.

PC:t ja räkit oli jaettu kuuteen ryhmään, joissa jokaisessa oli viisi PC:tä ja yksi räkki. Jokaisen työpisteen sähkö- ja tietoliikenneliitännät oli toteutettu johtokourun avulla. Räkit eivät sisältäneet samoja laitteita. Mittauksiin valittiin yksi PC ja yksi räkki.

7.2 Mittausten kuvaus

Laboratoriotilan yleinen sähkökentän taso mitattiin antennilla 2 */liite 2, Muiden lähteiden EMC-häiriöpiikit (antenni 2) ja Muiden lähteiden laajakaistaiset EMC-häiriöt (antenni 2)/*. Antenni suunnattiin sellaiseen suuntaan, mistä saatiin alustavien mittausten perusteella suurimmat kentän voimakkuudet. Tulokset saatiin dB μ V-yksikössä, eikä antennin Antenna Factor ollut tiedossa. Antennin impedanssi oli 75 Ω mittalaitteen sisään meno impedanssin ollessa 50 Ω . Tästä seurasi epäsovitusta, mutta sen suuruus on otettu huomioon virhemarginaalissa. Mittaustulokset eivät ole suoraan verrannollisia antennilla 1 mitattuihin arvoihin nähden. Laboratoriotilasta löydettiin yksittäisiä häiriöpiikkejä antennilla 1 */liite 2, Muiden lähteiden EMC-häiriöpiikit/*.

Muissa mittauksissa magneettikentän voimakkuus mitattiin antennilla 1 ja tulokset saatiin myös dB μ V-yksikössä. Ne muutettiin A/m-muotoon

kaavalla (12). Tulokset on esitetty logaritmisella asteikolla sekä taajuuden että voimakkuuden suhteen.

PC mitattiin kansi avattuna antennilla 1 /liite 3. Samoin myös tietoliikenneväkki /liite 4. Kaikki tilasta mitatut häiriöpiikit /liite5, *Kaikkien EMC-häiriöpiikkien summa/* ja laajakaistaiset häiriöt /liite5, *Kaikkien laajakaistaisten EMC-häiriöiden summa/* kerättiin omiin taulukoihinsa ja yhdistettiin yhdeksi taulukoksi /liite 5, *Kaikkien EMC-häiriöiden summa/*. Se yhdistettiin saman taulukkoon ICNIRP:n säteilymäärien raja-arvojen /taulukko 7/ ja maapallon luonnollisen kentän arvojen kanssa, jolloin saatiin laboratorion säteilymäärän yhteenveto /liite 5, *Säteilymäärien yhteenveto/*.

7.3 Taustakohinan taso

Mittavälineen taustakohina mitattiin ilman antennia. Yleinen kohinataso ei noussut millään taajuusalueella kun antenni liitettiin kiinni, eli todellinen taustakohinan taso ei selvinnyt käytetyllä analyysointilaitteella. Taustakohinan taso on esitetty oheisessa kaaviossa /liite 1.

Teho laski yleisesti 9 kHz ja 70 kHz välillä noin 25 dB sekä 150 kHz ja 10 MHz välillä noin 10 dB. Spektrin alkupään voimakas, mutta vaimeneva kohinataso johtuu 1/f-kohinasta ja suuren osan analyysointilaitteen yleistä kohinan voimakkuudesta selittää analyysointilaitteen itsensä tuottamat voimakkaat sähkömagneettiset kentät. Uusilla mittalaitteilla yleinen kohinan taso on varmasti merkittävästi pienempi. Mikäli analyysointilaitteesta saataisiin siirrettyä kaikki piirilevyllä toteutetut toiminnot prosessorin sisäisiksi toiminnoiksi ja samalla kaikki kelat ja kondensaattorit jäisivät pois, laitteen sähkömagneettinen säteily pienenisikin murto-osaan nykyisestä ja tarkkuus paranisi samassa suhteessa.

7.4 Laboratoriotilan taustasäteily

Alla olevassa taulukossa on esitetty laboratoriotilan sähkökentän taustasäteily antennilla 2 mitattuna.

Taulukko 11. Taustasäteilyn häiriöt

Taajuusalue		Taajuus	Huomiot
9 kHz -	150 kHz		Ei havaittuja häiriöitä logaritmisella antennilla eikä lähikentän mittapäällä
150 kHz -	30 MHz	10 MHz 20 MHz 25,15 MHz 27MHz...	GSM-kopin kaapeli eli GPS-signaali GPS-signaalin 10 MHz:n kerrannainen Laajakaistainen häiriö 27-35 MHz
30 MHz -	300 MHz	32,0 MHz 34,7 MHz ...35 MHz 59,7 MHz 75,2 MHz 88,1 MHz 93,5 MHz 104,9 MHz 175,8 MHz 189,3 MHz 226,4 MHz 244,0 MHz 256,8 MHz 293,3 MHz	Häiriöpiikki Häiriöpiikki Laajakaistainen häiriö 27-35 MHz Ajoittainen tai tilan sisältä tuleva häiriö Radiokanava (YLE Radio Peili 88,3 MHz) Radiokanava (YLEX 93,7 MHz) Radiokanava (Radio Nova 104,7 MHz) Ajoittainen tai tilan sisältä tuleva häiriö
200 MHz -	1 GHz	276,6 MHz 398,6 MHz 464,6 MHz 492,6 MHz 574,6 MHz 586,6 MHz 640,6 MHz 952,6 MHz	Ajoittainen häiriö, TETRA Ajoittainen häiriö, ehkä TETRA GSM-900
1 GHz -	3 GHz	1825 MHz 1946 MHz 2400 MHz	GSM-1800 GSM-1800 (oma) WLAN

Logaritminen antenni oli suunnattu laboratoriotilassa sellaiseen suuntaan, mistä saatiin alustavien mittausten perusteella suurimmat kentänvoimakkuudet. Kartan mukaan suunta oli itään. Vaikka räkki oli metrin päässä antennista, mikään räkin lähikentistä ei näkynyt logaritmisella antennilla, kuten eivät myöskään PC:n tai valaistuksen aiheuttamat kentät. Sekä räkin ovi, että PC:n kotelo mitattiin avattuna ja suljettuna, mutta kenttiä ei silti havaittu.

Taustasäteily mitattiin ilman kaistanpäästösudointa (10 kHz – 18 GHz). Logaritminen antenni ei näytä matalia taajuuksia ja taustakentän mittauspisteessä ei ollut lähikenttiä, joten käytetyillä antenneilla ei havaittu häiriöitä 8 kHz – 150 kHz taajuusalueella.

Mittaajan ei havaittu vaikuttavan mittaustulokseen. Mittajohdon asennon ei havaittu vaikuttavan olennaisesti kenttien voimakkuuteen. Lähikentän mittapäällä mitattaessa mittapää oli usein kiinni mitattavassa kappaleessa, vaikka standardin mukaan mittaukset tulisi suorittaa 20 cm etäisyydeltä. Mittalaitteesta johtuva suuri taustakohinan taso johtaisi signaalin kadottamiseen 20 cm etäisyydeltä mitattaessa suuressa osassa mittauksista, joten läheltä mittaaminen katsottiin pienemmäksi pahaksi. Oma GSM mitattiin pitämällä puhelinta logaritmisen antennin edessä ja soittamalla omaan numeroon.

7.5 Elektromagneettiset häiriölähteet

7.5.1 Tietoliikennekehikko

Räkki R1 (Rittal) sisälsi kolme Cisco Catalyst 2960 -kytkintä, kolme Cisco 2800 -reititintä ja UPS-laitteen Rittal Rimatrix5 (Rittal Power Modular Concept PMC12). Tuuletin, stand-by-tilassa ollut HP:n reititin, kytkentäpaneeli ja sähkön syöttöpaneeli eivät aiheuttaneet mittalaitteella havaittuja kenttiä. Seuraavassa taulukossa on esitelty räkin häiriöitä aiheuttavat laitteet taajuus alueittain.

Taulukko 12. Räkin aiheuttamat häiriöt.

Taajuus alue	Häiriön lähde
9 kHz – 150 kHz	Kytkin, UPS, reititin
150 kHz – 30 MHz	Kytkin, UPS
30 MHz – 300 MHz	Kytkin
200 MHz – 1GHz	(GSM-900)
1GHz – 3 GHz	<ei tuloksia>

UPS aiheutti kaksi häiriöpiikkiä: 60,1 kHz ja 63,9 kHz sekä 5,6 MHz ja 10,6 MHz välisen häiriöalueen, jonka voimakkuus oli huipussaan 17dB μ V 8 MHz kohdalla.

Kytkin aiheutti laajakaistaisen häiriön mittauksen 9 kHz alarajataajuudesta aina 50 MHz saakka. Se koostui noin 560 kHz välein esiintyvistä häiriöpiikeistä, joiden kaistanleveys oli 25 kHz ja voimakkuus jopa 28 dB μ V.

Reititin kuormitettiin 30 samanaikaisella jatkuvalla ping-komentojen sarjalla. Se aiheutti yhden häiriöpiikin 120 kHz kohdalle 0,3 kHz kaistalla voimakkuuden ollessa noin 8 dB μ V. Ehkä yllättävin mittaustulos oli räkin sisältä mitattu 900 MHz häiriö, mikä oli luonnollisestikin GSM-900-verkko. Yllättävän tuloksesta teki se, että räkin runko voimisti taajuutta vaimentamisen sijaan sitä enemmän, mitä lähempää räkin metalliosia mitattiin.

7.5.2 Tietokoneet

Mitattu tietokone (TA31611) oli HP Compaq dc5800 microtower, eli Intel Core 2 Quad CPU Q9300@2.50 GHz. Muisti oli 8192Mb DDR2 / 800MHz Dual Channel. Kovalevynä oli SATA-liitännäinen Seagate 250 Gb. Prosessorin kellotaajuus oli 2500 MHz ja väylän nopeus 1333 MHz. Muistin nopeus oli 800 MHz.

Tulostin (Lexmark Optra E310) aiheutti tulostettaessa 28,7 kHz ja 150 kHz piikit. Stand-by-tilassa oli lisäksi 70,3 kHz ja 100 kHz piikit.

Näyttö (Samsung SyncMaster 225BW) aiheutti 66,1 kHz ja 131,3 kHz häiriöpiikit. Vastaavat voimakkuudet olivat 7,2 ja 7,3 dB μ V.

Taulukko 13. PC:n häiriöt 9 kHz – 150 kHz:n alueella.

Taajuus / kHz	Kovalevy	Muisti	Prosesori	Siili	Muistin ohjain	Näytön ohjain	Virtalähde	Tuuletin
11,5	X	X	X					
27,0	X	X	X					
43,2	X	X	X	X			X	
53,1	X	X	X	X			X	
71,0							X	
79,5	X						X	
85,1	X	X	X				X	
95,7	X	X	X				X	
103,5	X	X	X		X	X	X	X
104,2			X					
105,9	X		X					
125,0	X		X				X	
127,8	X	X	X		X		X	
130,6	X	X	X				X	

Häiriöt taajuuksilla 95,7 kHz ja 105,9 kHz näkyivät vain komennon “dir /s C:\Windows” ollessa käynnissä. Tällöin PC luki tietoja kovalevyltä.

Taajuusalueella 150 kHz – 30 MHz löytyi muistin ohjainpiiristä laajakaistainen häiriö: alle 4 MHz taajuuksilla 350 kHz välein esiintyvä piikki, minkä voimakkuus (40 dB μ V) oli jopa 35 dB yli kohinatason. Lisäksi oli 24 MHz piikki. GPS-järjestelmän referenssitaajuuden 10 MHz piikki näkyi jokaisessa mittauksessa sillä taajuusalueella.

VHF-alueella (30 – 300 MHz) mitattiin muistin ohjainpiiristä 48.2 ja 62.4 MHz häiriöpiikit. Muistipiireistä löytyi laajakaistainen häiriö 9 kHz – 53 MHz:n taajuuksilla, missä häiriöpiikkejä esiintyy 350 kHz välein. Voimakkuudet olivat jopa 32 dB μ V eli 30 dB yli kohinatason. Virtalähteestä tuli myös laajakaistainen häiriökenttä 9 kHz – 67.6 MHz taajuuksilla 105 kHz välein. Amplitudi oli jopa 42 dB μ V eli 36 dB kohinan yläpuolella.

Taulukko 14. PC:n häiriöt UHF-alueella.

Taajuus / MHz	Kova-levy	Muisti	Proses-sori	Siili	Muistin ohjain	Näytön ohjain	Virta-lähde	Tuu-letin
500		X	X	X	X			X
734		X	X			X		X
816		X		X	X	X		
882		X		X	X	X		
940	X	X	X	X	X	X	X	X

UHF-taajuuksilla (300 MHz – 1 GHz) löytyi yllä olevan taulukon mukaisia häiriöpiikkejä. 500 MHz häiriökenttä oli selvästi muita kenttiä laajakaistaisempi (häiriön kaistanleveys oli 80 MHz). 940 MHz häiriö on GSM-900-verkko.

7.5.3 Valaistus

Loisteputkivalaistus aiheutti kaksi lähikenttää: 49,7 kHz (4,6 kHz kaistalla) ja 148,5 kHz (11 kHz kaistalla). Nämä vaimenivat nopeasti etäisyyden kasvaessa, mutta olivat lähikentässä voimakkuudeltaan jopa 37 dB μ V.

7.5.4 Sähköverkko

Sähköverkko aiheuttaa 50 Hz häiriötä, mutta tätä ei voitu mitata, koska antennin toiminta-alueen pienin taajuus on 9 kHz.

7.5.5 Videotykki

Videotykkinä oli Toshiba TDP-T90 ja siitä aiheutui 91.1 kHz, 97.1 kHz ja 127.4 kHz häiriöt. Nämä mitattiin RGB-kaapelista, koska itse laitteesta ei kenttiä havaittu – ei edes heijastetusta valokeilasta 9 kHz ja 1 GHz väliseltä alueelta. Häiriöpiikkien voimakkuudet olivat 21 dB μ V, 6 dB μ V ja 16 dB μ V.

7.5.6 Muut kentät

GSM-mittaustilan kyljessä oleva suodin toimi antennina ja muodosti muihin säteilyn lähteisiin verrattuna voimakkaan 10 MHz kentän. Sen voimakkuus oli 37dB μ V kaistanleveyden ollessa 40 kHz. Kyseessä oli GPS-järjestelmän referenssisignaali, mikä johdettiin koaksiaalikaapelia pitkin suotimen läpi Faradayn häkkiin, eli GSM-mittaustilaan.

Täydellä teholla käyvästä ilmastointilaitteesta (Rhoss) ei saatu mitattua muita häiriöitä kuin 10 MHz piikki, mikä oli voimakkuudeltaan 20 dB μ V. Laitteen sisäiset metalliset osat toimivat antennina voimistaen GPS-järjestelmän suotimen säteilemää 10 MHz häiriötä. Laite aiheuttaa todennäköisesti voimakkaan staattisen sähkökentän alle 9 kHz taajuudella, mikä ei ole mittavälineiden toiminta-alueella. Tämän voi havaita sähköisenä tuntemuksena hiuksissa.

7.5.7 Hyötysignaalit

Osa mitatuista häiriöistä on tarkoituksella tuotettuja hyötysignaaleja.

Spektristä löytyi kolme radiokanavaa: YLE Radio Peili (88.3 MHz), YLEX (93.7 MHz) ja Radio Nova (104.7 MHz).

TETRA, johon kuuluu myös viranomaisverkko VIRVE, käyttää taajuusalueita 380 – 430 MHz /12, s.35/.

GSM-900-verkko käyttää alueita 890 – 915 (lähetys) ja 935 – 960 MHz (vastaanotto) kun taas GSM-1800 toimii alueilla 1710 – 1785 ja 1805 – 1880 MHz /12, s.35/.

UMTS käyttää taajuusaluetta 1900 – 2200 MHz. /12, s.34/.

WLAN käyttää taajuutta 2.4 GHz. Taajuus oli ajoittain havaittavissa.

Satelliittipaikannusjärjestelmä GPS lähettää satelliiteista seuraavia taajuuksia: 1.57542 GHz (L1 signaali), 1.2276 GHz (L2), 1.38105 GHz (L3), 1.379913 GHz (L4) sekä 1.17645 GHz (L5). Näitä ei havaittu mittauksissa.

7.6 Yhteenveto häiriöiden spektristä

PC emitti runsaasti yksittäisiä häiriöpiikkejä VLF- ja LF-alueilla. UHF-alueella oli myös muutamia yksittäisiä piikkejä, joista 500 MHz piikki oli yksittäisistä piikeistä laajakaistaisin ($BW = 80 \text{ MHz}$). PC emitti myös voimakkaimman ja laajakaistaisimman laajakaistaisen häiriön. Alle 4 MHz laajakaistaisen häiriön amplitudi oli jopa $40 \text{ dB}\mu\text{V}$, alle 53 MHz häiriö $32 \text{ dB}\mu\text{V}$ ja alle 67.6 MHz häiriö $42 \text{ dB}\mu\text{V}$ /liite 3. Laajakaistaisia häiriöitä oli ainakin alueilla VLF, LF, MF, HF ja VHF.

Tietoliikennekehikko aiheutti muutaman häiriöpiikin LF-alueelle ja yhden laajakaistaisen 8.1 MHz häiriöpiikin HF-alueelle ($BW = 5 \text{ MHz}$). Voimakkuus tosin oli suurimmillaan vain $17 \text{ dB}\mu\text{V}$. Suurin häiriö aiheutui UPS-järjestelmästä. Laajakaistainen häiriö oli alle 50 MHz taajuuksilla ja sen amplitudi vaihteli verhoikäyrän mukaisesti maksimin ollessa $28 \text{ dB}\mu\text{V}$ /liite 4. Laajakaistaisia häiriöitä oli ainakin alueilla VLF, LF, MF, HF ja VHF.

Tilan voimakkaimmat yksittäiset häiriöpiikit aiheutuivat valaistuksesta ja GSM-kopin johdosta mitatusta GPS-järjestelmän referenssitaaajuudesta. Tilasta löytyi myös laajakaistainen häiriö keskitaajuuudella 29.5 MHz häiriön kaistanleveyden ollessa 6 MHz /liite 2.

Tilan kaikkien EMC-häiriöiden summa /liite 5 sisältää laboratoriotilan taustakenttien, PC:n, rakin ja muiden lähteiden häiriökenttien summan.

8 MITTAUSTEN TEOREETTINEN TARKASTELU

8.1 Mittaustulosten käsittely

VHF/UHF-antennin tehollinen aallonpituus ei ollut tiedossa. Yksinkertaisen sauva-antennin tapauksessa tehollista aallonpituutta h vastaisi aallonpituuden neljännes $\lambda / 4$. Antennin rakenteesta johtuen sen määrittäminen olisi monimutkaisempaa ja arvo muuttuisi taajuuden funktiona. Antennista saataisiin mitattua jännite U maapotentiaaliin nähden ja jos h tiedettäisiin, voitaisiin laskea sähkökentän voimakkuus E kaavalla (11). Tässä työssä käytettiin tämän antennin osalta dB μ V-arvoja.

$$U = E \cdot h$$

$$E = U / h \quad (11)$$

Lähikentän mittapää oli kytketty mittalaitteen 50Ω :n sisääntuloon. Jännitteen U mittaustulokset saatiin dB μ V-muodossa. Mittapään jokaiselle eri taajuusalueelle oli ilmoitettu Antenna Factor AF . Kaavan (12) avulla saatiin laskettua magneettikentän voimakkuus H .

$$AF = 20 \lg (H/U)$$

$$H = U \cdot 10^{(AF/20)} \quad (12)$$

Magneettikentän voimakkuus B on muutettavissa sähkökentän voimakkuudeksi E kaavalla (9).

8.2 Mittaustulosten tulkinta

Räkin tuuletin toimii todennäköisesti kommutaattorihjatulla tasasähkömoottorilla, joten sen aiheuttama häiriö oli matalataajuisempaa kuin mittalaitteiden taajuuden alaraja. Suurillakin kierrosnopeuksilla toimivat vaihtosähkömoottorit aiheuttavat melko matalataajuisia kenttiä, mitä tuskin havaittaisiin käytetyllä taajuusalueella. Taajuus on tällöin sama kuin pyörimisnopeus kierroksina sekunnissa.

Kytkin on merkittävä laajakaistaisen häiriön lähde. Häiriö aiheutunee kytkimen hakkurivirtalähteestä.

Räkin metalliosat toimivat antennina, vaikka runko oli erikseen maadoitettu omalla maadoitusjohtimellaan. Maadoittaminen ei ole välttämättä riittävä keino sähkömagneettisten kenttien poistamiseen metallisesta kappaleesta. Ainakin suojajohtimen jatkuvuuden resistanssin on oltava vain muutaman ohmin luokkaa, koska muutoin maadoituksella ei saada pienennettyä kentän voimakkuutta riittävästi.

Mittavälineistä aiheutui melko suuri pohjakohina, mutta tavoitteena ollut tilan yleisen sähkömagneettisten kenttien suuruusluokan selvittäminen onnistui kyllä. Suuri kohinan taso häytti lähinnä heikkojen signaalien havaitsemista.

Tuloksien tarkasteleminen oli mielekkäämpää dB μ V- kuin A/m-muodossa, koska logaritminen asteikko latistaa suurien taajuuksien voimakkuudet. Sama ilmiö näkyy ICNIRP:in altistusrajoissa */liite 5: säteilymäärien yhteenvedo/* säteilyn voimakkuuden voimakkaana laskemisena taajuuden suhteen.

9 YHTEENVETO

Laboratoriotilan sähkömagneettiset kentät läpäisevät ICNIRP:n altistusnormit käytetyllä taajuusalueella emission osalta.

Tuloksien mukaan suurimmat sähkömagneettisen säteilyn lähteet olivat tietokoneet ja GPS-järjestelmä. Tietokone aiheutti sekä voimakkaan että laajakaistaisen häiriön GPS-järjestelmän aiheuttaessa vain yhden mutta sitäkin voimakkaamman häiriöpiikin. Ehkä tehoa voisi laskea tai suojausta parantaa. Kotelo pitää myös rämisevää 50 Hz ääntä.

Myös GSM-verkko, WLAN, radiolähetykset ja valaistus aiheuttivat omat kenttänsä.

Tietoliikenneväkimen kytkimen laajakaistainen häiriö oli selvästi erilaista kuin PC:n ja taustasäteilyn yksinkertaisemmat laajakaistaiset häiriöt. Säännöllisin välein esiintyvien piikkien lisäksi niiden voimakkuus vaihteli verhoikäyrän mukaisesti.

Altistusnormeja on useita ja ICNIRP on yksi niistä. ”Paljonko on paljon” ja ”kuinka paljon on liikaa” ovat hyviä kysymyksiä. Laboratorion laitteiden ei ole havaittu häiritsevät toisiaan niin paljon, että EMC:n vuoksi tulisi toimintahäiriöitä. Allekirjoittanut saa silti päänsäryn GSM-mittaustilan kyljessä olevasta GPS-järjestelmän suotimesta.

10 LÄHTEET

1 Sähkötieto ry. Espoo 2008. EMC ja rakennusten sähkötekniikka, ST-käsikirja 37. 213 s.

2 Nyberg, Jokela. Hämeenlinna 2006. Sähkömagneettiset kentät, Säteily- ja ydinturvallisuus 6. 555 s.

3 Tamminen, Rekula & Juusela. Tallinna 2003. Sähköä ilmassa. 239 s.

4 Stimac, Tomislav. Definition of Frequency Bands. [online] [viitattu 7.5.2009]. Saatavilla: <http://www.vlf.it/frequency/bands.html>

5 Euroopan parlamentin EMC-direktiivi (2004/108/EC). [online] [viitattu 28.4.2009]. Saatavilla: http://ec.europa.eu/enterprise/electr_equipment/emc/directiv/text2004_108.htm

6 Direktiivi radio- ja telepäätelaitteille (1999/5/EC). [online] [viitattu 28.4.2009]. Saatavilla: <http://ec.europa.eu/enterprise/rte/dir99-5.htm>

7 Suomen sähkö-, radio- ja telealan lainsäädäntö (Sätköturvallisuuslaki 410/1996). [online] [viitattu 28.4.2009]. Saatavilla: <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/1996/19960410>

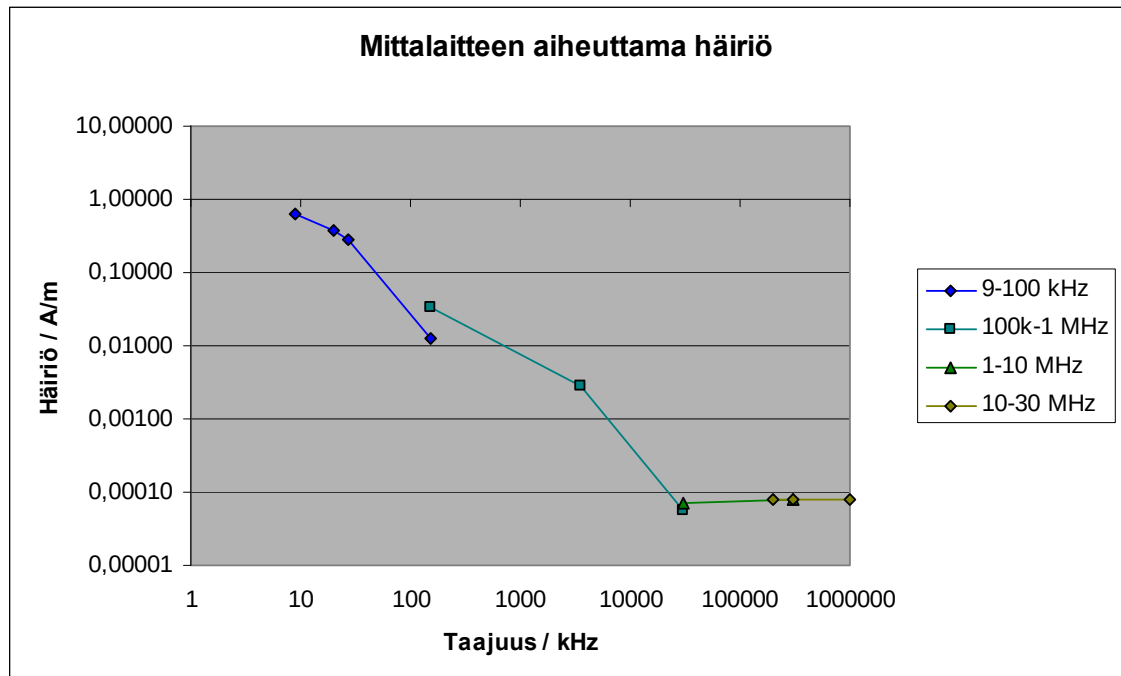
8 Laki radiotaajuuksista ja telelaitteista (1015/2001). [online] [viitattu 28.4.2009]. Saatavilla: <http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2001/20011015>

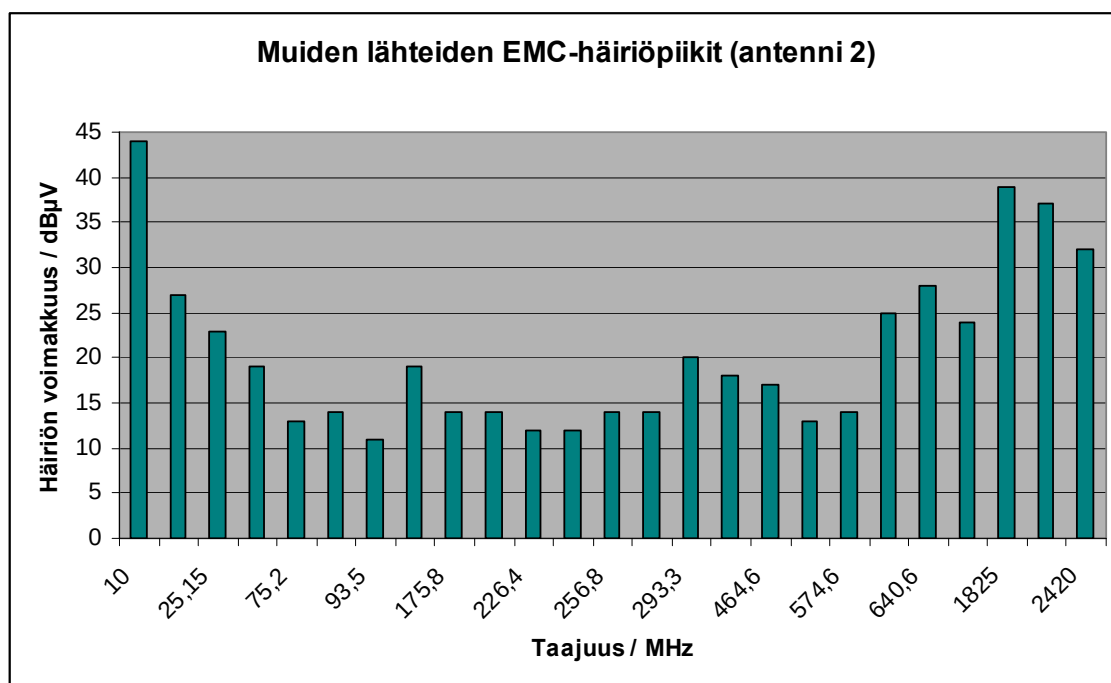
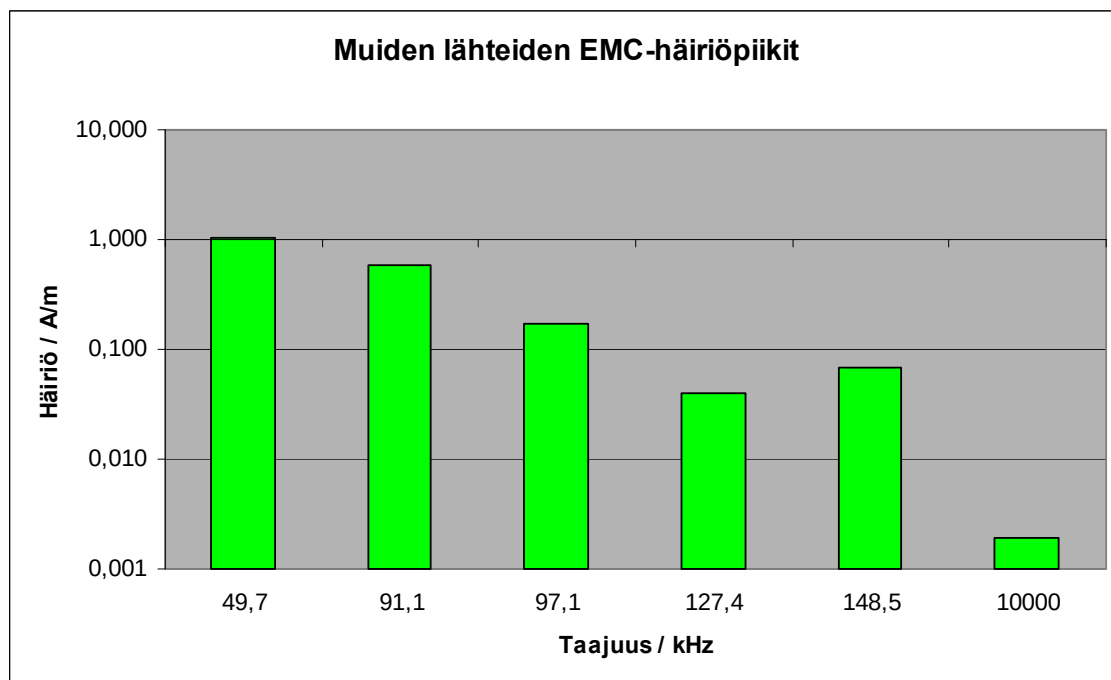
9 International Electrotechnical Vocabulary (IEV 161-01-07). [online] [viitattu 28.4.2009]. Saatavilla: <http://www.electropedia.org/iev/iev.nsf/display?openform&ievref=161-01-07>

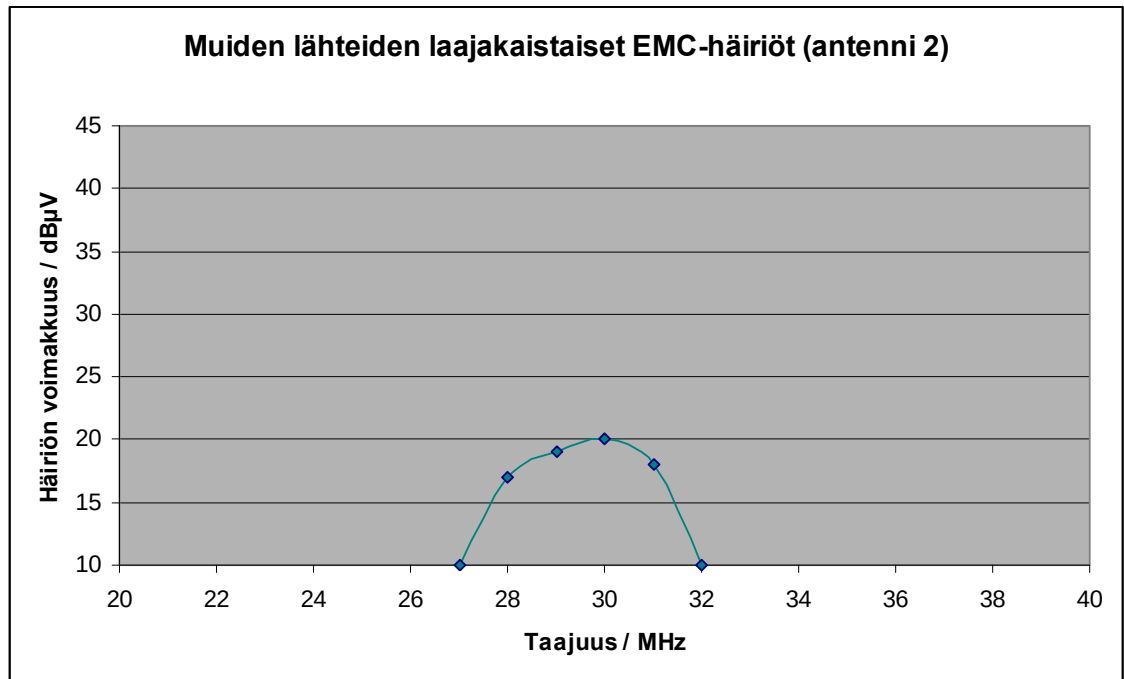
10 Sähkömagneettiset kentät (Säteilyturvakeskus). [online] [viitattu 28.4.2009]. Saatavilla: http://www.stuk.fi/sateilytietoa/sateilevat_laitteet/magneettikentat/fi_FI/index/

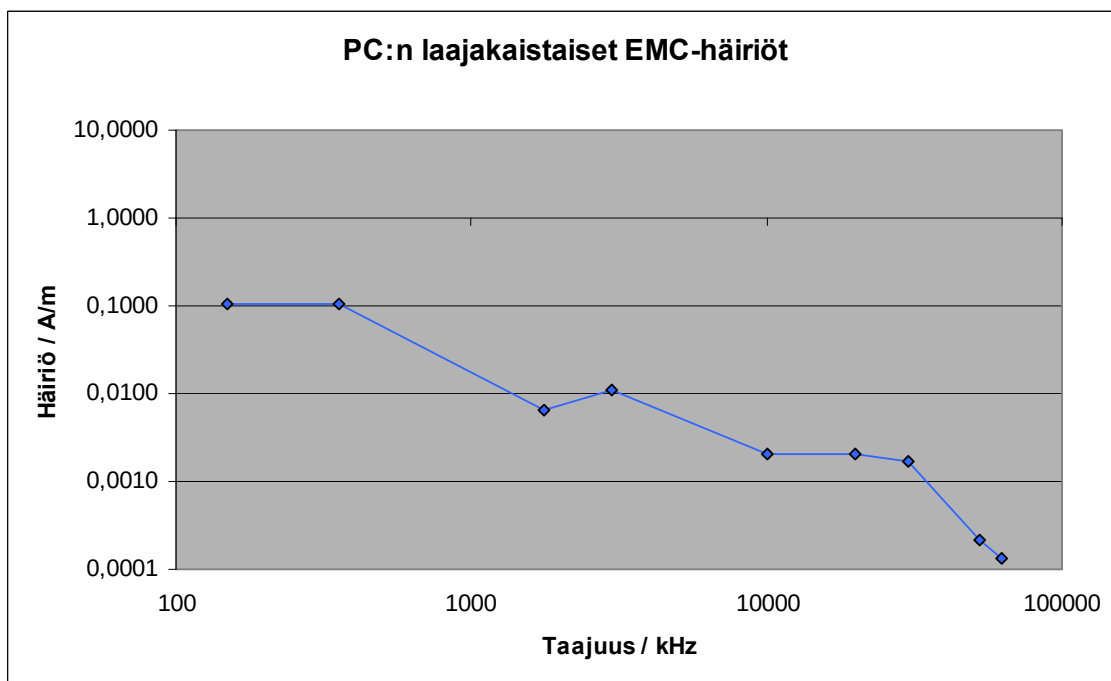
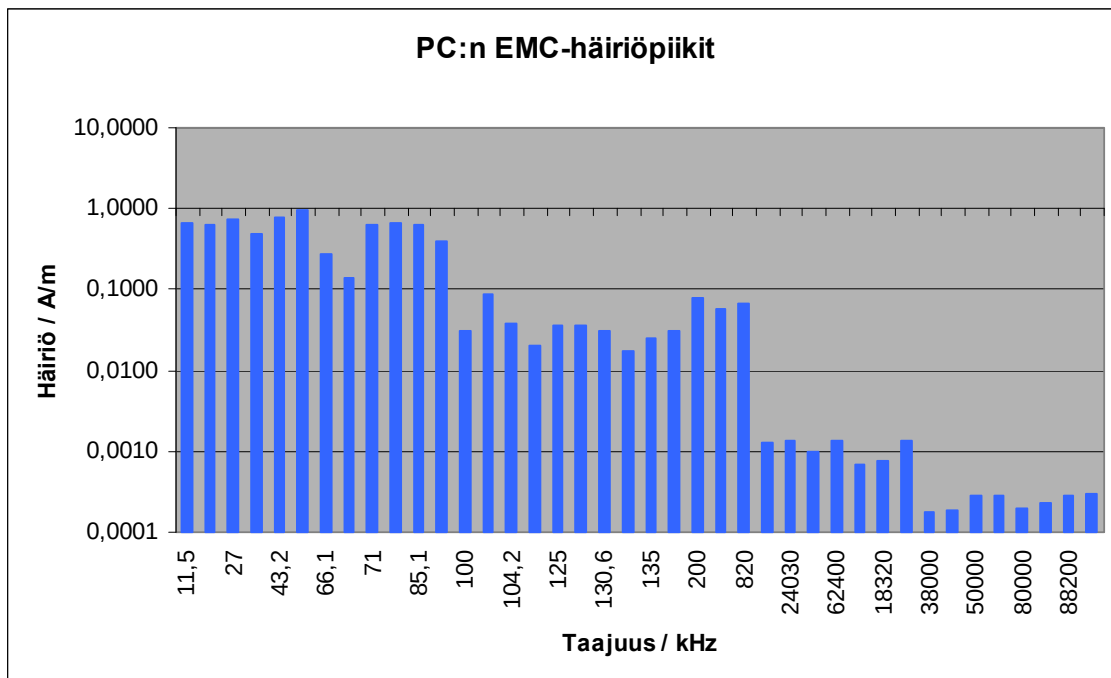
11 ICNIRP Guidelines, Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz) [online] [viitattu 30.4.2009]. Saatavilla: <http://www.icnirp.de/documents/emfgdl.pdf>

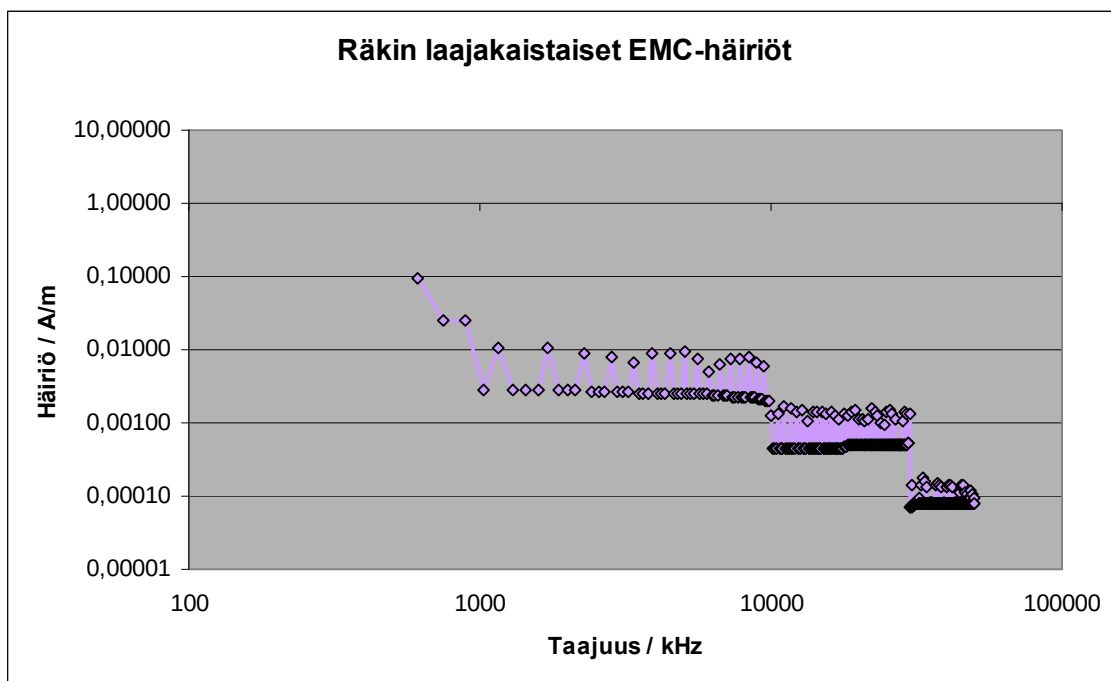
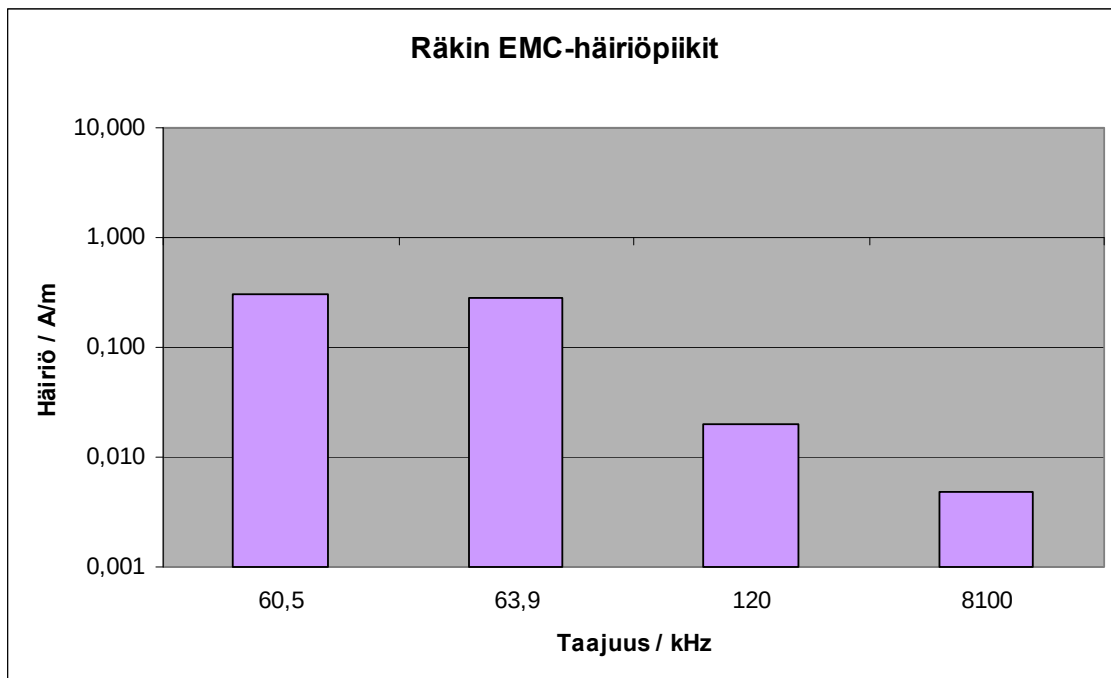
12 Hietanen, von Nandelstadh, Alanko. Työterveyslaitos, 2005. Sähkömagneettiset kentät työympäristössä, työympäristötutkimuksen raporttisarja 14. [online] [viitattu 8.5.2009]. Saatavilla: <http://www.ttl.fi/NR/rdonlyres/6EC22588-F05A-4AB2-9844-297EFB60E314/0/EMFohjekirja.pdf>

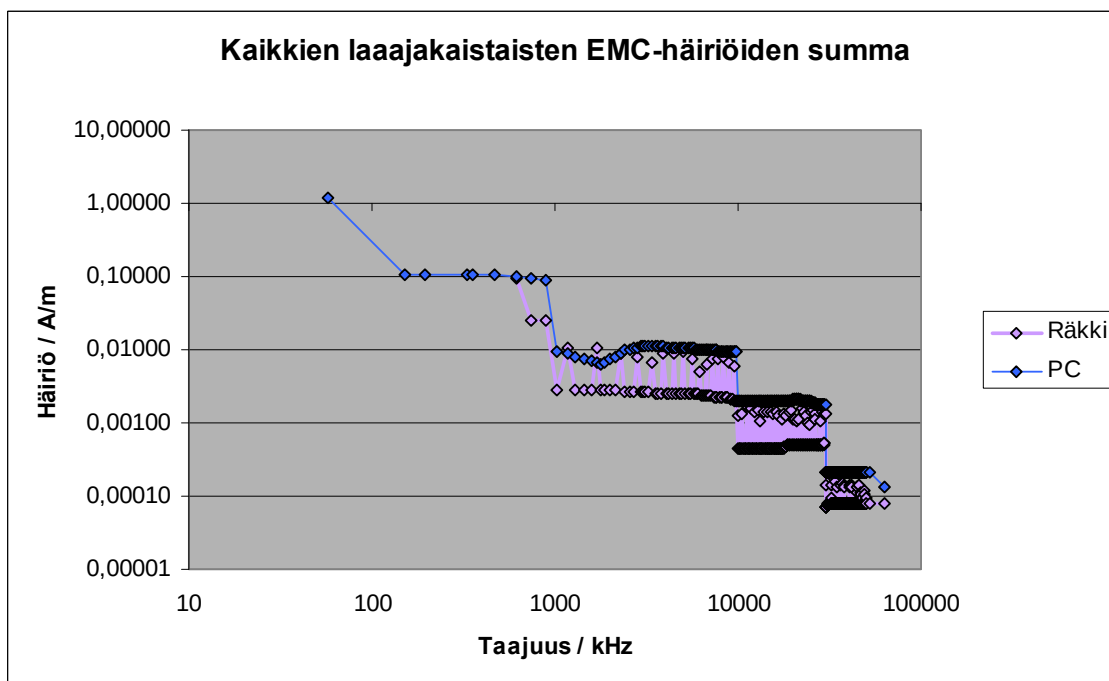
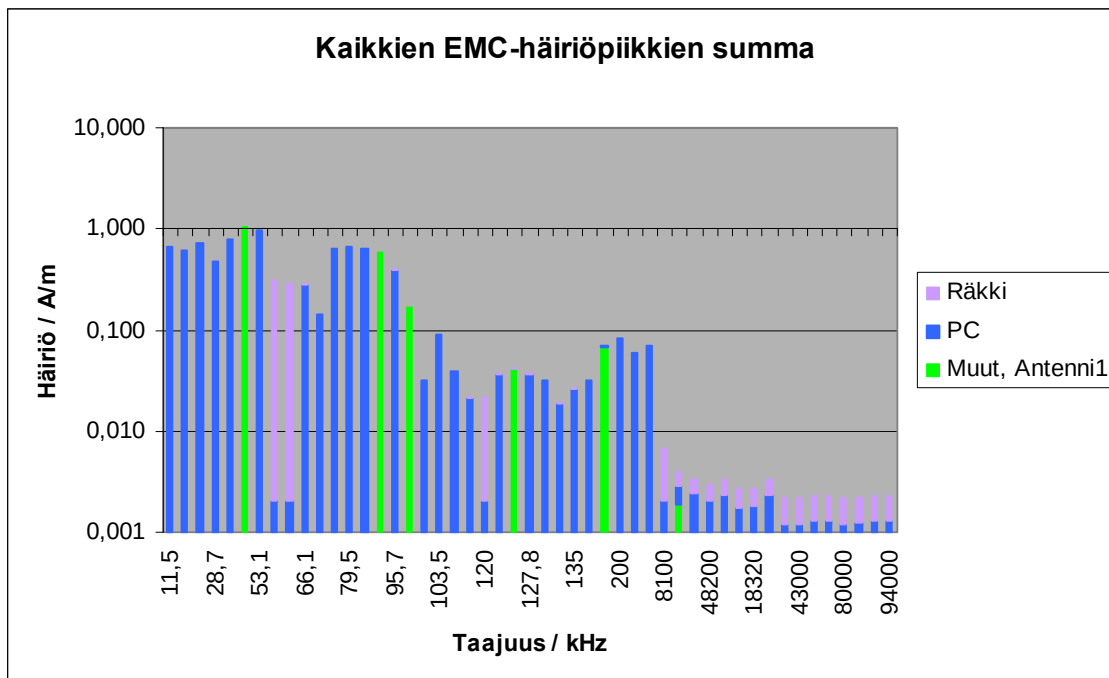
Liite 1: Mittalaitteen aiheuttama taustakohina

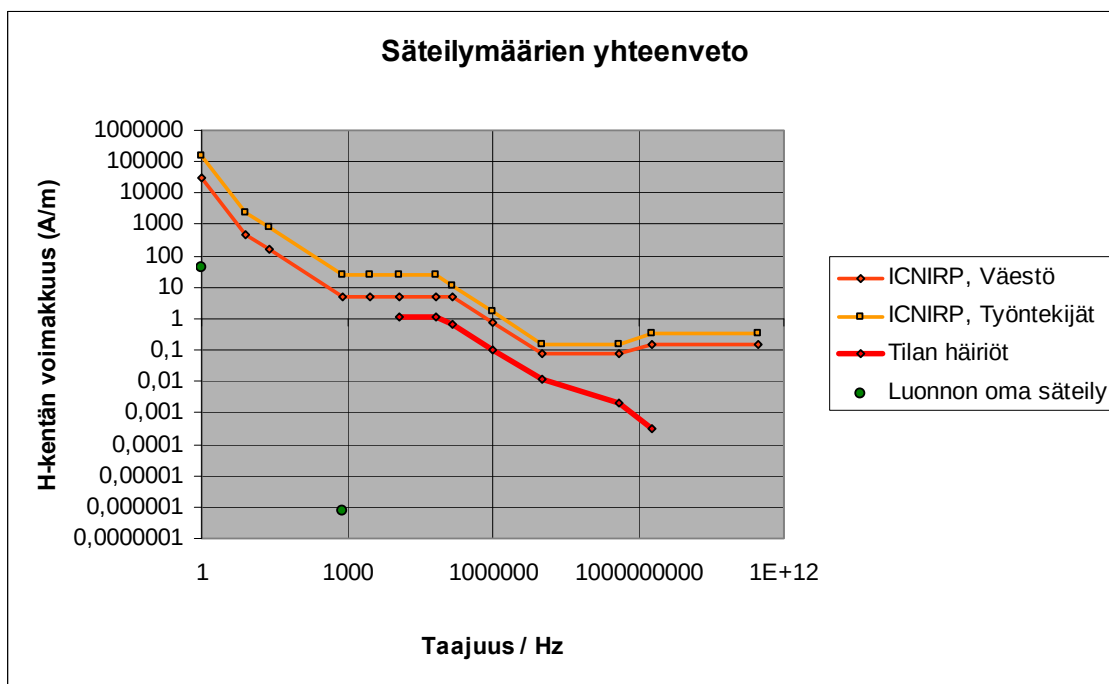
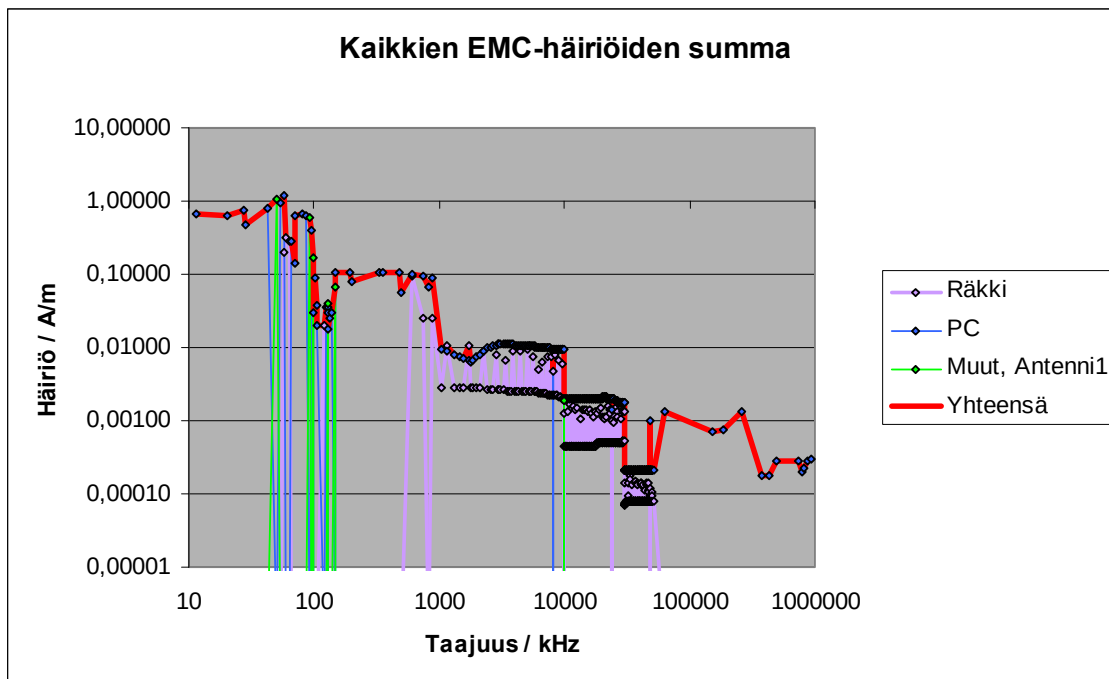
Liite 2: Tilan muiden lähteiden EMC-häiriöt



Liite 3: PC:n emittoimat EMC-häiriöt

Liite 4: Tietoliikennevälinön emittoimat EMC-häiriöt

Liite 5: Kaikkien EMC-häiriöiden summa



Liite 6: Tietokoneverkkolaboratorio A3-17:n layout-kuva