

## Väestön altistuminen laajakaistaisille sähkö- ja magneettikentille

**Tuomas Sauramäki, Tommi Keikko, Leena Korpinen**



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
Sähkötekniikka ja terveys -laboratorio  
Tampere 2002

Tutkimus on tehty Sähkövoimatekniikan kehityspoolin, Fingrid Oyj:n, Pohjolan Voima Oy:n ja Ympäristötutkimuspoolin tuella.

WWW-versio julkaistu 3.7.2003

## Sisällysluettelo

### PÄÄSIVU

### TIIVISTELMÄ

### ABSTRACT

### ALKUSANAT

## 1. JOHDANTO

### 1.1 Laajakaistaisten kenttien suositusarvot

#### 1.1.1 EU:n neuvoston suosituksen menetelmä laajakaistaisille sähkö- ja magneettikentille

#### 1.1.2 STM:n asetuksen mukainen menetelmä laajakaistaisille sähkö- ja magneettikentille

## 2. ELINYMPÄRISTÖN SÄHKÖ- JA MAGNEETTIKENTÄT

### 2.1. Sähkökentät

### 2.2. Magneettikentät

### 2.3. Elinympäristön sähkö- ja magneettikenttiä

#### 2.3.1. Sähkön siirto- ja jakelujohtojen sähkö- ja magneettikentät

#### 2.3.2. Esimerkkejä laitteiden kenttien vaimenemisesta

## 3. YLIAALLOT SÄHKÖVERKOSSA

## 4. LAAJAKAISTAISTEN KENTTIEN MITTAAMINEN

### 4.1 Painotetun kentän mittaamenetelmän periaate

### 4.2 Painotetun kentän mittauksiin rakennettu laitteisto

### 4.3 Kokeilumittaukset painotetun kentän menetelmällä

### 4.4 Yksittäisten harmonisten kenttien mittaamenetelmä

## 5. MITTAUSTULOKSIA SIIRTOJOHTOJEN LAAJAKAISTAISILLE KENTILLE ALTISTUMISESTA

### 5.1 TTKK:n aikaisempia mittauksia 400 kV siirtojohtoilta

### 5.2 Voimajohdon LM-1 laajakaistamittaukset

### 5.3 Yhteenveto voimajohdon LM-1 laajakaistamittauksista

## 6. MITTAUSTULOKSIA MUUNTAMOIDEN YLÄPUOLISISSA TILOISSA LAAJAKAISTAISILLE KENTILLE ALTISTUMISESTA

### 6.1 Muuntamon yläpuolisen tilan kenttien mittaaminen

### 6.2 Muuntamon yläpuolisen toimistotilan LM-2 laajakaistamittaukset

### 6.3 Muuntamon yläpuolisen toimistotilan LM-3 laajakaistamittaukset

### 6.4 Muuntamon yläpuolisen toimistotilan LM-4 laajakaistamittaukset

### 6.5 Yhteenveto muuntamoiden yläpuolisten tilojen mittauksista

## 7. MITTAUSTULOKSIA KOTIEN LAAJAKAISTAISILLE KENTILLE ALTISTUMISESTA

### 7.1 Asunnon kenttien mittaaminen

### 7.2 Kerrostaloasunnon LM-5 laajakaistamittaukset

### 7.3 Kerrostaloasunnon LM-6 laajakaistamittaukset

### 7.4 Kerrostaloasunnon LM-7 laajakaistamittaukset

### 7.5 Kerrostaloasunnon LM-8 laajakaistamittaukset

### 7.6 Muuntamon yläpuolisen kerrostalohuoneiston LM-9 laajakaistamittaukset

### 7.7 Kerrostaloasunnon LM-10 laajakaistamittaukset

### 7.8 Kerrostaloasunnon LM-11 laajakaistamittaukset

### 7.9 Omakotitalon LM-12 laajakaistamittaukset

### 7.10 Yhteenveto kotien mittauksista

## 8. POHDINTA

### 8.1 Laajakaistaisten kenttien määrittämisen problematiikka

### LÄHTEET

### LIITTEET

## Tiivistelmä

Suomessa Sosiaali- ja terveysministeriö (STM) on antanut asetuksen 'ionisoimattoman säteilyn väestölle aiheuttaman altistumisen rajoittamisesta', joka astui voimaan 1.5.2002. Uudessa asetuksessa vahvistetaan suositusarvot väestön pientaajuiselle sähkö- ja magneettikentälle altistumiselle. STM:n asetuksessa esitetyt kenttien suositusarvot perustuvat Euroopan unionin neuvoston aiemmin julkaisemaan suositukseen väestön sähkömagneettisille kentille (0 Hz - 300 GHz) altistumisen rajoittamisesta. STM:n asetuksen mukaan 50 Hz kentille altistumisen suositusarvot ovat 5 kV/m ja 100  $\mu$ T, kun altistuminen kestää merkittävän ajan. Ei merkittävän ajan kestäväälle altistumiselle suositusarvot ovat 15 kV/m ja 500  $\mu$ T.

Tämän hankkeen päätavoitteena oli tutkia, millaisia tarpeita on vähentää laajakaistaisille sähkö- ja magneettikentille altistumista uusien suositusten tähden. Lisäksi tavoitteena oli saada yleiskuva siitä, millaisille laajakaistaisille sähkö- ja magneettikentille yleensä elinympäristössä altistutaan. Sähkö- ja magneettikenttälähteitä mitattiin erilaisissa altistusympäristöissä ja samalla selvitettiin laajakaistaisten kenttien mittausten menetelmiä. Magneettikenttien osalta tuloksia verrattiin STM:n asetukseen ja EU:n neuvoston suositukseen. Sähkökenttien osalta tuloksia verrattiin vain EU:n neuvoston suositukseen.

Laajakaistaiselle magneettikentälle altistuminen mitattiin STM:n asetuksen mukaisella painotetun kentän menetelmällä kaupallisella mittarilla. Mittarin analogisesta ulostulosta mitattu jännitesignaali otettiin jatkokäsittelyyn. Signaalia suodatettiin ylipäästösuodattimella ja tallennettiin kannettavan tietokoneen muistiin. Tästä datasta määritettiin huippuarvojen keskiarvo. Jotta tätä jännitteen keskiarvoa voitiin verrata STM:n asetuksen mukaiseen altistumissuhteen arvoon 1, piti mittarin (koko järjestelmän) tuottamalle jännitteelle määrittää TTKK:n kalibrointilaitteistolla magneettikentän suositusarvoja vastaava vertailuarvo.

Rakennuksien kenttien osalta magneettikentät ovat lähempänä suositusarvoja kuin sähkökentät. Ensin mittauksia tehtiin kolmen muuntamon yläpuolisissa toimistoissa. Sitten sähkö- ja magneettikentille altistumisen mittauksia tehtiin neljässä kerrostalossa ja yhdessä omakotitalossa. Rakennuksissa kentät jäivät varsin pieniksi, koska sähkölaitteita ei juurikaan ollut käytössä. Aikaisemmissa TTKK:n mittauksissa on mitattu myös kodinkoneita ja kentät on todettu suositusarvoihin verrattuna varsin pieniksi.

Voimajohtoihin liittyen sähkökenttiä on tutkittu TTKK:n aikaisemmissa tutkimuksissa. Mittauksia on tehty 400 kV johdoilla 55 pylväsväliltä. Perinteisen tehollisarvon mittauksissa sähkökentän osalta 14 johdolla on ylitetty 5 kV/m arvo. Myös laajakaistaisen sähkökentän mittauksissa EU:n neuvoston suosituksen mukaisesti määritetty altistumissuhde on ylittänyt suositusarvon 7 pylväsvälillä 20 pylväsvälistä. Voimajohtojen osalta altistus ei kuitenkaan yleensä kestä merkittävää aikaa.

Johtopäätöksinä voidaan todeta, että tutkituissa altistumiskohteissa suositusarvojen laajakaistaisuudesta ei seuraa odottamattomia sähkö- ja magneettikenttien pienentämistarpeita. Pienentämistarpeet voidaan yleensä todeta jo perustaaajuisten kentän mittausten perusteella.

## Abstract

In Finland, the Ministry of Social Affairs and Health has given a decree on the 'Upper Limits of Public Exposure to Non-Ionizing Radiation', which came into effect on May 1st 2002. The upper limits for the public exposure to low frequency electric and magnetic fields is confirmed in the new decree. Upper limits presented in the decree are based on the EU Council recommendation on the limitation of exposure of the general public to electromagnetic fields (0 Hz to 300 GHz). In the decree the upper limits of the 50 Hz exposure are 5 kV/m and 100  $\mu$ T when the exposure continues for a significant time. When the exposure does not continue for a significant time, the upper limits are 15 kV/m and 500  $\mu$ T.

The main aim of this project was to clarify the needs to decrease the exposure to broadband electric and magnetic fields because of the new recommendations. In addition, the objective was to get an overview about the exposure to broadband electric and magnetic fields in general. Electric and magnetic field sources were measured near different exposure environments, and at the same time, measurement methods were clarified for broadband field measurements. The magnetic field results were compared to the decree and the EU Council recommendation. For the electric fields, the results were compared only to the EU Council recommendation.

The exposure to broadband magnetic field was measured with the weighted field method based on the decree by using a commercial meter. The voltage signal measured from the analogue output of the meter was studied further. The signal was filtered with a high pass filter and it was saved on the memory of a desktop. An average of the maximum of the values was defined from this data. To compare this average voltage value to the upper limit value 1 of the exposure ratio according to the decree, it was necessary to define a reference value for the voltage produced by the meter (the whole system) comparable to the magnetic field upper limits with the calibration system of TUT.

Magnetic fields were closer to guidelines than electric fields in case of buildings. At the beginning, measurements were carried out in three offices above indoor distribution substations. Then electric and magnetic field exposure measurements were carried out in four apartment buildings and in one house. In the buildings the fields were quite small because there were not many electrical appliances. In earlier measurements of TUT, domestic appliances were also measured and fields were noticed as quite small compared to guidelines.

In the case of power lines electric field has been studied earlier at TUT. 55 measurements have been carried out for 400 kV spans. The value 5 kV/m has been exceeded in 14 measurement in conventional RMS measurements. The exposure ratio defined based on the method in the EU Council recommendation has exceeded the upper limit value in 7 spans of the 20 spans. However, in the case of power lines the exposure does not usually take significant time.

As a conclusion, it can be stated that in studied exposure environments the broadband measurements does not cause unexpected needs for decreasing the electric and magnetic fields. Decreasing needs can usually be recognized already based on the fundamental frequency measurements.

## **Alkusanat**

Tämä raportti on Tampereen teknillisen korkeakoulun Sähkötekniikka ja terveys -laboratoriossa tehdyn tutkimusprojektin "Laajakaistaisille sähkö- ja magneettikentille altistumisen vähentämistarpeet sähköntuotannossa, siirrossa ja jakelussa" loppuportti aihealueesta Väestön altistuminen laajakaistaisille sähkö- ja magneettikentille. Hankkeen rahoittajina ovat toimineet Sähkövoimatekniikan kehityspooli, Fingrid Oyj, Pohjolan Voima Oy ja Ympäristötutkimuspooli.

Hankkeen johtoryhmään ovat kuuluneet Jarmo Elovaara (Fingrid Oyj), Osmo Haltia (Kauppa- ja teollisuusministeriö), Elina Lehtomäki (Sähköenergialiitto ry), Jukka Leskelä (Energia-alan Keskusliitto ry), Risto Vesala (Pohjolan Voima Oy) ja Leena Korpinen (Tampereen teknillinen korkeakoulu).

Hankkeen johtajana on toiminut prof. Leena Korpinen ja tutkijoina ovat olleet DI Tuomas Sauramäki ja DI Tommi Keikko ja tutkimusapulaisina tekn.yo Sampsa Kuusiluoma sekä IAESTE-harjoittelijat Márkus Norbert ja Eneko Izquierdo Ereno. Lisäksi hankkeessa tehdyissä mittauksissa ovat jonkin verran avustaneet tekn.yo Marika Keskinen ja tekn.yo Tommi Heikkilä. Raportin toteutuksessa ovat avustaneet Riitta Lehtelä, Leena Luoma ja Leila Virolainen.

Hankkeen toteutuksessa ovat myös avustaneet Tampereen sähkölaitos, Säteilyturvakeskus ja Tampereen aluetyöterveyslaitos. Johtoryhmälle ja kaikille mukana olleille henkilöille parhaat kiitokset.

## **1 Johdanto**

Viime vuosikymmeninä on suomalaisten elinympäristö sähköistynyt voimakkaasti. Kodeista ja työpaikoilta löytyy nykyään mitä moninaisimpia sähkölaitteita. Erilaiset sähkölaitteet ja koko sähkö- ja jakelujärjestelmä aiheuttavat ympäristöönsä eri suuruisia sähkö- ja magneettikenttiä. Yleisen ympäristötietoisuuden lisääntyessä on herännyt huoli näiden pienitaajuisien sähkö- ja magneettikenttien mahdollisista terveysvaikutuksista. Sähkö- ja magneettikenttien terveysvaikutuksiin liittyvä tutkimus on lisääntynyt maailmanlaajuisesti. Myös sähkö- ja magneettikentille altistumista on alettu rajoittaa. [27, 11]

Suomessa sosiaali- ja terveysministeriön (STM) asetus 'ionisoimattoman säteilyn väestölle aiheuttaman altistumisen rajoittamisesta' astui voimaan 1.5.2002. Asetuksessa vahvistetaan väestön altistumisen suositusarvot ultraviolettisäteilylle, radiotaajuiselle säteilylle ja lasersäteilylle sekä suositusarvot pientaajuisille sähkö- ja magneettikentille. Suosituksen mukaan väestön altistuksen suositusarvot 50 Hz kentille ovat 5 kV/m ja 100 µT, kun altistuminen kestää merkittävän ajan. [23, 24]

STM:n asetus pohjautuu Euroopan unionin neuvoston julkaisemaan suositukseen väestön sähkömagneettisille kentille (0 Hz - 300 GHz) altistumisen rajoittamiseksi [3]. EU:n neuvoston suositus puolestaan pohjautuu YK:n tunnustaman alan asiantuntijatoimikunnan ICNIRP:n (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) suositukseen altistuksen suositusarvoista [7].

STM:n asetus ja EU:n neuvoston suositus eroavat kuitenkin toisistaan tapauksessa, jossa altistutaan usealle eritaajuiselle kentälle. EU:n neuvoston suosituksen mukainen altistumissuhteen määrittämistapa [3] olettaa, että harmonisten yliaaltokomponenttien maksimit esiintyvät

yhtäaikaisesti. STM:n asetuksen mukainen painotetun kentän mittausmenetelmä [23, 24] sen sijaan ottaa huomioon myös kentän vaihekulmat.

Vaikka STM:n asetuksen mukainen menetelmää voidaan pitää teoreettisesti parempana, aiheuttaa käytännössä vaikeuksia se, ettei mittauksen tekemiseksi asetuksen vaatimalla tavalla ole saatavissa kaupallista mittaria.

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli tutkia, millaisia tarpeita on vähentää laajakaistaisille sähkö- ja magneettikentille altistumista uusien suositusten tähden. Lisäksi tavoitteena oli saada yleiskuva siitä, millaisille laajakaistaisille sähkö- ja magneettikentille yleensä elinympäristössä altistutaan. Tässä raportissa keskitytään väestön altistumiseen laajakaistaisille sähkö- ja magneettikentille elinympäristössä, esimerkiksi kodeissa, sekä kenttien vähentämistarpeiden arvioimiseen.

## 1.1 Laajakaistaisten kenttien suositusarvot

Laajakaistaisille sähkö- ja magneettikentille altistumisen arvioimiseen on olemassa kaksi menetelmää. Menetelmät ovat Euroopan unionin neuvoston suosituksen mukainen yksittäisten harmonisten kenttien mittausmenetelmä ja Säteilyturvakeskuksen (STUK) kehittämä STM:n asetuksen mukainen menetelmä. Seuraavaksi käydään läpi altistumisen arvioimiseen käytettävän altistumissuhteen määrittäminen kummallakin menetelmällä.

### 1.1.1 EU:n neuvoston suosituksen menetelmä laajakaistaisille sähkö- ja magneettikentille

Euroopan unionin neuvoston suosituksen mukaan usealle eritaajuiselle kentälle (taajuus alle 100 kHz) eli laajakaistaiselle kentälle altistumissuhteen  $R$  arvo saadaan yhtälön 1.1 avulla [3].

$$R = \sum_{i=1}^{100\text{kHz}} \frac{J_i}{J_{L,i}} \leq 1 \quad (1.1)$$

missä  $J_i$  on virrantiheys taajuudella  $i$  ja  
 $J_{L,i}$  on virrantiheyden perusrajoitus taajuudella  $i$ .

Käytännössä määritetään altistuminen kuitenkin viitearvoja hyväksikäyttäen. Euroopan unionin neuvoston suosituksen mukaan voidaan kenttiin soveltaa yhtälöiden 1.2 ja 1.3 mukaisia vaatimuksia 100 kHz saakka [3].

$$R = \sum_{i=1}^{100\text{kHz}} \frac{E_i}{E_{L,i}} \leq 1 \quad (1.2)$$

missä  $E_i$  on sähkökentän voimakkuus taajuudella  $i$  ja  
 $E_{L,i}$  sähkökentän voimakkuuden viitearvo.

$$R = \sum_{j=1}^{100\text{kHz}} \frac{H_j}{H_{L,j}} \leq 1 \quad (1.3)$$

missä  $H_j$  on magneettikentän voimakkuus taajuudella  $j$  ja  
 $H_{L,j}$  on magneettikentän voimakkuuden viitearvo.

### 1.1.2 STM:n asetuksen mukainen menetelmä laajakaistaisille sähkö- ja magneettikentille

STM:n asetuksen mukaisella painotetun kentän mittausmenetelmällä usealle eritaajuiselle kentälle (taajuus alle 100 kHz) eli laajakaistaiselle kentälle altistumissuhteen  $R$  arvo saadaan puolestaan yhtälön 1.4 avulla [23, 24].

$$R = \left| \sum_n \frac{J_n \cos(2\pi f_n t + \theta_n + \varphi_n)}{J_{L,n}} \right| \leq 1 \quad (1.4)$$

missä  $t$  on aika,  
 $J_n$  on virrantiheyden taajuuskomponentin tehollisarvo,  
 $f_n$  on vastaava taajuus ja  $\theta_n$  vastaava vaihekulma,  
 $n$  on taajuuskomponentin järjestysluku taajuuteen 50 Hz verrattuna,  
 $J_{L,n}$  on virrantiheyden suositusarvo ja  
 $\varphi_n$  on painotusfunktion vaihekulma, joka saadaan yhtälöstä 1.5.

$$\varphi_n = -\arctan(f_n / f_c) \quad (1.5)$$

missä  $f_c$  on rajataajuus, jonka yläpuolella suositusarvo kasvaa lineaarisesti taajuuden funktiona.

Myös STM:n asetuksen mukaisessa painotetun kentän mittausmenetelmässä voidaan määrittää altistuminen viitearvoja käyttäen. Altistumisessa huomioidaan kuitenkin mitatusta kentästä myös kentän taajuuskomponentin vaihekulma. Painotetun kentän mittausmenetelmässä laajakaistaisiin kenttiin voidaan soveltaa yhtälön 1.6 mukaista vaatimusta [23, 24].

$$R = \left| \sum_n \frac{A_n \cos(2\pi f_n t + \theta_n + \varphi_n)}{A_{L,n}} \right| \leq 1 \quad (1.6)$$

missä  $t$  on aika,  
 $A_n$  on sähkö- tai magneettikentän taajuuskomponentin tehollisarvo,  
 $f_n$  on vastaava taajuus,  
 $\theta_n$  on vastaava vaihekulma,  
 $n$  on taajuuskomponentin järjestysluku taajuuteen 50 Hz verrattuna,  
 $A_{L,n}$  kentän suositusarvo ja  
 $\varphi_n$  on painotusfunktion vaihekulma, joka saadaan yhtälöstä 1.7.

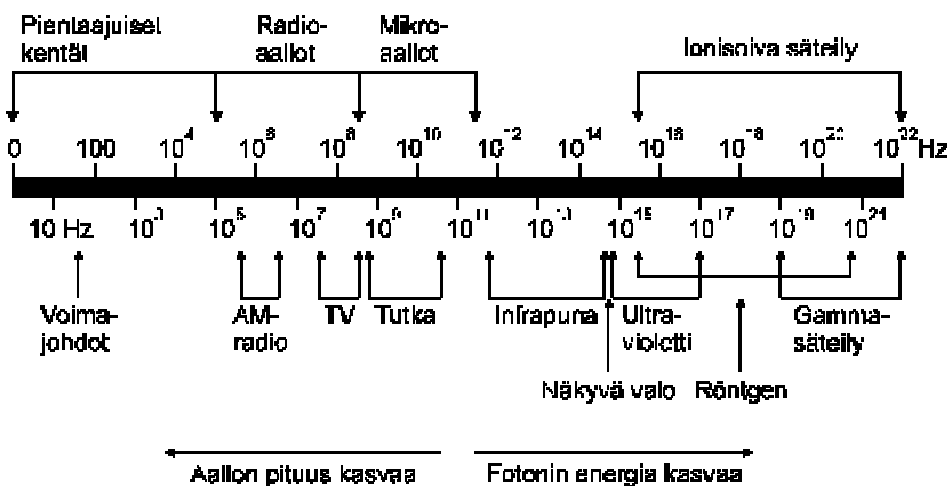
$$\varphi_x = \pi/2 - \arctan(f_x/f_c) \quad (1.7)$$

missä  $f_c$  on rajataajuus, jonka yläpuolella suositusarvo kasvaa lineaarisesti taajuuden funktiona.

Näitä edellä kuvattuja menetelmiä on käytetty hyväksi tässä raportissa esitetyissä mittauksissa.

## 2 Elinympäristön sähkö- ja magneettikentät

Sähkömagneettinen säteily etenee sähköisinä ja magneettisina värähtelyinä väliaineelle tyypillisellä valon nopeudella. Se jaetaan ionisoimattomaan ja ionisoivaan säteilyyn. Ionisoivan säteilyn, esimerkiksi röntgensäteilyn, sisältämä energia on riittävän suuri irrottamaan elektroneja atomeista, joihin säteily osuu. Tätä nimitetään ionisaatioksi. Ionisoimattoman säteilyn, muun muassa ultravioletti- ja infrapunasäteilyn sekä näkyvän valon energia ei riitä irrottamaan elektronia. [16] Kuvassa 2.1 on esitetty koko sähkömagneettisen säteilyn spektri.



Kuva 2.1. Sähkömagneettisen säteilyn spektri. [16]

Figure 2.1. Spectrum of the electromagnetic radiation. [16]

Sähköjärjestelmän aiheuttamasta ionisoimattomasta sähkömagneettisesta säteilystä ei yleensä käytetä sanaa säteily, vaan puhutaan sähkö- ja magneettikentistä, sillä 50 Hz taajuudella aallonpituus  $l$  on hyvin suuri ( $l=6000$  km) ja Planckin vakion ja taajuuden avulla laskettu fotonin energia ( $3,31 \times 10^{-32}$  J) merkityksettömän pieni verrattuna molekyylien sidosenergioihin tai niiden lämpöenergiaan. [20]

Kaukokentällä tarkoitetaan sähkömagneettista kenttää etäisyydellä, joka on paljon aallonpituutta suurempi (50 Hz:llä siis paljon yli 6000 km). Lähikentällä tarkoitetaan vastaavasti aluetta, jossa etäisyys kentän lähteeseen on paljon aallonpituutta pienempi. Sähköjärjestelmän aiheuttamien sähkö- ja magneettikenttien kaikki mahdolliset vaikutukset tapahtuvat lähikentän alueella ( $r \ll \lambda$ ). Koska normaalitilanteessa kolmivaiheisten järjestelmien eri virtajohtimien virtojen ja jännitteiden summa on lähes nolla, ovat kentät pieniä ja esiintyvät lähellä johtoa.

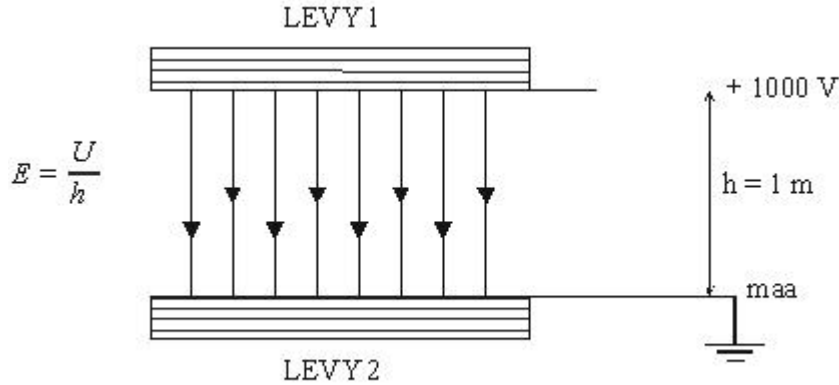
Sähköjärjestelmän lähiympäristöön syntyy sähkö- ja magneettikenttä kaikkien virrallisten ja jännitteellisten johtimien yhteisvaikutuksena. Lähialueella johtimien aiheuttamat kentät eivät kumoakaan toisiaan täydellisesti.

Sähkö- ja magneettikentät eivät lähikentässä riipu toisistaan, vaan sähkökenttä riippuu muun muassa jännitteestä, jota voidaan säätää tietyissä rajoissa ulkoisilla ohjaustoimenpiteillä. Magneettikenttä taas riippuu muun muassa virrasta, joka on verrannollinen kuormitukseen. Sähköjärjestelmän aiheuttamia sähkö- ja magneettikenttiä ei määritetä sähkömagneettisen säteilyn periaatteiden mukaan, vaan niitä tarkastellaan käytännössä toisistaan erillisinä näennäisstaattisina ilmiöinä [2].

## 2.1 Sähkökentät

Sähkövaraus synnyttää ympärilleen sähkökentän. Sähkökentän voimakkuus (V/m) määritellään kentän positiiviseen varaukseen Q kohdistaman voiman ja varauksen Q suhteena. Sähkökentän suunta on se suunta, johon kentässä oleva positiivinen varaus pyrkii liikkumaan. [16]

Kahden suuren toisiaan lähellä olevan sähköisesti varatun levyn välissä vallitsee homogeeninen sähkökenttä, jonka voimakkuus voidaan laskea jakamalla levyjen välinen potentiaaliero eli jännite niiden välisellä etäisyydellä (kuva 2.2). Sähkökenttää havainnollistamaan käytetään usein kenttäviivoja. Niiden suunta kuvaa kentän suuntaa ja niiden tiheys suhteellista kentänvoimakkuutta. Kuvassa 2.2 on esimerkkinä toisistaan 1 metrin etäisyydellä olevien tasomaisten levyjen välillä vallitseva homogeeninen sähkökenttä. Jos levyjen jännite-ero on 1000 V, sähkökentän voimakkuus on 1 kV/m. [16]



*Kuva 2.2.* Kahden levyn välinen sähkökentän voimakkuus (E on sähkökentän voimakkuus, U on levyjen välinen jännite, h on levyjen välinen etäisyys). [16]

*Figure 2.2.* Electric field strength between two plates. (E is electric field strength, U is voltage between the plates, h is distance between the plates). [16]

Sähkökentässä E olevan johtavan materian virrantiheyden suuruus J riippuu paitsi sähkökentän voimakkuudesta myös väliaineen johtavuudesta  $\sigma$  yhtälön 2.1 mukaisesti

$$J = \sigma E \quad (2.1)$$

Ilman sähkönjohtavuus ( $\sigma = 10^{-14}$  S/m) on huomattavasti pienempi kuin kudosten ( $\sigma \approx 1$  S/m), joten biologiset kudokset ovat ympäristössään käytännössä hyvin sähköä johtavia kappaleita. [16]

Kun sähköä johtava kappale viedään sähkökenttään, siinä olevat sähkövaraukset järjestyvät uudelleen kappaleen pinnalle. Tätä ilmiötä kutsutaan influenssiksi tai sähköstaattiseksi induktioksi. Nämä pintavaraukset aiheuttavat edelleen sähkökentän, joka muuttaa eli deformoi alkuperäistä häiriintymätöntä kenttää [2]. Deformaatiovaikutus riippuu kappaleen sähköisistä ominaisuuksista ja sen muodoista. Kentän häiriintyminen on otettava huomioon muun muassa sähkökenttiä mitattaessa, sillä myös mittaaaja ja mittari vaikuttavat mitattavaan kenttään.

Käyttötaajuiset 50 Hz sähkökentät ovat näennäisstaattisia kenttiä. Voimajohdon tapauksessa sähkövaraus ilmestyy johtimen pinnalle, kun johtoon kytketään jännite. Sähköjärjestelmän 50 Hz taajuudesta johtuen myös sähkökentän suunta vaihtuu samalla taajuudella ja aiheuttaa johtavien kappaleiden sähkövarauksiin edestakaisen liikkeen.

## 2.2 Magneettikentät

Sähkövarausten liike eli sähkövirta synnyttää ympärilleen magneettikentän. Pitkässä suorassa johtimessa kulkevan virran  $I$  aiheuttama magneettikentän voimakkuus  $H$  etäisyydellä  $r$  on

$$R = \sum_{i=1}^n \frac{J_i}{J_{L,i}} \leq 1 \quad (2.2)$$

Magneettikentän voimakkuus ilmoitetaan ampeereina metriä kohti (A/m). Magneettikenttä voidaan kuvata myös toisella suurella, jota kutsutaan magneettivuon tiheydeksi. Magneettivuon tiheys  $B$  riippuu väliaineesta ja magneettikentän voimakkuudesta  $H$  seuraavasti

$$B = \mu H = \mu_o \mu_r H \quad (1.1)$$

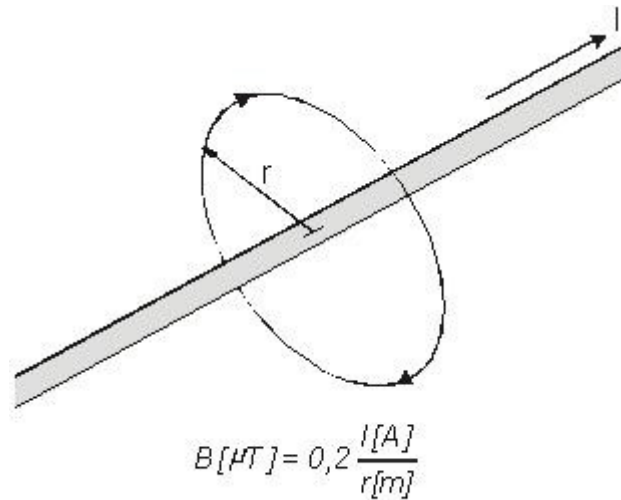
missä  $\mu$  on väliaineen permeabiliteetti,  
 $\mu_o$  on tyhjän permeabiliteetti ( $4\pi \times 10^{-7}$  H/m) ja  
 $\mu_r$  on väliaineen suhteellinen permeabiliteetti.

Magneettivuon tiheyden yksikkö on tesla (T). Kudosten magneettisia ominaisuuksia kuvaava suhteellinen permeabiliteetti  $\mu_r$  on melko tarkasti 1, joten biologisen materiaalin permeabiliteetti on lähes sama kuin tyhjän ( $\mu \approx \mu_o$ ). Tästä seuraa, että magneettikenttään viety epämagneettinen kappale ei muuta alkuperäistä kenttää kuten sähkökentän tapauksessa. Sähkökentälle tyypillistä deformaatiovaikutusta ei tapahdu.

Vain ferromagneettisten materiaalien kuten raudan, nikkelin ja koboltin permeabiliteetti poikkeaa niin paljon tyhjän permeabiliteetista, että kentän muoto muuttuu. Magneettikenttä ei myöskään vaimene tavallisissa rakennusmateriaaleissa. [16]

Magneettikentän voimakkuutta  $H = 1$  A/m vastaa ilmassa yhtälön 2.3 perusteella magneettivuon tiheys  $B = 1,26 \times 10^{-6}$  T = 1,26  $\mu$ T.

Myös magneettikenttää voidaan kuvata kenttäviivoilla. Jos suoran, pitkän johtimen virta on 1000 A, magneettivuon tiheys  $B$  1 metrin etäisyydellä on  $200 \mu\text{T}$  (kuva 2.3). [16]



*Kuva 2.3.* Suoran virtajohtimen ympärillä esiintyvä magneettikenttä ( $B$  on magneettivuon tiheys,  $I$  on johtimessa etäisyydellä  $r$  kulkeva virta). [16]

*Figure 2.3.* Magnetic field around a straight conductor ( $B$  is magnetic flux density,  $I$  is current in the conductor at the distance of  $r$ ). [16]

Muuttuvalla magneettikentällä on kyky indusoida väliaineeseen sähkökenttä. Tämä sähkökenttä puolestaan aiheuttaa johtavassa väliaineessa sähkövarausten liikkeen eli sähkövirran, jonka aiheuttama magneettikenttä pyrkii vastustamaan ulkoisen magneettikentän muuttumista. Indusoituneita virtoja kutsutaan pyörrevirroiksi. Tämän ilmiön yhteydessä energiaa muuttuu myös lämmöksi. Ilmiö on sitä voimakkaampi, mitä nopeammin magneettikenttä muuttuu eli mitä suuremmasta taajuudesta on kysymys. 50 Hz taajuudella esimerkiksi kudoksiin indusoituneet virrat ovat erittäin pieniä.

Magneettikenttä on suoraan verrannollinen johdon virtaan nähden. Johdon kuormituksen (virran) vaihteluista johtuen myös kentän taso johdon ympäristössä vaihtelee ajan suhteen [8]. Magneettikenttää onkin käsiteltävä ajasta riippuvana tilastollisena suurena. Keskimääräistä kenttää ei voida määrittää hetkellisillä mittauksilla tai laskelmilla yhtä luotettavasti kuin sähkökentän tapauksessa. Toisaalta deformaatioilmiö ei aiheuta normaalitilanteissa magneettikentän määrittämisessä ongelmia. [16]

### 2.3 Elinympäristön sähkö- ja magneettikenttiä

Suomessa sähköenergian siirto toteutetaan 110, 220 ja 400 kV kantaverkolla. Vuonna 2000 siirtojohtojen yhteenlaskettu pituus oli 21 500 km, joista 110 kV johtoja oli 15 000 km, 220 kV johtoja oli 2 500 km ja 400 kV johtoja oli 4 000 km [26]

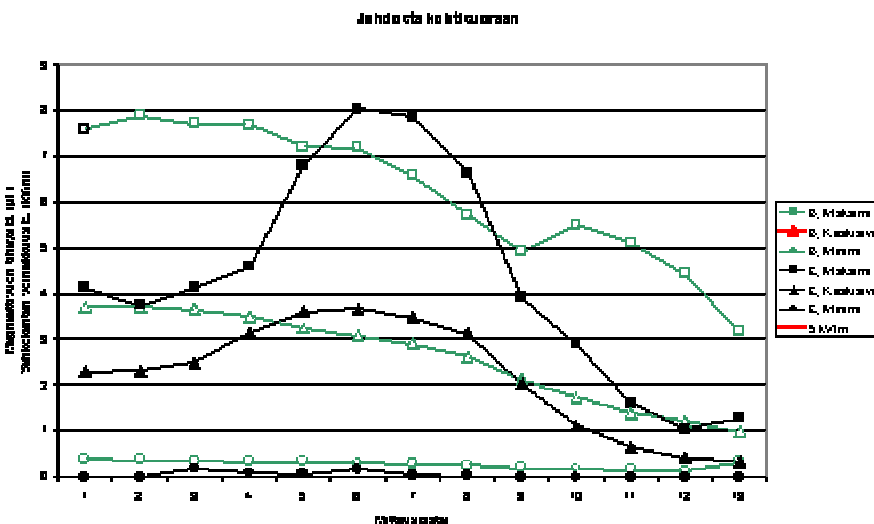
Tampereen teknillisessä korkeakoulussa (TTKK) on tehty aikaisemmin mittauksia elin- ja työympäristössä esiintyvistä sähkö- ja magneettikentistä. Mittausmenetelminä eri mittauksissa on käytetty raportissa: Laitteiden ja elinympäristön sähkö- ja magneettikenttien mittaaminen. Kauppa-

ja teollisuusministeriön tutkimuksia ja raportteja. 9/2000, [16] esitettyjä mittausten menetelmiä. Seuraavissa luvuissa esitetään eri projekteissa saatuja mittaustuloksia [12,13,14]. Näitä tuloksia on esitelty aikaisemmin Sähkö&Tele-lehdessä (numero 2-2000) [15], josta tähän on lyhennetty tekstiä.

### 2.3.1 Sähkön siirto- ja jakelujohtojen sähkö- ja magneettikentät

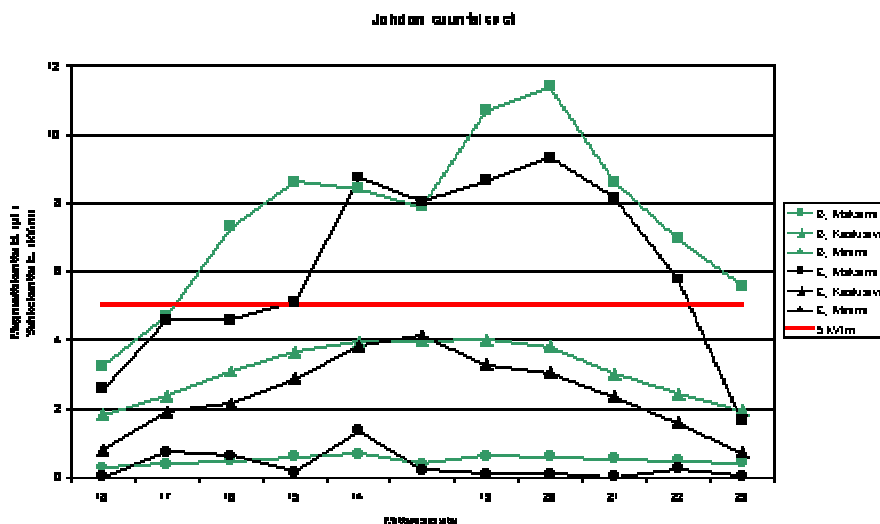
TTKK:ssa on mitattu 400 kV voimajohtojen perustajuisia sähkö- ja magneettikenttiä 25 pylväsväliltä. Mittaukset tehtiin pylväsvälin keskikohtalla ensin johtoa vastaan kohtisuorassa suunnassa ja sen jälkeen johdon suuntaisesti sillä etäisyydellä johdosta, missä saatiin kohtisuoraan mitattuna suurin kentän voimakkuus. Mittauskorkeus oli yksi metri. [16]

Mittauksissa käytettiin Wandel&Goltermann EFA-3 sähkökenttämittaria, jonka mittaustarkkuus on  $\pm 5\% \pm 1$  V/m ja lukema-alue on 0,5 V/m - 100 kV/m ja magneettikenttämittaria ML-1, jonka mittaustarkkuus on  $\pm 10\%$ . Kuvassa 2.4 ja 2.5 on yhdistettynä niiden pylväsvälien tulokset, joissa mittaukset on tehty samalla tavalla. Mittauspisteiden etäisyydet tosin vaihtelivat suhteessa pylväsvälin pituuteen.



Kuva 2.4. Yhteenveto: sähkö- ja magneettikentät (maksimi-, keski- ja minimiarvot) johtoa vastaan kohtisuorissa mittauksissa (n = 21). Mitattujen johtojen päiden jännitteet vaihtelivat mittausten aikana välillä 391,1 - 407,5 kV. [13]

Figure 2.4. Summary: electric and magnetic fields (maximum, mean and minimum values) in measurements perpendicular to the line (n = 21). Voltages for the ends of the line vary between 391,1 ... 407,5 kV during the measurement. [13]



*Kuva 2.5.* Yhteenveto: sähkö- ja magneettikentät (maksimi-, keski- ja minimiarvot) johdon suuntaisissa mittauksissa (n = 21). Mitattujen johtojen päiden jännitteet vaihtelivat mittausten aikana välillä 391,1 - 407,5 kV. [13]

*Figure 2.5.* Summary: electric and magnetic fields (maximum, mean and minimum values) in measurements parallel to the line (n = 21). Voltages for the ends of the line vary between 391,1 ... 407,5 kV during the measurement. [13]

Tarkasteltaessa kuvia 2.4 ja 2.5 magneettikenttätulosten osalta tulee ottaa huomioon se, että pylväsvälit on valittu ensisijaisesti sähkökenttäälstuksen näkökulmasta, sillä sähkökenttätasot ovat lähempänä suositusten enimmäisarvoja.

110 kV:n ja 20 kV:n osalta mittauksia on tehty vähemmän (taulukot 2.1 ja 2.2) kuin 400 kV:n johtojen kohdalla. Mittaukset on tehty vastaavasti kuin 400 kV:n johtojen mittaukset, mutta mittauspisteitä on ollut vähemmän pienempien pylväsetäisyyksien tähden. Taulukoiden 2.1 ja 2.2 sähkö- ja magneettikenttämittaukset on tehty EFA-3 mittarilla.

*Taulukko 2.1.* Esimerkkejä 110 ja 20 kV johtojen magneettikenttien mittaustuloksista. [16]

*Table 2.1.* Examples for magnetic field measurement results with 110 and 20 kV lines. [16]

Mittaus	Jännite U, kV	Johdintyyppi	Virta I, A	Max B, µT
1	110	Portaali	348,0	5,80
2	20	Maakaapeli	33,0	0,19
3	20	Maakaapeli	104,0	0,10
4	20	Avojohto	26,0	0,16
5	20	Avojohto	89,0	0,63
6	20	PAS	56,0	0,09
7	20	Avojohto	50,0	0,33
8	20	Kaksois PAS	262,0	0,63

9	20	Kaksois PAS	274,0	0,59
10	20	Avojohto	145,0	0,77
11	20	SAMKA	36,0	0,13
12	20	Avojohto	102,0	0,26
13	20	Avojohto	26,0	0,58
14	20	Kaksois PAS	269,0	0,58
15	20	Avojohto	129,0	0,75

Taulukko 2.2. Esimerkkejä 20 kV johtojen sähkökenttien mittaustuloksista. [16]

Table 2.2. Examples for electric field measurement results with 20 kV lines. [16]

Jännite U / kV	Johtotyyppi	Jännite U / kV	Suurin E / kV/m
20	Avojohto	20,5	0,09
20	PAS	20,4	0,06
20	SAMKA	20,7	0,0005

### 2.3.2 Esimerkkejä laitteiden kenttien vaimenemisesta

Erilaisten sähkölaitteiden magneettikentät vaihtelevat melko paljon. Yleensä kentät vaimenevat varsin nopeasti etäännyttäessä laitteesta. Taulukkoon 2.3 on kerätty esimerkkejä erilaisista kenttälähteistä ja niihin liittyvistä mittaustuloksista. Mittauksissa käytettiin HI-3604 mittaria (tarkkuus -2 - +0,5 dB).

Taulukko 2.3. Esimerkkejä laitteiden magneettikenttien etäisyysvaimenemisesta. [16]

Table 2.3. Examples for magnetic field attenuation with distance for appliances. [16]

Laite	Magneettivuon tiheys, $\mu\text{T}$ (etäisyydellä d, m)				Virta, A
Sähkökirjoituskone I	58 (d = 0,25)	4,8 (d = 0,4)	0,9 (d = 0,6)	0,3 (d = 0,8)	0,09
Sähkökirjoituskone II	29 (d = 0,25)	1,8 (d = 0,4)	0,3 (d = 0,6)	0,1 (d = 0,8)	0,05
Piirtoheitin I	9,8 (d = 0,4)	2,3 (d = 0,6)	0,8 (d = 0,8)	0,3 (d = 1,0)	1,6
Piirtoheitin II	5,7 (d = 0,4)	1,3 (d = 0,6)	0,5 (d = 0,8)	0,2 (d = 1,0)	2,0
Piirtoheitin III	2,5 (d = 0,4)	0,7 (d = 0,6)	0,3 (d = 0,8)	0,2 (d = 1,0)	1,3
Kahvinkeitin I	0,9 (d = 0,1)	0,2 (d = 0,2)	0,1 (d = 0,3)	0,08 (d = 0,4)	5,3
Kahvinkeitin II	3,7 (d = 0,1)	0,5 (d = 0,2)	0,2 (d = 0,3)	0,08 (d = 0,4)	3,0
Kopiokone	6,7 (d = 0,25)	0,7 (d = 0,4)	0,2 (d = 0,6)	0,1 (d = 0,8)	2,3
Radio	3,1 (d = 0,2)	0,9 (d = 0,3)	0,3 (d = 0,4)	0,2 (d = 0,5)	0,02
Vedenkeitin	2,5 (d = 0,15)	0,3 (d = 0,3)	0,05 (d = 0,45)	0,04 (d = 0,6)	8,2
Leivänpaahdin	1,2 (d = 0,2)	0,3 (d = 0,3)	0,08 (d = 0,4)	0,04 (d = 0,5)	3,6

Kodin laitteiden ja myös kodin sähköjärjestelmän kentät ovat huomattavasti pienempiä kuin suosituksessa esitetyt arvot.

### 3 Yliaallot sähköverkossa

Nykyään entistä useampi laite vaatii virheetöntä jännitettä toimiakseen oikein. Toisaalta sähkön käytön ja automaation lisääntyessä on myös häiriöitä sähköverkkoon aiheuttavien laitteiden määrä kasvanut. Ristiriitaisesta tilanteesta onkin seurannut sähkön laadun merkityksen kasvu. Häiriöiden lisäksi jännite- ja virtayliaallot synnyttävät ympäristöönsä sähkö- ja magneettikenttiä, joiden summautuminen perustaajuisiin sähkö- ja magneettikenttiin saattaa aiheuttaa suositusarvojen ylittymisen. Virrassa olevat yliaallot näkyvät magneettikentän yliaaltoina ja jännitteen yliaallot sähkökentän yliaaltoina. Yliaaltolähteen ei kuitenkaan tarvitse olla esimerkiksi samassa huoneistossa, mistä kenttien yliaaltoja voidaan havaita, koska yliaallot siirtyvät sähköverkossa.

Yliaaltoja sähkönsiirto- ja jakeluverkkoon synnyttävät virran tai jännitteen suhteen epälineaariset virtapiirin osat. Tärkeimpiä yliaaltojen lähteitä ovat puolijohdetekniikalla toteutetut tehonohjauslaitteet niin sähkövoimansiirrossa, teollisuudessa kuin kodeissakin [1, 25]. Suuntaajien lisäksi yliaaltoja synnyttävät muun muassa purkauslamput, tietokoneet, ylikuormitetut muuntajat, valokaariuunit sekä generaattorit. Kotitalouksissa yliaaltoja aiheuttavat tietokoneiden ja loisteputkivalaisimien lisäksi kaikki laitteet, joihin on liitetty elektronia ohjauksia ja toimintoja. Koska elektroniikassa käytetään tasasähköä, verkosta tuleva vaihtosähkö tasasuunnataan laitteissa. Tehon syötössä käytetään kokoaalto- ja puoliallotosasuuntausta sekä hakkuriteholähteitä, kuten tietokoneissa. Erilaisista käytännöistä johtuen verkkoon saattaa syntyä kaikkia mahdollisia harmonisia ja epäharmonisia yliaaltokomponentteja. Tästä syystä uusien kodinkoneiden tuottamat yliaallot vaihtelevat paljon eri laitteiden välillä.

Sähkölaitteet on tavallisesti suunniteltu toimimaan sinimuotoisella jännitteellä. Kun jännitteen tai virran käyrämuoto poikkeaa tästä muodosta, voidaan sen ajatella olevan muodostunut useasta eritaajuisesta sinimuotoisesta signaalista, joiden taajuudet ovat perusaallon taajuuden monikertoja. Yliaallon järjestysluku  $n$  ilmaisee moninkoertainen yliaallon taajuus on perustaajuuteen (50 Hz) nähden. Yliaaltojen matemaattinen käsittely perustuu Fourier-analyysiin. Fourier-analyysin avulla jaksollinen funktio voidaan hajottaa sini- tai kosinimuotoisiin komponentteihinsa [4].

Yliaaltojen teoreettisen tarkastelun lähtökohtana voidaan pitää yksinkertaistettua yliaaltoteoriaa. Yksinkertaistettuun yliaaltoteoriaan kuuluu niin sanottu virtalähdejattelu. Virtalähdejattelun mukaan esimerkiksi puolijohdetekniikalla toteutettu suuntaaja syöttää verkkoon yliaaltovirtaa. Kun yliaaltovirrat kohtaavat verkossa taajuutensa perusteella määräytyvän yliaaltoimpedanssin, aiheutuu tietty jännitehäviö. Näin syntyvät jännitteen yliaallot, jotka summautuessaan perusaaltoon aiheuttavat jännitteen käyrämuodon vääristymisen eli säröytymisen. Jännitteen yliaallon järjestysluku  $n$  on siis sama kuin virtayliaallon, joka sen on aiheuttanut, mutta amplitudi riippuu virtayliaallon suuruuden lisäksi yliaaltoimpedanssista. [1]

Kun verkossa on paljon yliaaltolähteitä, on yliaaltojen summautuminen vaikea laskea tarkasti. Käytännössä monesta eri lähteestä tulevien eri taajuuksien ja vaiheisten yliaaltojen summa on pienempi kuin yksittäisten yliaaltojen itseisarvojen summa. Tämä johtuu siitä, että yliaaltojen derivaattojen maksimit eivät esiinny yhtäaikaisesti ja näin ollen yliaallot voivat jopa kumota toisiaan [10]. Haluttaessa määrittää eri yliaaltokomponenttien yhteisvaikutus, antaa kokonaisharmonisen särön THD laskenta yhtälön 3.1 mukaisesti hyvän kokonaiskuvan siitä, miten paljon käyrämuoto poikkeaa sinimuodosta.

$$THD = \sqrt{\sum_{k=2}^{40} (Y_k)^2} \quad (3.1)$$

missä  $Y_h$  on yksittäisen harmonisen yliaallon suhteellinen amplitudi verrattuna perustaajuiseen arvoon ja  $h$  on harmonisen yliaallon järjestysluku [25].

Sähköenergialiitto ry (SENER) on julkaissut vuonna 1999 ylärajat suurjänniteverkon (vähintään 110 kV) harmonisille yliaalloille [22]. Arvot perustuvat CIGRE:n (International Council on Large Electric Systems) suositukseen vuodelta 1981. Yliaallot on jaettu taajuuksien esiintymisen mukaan kolmeen eri ryhmään. Ryhmät ovat parittomat kolmella jaottomat, parittomat kolmella jaolliset ja parilliset yliaallot. Peruseriaatteena on, että niitä yliaaltoja, joita verkossa esiintyy eniten myös sallitaan eniten.

Parittomat kolmella jaottomat yliaallot ovat pääasiassa suuntaajien aiheuttamia. Suuntaajista aiheutuvien yliaaltojen järjestysluku  $n$  voidaan laskea yhtälöllä 3.2.

$$n = k \cdot p \pm 1 \quad (3.2)$$

missä  $k$  on jokin kokonaisluku ja  
 $p$  on suuntaajan pulssiluku (tyypillisesti 6 tai 12).

Parittomista kolmella jaollisista yliaalloista kolmannelle yliaallolle sallitaan suurimmat arvot. Kolmatta yliaaltoa tuottavat muun muassa generaattorit sekä 1-vaihekuormitukset kuten tietokoneet ja purkauslamput.

Suomen päävoimansiirtoverkosta vastaava ja kantaverkkopalveluita myyvä yhtiö Fingrid Oyj takaa jännitteen harmonisille yliaalloille CIGRE:n suosituksen arvoja pienemmät arvot. Näiden katsotaan täyttyvän, kun viikon mittausjakson aikana 10 minuutin keskiarvot ovat 99 % ajasta suosituksen arvoja pienemmät. Fingrid Oyj:n verkkoon liittyvän asiakkaan sallitaan syöttää sinne korkeintaan CIGRE:n suosituksen mukaista yliaaltovirtaa. [28]

Yliaaltojen haittavaikutuksia voidaan vähentää ainakin kolmella eri tavalla. Ensinnäkin kiskostoon voidaan liittää suodatin, joka muodostuu kuristimen ja kondensaattorin sarjakytkennästä. Suodatin muodostaa hyvin pienen impedanssin halutulle yliaallolle, jolloin kyseinen yliaaltovirta tulee pääosin "imetyksi" suodattimeen. Toinen vaihtoehto vähentää yliaaltoja on käyttää 6-pulssisuuntaajan sijaan 12-pulssisuuntaajaa. Kuten yhtälöstä 3.2 havaitaan, eliminoidaan näin joukko matalataajuisia yliaaltoja. Kolmanneksi suuntaajakuormat voidaan erottaa muuntajalla muusta sähköjälkelusta. Tällä tavoin estetään säröytyneen toisiojännitteen haittavaikutukset muihin kuormituksiin.

#### 4 Laajakaistaisten kenttien mittaaminen

Laajakaistaisten kenttien mittaamiseen käytettiin tässä tutkimuksessa kaupallisia mittareita. Mittaamiseen on olemassa kaksi erilaista mittaamenetelmää, STM:n asetuksen mukainen painotetun kentän menetelmä ja EU:n neuvoston suosituksen mukainen yksittäisten harmonisten kenttien menetelmä. Kumpaankin menetelmää käytettiin altistumisen määrittämiseen.

Mittauksiin ei kuitenkaan ollut saatavissa sellaista kaupallista mittaria, joka soveltuisi mittauksiin täysin ja mittaisi samanaikaisesti usealle eritaajuiselle sähkö- ja magneettikentälle altistumista. Tästä syystä mittareilla ei voinut suoraan mitata laajakaistaisille kentille altistumista. Kaikissa kaupallisissa mittareissa ei myöskään ole analogista ulostuloa, josta saatavaa signaalia voitaisiin käsitellä mittauksen vaatimalla tavalla. Tästä syystä mittauksiin soveltuvan mittarin valinta oli tärkeä osa laajakaistaisten kenttien mittausmenetelmän kehittämistä.

#### 4.1 Painotetun kentän mittausmenetelmän periaate

Uuden STM:n asetuksen mukainen painotetun kentän mittausmenetelmä on Säteilyturvakeskuksen kehittämä. Asetuksen mukaan laajakaistaisiin kenttiin voidaan soveltaa aiemmin tässä raportissa esitetyn yhtälön 1.6 mukaista vaatimusta [23, 24]. Kentän suositusarvo on kuvattu STM:n asetuksessa taajuusriippuvina taulukkomuotoisina arvoina, joita voidaan likimääräisesti kuvata yhtälöllä 4.1.

$$A_{L,n} = K \frac{\sqrt{1 + (f_n / f_c)^2}}{f_n / f_c} \quad (4.1)$$

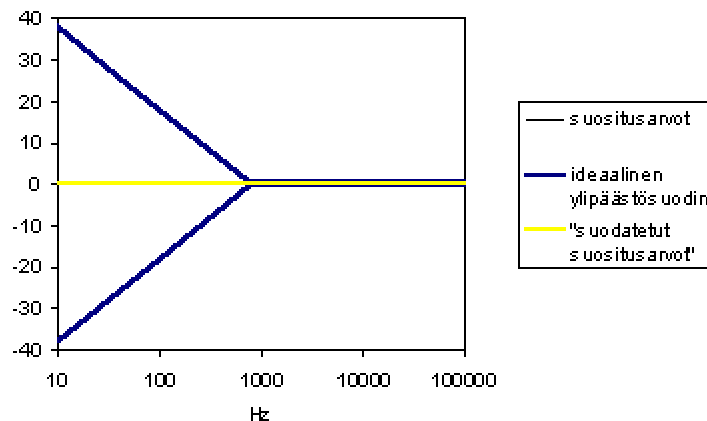
missä  $f_c$  on rajataajuus, jonka alapuolella suositusarvo kasvaa lineaarisesti taajuuden funktiona, sähkökentälle  $f_c = 3000$  Hz ja magneettikentälle  $f_c = 800$  Hz, ja

$K$  on sähkökentän voimakkuuden ( $K=87$  V/m), magneettikentän voimakkuuden ( $K=5$  A/m) ja magneettivuontiheyden ( $K=6,25$   $\mu$ T) suositusarvo paljon rajataajuutta  $f_c$  suuremmilla taajuuksilla.

Painotetun kentän mittausmenetelmä perustuu painotetun kentän määrittämiseen suodattamalla kenttä ylipäästösuodattimella. Painotettu kentän arvo eli suodatetun signaalin huippuarvo määritetään 10 minuutin aikajaksolla. Painotettu kentän arvo ei saa ylittää yhtälössä 4.1 esitettyä vakion  $K$  huippuarvoa 123 V/m sähkökentälle eikä huippuarvoa 8,875  $\mu$ T tai 7,1 A/m

magneettikentälle. Painotetut huippuarvot on saatu kertomalla tehollisarvot luvulla  $\sqrt{2}$ .

Ylipäästösuodattimen käytön periaatetta magneettikentän tapauksessa selventää seuraava kuva 4.1, jossa samalla mitta-asteikolla esitetään suositusarvo, suodattimen taajuusvaste ja suositusarvoa vastaava suodatettu signaali.



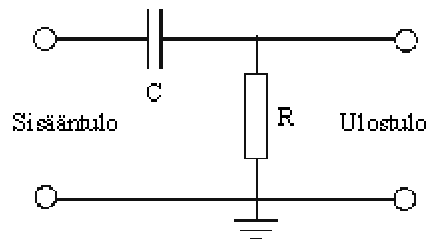
*Kuva 4.1.* Ylipäästösuodattimen käytön periaate magneettikentälle.

*Figure 4.1.* Basics for the use of high-pass filter for magnetic field.

Kuvassa esitetty suositusarvon määrittämisessä vertailutasona on käytetty suositusarvon tehollisarvoa yli 800 Hz taajuiselle magneettivuon tiheydelle,  $6,25 \mu\text{T}$ . Tästä syystä suodatettu suositusarvon suuruinen magneettivuon tiheys vastaa kaikilla taajuuksilla 0 dB tasoa.

Käytännössä painotetun kentän menetelmän mittauksiin tarvitaan analogisella ulostulolla varustettu mittari, koska mitattua kentänvoimakkuutta täytyy suodattaa. Suodattamiseen tarvitaan puolestaan ylipäästösuodatin, jonka 3 dB:n rajataajuus on 3000 Hz sähkökenttää mitattaessa ja 800 Hz magneettikenttää mitattaessa. Tämän jälkeen suodatetusta signaalista täytyy laskea huippuarvojen keskiarvo 10 minuutin aikajaksolla asetuksen mukaisesti. Lopuksi koko laitteistolle tulee määrittää sille ominainen vertailuarvo esimerkiksi kalibrointilaitteiston avulla. Vertailuarvon avulla suodatetun signaalin huippuarvojen keskiarvosta lasketaan altistumissuhteen R arvo.

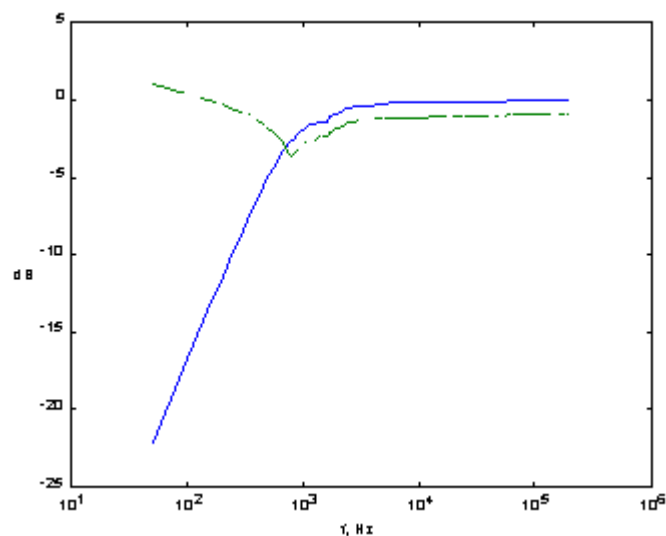
Mittareilta saatiin ulostulona analoginen jännitesignaali, joka syötettiin Tampereen teknillisen korkeakoulun (TTKK) protopajan valmistamille ylipäästösuodattimille. Kuvassa 4.2 on esitetty käytetyn yksiasteisen RC-suodattimen periaatekuva. Suodattimien 3 dB:n rajataajuudet ovat 3000 Hz sähkökentälle ja 800 Hz magneettikentälle.



*Kuva 4.2.* Yksiasteisen RC-ylipäästösuodattimen periaatekytkentäkaavio (sähkökentälle:  $R = 5,36 \text{ kW}$  ja  $C = 10 \text{ nF}$ , ja magneettikentälle:  $R = 4,22 \text{ kW}$  ja  $C = 47 \text{ nF}$ ).

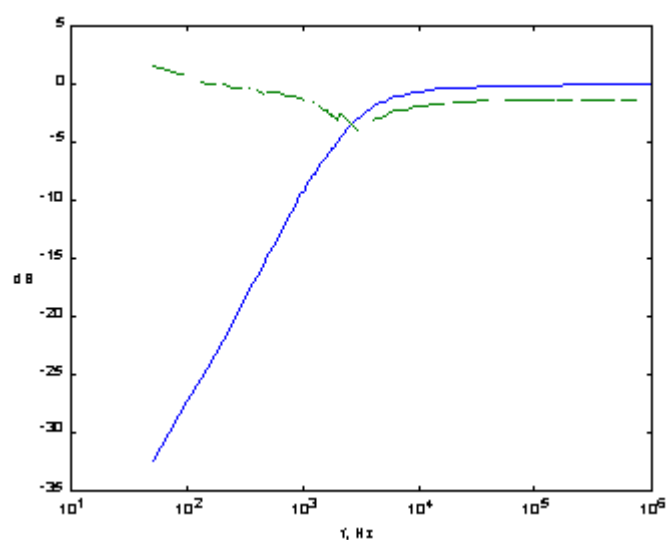
*Figure 4.2.* Basic circuit arrangement of the first degree RC high pass filter (electric field were:  $R = 5,36 \text{ kW}$  and  $C = 10 \text{ nF}$ , and for magnetic field:  $R = 4,22 \text{ kW}$  and  $C = 47 \text{ nF}$ ).

RC-suodattimen mitattu taajuusvaste sekä suodattimen taajuusvasteen ja STM:n asetuksen suositusarvojen tulo on esitetty kuvassa 4.3 magneettikentälle ja kuvassa 4.4 sähkökentälle.



*Kuva 4.3.* RC-suodattimen taajuusvaste (—) sekä suodattimen taajuusvasteen ja STM:n asetuksen altistumissuosituksen tulo (---) magneettikentälle.

*Figure 4.3.* Frequency response of the RC filter (—) and multiplication of the frequency response and the decree of Finnish Ministry of Social Affairs and Health for magnetic field (---).



*Kuva 4.4.* RC-suodattimen taajuusvaste (—) sekä suodattimen taajuusvasteen ja STM:n asetuksen altistumissuosituksen tulo (---) sähkökentälle.

*Figure 4.4.* Frequency response of the RC filter (—) and multiplication of the frequency response and the decree of Finnish Ministry of Social Affairs and Health for electric field (---).

Kuvista 4.3 ja 4.4 voidaan havaita suodattimen taajuusvasteen ja STM:n asetuksen altistumissuosituksen tulon alittavan hieman -3 dB tason sekä magneettikentän että sähkökentän

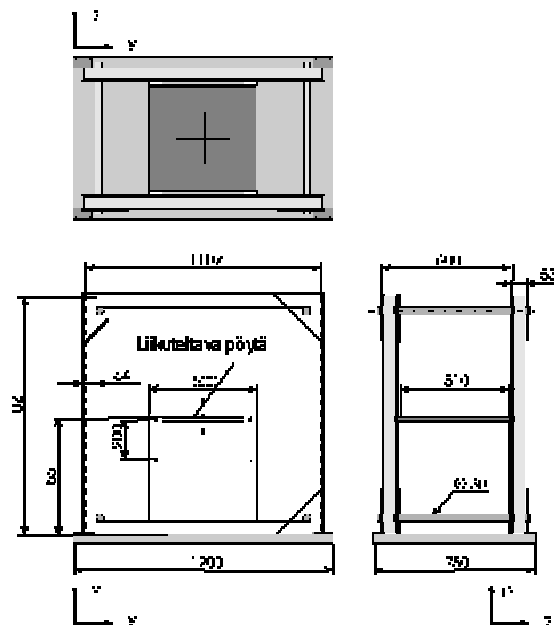
tapauksessa. Tämä johtuu siitä, että vaikka komponenttien arvoista lasketut suodattimien -3 dB:n rajataajuudet (magneetikentälle 802 Hz ja sähkökentälle 2969 Hz) ovat hyvin lähellä haluttuja, omaavat komponentit kuitenkin toleranssia, minkä seurauksena rajataajuudet eivät täysin vastaa teoreettisia arvoja. Tästä ei kuitenkaan aiheudu suurta virhettä mittaustuloksiin, koska taajuudet 800 Hz:n ympäristössä eivät ole missään erityisessä käytössä sähköverkossa.

#### 4.2 Painotetun kentän mittauksiin rakennettu laitteisto

Painotetun kentän mittausmenetelmää kokeiltiin aluksi sähkökentän osalta Holaday HI-3603 - ja Holaday HI-3604 -mittareilla [5, 6]. Näistä Holaday HI-3604 -mittarilla saadaan mitattua taajuudet 0 - 2 kHz ja Holaday HI-3603 -mittarilla taajuudet 2 - 100 kHz. Magneettikenttämittaukset voitiin suorittaa Holaday HI-3604 -mittarilla. Mittauksissa ylipäästösuolettimelta tuleva analoginen signaali tallennettiin National Instrumentsin mittauskortin [18] ja ohjelmiston [19] avulla kannettavan tietokoneen kovalevyille 50 kHz:n näytteenottotaajuudella 10 minuutin ajan. 50 kHz:n näytteenottotaajuus arvioitiin riittäväksi, sillä aineiston kokoa ei haluttu kasvattaa jatkokäsittelyn vaikeutumisen takia.

Kovalevyttä aineisto poltettiin CD-ROM -levylle jatkokäsittelyä varten. Jatkokäsittelyyn käytettiin TTKK:lla C++ -ohjelmointikielellä tehtyä ohjelmaa. MS-DOS -tilassa toimiva ohjelmisto laskee datasta puolijaksoittain (10 ms) esiintyvien huippuarvojen itseisarvojen aikakeskiarvon. Ohjelma tukee sekä yksi- että kaksikanavamittauksia.

Jotta mittaustaitteiston tuottamaa jännitteen keskiarvoa voitiin verrata STM:n asetuksen mukaiseen altistumissuhteen  $R$  arvoon 1, piti järjestelmän tuottamalle jännitteelle määrittää vertailuarvo. Vertailuarvo määritettiin TTKK:n Helmholtzin kelaan (kuva 4.5) ja Elgar SmartWave -teholähteeseen perustuvalla kalibrointilaitteistolla.



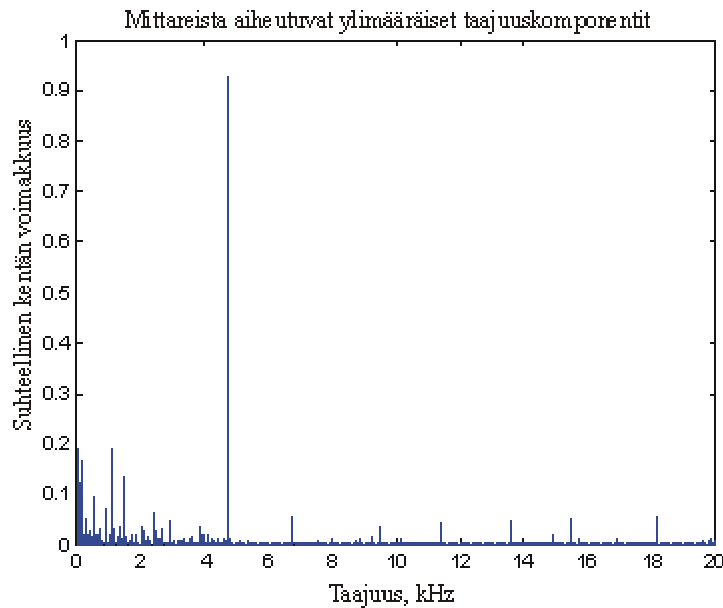
Kuva 4.5. Tekninen piirustus Helmholtzin kelasta.

Figure 4.5. Mechanical drawing from the Helmholtz coil.

Kalibrointilaitteistolla tuotettiin magneettikentän voimakkuuksia, jotka vastasivat STM:n asetuksen mukaisia yksittäisten harmonisten kenttien suositusarvoja. Näin tuotetun tunnetun magneettikentän avulla mitattiin tietokoneelle tulevan jännitteen suuruutta.

### 4.3 Kokeilumittaukset painotetun kentän menetelmällä

Kokeilumittausten tuloksien taajuuskuvaajia piirrettäessä havaittiin, että Holaday -mittareista aiheutuu ylimääräisiä kentänvoimakkuuksia epämääräisille taajuuksille. Kuva 4.6 kenttäsignaalin spektriä.



*Kuva 4.6.* Mittareista aiheutuvat ylimääräiset kentän arvot epämääräisillä taajuuksilla.

*Figure 4.6.* Extra field values in uncertain frequencies caused by meters.

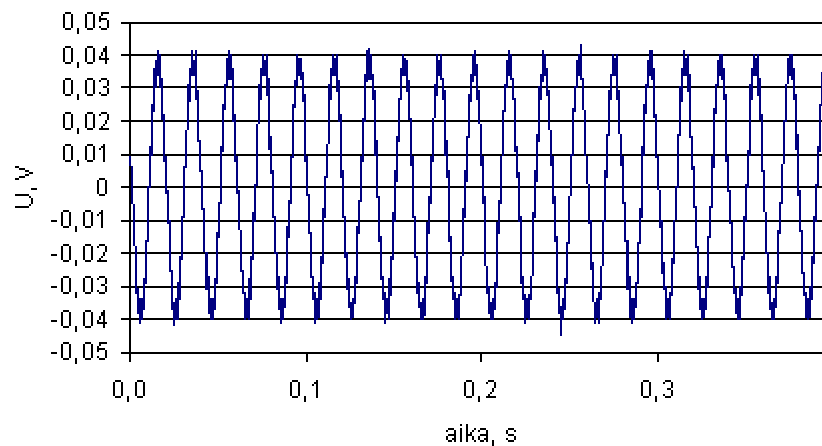
Riittävän laatutason varmistamiseksi mittausaineistoa ei haluttu muuntaa erilaisilla signaalinkäsittelyohjelmilla jälkeenkäin, joten sähkökentän osalta menetelmä jouduttiin toteamaan laatutasoltaan riittämättömäksi. Magneettikentän osalta kokeilumittauksia sen sijaan jatkettiin Narda 8532 -mittarilla (tarkkuus  $\pm 5\%$ , kalibroitu vuonna 1998), jonka ulostulossa ei havaittu kentästä poikkeavia epämääräisiä taajuuksia. Kyseinen mittari pystyy mittaamaan magneettivuon tiheyden taajuusalueelta 12 Hz - 50 kHz. Kuvassa 4.7 on esitetty koko mittauslaitteisto.



*Kuva 4.7.* Magneettikentän laajakaistamittauslaitteisto: kolmijalan yläpäähän kiinnitetty anturi, kolmijalan alaosaan kiinnitetty mittari, ylipäästösuodin ja kannettava tietokone.

*Figure 4.7.* Equipment for broadband magnetic field measurement: sensor attached upper end of the tripod, meter attached lower end of the tripod, high pass filter and desktop.

Seuraavassa kuvassa 4.8 on esitetty magneettikentän painotettua käyrämuotoa. Kuvaaja on piirretty Excel -ohjelmalla. TTKK:n laskentaohjelma on laskenut keskiarvoksi 0,04032.



*Kuva 4.8.* Magneettikentän painotettua käyrämuotoa.

*Figure 4.8.* Weighted magnetic field curve.

Kuvaajan perusteella voidaan havaita, että TTKK:n laskentaohjelmalla laskettu keskiarvon suuruus on melko tarkasti saman suuruinen kuin käyrästä lukemalla saadaan.

Kalibrointilaitteistolla tuotettiin STM:n asetuksen mukaisia yksittäisten harmonisten magneettikentän voimakkuuksien suositusarvoja. Vertailuarvoa määritettäessä mitattiin tunnetusta magneettikentästä tietokoneelle tulevan jännitteen suuruutta. Vertailuarvoksi valittiin suurin esiintynyt jännitearvo. Narda 8532 -mittarin kolmelle eri mittausaluevaihtoehdolle (max 20 mG,

max 200 mG ja max 2000 mG) määritettiin jokaiselle oma vertailuarvo. Esimerkiksi kuvassa 4.8 esitetty data on mitattu 200 mG:n alueella, jolla vertailuarvoksi tuli 0,49. Näin kyseisestä datasta saadaan määritettyä altistumissuhteen  $R$  arvoksi 0,08 ( $=0,04032/0,49$ ).

#### 4.4 Yksittäisten harmonisten kenttien mittausmenetelmä

Yksittäisten harmonisten kenttien mittausmenetelmän perustana on Euroopan unionin neuvoston suositus väestön sähkömagneettisille kentille (0 Hz - 300 GHz) altistumisen rajoittamiseksi [3]. Suosituksessa on kohta, jossa määritellään perusrajoitus yhtäaikaisesta altistumisesta usealle eritaajuiselle kentälle. Euroopan unionin neuvoston suosituksen mukaan laajakaistaisiin kenttiin voidaan soveltaa edellisissä luvuissa esitettyjen yhtälöiden 1.2 ja 1.3 mukaisia vaatimuksia [3]. Kuvassa 4.9 on esitetty esimerkki mittaustilanteesta sähköaseman kytkinkentällä. Mittauksissa käytettiin Wandel&Goltermann EFA-3 -mittaria (tarkkuus sähkökentälle  $\pm 5\%$  ja magneetikentälle  $\pm 8\%$ , kalibroitu vuonna 1998).



*Kuva 4.9.* Sähkökentän mittaus Wandel&Goltermann EFA-3 -mittarilla.

*Figure 4.9.* Electric field measurement with Wandel&Goltermann EFA-3 meter.

Mittarilla ei voinut mitata haluttuja taajuuksia samanaikaisesti. Tästä syystä sähkö- ja magneetikentät mitattiin 50 Hz:n välein taajuusalueella 50 - 2000 Hz. Ensiksi mitattiin kentän arvo 50 Hz:n taajuudella, sitten 100 Hz:n taajuudella ja näin jatkettiin 2000 Hz:n taajuuteen asti. Seuraavassa on havainnollistettu, kuinka altistumissuhde määritetään mitatuista arvoista, kun 50 Hz sähkökentän arvo on 32,22 V/m, 100 Hz 0,20 V/m, 150 Hz 0,10 V/m, 200 Hz 0,10 V/m ja 250 Hz 0,40 V/m. Sähkökentän harmonisia arvoja on mitattu 2000 Hz:iin asti, jolloin arvo on 0,21 V/m. Altistumissuhde lasketaan edellä mainituista arvoista yhtälön 4.3 mukaisesti.

$$R = \frac{32,22}{250 \cdot 10^3} + \frac{0,20}{250 \cdot 10^3} + \frac{0,10}{250 \cdot 10^3} + \frac{0,10}{250 \cdot 10^3} + \frac{0,40}{250 \cdot 10^3} + \dots + \frac{0,21}{250 \cdot 10^3} = 0,04 \quad (4.3)$$

Näin laskettu altistumissuhteen arvo ei saisi ylittää arvoa 1 luvussa 1 esitetyn yhtälön 1.2 mukaisesti [3]. Tässä esimerkissä altistumissuhteen arvo jääkin selvästi arvon 1 alle.

Erityisesti pieniä sähkökentän arvoja mitattaessa tuloksia vääristää kohina. Yksittäisiä taajuuskomponentteja mitattaessa EFA-3 -mittari antaa kaikille taajuuksille jonkin nollaa suuremman arvon. Mittarin käyttöohjeissa kohinataso oli määritelty tasoon 0,005 kV/m. Mitä enemmän eri taajuuskomponentteja mitataan, sitä enemmän kohinasta aiheutuvaa lisäystä summautuu myös altistumissuhteen arvoon. Jos kaikilla yksittäisillä taajuuskomponenteilla 50 Hz arvosta 2000 Hz arvoon mitattaisiin 0,0005 kV/m kentänarvo, vaikuttaa se altistumissuhteen summan arvoon 0,0265 verran.

## 5. Mittaustuloksia siirtojohtojen laajakaistaisille kentille altistumisesta

Aikaisemmissa TTKK:n mittauksissa on todettu, että erityisesti 400 kV siirtojohdoilla EU:n neuvoston suositusarvo 5 kV/m sähkökentälle saattaa ylittyä [21]. TTKK:n tutkimuksissa on tutkittu myös laajakaistaisia sähkö- ja magneettikenttiä. Siirtojohtojen aiheuttamat sähkökentät ylittävät todennäköisesti paikoin suositusarvot riippumatta siitä, käytetäänkö tarkastelussa vaatimusta laajakaistaisten kenttien altistumissuhteelle tai 50 Hz raja-arvoa 5 kV/m [21]. Tässä tutkimuksessa mitattiin yksi uusi pylväsväli.

### 5.1 TTKK:n aikaisempia mittaustuloksia 400 kV siirtojohdoilta

TTKK:n projektissa "Laajakaistaisten sähkö- ja magneettikenttien mittaaminen 400 kV voimajohtojen alla" on mitattu laajakaistaisia sähkö- ja magneettikenttiä 400 kV siirtojohtojen alla. Mittausmenetelmänä mittauksissa on käytetty raportissa: Laitteiden ja elinympäristön sähkö- ja magneettikenttien mittaaminen, kauppa- ja teollisuusministeriön tutkimuksia ja raportteja, 9/2000, esitettyä mittausmenetelmää [16]. Seuraavassa taulukossa 5.1. on esitetty tämän projektin mittaustuloksia [21].

*Taulukko 5.1.* Aikaisempia mittaustuloksia laajakaistaista sähkö- ja magneettikentistä 400 kV voimajohtojen alla (T on Tampereen alue, H on Helsingin alue, E50 Hz on perustaaajuinen sähkökenttä, B50 Hz on perustaaajuinen magneettikenttä). [21]

*Table 5.1.* Measurement results from earlier study for broadband electric and magnetic fields below 400 kV power lines (T is Tampere area, H is Helsinki area, E50 Hz is nominal frequency electric field, B50 Hz is nominal frequency magnetic flux density). [21]

Pyväsväli	U, kV	I, A	E50 Hz kV/m	Väestön altistussähkökentälle	B50 Hz $\mu$ T	Väestön altistusmagneettikentälle
T4	410	244	3,37	0,71	4,10	0,06
T3	409	368	4,87	1,04	4,52	0,05
T7	406	305	5,36	1,14	4,44	0,05
T5	408	161	5,58	1,18	1,49	0,02
T14	406	334	3,04	0,63	5,16	0,06
T15	410	431	1,33	0,28	3,69	0,04
T16	411	198	4,89	1,04	2,11	0,03

T17	411	198	4,30	0,91	2,25	0,03
T18	410	318	1,84	0,38	2,80	0,03
T19	411	342	4,34	0,91	4,99	0,06
T20	410	366	3,93	0,83	5,58	0,06
T21	414	79	3,43	0,72	2,83	0,04
T22	413	153	4,63	0,98	3,22	0,04
T23	411	626	2,68	0,57	3,43	0,04
T24	411	105	5,68	1,18	2,80	0,04
T25	414	629	5,31	1,12	8,21	0,09
H19	408	391	3,10	0,65	4,02	0,05
T26	413	596	5,06	1,06	11,36	0,12
T27	412	676	3,88	0,83	6,07	0,07
T28	409	113	2,20	0,46	0,80	0,01
T24u	411	192	5,46	1,13	2,56	0,03

## 5.2 Voimajohdon LM-1 laajakaistamittaukset

Fingrid Oyj:n toivomuksesta mittauskohteeksi valittiin pylväsväli, jossa on kaksi portaalijohtoa rinnakkain. Tehtyjen laskelmien perusteella sähkökentän arvojen todettiin olevan noin 10 kV/m.

Mittaukset suoritettiin heinäkuussa 2002 iltapäivällä kello 13.10-16.20. Mittausmenetelmänä mittauksessa käytettiin raportissa: Laitteiden ja elinympäristön sähkö- ja magneettikenttien mittaaminen. Kauppa- ja teollisuusministeriön tutkimuksia ja raportteja. 9/2000, [16] esitettyä mittausmenetelmää. Johtojen jännitteet olivat 410 kV ja 411 kV sekä virrat 405 A ja 99 A. Suhteelliseksi ilmankosteudeksi mitattiin 40 % ja lämpötilaksi 32 °C. Seuraavassa kuvassa 5.1 on esitetty valokuva voimajohdoista. Liitteessä 1 on esitetty piirros pylväsvälin maastosta, vaihejohtimien sijoittelu sekä mittauspisteet.



*Kuva 5.1.* Valokuva 400 kV voimajohdon LM-1 portaalipylväistä.

*Figure 5.1.* Photograph from the 400 kV horizontal lines LM-1.

Aluksi pylväsvälillä tehtiin johdon poikki menevällä tiellä sähkö- ja magneettikentän perusmittaus kenttien maksimikohtien löytämiseksi. Mittauksen suurin magneettivuon tiheyden arvo  $9,46 \mu\text{T}$  mitattiin tien vierestä ja siitä paikasta tehtiin magneettikentälle laajakaistamittaukset. Liitteessä 1 sivulla 2(2) on esitetty voimajohdon LM-1 magneettivuon tiheyden taajuuskomponentit.

Liitteessä 1 esitetystä magneettivuon tiheyden taajuuskomponenttikuvaajasta voidaan havaita, että magneettikentässä ei esiintynyt selvästi kohinasta erottuvia yliaaltotaajuuksia. Magneettivuon tiheyden tehollisarvo oli  $9,43 \mu\text{T}$ . STM:n asetuksen mukaisesti painotetun kentän mittausmenetelmällä määritetty altistumissuhde oli 0,08 sekä samasta pisteestä EU:n neuvoston suosituksen mukaisesti yksittäisten harmonisten kenttien menetelmällä lasketut altistumissuhteet olivat 0,16 (taajuudet on laskettu 50 Hz:n välein 2000 Hz:iin saakka) ja 0,10 (taajuudet on laskettu 100 Hz:n välein 650 Hz:iin saakka). Altistumissuhteet eivät saisi ylittää arvoa yksi. Altistumissuhde, jossa taajuuksia on laskettu 50 Hz:n välein 2000 Hz:iin saakka, on suurempi lähinnä kohinasta johtuen.

Suurin sähkökentän arvo  $8,40 \text{ kV/m}$  mitattiin voimajohtojen ali kulkevan tien vierestä ja siitä paikasta tehtiin sähkökentälle laajakaistamittaukset. Liitteessä 1 on esitetty voimajohdon LM-1 sähkökentän voimakkuuden taajuuskomponentit.

Liitteessä 1 esitetystä sähkökentän voimakkuuden taajuuskomponenttikuvaajasta voidaan havaita, että sähkökentässä ei esiintynyt kohinasta erottuvia yliaaltotaajuuksia. Sähkökentän voimakkuuden tehollisarvo oli  $8,40 \text{ kV/m}$ . Taajuuskomponenteista EU:n neuvoston suosituksen mukaisesti yksittäisten harmonisten kenttien menetelmällä lasketut altistumissuhteet olivat 2,24 (taajuudet on laskettu 50 Hz:n välein 2000 Hz:iin saakka) ja 1,80 (taajuudet on laskettu 100 Hz:n välein 650 Hz:iin saakka). Altistumissuhteet eivät saisi ylittää arvoa yksi.

### **5.3 Yhteenvedo voimajohdon LM-1 laajakaistamittauksista**

Kaikkien TTKK:ssa tehtyjen mittausten perusteella voidaan havaita, että sähkökentälle EU:n neuvoston suosituksen mukaisesti laskettu väestöaltistuksen altistumissuhde ylittää suositusarvon yksi riippumatta siitä, tarkastellaanko yliaaltokomponentteja 650 Hz:iin vai 2000 Hz:iin saakka. STM:n asetuksessa sallitaan kuitenkin 50 Hz sähkökentille kolminkertainen EU:n neuvoston suositusarvon ylittyminen, jos altistuminen ei kestä merkittävää aikaa. Näin ollen vaikka mittauksessa EU:n neuvoston suositusarvo ylittyi, ei STM:n asetuksen suositusarvoa ylitetty. Magneettikentän tapauksessa STM:n asetuksen mukaisesti määritetty ja EU:n neuvoston suosituksen mukaisesti lasketut altistumissuhteet alittavat selvästi suositusarvon yksi.

Myös aikaisemmassa tutkimuksessa päädyttiin saman suuntaisiin tuloksiin [21]. Näiden 400 kV siirtojohtojen tutkimusten yhteenvedona voidaankin todeta, että 400 kV siirtojohtoilla ei ole kenttien vähentämistarpeita, eikä laajakaistaisuus aiheuta suuria muutoksia suositusarvojen ylittymiseen.

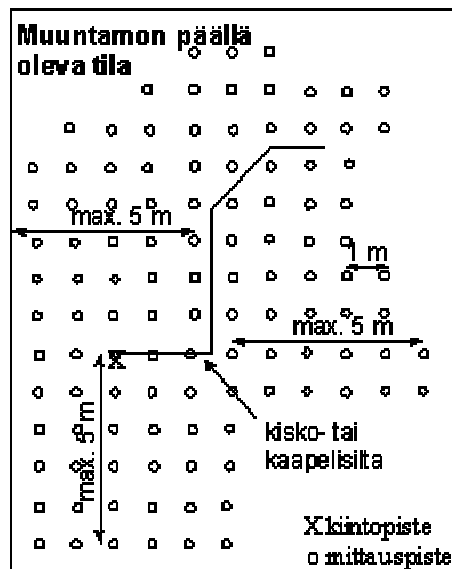
## **6 Mittaustuloksia muuntamoiden yläpuolisissa tiloissa laajakaistaisille kentille altistumisesta**

Aikaisemmissa tutkimuksissa on muuntamoiden yläpuolisten tilojen magneettikenttien todettu ylittävän muiden asuin ympäristöjen kenttätasot [17]. Sähkökenttien on todettu olevan hyvin pieniä, koska muuntamoiden ja niiden yläpuolisten tilojen väliset rakenteet vaimentavat tehokkaasti sähkökenttiä.

Aikaisemmissa tutkimuksissa on mitattu kentänvoimakkuuksien tehollisarvoja. Tässä tutkimuksessa selvitettiin erityisesti laajakaistaisia kenttiä.

## 6.1 Muuntamon yläpuolisen tilan kenttien mittaaminen

Mittaukset muuntamoiden yläpuolisissa tiloissa tehtiin tässä hankkeessa mittausten menetelmällä, joka on esitetty TTKK:n aikaisemmassa raportissa [16,17]. Muuntamon yläpuoliseen tilaan tehtiin ruudukko. Mittaukset tehtiin ruudukosta yhden metrin mittausvälillä. Ruudukko oli kooltaan sellainen, että se peitti koko alapuolisen muuntajan ja pienjännitekojeiston välisen yhteyden. Joissakin tiloissa seinät rajoittivat ruudukon kokoa. Ruudukon kokoa määritteli se, miten pitkälle katsottiin aiheelliseksi mitata. Ruudukon kokoa määritettäessä voitiin myös tehdä katselmusmittaus, jossa käveltiin mittarin kanssa mitattavassa tilassa ja seurattiin kentän tasoa. Tämän mittauksen tulosten avulla saatiin selville, miten suureksi ruudukko kannatti määrittää. Esimerkki ruudukosta on esitetty kuvassa 6.1.



Kuva 6.1. Esimerkki mittauspisteistä muuntamon yläpuolisessa tilassa (x on kiintopiste, o on mittauspiste). [16]

Figure 6.1. Example for the measurement points in a space above indoor distribution substation (x is reference point, o is measurement point) [16]

Kun ruudukko saatiin määritetyksi mitattavaan tilaan, mitattiin muuntajan ja pääkeskuksen välisen pienjännitekiskon tai -kaapelin virta ja sen spektri. Spektri tallennettiin kannettavan tietokoneen muistiin, jotta voitiin jälkikäteen vertailla magneettikentässä esiintyviä yliaaltoja virran yliaaltoihin. Virrasta pyrittiin mittaamaan tehollisarvo jokaisesta vaihejohtimesta ja nollajohtimesta.

Kentät voidaan mitata määritetyn ruudukon pisteistä 0 m, 1 m ja 2 m korkeudella, mutta yleensä kaksi mittauskorkeutta 0 m ja 1 m ovat riittävät. Tässä hankkeessa sähkö- ja magneettikentän spektri mitattiin pisteestä, jossa oli suurin magneettikentän arvo. Laajakaistamittaukset suoritettiin sähkö- ja magneettikentälle luvussa 4.2 esitetyllä yksittäisten harmonisten kenttien mittausten menetelmällä ja magneettikentälle lisäksi luvussa 4.1 esitetyllä painotetun kentän

menetelmällä. Spektrin mittauspäikka ja -korkeus merkittiin mittauspöytäkirjaan. Mittaus voidaan tehdä esimerkiksi 1 m korkeudelta. Kun magneettikenttä ja sen spektri oli saatu mitattua, mitattiin muuntajan ja pääkeskuksen välisen pienjännitekiskon tai -kaapelin virta ja sen spektri uudestaan.

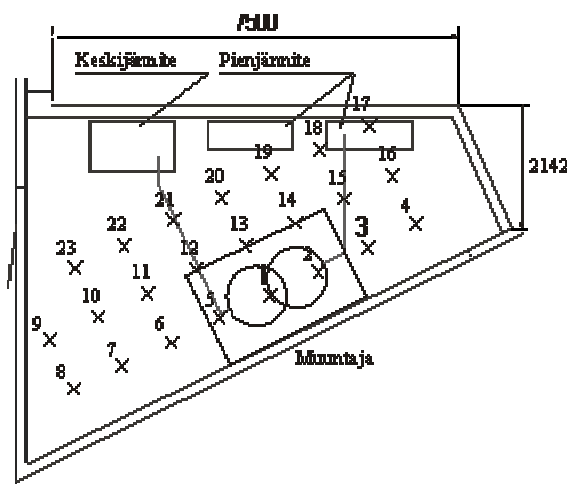
## 6.2 Muuntamon yläpuolisen toimistotilan LM-2 laajakaistamittaukset

Rakenteilla olevan toimistorakennuksen kentänvoimakkuudet haluttiin kartoittaa muuntamon (kuivamuuntaja 500 kVA) yläpuolisesta tilasta mahdollisia kentän pienentämistoimenpiteitä varten. Tila oli mittausten aikana tyhjillään. Mittauksen aikana toukokuussa 2002 kello 9.30-11.30 vaihevirtojen keskiarvo oli hyvin pieni 165 A, sillä rakennuksen ilmastointi ja satunnaisesti käytetyt työkoneet olivat ainoat käytössä olleet kuormitukset. Tarkempia tietoja virrasta on esitetty liitteessä 2. Rakennuksessa oli viisijohdinjärjestelmä. Seuraavissa kuvissa 6.2 ja 6.3 on esitetty kuva muuntamon yläpuolisesta tilasta ja käytetyt mittauspisteet.



*Kuva 6.2.* Valokuva muuntamon LM-2 yläpuolisesta tilasta.

*Figure 6.2.* Photograph in the space above indoor distribution substation LM-2.

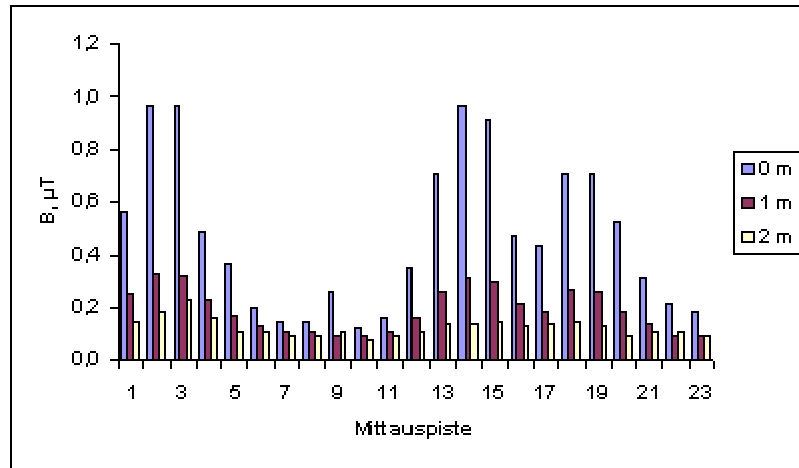


*Kuva 6.3.* Mittauspistepiirros muuntamon LM-2 yläpuolisesta tilasta.

*Figure 6.3.* Location of the measurement points in the space above indoor distribution

substation LM-2.

Kuvasta 6.3 havaitaan, että mittausten kiintopisteeksi on valittu muuntajan kannelta keskimäinen pienjännitteen vaihe. Seuraavassa kuvassa 6.4 on esitetty magneettivuon tiheyden mittaustulokset lattialta sekä 1 ja 2 metrin korkeudelta. Liitteessä 2 on esitetty pisteestä 2 yhden metrin korkeudelta mitatut magneettivuon tiheyden taajuuskomponentit.



*Kuva 6.4.* Muuntamon LM-2 yläpuolisessa tilassa mitattujen magneettivuon tiheyksien arvot lattialta sekä yhden ja kahden metrin korkeudelta.

*Figure 6.4.* Magnetic flux densities measured from the floor of the space above indoor distribution substation LM-2 and at the heights of 1 and 2 meters.

Liitteessä 2 esitetystä magneettivuon tiheyden taajuuskomponenttikuvaajasta voidaan havaita, että suurimmat magneettikentän taajuuskomponentit perustaajuisen kentän (50 Hz) lisäksi ovat 3. (150 Hz), 5. (250Hz) ja 7. (350 Hz) yliaalto. Kolmatta yliaaltoa aiheuttavat loistoputkivalaisimet sekä hakkuriteholähteet. Viidettä ja seitsemättä yliaaltoa aiheuttavat puolestaan 6-pulssi tasasuuntaajat. Myös kohinan vaikutus mittaustuloksiin on havaittavissa.

Magneettivuon tiheyden tehollisarvo oli  $0,32 \mu\text{T}$ . STM:n asetuksen mukaisesti painotetun kentän mittausten menetelmällä määritetty altistumissuhde oli 0,01 sekä samasta pisteestä EU:n neuvoston suosituksen mukaisesti yksittäisten harmonisten kenttien menetelmällä lasketut altistumissuhteet olivat 0,16 (taajuudet on laskettu 50 Hz:n välein 2000 Hz:iin saakka) ja 0,10 (taajuudet on laskettu 100 Hz:n välein 650 Hz:iin saakka). Altistumissuhteet eivät saisi ylittää arvoa yksi.

Liitteessä 2 on esitetty pisteestä 2 yhden metrin korkeudelta mitatut sähkökentän voimakkuuden taajuuskomponentit.

Sähkökentän voimakkuuden tehollisarvo oli  $0,0033 \text{ kV/m}$ . Liitteessä 2 esitetystä sähkökentän voimakkuuden taajuuskomponenttikuvaajasta voidaan havaita, että 1100 Hz taajuuskomponentin mittaustulos epäonnistunut. Tästä ei kuitenkaan aiheudu virhettä tuloksiin, sillä kentän arvo olisi lähes varmasti pelkkää mittauskohinaa. Taajuuskomponenteista EU:n neuvoston suosituksen mukaisesti yksittäisten harmonisten kenttien menetelmällä lasketut altistumissuhteet olivat 0,03 (taajuudet on laskettu 50 Hz:n välein 2000 Hz:iin saakka) ja likimain nolla (taajuudet on laskettu 100 Hz:n välein

650 Hz:iin saakka). Altistumissuhteet eivät saisi ylittää arvoa yksi. Altistumissuhde, jossa taajuuksia on laskettu 50 Hz:n välein 2000 Hz:iin saakka, on suurempi kohinasta johtuen.

Tulosten perusteella voidaan sanoa sähkökentän olevan tämän muuntamon yläpuolisessa tilassa merkityksetön. Myös magneettikentälle STM:n asetuksen mukaisesti määritetty ja EU:n neuvoston suosituksen mukaisesti lasketut altistumissuhteet jäävät varsin pieniksi, koska mittauksen aikana vaihevirratt olivat pieniä. Vaikka virrat olisivat suurempiakin, jäisivät kentät varsin selvästi alle suositusarvojen, joten siinä mielessä kenttien vähentämistarpeita ei tässä tapauksessa ole. Jos kuitenkin tiedetään, että yläpuoliseen tilaan tullaan sijoittamaan mahdollisesti kentille herkkiä näyttöpäätteitä, voi kenttien pienentäminen olla tarpeellista. Seuraavassa mittauksessa LM-3 esitetään mittaustuloksia kenttien vähentämistoimenpiteiden jälkeen.

### 6.3 Muuntamon yläpuolisen toimistotilan LM-3 laajakaistamittaukset

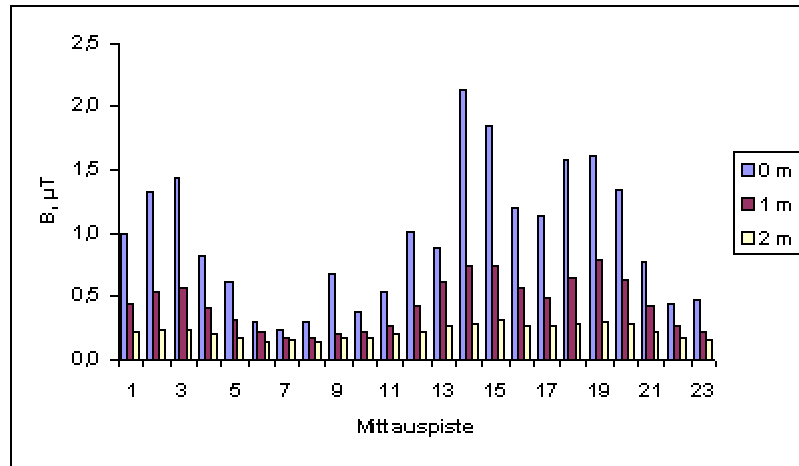
Mittaus tehtiin kesäkuussa 2002 saman muuntamon yläpuolelta samoista pisteistä kuin muuntamon yläpuolisen toimistotilan LM-2 mittaus kenttien vähentämiseksi tehtyjen töiden jälkeen. Tilaa ei vielä ole otettu toimistokäyttöön. Rakennuksen kuormitusvirrat olivat työkoneista ja ilmastoinnista johtuvia. Mittauksen aikana kello 9.30-11.30 vaihevirtojen keskiarvo oli 427 A. Tarkempia tietoja virrasta on esitetty liitteessä 3. Rakennuksessa oli viisijohdinjärjestelmä. Mittaus tehtiin sen jälkeen kun muuntamotilaan oli pienjännitepuolelle asennettu 5 mm alumiininen suojakouru kaapelisillan taakse vähentämään yläpuolelle aiheutuvia kenttiä. Seuraavassa kuvassa 6.5 on esitetty kuva muuntamon yläpuolisesta tilasta.



*Kuva 6.5.* Valokuva muuntamon LM-3 yläpuolisesta tilasta.

*Figure 6.5.* Photograph in the space above indoor distribution substation LM-3.

Kuvassa 6.6 on esitetty mittaustulokset lattialta sekä 1 ja 2 metrin korkeudelta.



*Kuva 6.6.* Muuntamon LM-3 yläpuolisessa tilassa mitattujen magneettivuon tiheyksien arvot lattialta sekä yhden ja kahden metrin korkeudelta.

*Figure 6.6.* Magnetic flux densities measured from the floor of the space above indoor distribution substation LM-3 and at the heights of 1 and 2 meters.

Kuvasta 6.6 havaitaan kentän maksimikohdan siirtyneen suojalevytyksen jälkeen. Liitteessä 3 on esitetty pisteestä 19 yhden metrin korkeudelta mitatut kentän taajuuskomponentit.

Liitteessä 3 esitetystä magneettivuon tiheyden taajuuskomponenttikuvaajasta voidaan havaita, että suurimmat toimistotilassa LM-3 mitatut magneettikentän taajuuskomponentit perustaajuisen kentän (50 Hz) lisäksi ovat 3. (150 Hz), 5. (250 Hz), 7. (350 Hz), 8. (400 Hz), 9. (450 Hz), 10. (500 Hz) yliaalto. Kyseisiä yliaaltoja aiheuttavat muun muassa loisteputkivalaisimet, hakkuriteholähteet ja elektroniikassa käytetyt tasasuuntaajat. 400 Hz ja 500 Hz arvoissa saattaa olla kyse myös kohinasta johtuvasta päästökaistan leviämisestä, eli 450 Hz arvo näkyy myös kyseisillä taajuuksilla.

Magneettivuon tiheyden tehollisarvo oli  $0,75 \mu\text{T}$ . STM:n asetuksen mukaisesti painotetun kentän mittausten menetelmällä määritetty altistumissuhde oli 0,01 sekä samasta pisteestä EU:n neuvoston suosituksen mukaisesti yksittäisten harmonisten kenttien menetelmällä lasketut altistumissuhteet olivat 0,07 (taajuudet on laskettu 50 Hz:n välein 2000 Hz:iin saakka) ja 0,02 (taajuudet on laskettu 100 Hz:n välein 650 Hz:iin saakka). Altistumissuhteet eivät saisi ylittää arvoa yksi.

Liitteessä 3 on esitetty pisteestä 19 yhden metrin korkeudelta mitatut sähkökentän voimakkuuden taajuuskomponentit.

Sähkökentän voimakkuuden tehollisarvo oli  $0,0022 \text{ kV/m}$ . Taajuuskomponenteista EU:n neuvoston suosituksen mukaisesti yksittäisten harmonisten kenttien menetelmällä lasketut altistumissuhteet olivat 0,03 (taajuudet on laskettu 50 Hz:n välein 2000 Hz:iin saakka) ja likimain nolla (taajuudet on laskettu 100 Hz:n välein 650 Hz:iin saakka). Altistumissuhteet eivät saisi ylittää arvoa yksi. Altistumissuhde, jossa taajuuksia on laskettu 2000 Hz:iin saakka, on suurempi kohinasta johtuen.

Verrattaessa tässä mittauksessa yhden metrin korkeudelta mitattuja arvoja (kuva 6.10) edellisen mittauksen arvoihin (kuva 6.8) havaitaan maksimikohdan siirtyneen mittauspisteestä 2 pisteeseen 19. Tämä johtuu muuntamotilaan kenttien vähentämiseksi tehdyistä toimenpiteistä.

Myös tässä mittauksessa voidaan sanoa sähkökentän olevan merkityksetön. Lisäksi voidaan todeta magneettikentälle STM:n asetuksen mukaisesti määritellyn ja EU:n neuvoston suosituksen mukaisesti laskettujen altistumissuhteiden alittavan selvästi suositusarvon yksi.

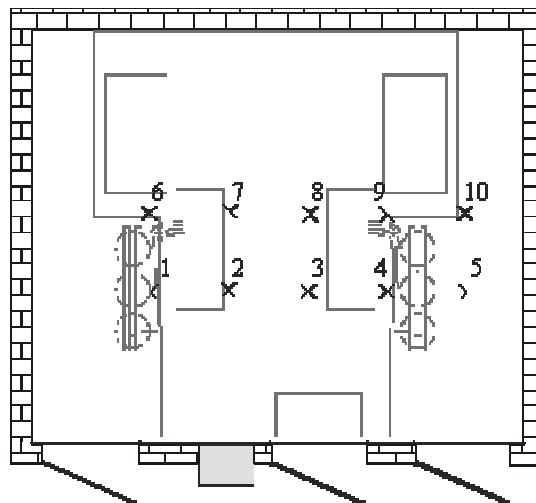
#### 6.4 Muuntamon yläpuolisen toimistotilan LM-4 laajakaistamittaukset

Kahden kuivamuuntajan (2\*1000 kVA) muuntamo sijaitsi vanhassa teollisuusrakennuksessa, jota saneerattiin toimistokäyttöön. Osa rakennuksesta oli mittausten aikaan käytössä ja osa työn alla. Kuormitusvirrat olivat sekä toimistokuormasta että myös työkonesta johtuvia. Rakennuksessa oli viisijohdinjärjestelmä. Mittaus tehtiin sähkölaitoksen kanssa yhteistyössä, sillä sähköyhtiö halusi kartoittaa kuivamuuntajista yläpuolelle aiheutuvat kenttätasot. Mittaukset suoritettiin marraskuussa 2001 kello 10.30-11.45. Kuvassa 6.7 on esitetty toinen muuntajista ja kuvassa 6.8 muuntamon yläpuolisen tilan mittauspisteet.



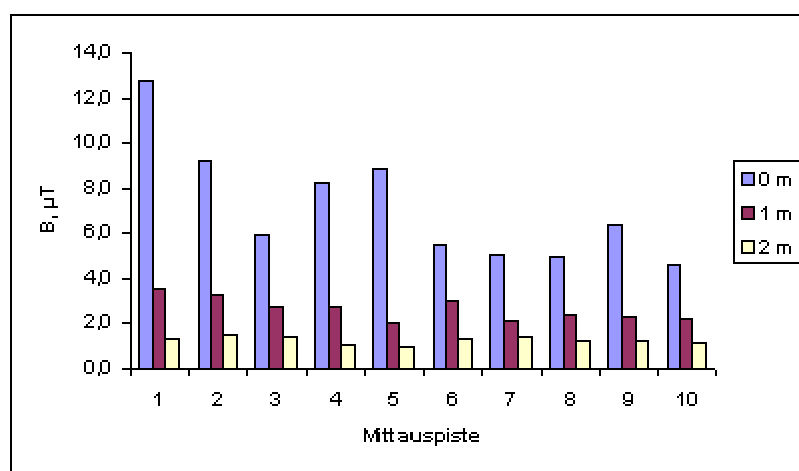
*Kuva 6.7.* Valokuva muuntamosta LM-4.

*Figure 6.7.* Photograph from the indoor distribution substation LM-4.



*Kuva 6.8.* Mittauspisteiden sijainti muuntamon LM-4 yläpuolisessa tilassa.  
*Figure 6.8.* Location of the measurement points in the space above indoor distribution substation LM-4.

Kuvasta 6.8 havaitaan, että mittausten kiintopisteeksi on valittu vasemman puoleisen muuntajan kannelta keskimmäisen pienjännitteen läpivientieristimen kohta. Kiintopiste valittiin vasemman puoleisen muuntajan kannelta, sillä sen kyseisen muuntajan vaihevirtojen keskiarvoksi mitattiin 827 A, kun taas oikeanpuoleisen muuntajan vaihevirtojen keskiarvoksi mitattiin 479 A. Mittausruudukko on myös varsin pieni, koska yläpuolista tilaa ei ollut mahdollisuutta mitata isommalta alueelta. Kuvassa 6.9 on esitetty muuntamon LM-4 yläpuolisessa toimistotilassa mitattujen magneettivuon tiheyksien arvot lattialta sekä yhden ja kahden metrin korkeudelta.



*Kuva 6.9.* Muuntamon LM-4 yläpuolisessa tilassa mitattujen magneettivuon tiheyksien arvot lattialta sekä yhden ja kahden metrin korkeudelta.  
*Figure 6.9.* Magnetic flux densities measured from the floor of the space above indoor distribution substation LM-4 and at the heights of 1 and 2 meters.

Kuten kuvasta 6.9 havaitaan, suurin kentän arvo löytyi heti pisteestä 1. Liitteessä 4 on esitetty pisteestä 1 yhden metrin korkeudelta mitatut kentän taajuuskomponentit. Liitteessä 4 esitetystä magneettivuon tiheyden taajuuskomponenttikuvaajasta voidaan havaita, että suurimmat toimistotilassa mitatut taajuuskomponentit perustaajuisen kentän (50 Hz) lisäksi ovat 3. (150 Hz) ja 7. (350 Hz) yliaalto. Kyseiset yliaaltokomponentit johtuvat tyypillisestä toimistokuormasta, kuten loisteputkista, hakkuriteholähteistä ja tasasuuntaajista.

Magneettivuon tiheyden tehollisarvo oli 3,55  $\mu\text{T}$ . EU:n neuvoston suosituksen mukaisesti yksittäisten harmonisten kenttien menetelmällä lasketut altistumissuhteet olivat 0,11 (taajuudet on laskettu 50 Hz:n välein 2000 Hz:iin saakka) ja 0,06 (taajuudet on laskettu 100 Hz:n välein 650 Hz:iin saakka). Altistumissuhteet eivät saisi ylittää arvoa yksi.

Tuloksista havaitaan EU:n neuvoston suosituksen mukaisesti magneettikentälle lasketun väestön altistuksen altistumissuhteen alittavan suositusarvon yksi riippumatta siitä, tarkastellaanko

yliaaltokomponentteja 650 Hz:iin vai 2000 Hz:iin saakka, joten tässä tapauksessa ei ole tarvetta kenttien vähentämistoimenpiteille.

## 6.5 Yhteenveto muuntamoiden yläpuolisten tilojen mittauksista

Tutkimuksessa tehtiin laajakaistaisia sähkö- ja magneettikentän mittauksia kolmen muuntamon yläpuolisissa tiloissa. Taulukossa 6.1 on esitetty yhteenveto muuntamon yläpuolisten tilojen mittaustuloksista. Altistuminen on esitetty altistumissuhteena.

*Taulukko 6.1.* Yhteenveto muuntamoiden yläpuolisten tilojen mittaustuloksista.

*Table 6.1.* Summary of the measurement result in a space above indoor distribution substations.

Mittaus	Max B, $\mu\text{T}$	Väestön altistus B-kentälle*	Väestön altistus B-kentälle**	Väestön altistus B-kentälle***	Max E, kV/m	Väestön altistus E-kentälle*	Väestön altistus E-kentälle**
LM-2	0,32	0,05	0,01	0,01	0,0033	0,03	0,00
LM-3	0,75	0,07	0,02	0,01	0,0022	0,03	0,00
LM-4	3,55	0,11	0,06	-	-	-	-

\* harmoniset komponentit on laskettu 50 Hz:n välein 2000 Hz:iin saakka EU:n neuvoston suosituksen mukaisella menetelmällä

\*\* harmoniset komponentit on laskettu 100 Hz:n välein 650 Hz:iin saakka EU:n neuvoston suosituksen mukaisella menetelmällä

\*\*\* mittaukset suoritettu STM:n asetuksen mukaisella menetelmällä

Muuntamon yläpuolisissa tiloissa altistumissuhteet olivat varsin pieniä. Myös TTKK:n aikaisemmissa tutkimuksissa [16,17] muuntamon yläpuolisissa tiloissa tehdyt sähkö- ja magneettikentät ovat olleet suositusarvoihin verrattuna pieniä.

Edellä esitettyjen tulosten perusteella voidaan havaita, että tässä hankkeessa mitatuissa muuntamoiden yläpuolisissa tiloissa ei ylitetä suositusarvoja eikä laajakaistaisuuden vaikutus altistussuhteisiin ole kovin suuri. Yhteenvetona voidaan todeta, että muuntamoiden yläpuolisissa tiloissa ei ole kenttien vähentämistarpeita.

## 7 Mittaustuloksia kotien laajakaistaisille kentille altistumisesta

Kotien kenttien mittaaminen on tärkeää, koska niissä väestö altistuu pitkäaikaisesti sähkö- ja magneettikentille. Asunnoissa yleensä keskeisiä ovat magneettikentät. Sähkökentät ovat hyvin pieniä, koska asunnoissa käytetyt jännitetasot ovat alhaisia ja paljaita jännitteisiä osia ei ole käytössä.

Asuntojen kenttiä voidaan mitata lähinnä kahdesta näkökulmasta. Ensinnäkin voidaan olla kiinnostuneita rakennuksen sähköjärjestelmästä ja sen kenttien yleistasosta. Lisäksi voidaan haluta selvittää laitteiden kentät ja niille altistuminen.

## 7.1 Asunnon kenttien mittaaminen

Huoneen tai esimerkiksi ison hallin jonkun alueen kenttien mittaaminen voidaan toteuttaa lähinnä kolmella tavalla: keskipisteen mittauksella, viiden pisteen mittauksella tai tarkemmalla kartoituksella. Kaikissa mittauksissa mittauskorkeutena voidaan käyttää 1 m. Tässä hankkeessa käytettiin viiden pisteen menetelmää.

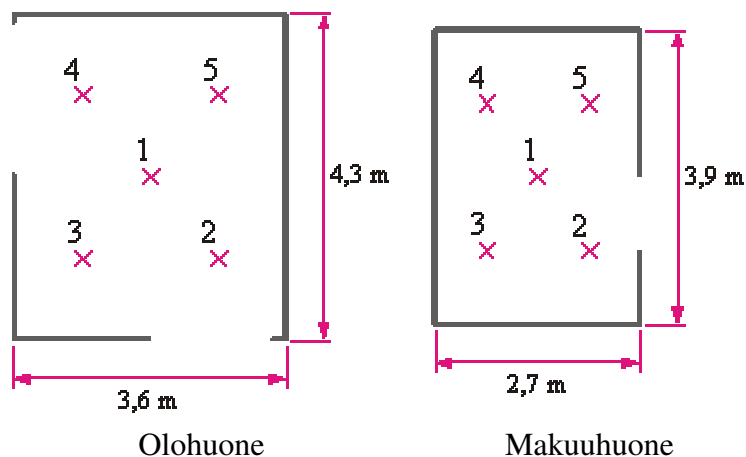
Keskipistemittauksessa määritellään huoneen keskipiste mittaamalla tai muuten arvioimalla. Viiden pisteen menetelmässä määritellään lisäpisteet keskipisteen ja huoneen kulmien avulla.

Mittaaminen aloitettiin mittaamalla ja merkitsemällä lattiaan mittauspisteet. Tämän jälkeen sähkö- ja magneettikentän arvot mitattiin alkaen keskipisteestä. Mihinkään tavaroihin tai laitteisiin ei koskettu mittauksen aikana. Jos esimerkiksi televisio oli suljettuna huoneeseen tultaessa, sen annettiin olla suljettuna koko mittauksen ajan.

Pisteessä, josta suurin kentän arvo löytyi suoritettiin laajakaistamittaukset. Laajakaistamittaukset suoritettiin sähkö- ja magneettikentälle luvussa 4.2 esitetyllä yksittäisten harmonisten kenttien mittausmenetelmällä ja magneettikentälle lisäksi luvussa 4.1 esitetyllä painotetun kentän menetelmällä.

## 7.2 Kerrostaloasunnon LM-5 laajakaistamittaukset

Mitattu asunto oli 1990-luvun lopulla rakennettu kerrostalokaksio, jossa on käytössä viisijohdinjärjestelmä. Asunto oli talon toisessa kerroksessa. Mittaukset suoritettiin toukokuussa 2002 iltapäivällä kello 13.00-15.00 Asunto oli juuri ennen mittausta tyhjennetty muuton vuoksi, joten käytössä ei ollut kenttiä aiheuttavia kodinelektronikkalaitteita. Muut asunnot kerrostalossa olivat asuttuja, joten niistä aiheutui kuormaa. Kuvassa 7.1 on esitetty mittauspisteet.



Kuva 7.1. Mittauspisteiden sijainti asunnon LM-5 huoneissa.

Figure 7.1. Location of the measurement points in the apartment LM-5.

Taulukossa 7.1 on esitetty kyseisistä pisteistä mitatut kentät.

Taulukko 7.1. Asunnossa LM-5 mitattujen magneettivuon tiheuksien ja sähkökenttien arvot viiden

metrin korkeudelta.

Table 7.1. Magnetic flux densities and electric fields measured from the apartment LM-5 at the height of 1 meter.

Mittauspiste	B, $\mu\text{T}$ (makuuhuone)	B, $\mu\text{T}$ (olohuone)
1	0,07	0,07
2	0,08	0,09
3	0,09	0,09
4	0,09	0,07
5	0,07	0,08
Mittauspiste	E, kV/m (makuuhuone)	E, kV/m (olohuone)
1	0,0024	0,0023
2	0,0024	0,0023
3	0,0022	0,0030
4	0,0023	0,0024
5	0,0029	0,0021

Liitteessä 5 on esitetty kerrostaloasunnon LM-5 mittauksen sähkö- ja magneettikentän maksimikohdista mitatut taajuuskomponentit.

Magneettivuon tiheyden tehollisarvo oli 0,09  $\mu\text{T}$ . STM:n asetuksen mukaisesti painotetun kentän mittausmenetelmällä määritetty altistumissuhde oli 0,01 sekä samasta pisteestä EU:n neuvoston suosituksen mukaisesti yksittäisten harmonisten kenttien menetelmällä lasketut altistumissuhteet olivat 0,04 (taajuudet on laskettu 50 Hz:n välein 2000 Hz:iin saakka) ja likimain nolla (taajuudet on laskettu 100 Hz:n välein 650 Hz:iin saakka). Altistumissuhteet eivät saisi ylittää arvoa yksi. Yksittäisten harmonisten kenttien menetelmällä lasketut altistumissuhteet eroavat toisistaan mittarille tyypillisestä kohinasta johtuen.

Sähkökentän voimakkuuden tehollisarvo oli 0,0030 kV/m. Taajuuskomponenteista EU:n neuvoston suosituksen mukaisesti yksittäisten harmonisten kenttien menetelmällä lasketut altistumissuhteet olivat 0,03 (taajuudet on laskettu 50 Hz:n välein 2000 Hz:iin saakka) ja likimain nolla (taajuudet on laskettu 100 Hz:n välein 650 Hz:iin saakka). Altistumissuhteet eivät saisi ylittää arvoa yksi. Altistumissuhde, jossa taajuudet on laskettu 2000 Hz:iin saakka on suurempi tuloksissa esiintyvistä kohinasta johtuen.

Tulosten perusteella voidaan sanoa sekä sähkö- että magneettikenttien olevan tässä mittauksessa varsin pieniä, koska käytössä ei ollut kenttiä aiheuttavia kodin sähkölaitteita. Mittausten perusteella näyttää siltä, että tässä tapauksessa kenttien vähentämistarpeita ei ole olemassa.

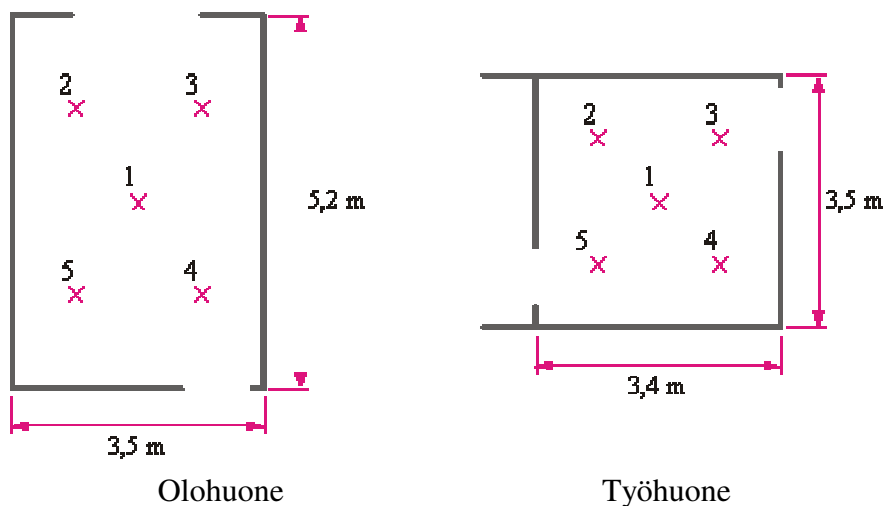
### 7.3 Kerrostaloasunnon LM-6 laajakaistamittaukset

Taloyhtiön asukkaat olivat kiinnostuneet sähkö- ja magneettikentistä, koska yhtiön D-rapussa erään asunnon alapuolella on kiinteistömuuntamo ja sen aiheuttamia kenttiä oli tutkittu aiemmin (esitetään myöhemmin tässä raportissa luvussa laajakaistamittauksessa LM-9). Mittaukset LM-6, LM-7 ja LM-8 tehtiin heinäkuussa 2002. Talo on rakennettu 1960-luvun lopulla. Talossa on käytössä nelijohdinjärjestelmä. Mittauksia tehtiin talon kolmessa eri rapussa sijaitsevissa asunnoissa. Mittaus LM-6 tehtiin B-rapun alimman kerroksen huoneistossa. Kuvassa 7.2 on esitetty valokuva mitatun asunnon olohuoneesta. Valokuvassa näkyvä televisio ei ollut päällä eikä huoneessa ollut muitakaan laitteita käytössä. Kuvassa 7.3 on esitetty mittauspisteet asunnon olo- ja työhuoneesta.



*Kuva 7.2.* Valokuva asunnon LM-6 olohuoneesta.

*Figure 7.2.* Photograph from the living room of the apartment LM-6.



*Kuva 7.3.* Mittauspistepiirros asunnosta LM-6 huoneista.

*Figure 7.3.* Location of the measurement points in the apartment LM-6.

Seuraavassa taulukossa 7.2 on esitetty perustaajuisen kentän (50 Hz) mittaustulokset yhden metrin korkeudelta. Mittaukset suoritettiin aamupäivällä kello 10.00-11.45.

*Taulukko 7.2.* Asunnossa LM-6 mitattujen magneettivuon tiheyksien ja sähkökenttien arvot yhden metrin korkeudelta.

*Table 7.2.* Magnetic flux densities and electric fields measured from the apartment LM-6 at the height of 1 meter.

Mittauspiste	B, $\mu\text{T}$ (olohuone)	B, $\mu\text{T}$ (työhuone)
1	0,07	0,07
2	0,07	0,09
3	0,08	0,06
4	0,08	0,07
5	0,08	0,06
Mittauspiste	E, kV/m (olohuone)	E, kV/m (työhuone)
1	0,0044	0,0059
2	0,0027	0,0035
3	0,0026	0,0030
4	0,0022	0,0374
5	0,0027	0,0050

Liitteessä 6 on esitetty kerrostaloasunnon LM-6 mittauksen sähkö- ja magneettikentän maksimikohdista mitatut taajuuskomponentit.

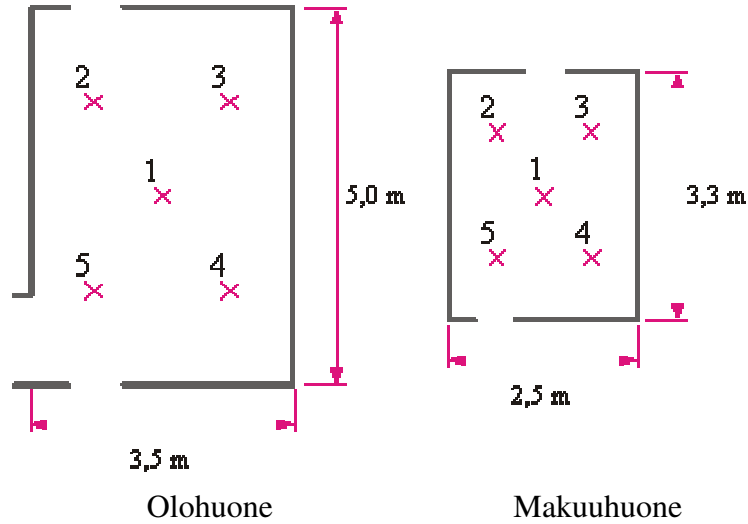
Magneettivuon tiheyden tehollisarvo oli 0,16  $\mu\text{T}$ . STM:n asetuksen mukaisesti painotetun kentän mittausten menetelmällä määritetty altistumissuhde oli 0,01 sekä samasta pisteestä EU:n neuvoston suosituksen mukaisesti yksittäisten harmonisten kenttien menetelmällä lasketut altistumissuhteet olivat 0,04 (taajuudet on laskettu 50 Hz:n välein 2000 Hz:iin saakka) ja likimain nolla (taajuudet on laskettu 100 Hz:n välein 650 Hz:iin saakka). Altistumissuhteet eivät saisi ylittää arvoa yksi. Myös tässä tapauksessa yksittäisten harmonisten kenttien menetelmällä lasketut altistumissuhteet eroavat toisistaan mittarille tyypillisestä kohinasta johtuen.

Sähkökentän voimakkuuden tehollisarvo oli 0,0378 kV/m. Taajuuskomponenteista EU:n neuvoston suosituksen mukaisesti yksittäisten harmonisten kenttien menetelmällä lasketut altistumissuhteet olivat 0,04 (taajuudet on laskettu 50 Hz:n välein 2000 Hz:iin saakka) ja 0,01 (taajuudet on laskettu 100 Hz:n välein 650 Hz:iin saakka). Altistumissuhteet eivät saisi ylittää arvoa yksi. Myöskin sähkökentän tapauksessa altistumissuhteet eroavat toisistaan mittarille tyypillisestä kohinasta johtuen.

Tulosten perusteella voidaan sanoa sekä sähkö- että magneettikenttien olevan tässä mittauksessa varsin pieniä, joten kenttien vähentämistarpeita ei ole olemassa.

## 7.4 Kerrostaloasunnon LM-7 laajakaistamittaukset

Mittaus LM-7 tehtiin heinäkuussa 2002 C-rapun asunnossa samassa 1960-luvulla rakennetussa taloyhtiössä kuin mittaukset LM-6 ja LM-8. Talossa oli käytössä nelijohdinjärjestelmä. Kuvassa 7.4 on esitetty olohuoneen ja makuuhuoneen mittauspisteet. Huoneissa ei ollut käytössä sähkölaitteita.



Kuva 7.4. Mittauspisteiden sijainti asunnon LM-7 huoneissa.

Figure 7.4. Location of the measurement points in the apartment LM-7.

Seuraavassa taulukoissa 7.3 on esitetty perustaajuisen kentän (50 Hz) mittaustulokset yhden metrin korkeudelta. Mittaukset suoritettiin kello 10.00-11.45.

Taulukko 7.3. Asunnossa LM-7 mitattujen magneettivuon tiheyksien ja sähkökenttien arvot yhden metrin korkeudelta.

Table 7.3. Magnetic flux densities and electric fields measured from the apartment LM-7 at the height of 1 meter.

Mittauspiste	B, $\mu\text{T}$ (olohuone)	B, $\mu\text{T}$ (huone)
1	0,14	0,13
2	0,13	0,11
3	0,10	0,13
4	0,12	0,15
5	0,16	0,11
Mittauspiste	E, kV/m (olohuone)	E, kV/m (huone)
1	0,0002	0,0295
2	0,0004	0,0250

3	0,0002	0,0157
4	0,0005	0,0443
5	0,0007	0,0311

Liitteessä 7 on esitetty sähkö- ja magneettikentän maksimikohdista mitatut taajuuskomponentit.

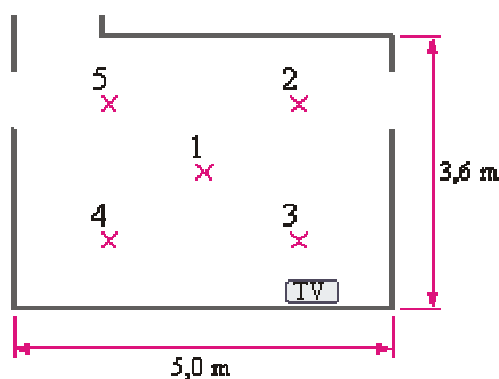
Magneettivuon tiheyden tehollisarvo oli  $0,10 \mu\text{T}$ . STM:n asetuksen mukaisesti painotetun kentän mittausmenetelmällä määritetty altistumissuhde oli 0,01 sekä samasta pisteestä EU:n neuvoston suosituksen mukaisesti yksittäisten harmonisten kenttien menetelmällä lasketut altistumissuhteet olivat 0,04 (taajuudet on laskettu 50 Hz:n välein 2000 Hz:iin saakka) ja likimain nolla (taajuudet on laskettu 100 Hz:n välein 650 Hz:iin saakka). Altistumissuhteet eivät saisi ylittää arvoa yksi. Myös tässä mittauksessa yksittäisten harmonisten kenttien menetelmällä lasketut altistumissuhteet eroavat toisistaan käytetylle mittarille tyypillisestä kohinasta johtuen.

Sähkökentän voimakkuuden tehollisarvo oli  $0,0400 \text{ kV/m}$ . Taajuuskomponenteista EU:n neuvoston suosituksen mukaisesti yksittäisten harmonisten kenttien menetelmällä lasketut altistumissuhteet olivat 0,04 (taajuudet on laskettu 50 Hz:n välein 2000 Hz:iin saakka) ja 0,01 (taajuudet on laskettu 100 Hz:n välein 650 Hz:iin saakka). Altistumissuhteet eivät saisi ylittää arvoa yksi. Kuten aikaisemmissakin mittauksissa, sähkökentän ollessa verrattain pieni, eroavat lasketut altistumissuhteet toisistaan mittarille tyypillisestä kohinasta johtuen.

Tulosten perusteella voidaan sanoa sekä sähkö- että magneettikenttien olevan tässä mittauksessa varsin pieniä, joten kenttien vähentämistoimenpiteille ei ole tarvetta.

### 7.5 Kerrostaloasunnon LM-8 laajakaistamittaukset

Mittaus tehtiin heinäkuussa 2002 D-rapun ylimmän kerroksen asunnossa samassa 1960-luvulla rakennetussa taloyhtiössä kuin mittaukset LM-6 ja LM-7. Seuraavassa kuvassa 7.5 on esitetty olohuoneen mittauspisteet. Mittauksen aikana ainoa olohuoneessa käytössä ollut laite oli TV.



Kuva 7.5. Mittauspisteiden sijainti asunnon LM-8 olohuoneessa.

Figure 7.5. Location of the measurement points in the living room of the apartment LM-8.

Seuraavassa taulukossa 7.4 on esitetty perustaajuuden kentän (50 Hz) mittaustulokset yhden metrin korkeudelta. Mittaukset suoritettiin iltapäivällä kello 13.00-14.00.

*Taulukko 7.4.* Asunnossa LM-8 mitattujen magneettivuon tiheyksien ja sähkökenttien arvot yhden metrin korkeudelta.

*Table 7.4.* Magnetic flux densities and electric fields measured from the apartment LM-8 at the height of 1 meter.

Mittauspiste	B, $\mu\text{T}$
1	0,10
2	0,13
3	0,56
4	0,08
5	0,10
Mittauspiste	E, kV/m
1	0,0063
2	0,0053
3	0,0767
4	0,0025
5	0,0022

Liitteessä 8 on esitetty pisteestä 3 yhden metrin korkeudelta mitatut magneettikentän ja sähkökentän voimakkuuden taajuuskomponentit.

Magneettivuon tiheyden tehollisarvo oli 0,43  $\mu\text{T}$ . Liitteen 8 magneettikentän kuvaajasta havaitaan käytössä olleen television aiheuttamat magneettivuon tiheyden taajuuskomponentit. STM:n asetuksen mukaisesti painotetun kentän mittausmenetelmällä määritetty altistumissuhde oli 0,02 sekä samasta pisteestä EU:n neuvoston suosituksen mukaisesti yksittäisten harmonisten kenttien menetelmällä lasketut altistumissuhteet olivat 0,08 (taajuudet on laskettu 50 Hz:n välein 2000 Hz:iin saakka) ja 0,02 (taajuudet on laskettu 100 Hz:n välein 650 Hz:iin saakka). Altistumissuhteet eivät saisi ylittää arvoa yksi.

Sähkökentän voimakkuuden tehollisarvo oli 0,0651 kV/m. Aivan kuten magneettikentänkin tapauksessa, liitteen 8 sähkökentän kuvaajasta havaitaan käytössä olleen television aiheuttamat perustaajuisten kentän monikerrat.

Taajuuskomponenteista EU:n neuvoston suosituksen mukaisesti yksittäisten harmonisten kenttien menetelmällä lasketut altistumissuhteet olivat 0,05 (taajuudet on laskettu 50 Hz:n välein 2000 Hz:iin saakka) ja 0,02 (taajuudet on laskettu 100 Hz:n välein 650 Hz:iin saakka). Altistumissuhteet eivät saisi ylittää arvoa yksi.

Tuloksista voidaan havaita, että tässä mittauksessa saatiin päällä olleen television vuoksi hieman suurempia sähkö- ja magneettikentän arvoja kuin tutkimuksen muissa kotimittauksissa. Silti sekä sähkö- että magneettikenttien voidaan todeta olevan hyvin pieniä.

## 7.6 Muuntamon yläpuolisen kerrostaloasunnon LM-9 laajakaistamittaukset

Kahden muuntajan kiinteistömuuntamo sijaitsi asuinhuoneiston alapuolella siten, että toinen muuntaja (500 kVA) sijaitsi olohuoneen alla ja toinen muuntaja (350 kVA) makuuhuoneen alla. Koska asunto oli muuntamon yläpuolella, tehtiin tässä paikassa muuntamomittaus.

Mittauspaikka saatiin sähköyhtiöltä, joka myös avusti virtojen mittaamisessa. Sähköyhtiölle oli valitettu muun muassa television näytön värinästä olohuoneessa. Sähköyhtiö halusi kartoittaa kenttien tasot, ennen kuin mahdollisiin pienentämistoimenpiteisiin ryhdyttäisiin.

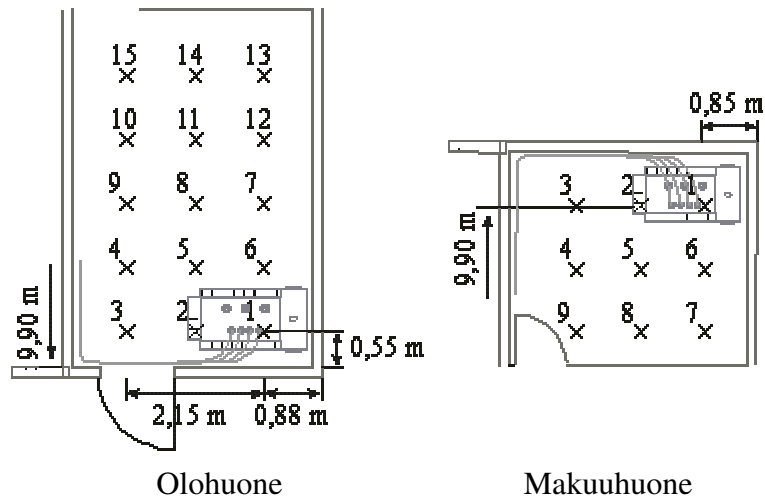
Mittaukset suoritettiin toukokuussa 2002 kello 9.30-12.30 siten, että koko sähkökuorma käännettiin ensin toiselle muuntajalle ja mitattiin sen yläpuolinen tila. Tämän jälkeen tehtiin vastaavasti toiselle muuntajalle.

Mittauksen aikana vaihevirtojen keskiarvo oli 286 A. Tarkempia tietoja virrasta on esitetty liitteessä 9. Seuraavissa kuvissa 7.6 ja 7.7 on esitetty kuva muuntamon yläpuolisesta tilasta ja muuntamon yläpuolisten huoneiden mittauspisteet.



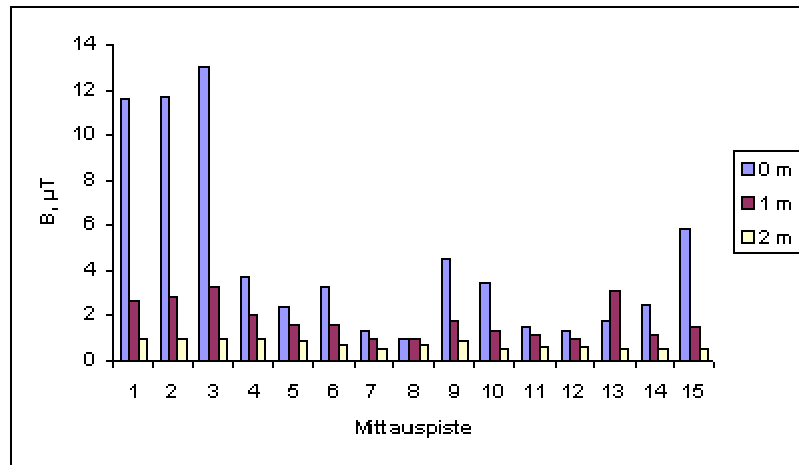
*Kuva 7.6.* Valokuva muuntamon LM-9 yläpuolisesta tilasta.

*Figure 7.6* Photograph in the space above indoor distribution substation LM-9.



*Kuva 7.7.* Mittauspistepiirros muuntamon LM-9 yläpuolisista huoneista.  
*Figure 7.7.* Location of the measurement points in the space above indoor distribution substation LM-9.

Kuvista havaitaan, että mittauksen kiintopisteiksi oli valittu kummankin muuntajan kannelta keskimmäisen pienjännitteen läpivientieristimen kohta. Kuvassa 7.8 on esitetty muuntamon yläpuolisessa olohuoneessa mitattujen magneettivuon tiheyksien arvot lattialta sekä yhden ja kahden metrin korkeudelta.



*Kuva 7.8.* Muuntamon LM-9 yläpuolisessa olohuoneessa mitattujen magneettivuon tiheyksien arvot lattialta sekä yhden ja kahden metrin korkeudelta.  
*Figure 7.8.* Magnetic flux densities measured from the floor of the space above indoor distribution substation LM-9 and at the heights of 1 and 2 meters (living room).

Kuten kuvasta 7.8 havaitaan löytyi olohuoneesta pisteestä 3 suurin kentän arvo. Kuvan 7.7 perusteella näyttäisi siltä, että sen aiheuttaa muuntajan ja pienjännitekeskuksen välinen kaapelisilta.

Liitteessä 9 on esitetty tästä pisteestä olohuoneesta yhden metrin korkeudelta mitatut kentän taajuuskomponentit.

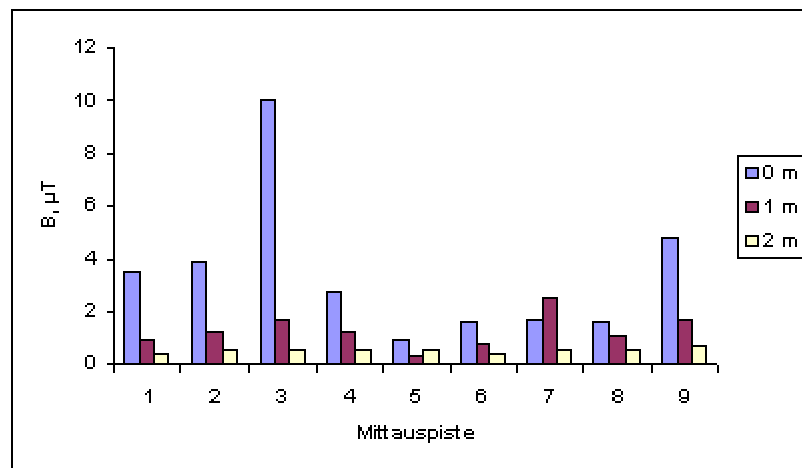
Liitteessä 9 esitetystä magneettivuon tiheyden taajuuskomponenttikuvaajasta voidaan havaita, että suurimmat olohuoneessa mitatut magneettikentän taajuuskomponentit perustaaajuisen kentän (50 Hz) lisäksi ovat 2. (100 Hz), 3. (150 Hz) ja 5. (250 Hz) yliaalto. Myös 9. (450 Hz) yliaalto on havaittavissa. Kolmella jaollisia yliaaltoja aiheuttavat muun muassa hakkuriteholähteet ja loisteputket. Muita esiintyneitä yliaaltoja (100 Hz ja 250 Hz), kuten myös kolmella jaollisia yliaaltoja, aiheuttavat kaikki kodin elektroniikkalaitteet kuten stereot, videot, televisiot, kelloradiot ja kierrekantaiset energiansäästölamput. Erityisesti yliaaltoja aiheuttavat kyseisissä laitteissa käytetyt tasasuuntaajat.

Liitteessä 9 esitetystä kuormitusvirrassa ei esiinny lainkaan parillisia yliaaltoja. Tästä syystä 2. yliaallon esiintymisen syynä saattaa olla kohinasta johtuva päästökaistan leviäminen, jolloin perusaalto ja 3. yliaalto näkyvät myös 100 Hz taajuudella. On myös mahdollista, että huoneistossa muuntamon aiheuttaman magneettikentän lisäksi laitteiden kenttä sisältää 100 Hz komponentin, joka ei kuitenkaan erotu muuntamon kuormitusvirrassa.

Magneettivuon tiheyden tehollisarvo oli  $2,90 \mu\text{T}$ . STM:n asetuksen mukaisesti painotetun kentän mittausten menetelmällä määritetty altistumissuhde oli 0,03 sekä samasta pisteestä EU:n neuvoston suosituksen mukaisesti yksittäisten harmonisten kenttien menetelmällä lasketut altistumissuhteet olivat 0,09 (taajuudet on laskettu 50 Hz:n välein 2000 Hz:iin saakka) ja 0,04 (taajuudet on laskettu 100 Hz:n välein 650 Hz:iin saakka). Liitteessä 9 on esitetty muuntamon LM-9 sähkökentän voimakkuuden taajuuskomponentit, jotka on mitattu olohuoneesta samasta pisteestä kuin magneettivuon tiheyden taajuuskomponentit.

Sähkökentän voimakkuuden tehollisarvo oli  $0,0022 \text{ kV/m}$ . Taajuuskomponenteista EU:n neuvoston suosituksen mukaisesti yksittäisten harmonisten kenttien menetelmällä lasketut altistumissuhteet olivat 0,03 (taajuudet on laskettu 50 Hz:n välein 2000 Hz:iin saakka) ja likimain nolla (taajuudet on laskettu 100 Hz:n välein 650 Hz:iin saakka). Kohinasta johtuen altistumissuhde, jossa taajuuksia on laskettu 50 Hz:n välein 2000 Hz:iin saakka, on altistumissuhteista suurempi. Kohina erottuu liitteen 9 sähkökenttäkuvaajasta hyvin selvästi.

Kuvassa 7.9 on esitetty muuntamon LM-9 yläpuolisessa makuuhuoneessa mitattujen magneettikenttien arvot lattialta sekä yhden ja kahden metrin korkeudelta.



*Kuva 7.9.* Muuntamon LM-9 yläpuolisessa makuuhuoneessa mitattujen magneettivuon tiheyksien arvot lattialta sekä yhden ja kahden metrin korkeudelta.

*Figure 7.9.* Magnetic flux densities measured from the floor of the space above indoor distribution substation LM-9 and at the heights of 1 and 2 meters (bedroom).

Kuten olohuoneenkin tapauksessa makuuhuoneen kentissä havaitaan muuntajan ja pienjännitekeskuksen välisen kaapelisillan vaikutus. Lisäksi pisteen 7 alapuolella sijaitsevan keskijännitekeskuksen vaikutus kenttiin on havaittavissa. Liitteessä 9 on esitetty muuntamon LM-9 magneettivuon tiheyden taajuuskomponentit (makuuhuone).

Liitteessä 9 esitetystä makuuhuoneen magneettivuon tiheyden taajuuskomponenttikuvaajasta voidaan havaita, että suurimmat magneettikentän taajuuskomponentit perustaajuisten kentän (50 Hz) lisäksi ovat 3. (150 Hz), 5. (250 Hz), 7. (350 Hz), 9. (450 Hz), 10. (500 Hz) ja 11. (550 Hz) yliaalto. Kuten edellisen mittauksen yhteydessä todettiin, yliaaltoja aiheuttavat muun muassa hakkuriteholähteet ja loisteputket, sekä kaikki kodinelektronikkalaitteet. Liitteessä 9 esitettyssä kuormitusvirrassa ei kuitenkaan esiinny lainkaan parillisia yliaaltoja.

Magneettivuon tiheyden tehollisarvo oli  $1,56 \mu\text{T}$ . STM:n asetuksen mukaisesti painotetun kentän mittausmenetelmällä määritetty altistumissuhde oli 0,018 sekä samasta pisteestä EU:n neuvoston suosituksen mukaisesti yksittäisten harmonisten kenttien menetelmällä lasketut altistumissuhteet olivat 0,06 (taajuudet on laskettu 50 Hz:n välein 2000 Hz:iin saakka) ja 0,02 (taajuudet on laskettu 100 Hz:n välein 650 Hz:iin saakka). Altistumissuhteet eivät saisi ylittää arvoa yksi.

Liitteessä 9 on esitetty muuntamon LM-9 sähkökentän voimakkuuden taajuuskomponentit, jotka on mitattu makuuhuoneen samasta pisteestä kuin magneettivuon tiheyden taajuuskomponentit. Sähkökentän voimakkuuden tehollisarvo oli 0,0022 kV/m. Taajuuskomponenteista EU:n neuvoston suosituksen mukaisesti yksittäisten harmonisten kenttien menetelmällä lasketut altistumissuhteet olivat 0,03 (taajuudet on laskettu 50 Hz:n välein 2000 Hz:iin saakka) ja likimain nolla (taajuudet on laskettu 100 Hz:n välein 650 Hz:iin saakka). Altistumissuhteet eivät saisi ylittää arvoa yksi. Yksi altistumissuhteiden eroon vaikuttava asia on liitteen 9 makuuhuoneen sähkökenttäkuvaajassa selvästi erottuva kohina.

Tulosten perusteella voidaan sanoa sähkökentän olevan tämän muuntamon yläpuolisessa tilassa merkityksetön. Myös magneettikentälle STM:n asetuksen mukaisesti määritetty ja EU:n neuvoston suosituksen mukaisesti lasketut altistumissuhteet alittavat selvästi suositusarvon yksi, joten tässä tapauksessa kenttien vähentämistarpeita ole.

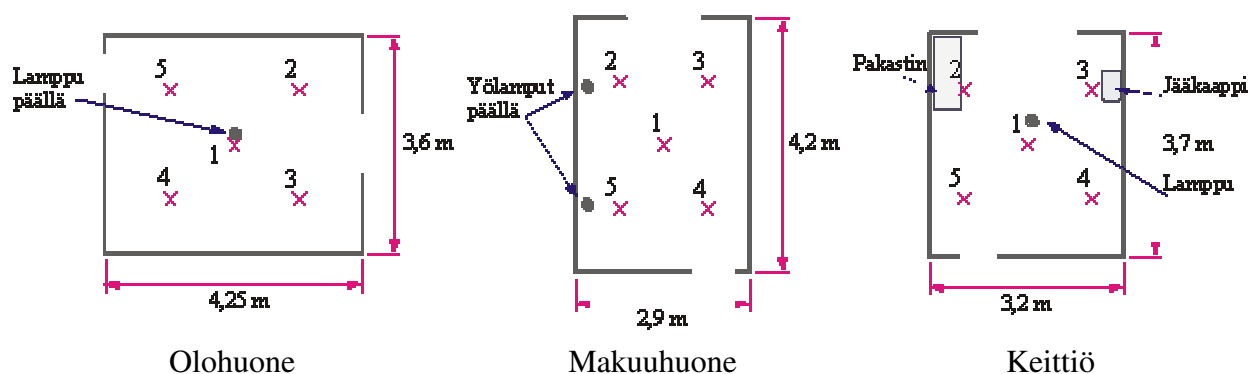
## **7.7 Kerrostaloasunnon LM-10 laajakaistamittaukset**

Mitattu asunto oli 1980-luvun puolivälissä rakennettu ensimmäisen kerroksen kerrostalokaksio. Rakennuksessa ei ollut muuntamoita. Rakennuksessa on käytössä nelijohdinjärjestelmä. Mittaus tehtiin heinäkuussa 2002 klo 12.00-14.00. Kuvassa 7.10 on esitetty valokuva mitatun asunnon keittiöstä ja kuvassa 7.11 mittauspisteet.



Kuva 7.10. Valokuva asunnon LM-10 keittiöstä.

Figure 7.10. Photograph from the kitchen of the apartment LM-10.



Kuva 7.11. Mittauspisteiden sijainti asunnon LM-10 huoneissa.

Figure 7.11. Location of the measurement points in the apartment LM-10.

Seuraavassa taulukossa 7.5 on esitetty perustaajuisen kentän (50 Hz) mittaustulokset yhden metrin korkeudelta.

Taulukko 7.5. Asunnossa LM-10 mitattujen magneettivuon tiheyksien ja sähkökenttien arvot yhden metrin korkeudelta.

Table 7.5. Magnetic flux densities and electric fields measured from the apartment LM-10 at the height of 1 meter.

Mittauspiste	B, $\mu\text{T}$ (olohuone)	B, $\mu\text{T}$ (makuuhuone)	B, $\mu\text{T}$ (keittiö)
1	0,22	0,08	0,16

2	0,17	0,09	0,11
3	0,18	0,11	0,13
4	0,11	0,11	0,26
5	0,10	0,09	0,16
<b>Mittauspiste</b>	<b>E, kV/m (olohuone)</b>	<b>E, kV/m (makuuhuone)</b>	<b>E, kV/m (keittiö)</b>
1	0,0331	0,0023	0,0050
2	0,0078	0,0076	0,0071
3	0,0085	0,0024	0,0058
4	0,0050	0,0043	0,0023
5	0,0045	0,00212	0,0024

Liitteessä 10 on esitetty asunnon LM-10 olohuoneen, makuuhuoneen ja keittiön sähkö- ja magneettikentän maksimikohdista mitatut taajuuskomponentit.

Magneettivuon tiheyden tehollisarvo oli 0,18  $\mu$ T. Liitteen 10 olohuoneen magneettikentän maksimikohdasta mitattuja taajuuskomponentteja esittävästä kuvaajasta erottuu selvästi 3. (150 Hz) ja 23. (1150 Hz) yliaalto. Mittarin valmistaja on kuitenkin ilmoittanut mittarin kohinasoksi 0,05  $\mu$ T, minkä kyseisten yliaaltojen vuontiheydet alittavat. Toisaalta asuinrakennusten sähköjärjestelmässä tyypillisesti esiintyvä 3. (150 Hz) yliaalto voisi hyvinkin näkyä mittaustuloksissa. EU:n neuvoston suosituksen mukaisesti yksittäisten harmonisten kenttien menetelmällä lasketut altistumissuhteet olivat 0,05 (taajuudet on laskettu 50 Hz:n välein 2000 Hz:iin saakka) ja 0,01 (taajuudet on laskettu 100 Hz:n välein 650 Hz:iin saakka). Altistumissuhteet eivät saisi ylittää arvoa yksi.

Sähkökentän voimakkuuden tehollisarvo olohuoneessa oli 0,0323 kV/m. Taajuuskomponenteista EU:n neuvoston suosituksen mukaisesti yksittäisten harmonisten kenttien menetelmällä lasketut altistumissuhteet olivat 0,04 (taajuudet on laskettu 50 Hz:n välein 2000 Hz:iin saakka) ja 0,01 (taajuudet on laskettu 100 Hz:n välein 650 Hz:iin saakka). Altistumissuhteet, joiden erot johtuvat todennäköisesti kohinasta, eivät saisi ylittää arvoa yksi.

Magneettivuon tiheyden tehollisarvo oli 0,12  $\mu$ T. Liitteen 10 makuuhuoneen magneettikentän maksimikohdasta mitattuja taajuuskomponentteja esittävästä kuvaajasta voidaan havaita, että kaikki yliaaltokomponentit jäävät kohinatason alapuolelle kuten olohuoneessakin. EU:n neuvoston suosituksen mukaisesti yksittäisten harmonisten kenttien menetelmällä lasketut altistumissuhteet olivat 0,05 (taajuudet on laskettu 50 Hz:n välein 2000 Hz:iin saakka) ja likimain nolla (taajuudet on laskettu 100 Hz:n välein 650 Hz:iin saakka). Altistumissuhteet eivät saisi ylittää arvoa yksi.

Sähkökentän voimakkuuden tehollisarvo oli makuuhuoneessa 0,0215 kV/m. Taajuuskomponenteista EU:n neuvoston suosituksen mukaisesti yksittäisten harmonisten kenttien menetelmällä lasketut altistumissuhteet olivat 0,01 (taajuudet on laskettu 50 Hz:n välein 2000 Hz:iin saakka) ja likimain nolla (taajuudet on laskettu 100 Hz:n välein 650 Hz:iin saakka). Altistumissuhteet, joiden keskinäiset erot johtuvat pääasiassa kohinasta, eivät saisi ylittää arvoa yksi.

Magneettivuon tiheyden tehollisarvo oli  $0,22 \mu\text{T}$ . Kuten liitteen 10 keittiön magneettikentän maksimikohdasta mitattuja taajuuskomponentteja esittävästä kuvaajasta havaitaan, jäivät yliaaltojen vuontiheydet myös keittiössä kohinatason alapuolelle. STM:n asetuksen mukaisesti painotetun kentän mittausten menetelmällä määritetty altistumissuhde oli 0,01 sekä samasta pisteestä EU:n neuvoston suosituksen mukaisesti yksittäisten harmonisten kenttien menetelmällä lasketut altistumissuhteet olivat 0,04 (taajuudet on laskettu 50 Hz:n välein 2000 Hz:iin saakka) ja likimain nolla (taajuudet on laskettu 100 Hz:n välein 650 Hz:iin saakka). Altistumissuhteet eivät saisi ylittää arvoa yksi.

Sähkökentän voimakkuuden tehollisarvo oli keittiössä 0,0070 kV/m. Taajuuskomponenteista EU:n neuvoston suosituksen mukaisesti yksittäisten harmonisten kenttien menetelmällä lasketut altistumissuhteet olivat 0,03 (taajuudet on laskettu 50 Hz:n välein 2000 Hz:iin saakka) ja likimain nolla (taajuudet on laskettu 100 Hz:n välein 650 Hz:iin saakka). Altistumissuhteet eivät saisi ylittää arvoa yksi. Erot altistumissuhteissa selittyvät. Liitteen 10 keittiön sähkökentän maksimikohdasta mitattuja taajuuskomponentteja esittävästä kuvaajasta näkyvällä kohinalla.

Tulosten perusteella voidaan sanoa sekä sähkö- että magneettikenttien olevan myös tässä asunnossa mittauksen aikana hyvin pieniä, joten kenttien vähentämistarpeita ei ole.

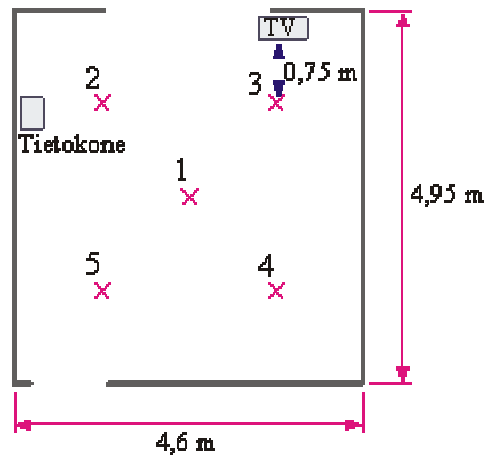
### 7.8 Kerrostaloasunnon LM-11 laajakaistamittaukset

Mitattu asunto oli 1940-luvun lopulla rakennettu neljännen kerroksen kerrostaloyksistö. Talon sähköjärjestelmä oli kuitenkin uusittu viisijohdinjärjestelmäksi 1990-luvulla. Mittaukset suoritettiin elokuussa 2002 aamupäivällä kello 8.45-10.00. Kuvassa 7.12 on esitetty valokuva mitatusta asunnosta ja kuvassa 7.13 huoneen mittauspisteet.



*Kuva 7.12.* Valokuva asunnon LM-11 huoneesta.

*Figure 7.12.* Photograph from the room of the apartment LM-11.



*Kuva 7.13.* Mittauspisteiden sijainti asunnossa LM-11.

*Figure 7.13.* Location of the measurement points in the apartment LM-11.

Mittausten aikana TV ja tietokone olivat päällä. Seuraavassa taulukossa 7.6 on esitetty perustaaajuisen kentän (50 Hz) mittaustulokset yhden metrin korkeudelta.

*Taulukko 7.6.* Asunnossa LM-11 mitattujen magneettivuon tiheyksien ja sähkökenttien arvot yhden metrin korkeudelta.

*Table 7.6.* Magnetic flux densities and electric fields measured from the apartment LM-11 at the height of 1 meter.

Mittauspiste	B, $\mu\text{T}$
1	0,07
2	0,07
3	0,14
4	0,07
5	0,07
Mittauspiste	E, kV/m
1	0,0027
2	0,0099
3	0,0585
4	0,0024
5	0,0022

Liitteessä 11 on esitetty sähkö- ja magneettikentän maksimikohdista mitatut taajuuskomponentit.

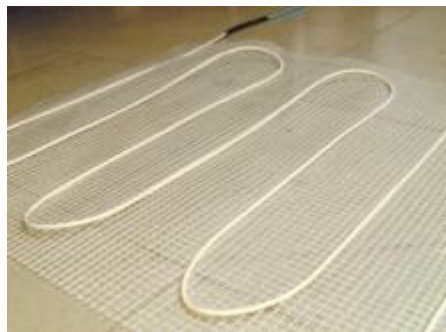
Magneettivuon tiheyden tehollisarvo oli  $0,14 \mu\text{T}$ . Liitteen 11 magneettikentän kuvaajasta havaitaan käytössä olleen television aiheuttamat magneettivuon tiheyden komponentit. Toisaalta mittarin kohinatasoksi on ilmoitettu  $0,05 \mu\text{T}$ , joten kyseisistä tuloksista ei voida sanoa mitkä taajuuskomponenteista ovat kohinaa ja mitkä todellista kenttää. STM:n asetuksen mukaisesti painotetun kentän mittausmenetelmällä määritetty altistumissuhde oli  $0,01$  sekä samasta pisteestä EU:n neuvoston suosituksen mukaisesti yksittäisten harmonisten kenttien menetelmällä lasketut altistumissuhteet olivat  $0,05$  (taajuudet on laskettu  $50 \text{ Hz}$ :n välein  $2000 \text{ Hz}$ :iin saakka) ja  $0,01$  (taajuudet on laskettu  $100 \text{ Hz}$ :n välein  $650 \text{ Hz}$ :iin saakka). Altistumissuhteet eivät saisi ylittää arvoa yksi.

Sähkökentän voimakkuuden tehollisarvo oli  $0,0463 \text{ kV/m}$ . Taajuuskomponenteista EU:n neuvoston suosituksen mukaisesti yksittäisten harmonisten kenttien menetelmällä lasketut altistumissuhteet olivat  $0,07$  (taajuudet on laskettu  $50 \text{ Hz}$ :n välein  $2000 \text{ Hz}$ :iin saakka) ja  $0,01$  (taajuudet on laskettu  $100 \text{ Hz}$ :n välein  $650 \text{ Hz}$ :iin saakka). Altistumissuhteet, joiden keskinäiset erot johtuvat kohinasta, eivät saisi ylittää arvoa yksi.

Niin kuin tutkimuksen kaikissa muissakin asunnoissa, voidaan mittaustulosten perusteella sanoa sekä sähkö- että magneettikenttien olevan myös tässä asunnossa hyvin pieniä, joten kenttien vähentämistarpeita ei ole olemassa.

## 7.9 Omakotitalon LM-12 laajakaistamittaukset

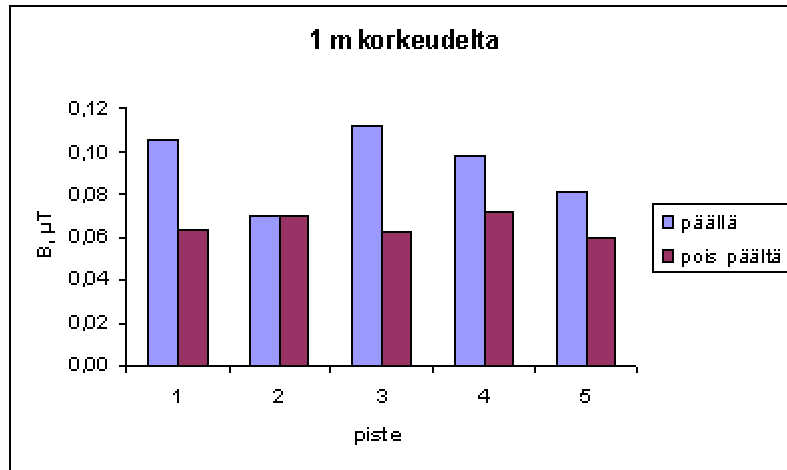
Mitattu omakotitalo oli rakennettu vuonna 2001. Talossa on kahdessa kerroksessa seitsemän huonetta ja keittiö. Sähköjärjestelmä on viisijohdinjärjestelmä. Lämmitysjärjestelmä koostuu suorista vastuslämmittimistä ja lattialämmityksestä. Mittaukset suoritettiin tammikuussa 2003 päivällä kello  $10.50 - 15.00$  omakotitalon eteisessä ja kodinhoitohuoneesta. Eteisen koko on  $6,4 \text{ m}^2$ . Eteisessä on käytössä teholtaan  $550\text{W}$  lattialämmitys. Eteisen lattiaan on upotettu  $29 \text{ m}$  lämpökaapelia. Asennus oli tehty kuvan 7.14 mukaisesti asennusvälin ollessa noin  $20 \text{ cm}$ .



*Kuva 7.14.* Lämpökaapelin asennuseriaate [29].

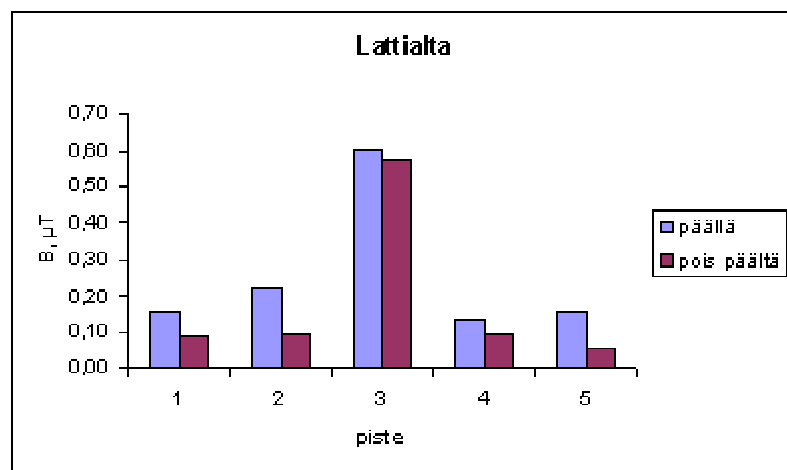
*Figure 7.14.* Installation principle of the heater cable [29].

Mittaukset suoritettiin viidestä pisteestä lattialämmityksen ollessa päällä (termostaatti asetettiin  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ ) ja vastaavasti pois päältä. Mittauspisteet sijaitsivat huoneen keskellä (piste 1) ja huoneen kulmien diagonaalien neljännesten kohdalla (pisteet 2 - 5). Piste 5 oli lähellä ulko-ovea. Eteisessä oli myös pakastin lähellä pistettä 3. Seuraavissa kuvissa 7.15 ja 7.16 on esitetty saadut mittaustulokset.



*Kuva 7.15.* Eteisestä mitatut magneettivuon tiheydet (termostaatti päällä ja pois päältä) yhden metrin korkeudelta.

*Figure 7.15.* Magnetic flux densities (thermostat on and off) measured from the hall at the height of one meter.



*Kuva 7.16.* Eteisestä mitatut magneettivuon tiheydet (termostaatti päällä ja pois päältä) lattialta.

*Figure 7.16.* Magnetic flux densities (thermostat on and off) measured from the floor.

Kuvissa pisteen kolme muita pisteitä suuremman kentänvoimakkuuden aiheuttaa mittauspisteen lähellä sijainnut pakastin. Kuten kuvista 7.15 ja 7.16 voidaan havaita, ovat lattialämmityksen aiheuttamat magneettikentät varsin pieniä. Kodinhoitohuoneen mittauksissa kaikki tulokset jäivät alle mittarin valmistajan ilmoittaman kohinatason  $0,05 \mu\text{T}$ , joten tämän mittauksen tuloksia ei esitetä tässä.

Liitteessä 12 on esitetty pisteestä 3 yhden metrin korkeudelta mitatut magneettivuon tiheyden taajuuskomponentit. Taajuuskomponenttien kuvaajasta havaitaan, että kaikki yksittäisten taajuuskomponenttien magneettikentätasot jäävät alle mittarin valmistajan ilmoittaman kohinatason  $0,05 \mu\text{T}$ . STM:n asetuksen mukaisesti painotetun kentän mittausmenetelmällä määritetty altistumissuhde oli 0,04 sekä samasta pisteestä EU:n neuvoston suosituksen mukaisesti yksittäisten

harmonisten kenttien menetelmällä lasketut altistumissuhteet olivat 0,04 (taajuudet on laskettu 50 Hz:n välein 2000 Hz:iin saakka) ja likimain nolla (taajuudet on laskettu 100 Hz:n välein 650 Hz:iin saakka).

Omakotitalon eteisestä mitattiin myös sähkökentät. Sähkökentät jäivät mittauksissa varsin pieniksi. Suurin arvo, 23,9 V/m, mitattiin eteisen pisteestä 3. Tästä pisteestä mitattiin myös sähkökentän taajuuskomponentit, jotka on esitetty liitteessä 12. Taajuuskomponenttien perusteella voidaan todeta, että lattialämmityksestä aiheutuva sähkökenttä on lähes pelkästään perustaajuista kenttää. Taajuuskomponenteista EU:n neuvoston suosituksen mukaisesti yksittäisten harmonisten kenttien menetelmällä lasketut altistumissuhteet olivat 0,03 (taajuudet on laskettu 50 Hz:n välein 2000 Hz:iin saakka) ja 0,01 (taajuudet on laskettu 100 Hz:n välein 650 Hz:iin saakka).

Mittaustulosten perusteella voidaan todeta kenttien olevan tässä sähkölämmitteisessä omakotitalossa hyvin pieniä, joten kenttien vähentämistarpeita ei ole olemassa.

## 7.10 Yhteenveto kotien mittauksista

Tutkimuksessa tehtiin laajakaistaisia sähkö- ja magneettikentän mittauksia kuuden kodin huoneissa. Taulukossa 7.7 on esitetty yhteenveto kotien mittaustuloksista. Altistuminen on esitetty altistumissuhteena.

*Taulukko 7.7. Yhteenveto kotien mittaustuloksista.*

*Table 7.7. Summary of the measurement result in homes.*

Mittaus	Max B, $\mu\text{T}$	Väestön altistus B-kentälle*	Väestön altistus B-kentälle**	Väestön altistus B-kentälle***	Max E, kV/m	Väestön altistus E-kentälle*	Väestön altistus E-kentälle**
LM-6	0,09	0,04	0,00	0,01	0,0030	0,03	0,00
LM-7	0,16	0,04	0,00	0,01	0,0378	0,04	0,01
LM-8	0,10	0,04	0,00	0,01	0,0400	0,04	0,01
LM-9	0,43	0,08	0,02	0,02	0,0651	0,05	0,02
LM-2	2,90	0,09	0,04	0,03	0,0022	0,03	0,00
LM-2	1,56	0,06	0,02	0,02	0,0022	0,03	0,00
LM-10	0,18	0,05	0,01	-	0,0323	0,04	0,01
LM-10	0,12	0,05	0,00	-	0,0215	0,01	0,00
LM-10	0,22	0,04	0,00	0,01	0,0070	0,03	0,00
LM-11	0,14	0,05	0,01	0,01	0,0463	0,07	0,01
LM-12	0,09	0,04	0,00	0,04	0,0244	0,03	0,01

\* harmoniset komponentit on laskettu 50 Hz:n välein 2000 Hz:iin saakka EU:n neuvoston suosituksen mukaisella menetelmällä

\*\* harmoniset komponentit on laskettu 100 Hz:n välein 650 Hz:iin saakka EU:n neuvoston suosituksen mukaisella menetelmällä

\*\*\* mittaukset suoritettu STM:n asetuksen mukaisella menetelmällä

Tulosten perusteella voidaan todeta, että suomalaisissa kodeissa sähkö- ja magneettikentät alittavat väestön suositusarvot riippumatta siitä, käytetäänkö tarkastelussa sosiaali- ja terveystieteiden asetuksen mukaista painotetun kentän mittaussuhteita vai Euroopan unionin neuvoston suosituksen mukaista yksittäisten harmonisten kenttien mittaussuhteita. Myös TTKK:n aikaisemmissa tutkimuksissa [16] kodeissa tehdyt sähkö- ja magneettikentät ovat olleet suositusarvoihin verrattuna pieniä.

Edellä esitettyjen tulosten perusteella voidaan havaita, että tässä hankkeessa mitatuissa kodeissa ei ylity suositusarvoja eikä laajakaistaisuuden vaikutus altistussuhteisiin ole kovin suuri. Yhteenvedon voidaan todeta, että tutkituissa kodeissa ei ole kenttien vähentämistarpeita.

## 8 Pohdinta

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, millaisia tarpeita on vähentää laajakaistaisille sähkö- ja magneettikentille altistumista uusien suositusten tähden. Tavoitteena oli kartoittaa elinympäristön laajakaistaisille kentille altistumista ja saada yleiskuva siitä, millaisille laajakaistaisille sähkö- ja magneettikentille yleensä suomalaisessa elinympäristössä altistutaan.

Yleisenä johtopäätöksenä voidaan todeta, että tässä tutkimuksessa mitatuissa kodeissa ja muuntamoiden yläpuolisissa tiloissa olivat sähkö- ja magneettikentät hyvin pieniä verrattuna suositusarvoihin, joten kenttien vähentämistarpeita ei ole.

Voimajohtojen aiheuttamat laajakaistaiset sähkökentät sen sijaan hyvin ilmeisesti ylittävät monin paikoin suositusarvon 5 kV/m. Tämän suositusarvon ylittyminen tapahtuu riippumatta siitä, käytetäänkö tarkastelussa yksittäisten harmonisten kenttien menetelmää, painotetun kentän menetelmää tai perustaajuisen kentän (50 Hz) raja-arvoa 5 kV/m. Pylväsvälit, joissa suositusarvot ylittyvät, sijaitsevat kuitenkin paikoissa, joissa altistuminen ei yleensä kestä merkittävää aikaa. Jos altistuminen ei kestä merkittävää aikaa, sovelletaan STM:n asetuksessa 50 Hz sähkökentille kolminkertaista suositusarvoa 15 kV/m. Mittauksissa pysyttiin STM:n asetuksen sallimissa rajoissa. Vastaavasti voidaan todeta, että voimajohtojen aiheuttamat laajakaistaiset magneettikentät eivät ylitä suositusarvoja. Näiden mittausten perusteella STM:n asetuksen tähden ei selvästi ole olemassa myöskään voimajohtojen kenttien vähentämistarpeita.

Tässä tutkimuksessa esitettyjen mittaustulosten perusteella näyttäisi siltä, että yliaallot nostavat altistumissuhdetta varsin vähän voimajohtojen osalta. Perustaajuisen sähkökentän ylityksiä asetetun suositusarvon 5 kV/m seitsemässä mittauksessa. Näiden mittausten lisäksi ylittyi laajakaistaisen kentän altistumissuhteen vaatimus ( $\leq 1$ ) ainoastaan kahdessa mittauksessa (kummassakin 1,04), joissa kummassakin myös perustaajuisen kentän (4,87 kV/m ja 4,89 kV/m) oli hyvin lähellä sille asetettua suositusarvoa. Lisäksi näissä mittauksissa käytettiin ainoastaan yksittäisten harmonisten kenttien menetelmää määrittäessä altistumissuhdetta. Painotetun kentän menetelmällä myös näissä mittauksissa olisi altistumissuhde voinut jäädä alle suositusarvon.

### 8.1 Laajakaistaisen kenttien määrittämisen problematiikka

Tässä tutkimuksessa etsittiin myös menetelmiä laajakaistaisen kenttien mittaamiseksi. Ei ole saatavissa kaupallista mittaria, joka mittaisi usealle eritaajuisille sähkö- ja magneettikentille altistumista STM:n asetuksessa ja EU:n neuvoston suosituksessa esitettyjen taajuusriippuvien suositusarvojen mukaisesti ja antaisi siten ulostulonaan arvon laajakaistaisille kentille altistumisen suuruudesta. Lisäksi STM:n asetuksen mukainen painotetun kentän ja EU:n neuvoston suosituksen mukainen yksittäisten harmonisten kenttien mittaussuhteiden eroavat periaatteellisesti toisistaan

siinä, että painotetun kentän mittaamenetelmä ottaa huomioon kentän vaihekulmat toisin kuin yksittäisten harmonisten kenttien mittaamenetelmä. Kummankin menetelmän perusidea on kuitenkin sama, eli altistumissuhteen arvon tulisi jäädä alle yhden.

Säteilyturvakeskuksen kehittämä STM:n asetuksen mukainen painotetun kentän mittaamenetelmä on teoreettisesti parempi, sillä se ottaa huomioon myös kentän vaihekulmat. Myös tässä menetelmässä on kuitenkin teknisesti vaikeita kohtia. Ensimmäiseksi ongelmaksi muodostuu sellaisen mittarin löytäminen, mistä löytyy luotettava analoginen ulostulo ja riittävän suuri mittauserä taajuusalue. Mittarin olisi myös hyvä olla kolmiakselinen, jotta anturin väärästä asennosta aiheutuva mittauserä tarkkuus voitaisiin eliminoida. Lisäksi kolmiakselisessa mittarissa tulisi olla jokaiselle akselille oma ulostulo, koska eri akselien sisältämää aikatietoa ei saa hukata yhdistämällä signaalit ennen suodattamista. Seuraavaksi tarvitaan ylipäästösuodatin, jonka toimintakäyrä on asetuksessa esitetyn mukainen. Tämän jälkeen signaalia tallennetaan asetuksen mukaisesti 10 minuutin ajan. Tämä puolestaan tarkoittaa valtavaa datamäärää, jos taajuudet halutaan mitata asetuksessa esitetyn mukaisesti 100 kHz:iin saakka. Näytteenottotaajuutena tulisi laskostumisen estämiseksi käyttää vähintään 200 kHz:iä Nyquistin näytteenottoeteoreeman mukaisesti. Saadusta näytteestä lasketaan tämän jälkeen puolijaksoittain (10 ms) esiintyvien huippuarvojen itseisarvojen keskiarvo. Lopuksi on varmistettava kaikkien komponenttien yhteensopivuus ja koko järjestelmä on kalibroitava altistumissuhteen määrittämistä varten.

Tässä tutkimuksessa jouduttiin tekemään joitakin kompromisseja painotetun magneettikentän mittaamenetelmän suhteen. Käytetty Narda 8532 -mittari (tarkkuus  $\pm 5\%$ ) oli yksiakselinen ja se kykeni mittaamaan taajuudet 12 Hz:stä 50 kHz:iin. Näytteenottotaajuutena käytettiin 50 kHz:iä. Taajuusalue voidaan kuitenkin todeta riittäväksi, koska perustaajuuden kentän (50 Hz) lisäksi kohinasta erottuvia yliaaltotaajuuksia oli pääasiassa 13. yliaaltoon (650 Hz) asti. Sähkökentän osalta painotetun kentän mittaamenetelmä jouduttiin hylkäämään, koska mittauserä vaiheessa käytetyt mittarit aiheuttivat ylimääräisiä piikkejä kenttiin epämääräisille taajuuksille ja näin ollen mittaustulokset jouduttiin toteamaan laatutasoltaan riittämättömiksi.

Mittaukset suoritettiin myös EU:n neuvoston suosituksen mukaisesti yksittäisten harmonisten kenttien mittaamenetelmällä, eli kentän arvot mitattiin taajuuskomponentteittain ja altistumissuhteen komponentit summattiin yhteen. Mittaukset tehtiin kaupallisella kolmeakselisella Wandel&Goltermann EFA-3 -mittarilla (tarkkuus sähkökentälle  $\pm 5\%$ , magneettikentälle  $\pm 8\%$ ).

Mitattuja arvoja ei kuitenkaan voitu verrata aivan EU:n neuvoston suosituksen mukaisesti. Käytössä ollut EFA-3 mittari ei kyennyt mittaamaan kentän taajuusvälit samanaikaisesti, vaan eritaajuiset kentän komponentit mitattiin yksitellen. Mittari ei myöskään kyennyt mittaamaan kentän arvoja aikakeskiarvoina, vaan mitatut arvot ovat hetkellisiä arvoja. Siksi EU:n neuvoston suosituksen ylittävistä mittaustuloksista ei voi päätellä, miten merkittävän ajan ylitys jatkui.

Mittauksia ei myöskään tehty taajuuksien jatkuvana summana, vaan kenttien arvot mitattiin perustaajuuden lisäksi ainoastaan 50 Hz:n välein 2000 Hz:iin asti. Lisäksi EU:n neuvoston suosituksessa oletetaan, että harmonisten yliaaltojen derivaattojen maksimit esiintyvät yhtäaikaaisesti. Tämä ei kuitenkaan vastaa käytäntöä. Sähköverkossa esiintyvät yliaallot eivät summaudu, vaan voivat jopa pienentää kentän maksimi-arvoa. Jos mittaukset tehtäisiin taajuuksien jatkuvana summana, pelkkä häiriö saattaisi riittää ylittämään vaatimuksen laajakaistaisten kenttien altistumissuhteelle.

Edellä esitetyn perusteella laajakaistaisten kenttien mittaamisessa ongelmaksi muodostuu, kuinka tiheästi ja kuinka korkealle eri taajuuksia mitataan. Mitattaessa taajuudet 100 Hz välein välillä 50 -

650 Hz saadaan altistumissuhteeksi yleensä huomattavasti pienempi arvo kuin mitattaessa taajuudet 50 Hz välein välillä 50 - 2000 Hz. Altistumissuhteen yhtälössä mitattavia taajuuksia ovat kaikki taajuudet 100 kHz asti. Lisäksi suosituksessa esitetyistä yhtälöistä voidaan havaita, että taajuuden kasvaessa kasvaa myös sen painoarvo määritettäessä altistumissuhdetta. Koska jokaiseen mitattuun arvoon vaikuttaa mittarin virhe (kohinataso), kasvaa sen vaikutus sitä mukaan, mitä korkeampia taajuuskomponentteja mitataan.

Käytännössä sähköjärjestelmässä särön kannalta merkittävät yliaaltotaajuudet ovat taajuudeltaan alle 650 Hz. Näin ollen voidaan todeta, että altistumissuhteet, jotka on laskettu 100 Hz välein 650 Hz:iin saakka, ovat riittäviä käytännössä. Tähän saadaan tukea myös vertailtaessa mittaustuloksia painotetun kentän mittausten menetelmällä saatuihin mittaustuloksiin.

Tulevaisuudessa olisi tärkeää kehittää STM:n asetuksen mukaista painotetun kentän mittausten menetelmää, jotta laajakaistaisten kenttien arvot saataisiin luotettavasti selvitettyä. Olisi myös tärkeää selvittää, kuinka paljon sähköjärjestelmästä aiheutuvien kenttien mittaustuloksiin vaikuttaa mittauksissa käytettävä taajuusalue. Riittävän taajuusalueen määrittäminen on tärkeää, sillä ei ole saatavissa kaupallista mittaria, jonka taajuusalue olisi STM:n asetuksen mukainen ja mittaussuhteet olisivat yhtäaikaaisesti riittävät.

Keskeisin tulevaisuuden haaste on saada markkinoille STM:n asetuksen mukainen kaupallinen mittari. Vasta tämän jälkeen STM:n asetusta voidaan luottavaisin mielin soveltaa käytännön mittaustuloksissa.

## Lähteet

1. Anttila I. Saransaari P. 1981. Katsaus sähköverkon yliaaltoihin ja niiden aiheuttamiin häiriöihin. Raportti, Tampere, TTKK, 38 s.
2. CIGRÉ. 1980. Electric and magnetic fields produced by transmission systems. Description of phenomena and practical guide for calculation. International Conference on Large High Voltage Electric Systems, Pariisi, Ranska. 139 s.
3. Council of the European Union, Council Recommendation of 12 July 1999 on the limitation of exposure of the general public to electromagnetic fields (0 Hz to 300 GHz), Official Journal of the EC: L 199 on 30 July 1999, s. 59-70
4. Glyn James. 1999. Advanced Modern Engineering Mathematics. Addison-Wesley, 989 s.
5. Holaday Industries Inc. 1992. HI-3603 VDT/VLF Survey Meter, User's Manual.
6. Holaday Industries Inc. 1992. HI-3604 ELF Survey Meter, User's Manual.
7. ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection). Guidelines for Limiting Exposure to Time-varying Electric, Magnetic and Electromagnetic fields (up to 300 GHz). Health Physics, 74(1998):4, s. 494-522.
8. IEEE Magnetic Fields Task Force. 1988. Magnetic Fields from Electric Power Lines: Theory and Comparison to Measurements. A report of the IEEE Magnetic Fields Task Force of the AC Fields Working Group of the Corona and Field Effects Subcommittee of the Transmission and Distribution Committee. IEEE Transactions on Power Delivery 3, 4, s. 2127-2136.

9. IEEE Std. 644-1994. 1995. IEEE Standard Procedures for Measurement of Power Frequency Electric and Magnetic Fields From AC Power Lines. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York, USA, 30 s.
10. Keikko T, Kotiniitty J, Korpinen L, Elovaara J, Vanhala P. 2000. Considering Electric and Magnetic Fields in Electric Power System Design in Finland, CIGRÈ.
11. Korpinen L. 1996. Cardiovascular Effects of Short Term Exposure to Electric and Magnetic Fields of Electricity Power Transmission, Publications 182, Tampere University of Technology, 140 s.
12. Korpinen L.; (toim.); Ajankohtaispäivä: Pientaajuiset (50 Hz - 100 kHz) sähkö- ja magneettikentät työympäristössä. Tampereen teknillinen korkeakoulu, Sähkövoimatekniikan laitos, Teollisuuden sähkötekniikka, raportti 2-99, Tampere 1999, 125 s.
13. Korpinen L., Isokorpi J., Keikko T.; Kartoitus pientaajuisista sähkökentistä elin- ja työympäristössä. Tampereen teknillinen korkeakoulu, Sähkövoimatekniikan laitos, raportti 6-98, Tampere 1998, 35 s.
14. Korpinen L.; Kartoitus pientaajuisista sähkökentistä valmistui. Sähköala, 1999, no 10, s. 60-61
15. Korpinen L. 2000. Käyttöajuiset sähkö- ja magneettikentätelinympäristössä. Sähkö&Tele 2-2000, s.56-59
16. Korpinen L. 2000. Laitteiden ja elinympäristön sähkö- ja magneettikenttien mittaaminen. Kauppa- ja teollisuusministeriön tutkimuksia ja raportteja. 9/2000, 134 s.
17. Kotiniitty, J., Reivonen, S., Kantell, T., Keikko, T., Korpinen, L. 1999. Kiinteistömuuntamoiden magneettikentät. Tampereen teknillinen korkeakoulu, Sähkövoimatekniikka, Teollisuuden sähkötekniikka, raportti. Tampere. 1-99, 90 s.
18. National Instruments. 2001. DAQCARD-AI-16XE-50. Austin, Texas.
19. National Instruments. 2000. User Manual, labVIEW 6i. Austin, Texas.
20. ORAU (Oak Ridge Associated Universities). 1992. Final Report; Health Effects of Low-Frequency Electric and magnetic fields. Oak Ridge, Tenn USA; II:10-1.
21. Sauramäki T., Keikko T., Korpinen L. 2002. Laajakaistaisten sähkö- ja magneettikenttien mittaaminen 400 kV voimajohtojen alla. Tampereen teknillinen korkeakoulu, Sähkötekniikka ja terveys -laboratorio, Raportti 1-2002. Tampere. 63 s.
22. SENER. 1999. Loistehon kompensointi ja yliaaltojen rajoittaminen, Sähköenergialiitto ry, Helsinki.
23. Sosiaali- ja terveysministeriö. Väestön ionisoimatonta säteilyaltistusta rajoittavan sosiaali- ja terveysministeriön NIR-asiantuntijaryhmän muistio, Sosiaali- ja terveysministeriön työryhmämuistioita 2001:38, Helsinki 2002, 64 s.
24. Sosiaali- ja terveysministeriö. Sosiaali- ja terveysministeriön asetus ionisoimatonta säteilyn väestölle aiheuttaman altistumisen rajoittamisesta. Helsinki, 4.4.2002.

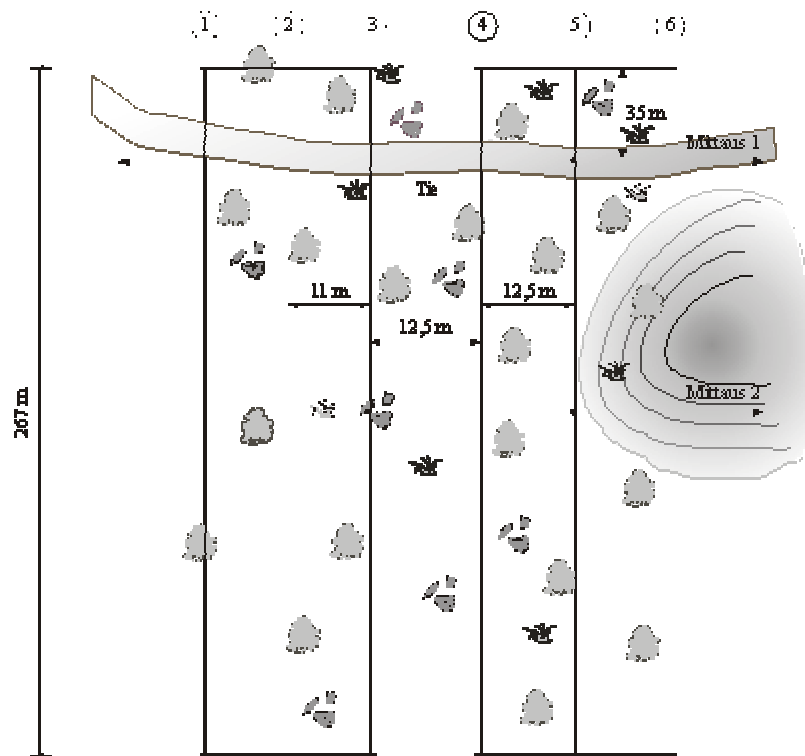
25. Suomalaiset ABB-yhtiöt. 2000. Teknisiä tietoja ja taulukoita, Vaasa, 626 s.
26. Sähkö ja kaukolämpö 2000, Helsinki: Adato Energia, 2000, s. 60
27. WHO. 1998. Electromagnetic Fields and Public Health: Extremely Low Frequency (ELF), Fact Sheet, WHO/205.
28. www.fingrid.fi
29. www.elfoil.fi/sovellukset/lattiakaap.html

## Liitteet

## LIITE 1

### Voimajohdon laajakaistamittaukset LM-1

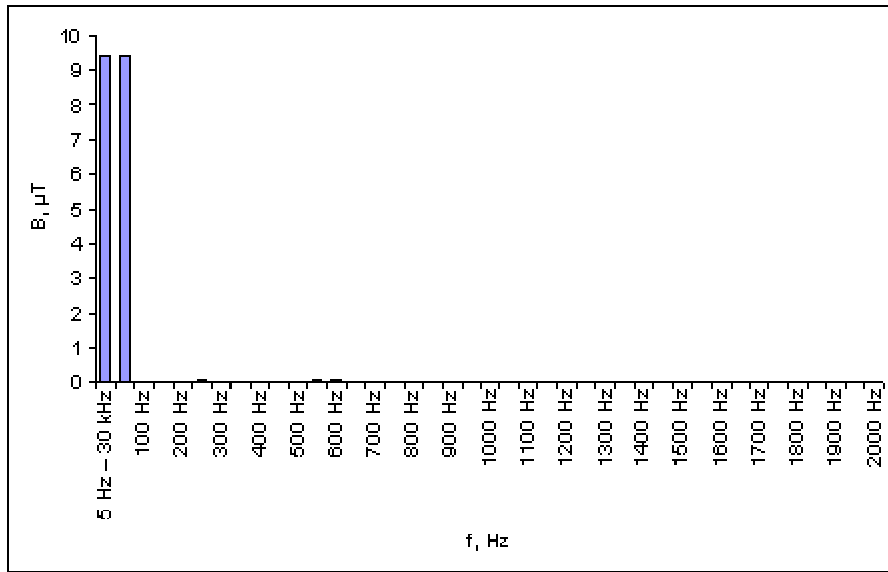
Mittauspisteiden sijainti voimajohdolla LM-1



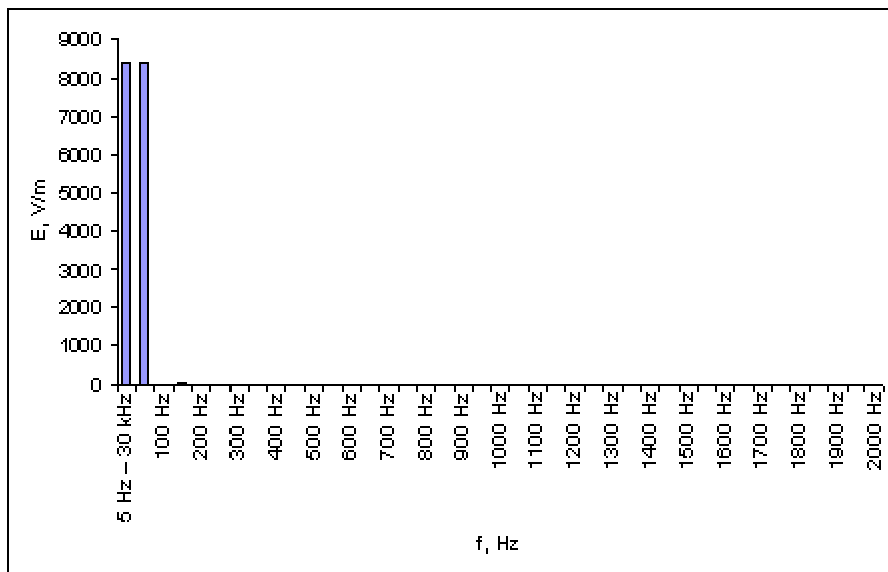
Jokimen kirkon tien kohdalla

- |           |           |
|-----------|-----------|
| (1) 12,3m | (4) 11,6m |
| (2) 12,5m | (5) 11,3m |
| (3) 12,7m | (6) 12,6m |

Voimajohdon LM-1 magneettivuon tiheyden taajuuskomponentit



Voimajohdon LM-1 sähkökentän voimakkuuden taajuuskomponentit.

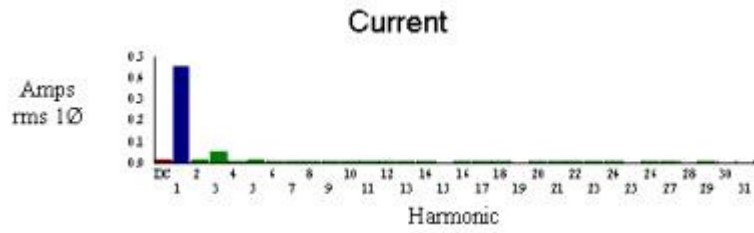


## LIITE 2

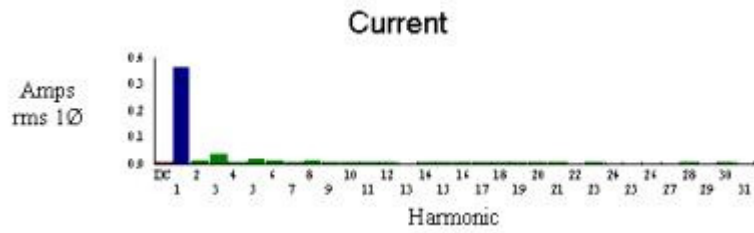
### Muuntamon yläpuolisen toimistotilan laajakaistamittaukset LM-2

Muuntamon LM-2 virtojen taajuuskomponentit ennen ja jälkeen mittausta. Virrat on mitattu mittamuuntajalta, muuntosuhde 5/2000.

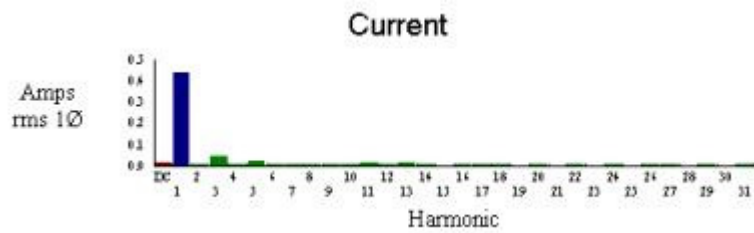
Vaihe 1 ennen mittausta.



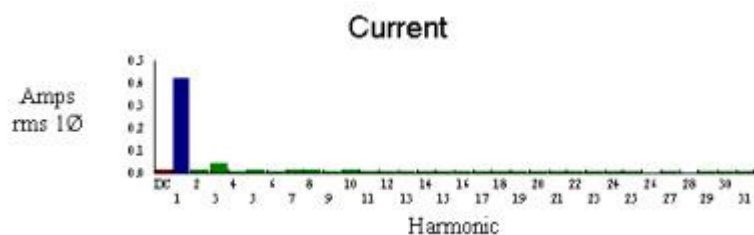
Vaihe 1 mittauksen jälkeen



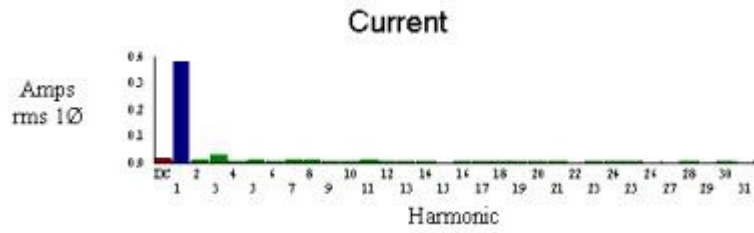
Vaihe 2 ennen mittausta



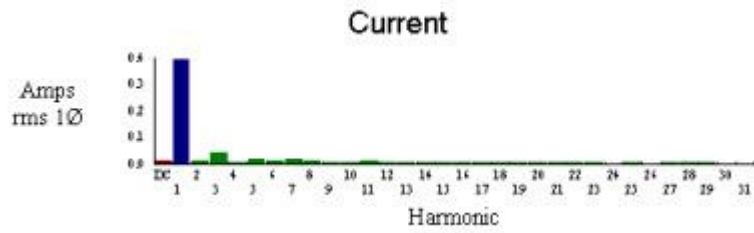
Vaihe 2 mittauksen jälkeen



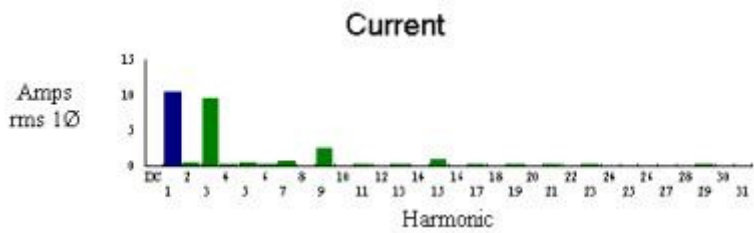
Vaihe 3 ennen mittausta



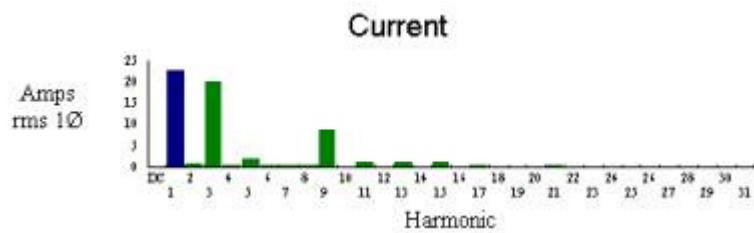
Vaihe 3 mittauksen jälkeen



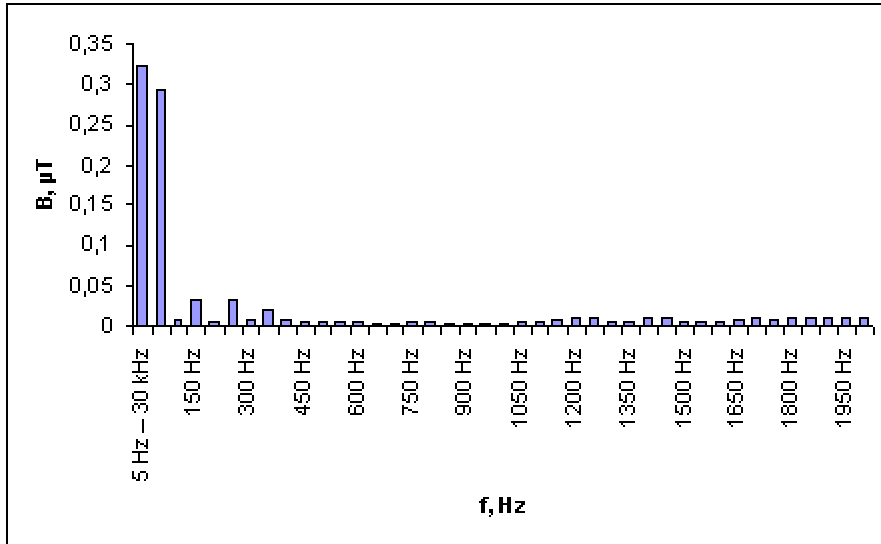
Vaihe n ennen mittausta



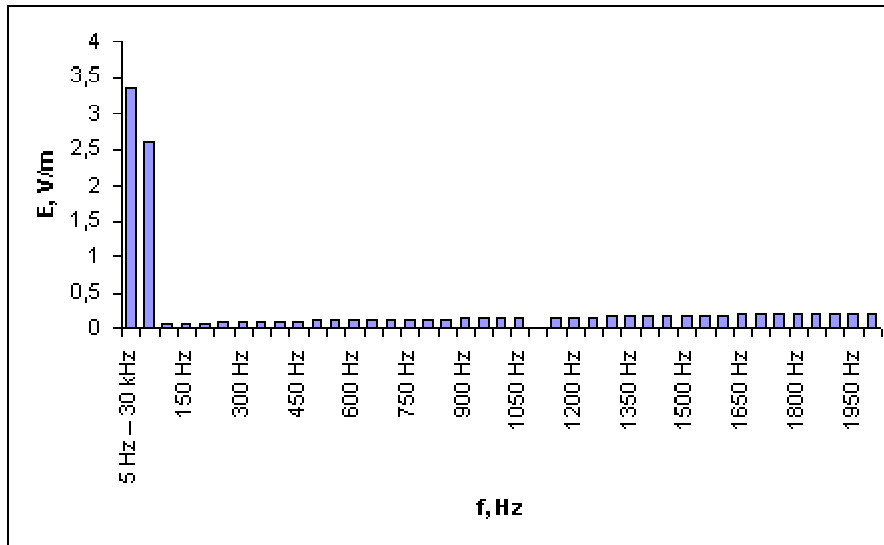
Vaihe n mittauksen jälkeen



Muuntamon LM-2 pisteestä 2 yhden metrin korkeudelta mitatut magneettivuon tiheyden taajuuskomponentit



Muuntamon LM-2 pisteestä 2 yhden metrin korkeudelta mitatut sähkökentän voimakkuuden taajuuskomponentit.

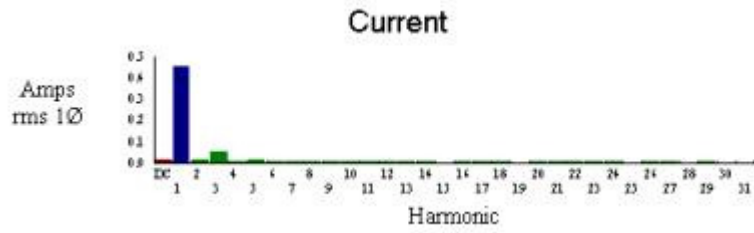


### LIITE 3

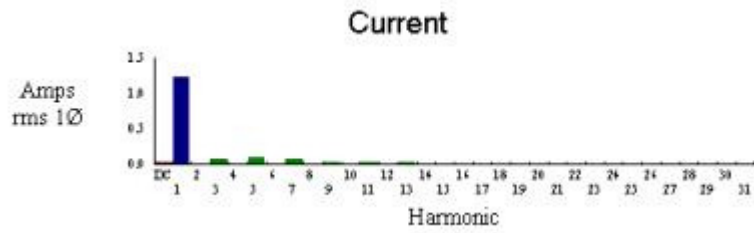
#### Muuntamon yläpuolisen toimistotilan laajakaistamittaukset LM-3

Muuntamon LM-3 virtojen taajuuskomponentit ennen ja jälkeen mittausta. Virrat on mitattu mittamuuntajalta, muuntosuhde 5/2000.

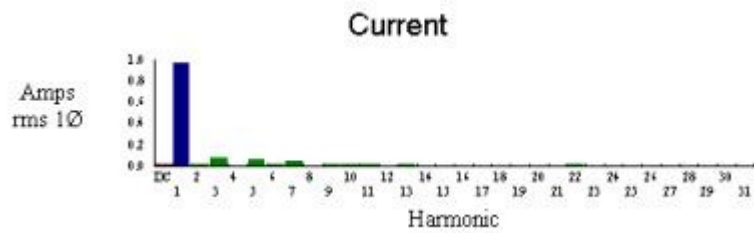
Vaihe 1 ennen mittausta



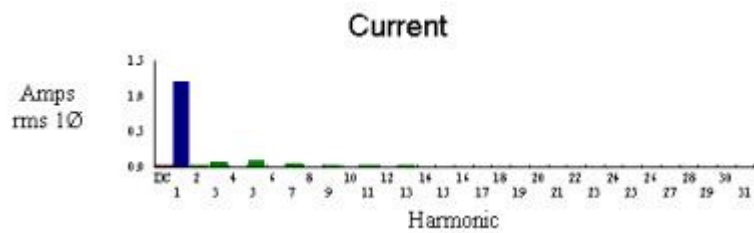
Vaihe 1 mittauksen jälkeen



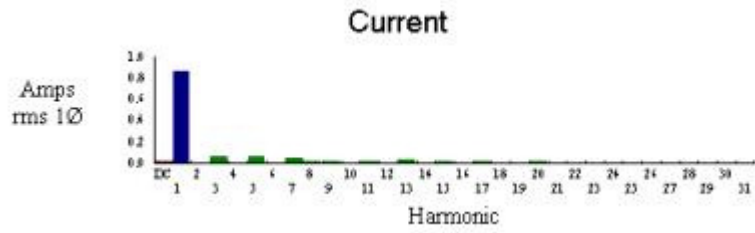
Vaihe 2 ennen mittausta



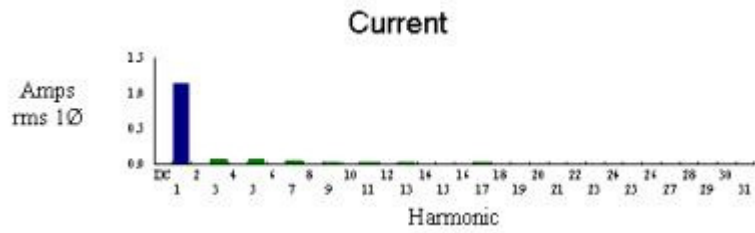
Vaihe 2 mittauksen jälkeen



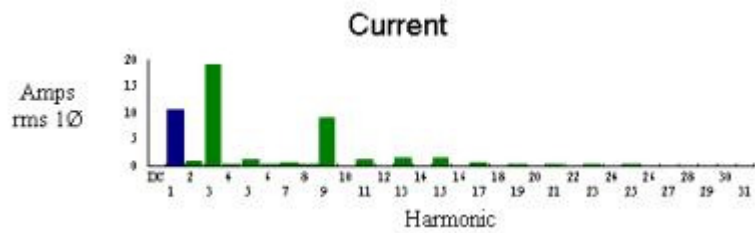
Vaihe 3 ennen mittausta



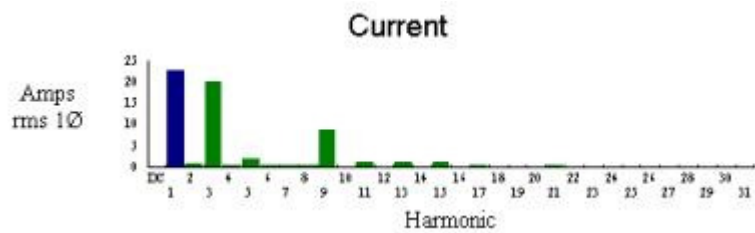
Vaihe 3 mittauksen jälkeen



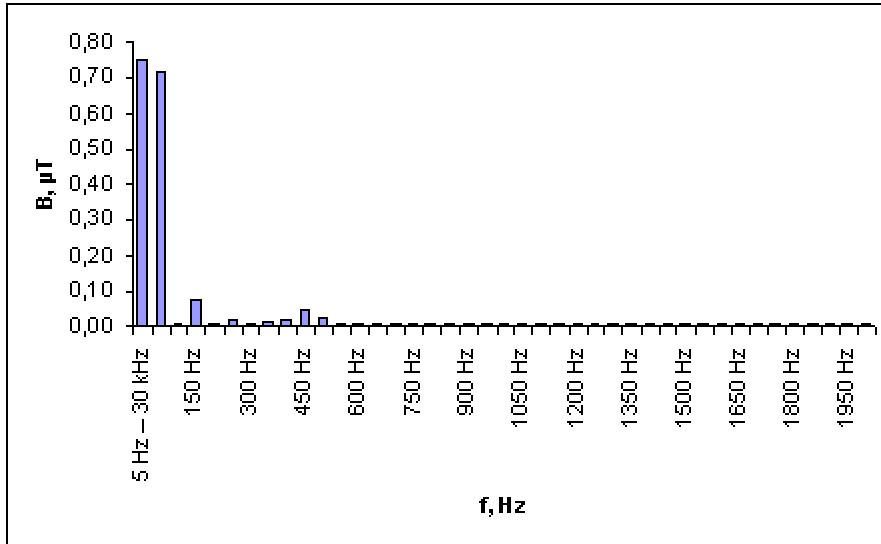
Vaihe n ennen mittausta



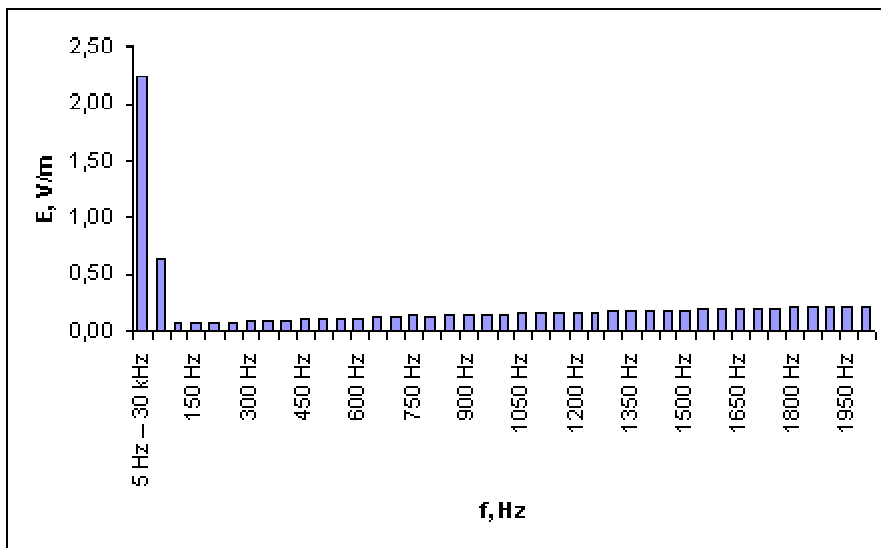
Vaihe n mittauksen jälkeen



Muuntamon LM-3 pisteestä 19 yhden metrin korkeudelta mitatut kentän taajuuskomponentit



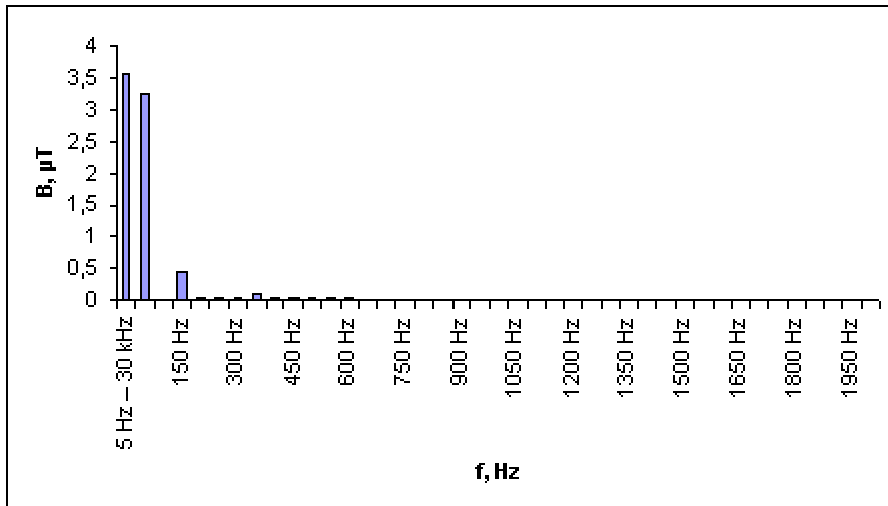
Muuntamon LM-3 pisteestä 19 yhden metrin korkeudelta mitatut sähkökentän voimakkuuden taajuuskomponentit



## LIITE 4

### Muuntamon yläpuolisen toimistotilan laajakaistamittaukset LM-4

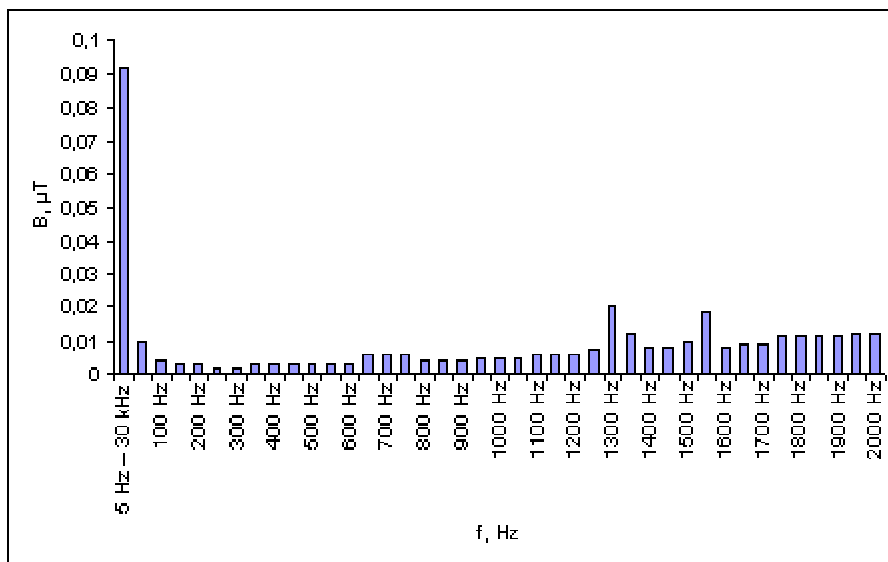
Muuntamon LM-4 pisteestä 1 yhden metrin korkeudelta mitatut kentän taajuuskomponentit.



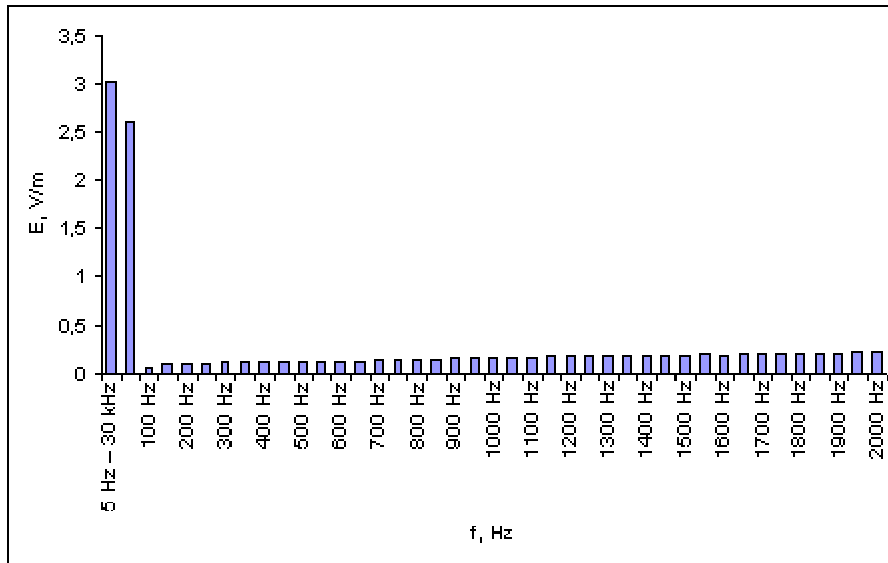
## LIITE 5

### Kerrostalon laajakaistamittaukset LM-5

Kerrostalomittauksen LM-5 magneettikentän maksikohdasta (makuuhuone) mitatut magneettivuon tiheyden taajuuskomponentit



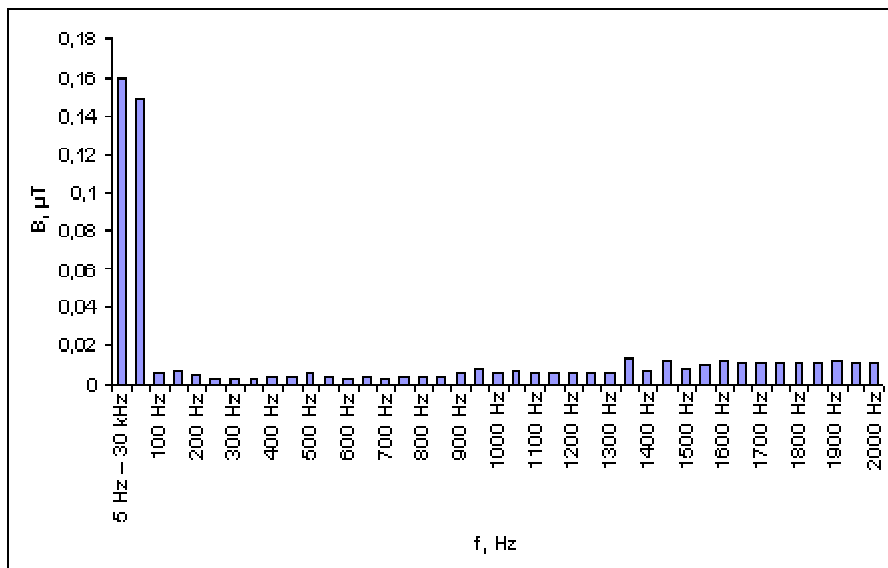
Kerrostalomittauksen LM-5 sähkökentän maksikohdasta (olohuone) mitatut sähkökentän voimakkuuden taajuuskomponentit



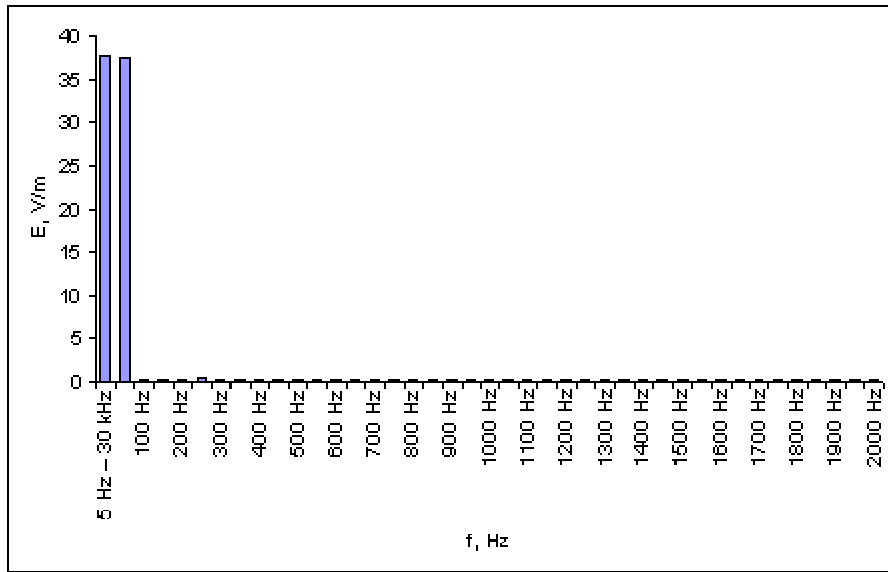
## LIITE 6

### Kerrostalon laajakaistamittaukset LM-6

Kerrostalomittauksen LM-6 magneettikentän maksimikohdasta (työhuone) mitatut magneettivuon tiheyden taajuuskomponentit



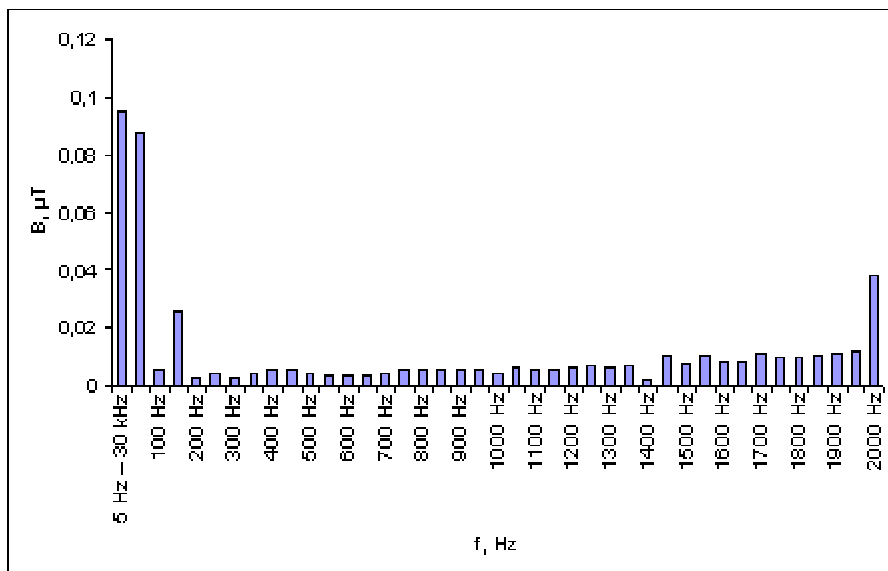
Kerrostalomittauksen LM-6 sähkökentän maksimikohdasta (työhuone) mitatut sähkökentän voimakkuuden taajuuskomponentit



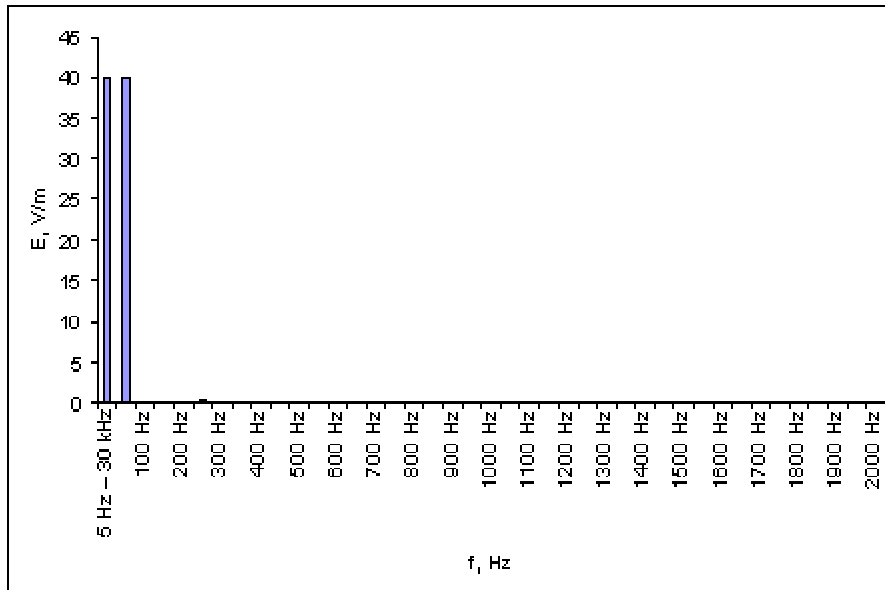
## LIITE 7

### Kerrostalon laajakaistamittaukset LM-7

Kerrostalomittauksen LM-7 magneettikentän maksikohdasta (olohuone) mitatut magneettivuon tiheyden taajuuskomponentit



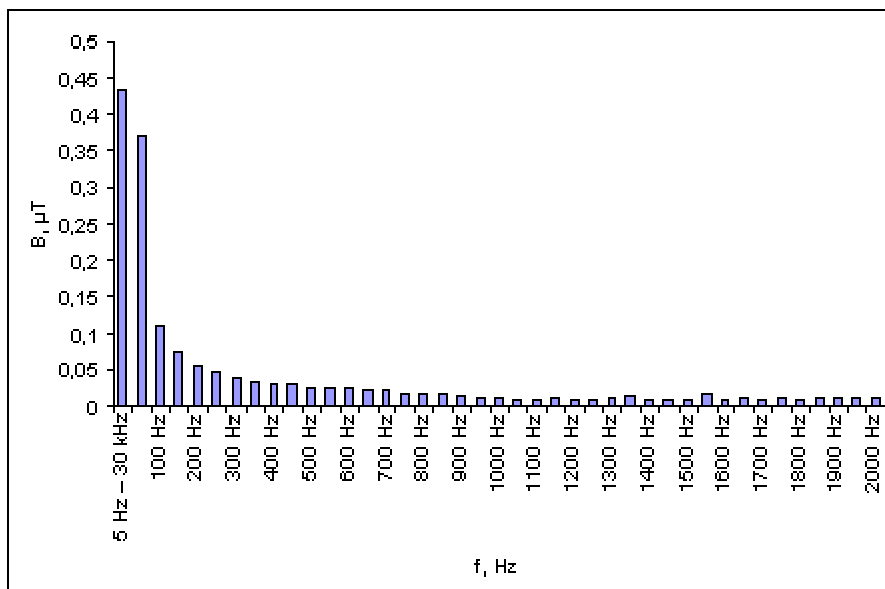
Kerrostalomittauksen LM-7 sähkökentän maksikohdasta (huone) mitatut sähkökentän voimakkuuden taajuuskomponentit



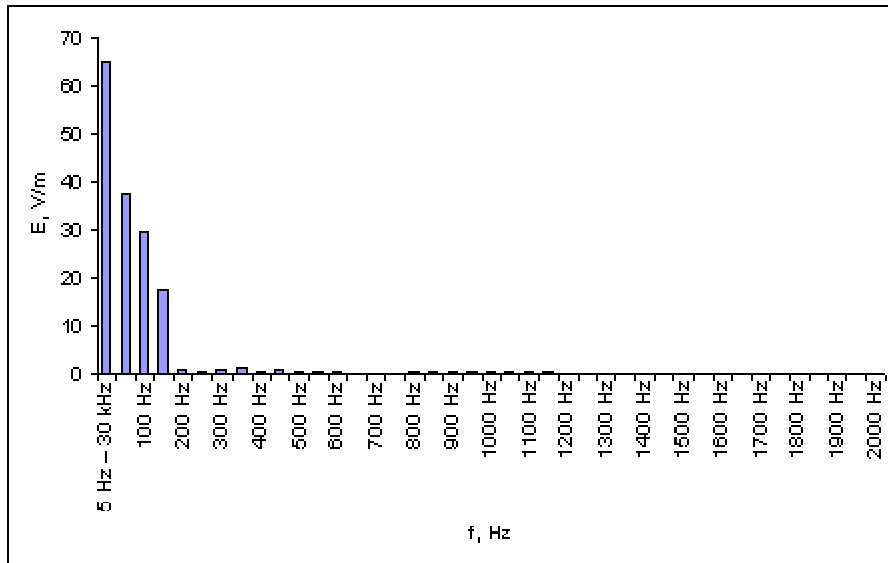
## LIITE 8

### Kerrostalon laajakaistamittaukset LM-8

Kerrostalomittauksen LM-8 pisteestä 3 yhden metrin korkeudelta mitatut magneettivuon tiheyden taajuuskomponentit



Kerrostalomittauksen LM-8 pisteestä 3 yhden metrin korkeudelta mitatut sähkökentän voimakkuuden taajuuskomponentit

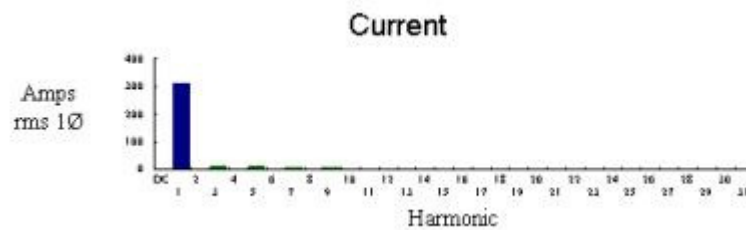


## LIITE 9

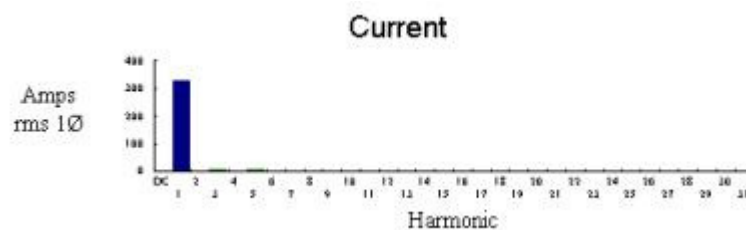
### Muuntamon yläpuolisen kerrostalohuoneiston laajakaistamittaukset LM-9

Muuntamon LM-9 virtojen taajuuskomponentit (olohuone)

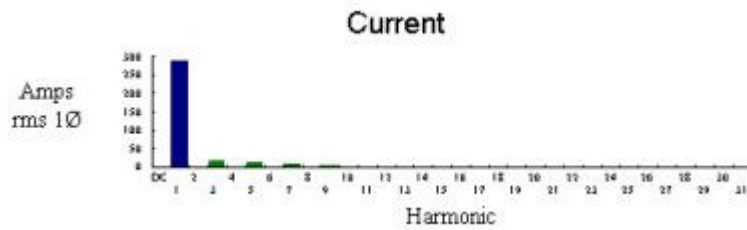
Vaihe 1 ennen mittausta



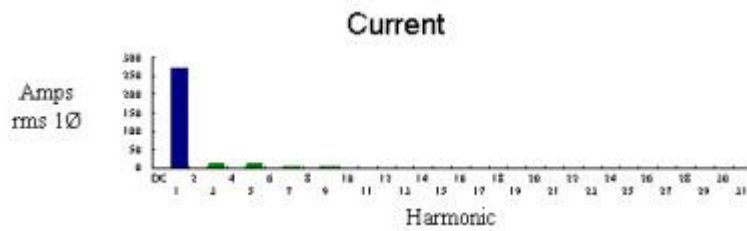
Vaihe 1 mittauksen jälkeen



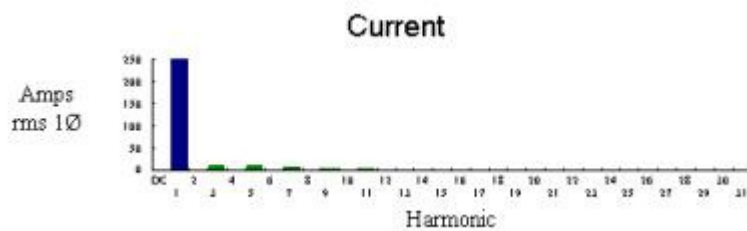
Vaihe 2 ennen mittausta



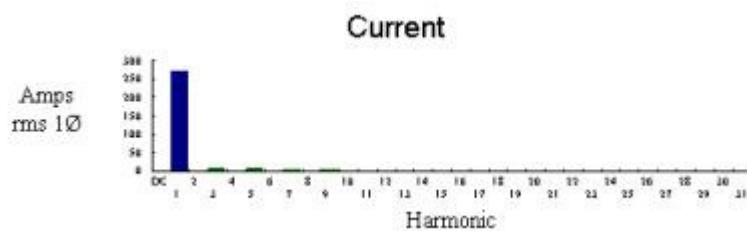
Vaihe 2 mittauksen jälkeen



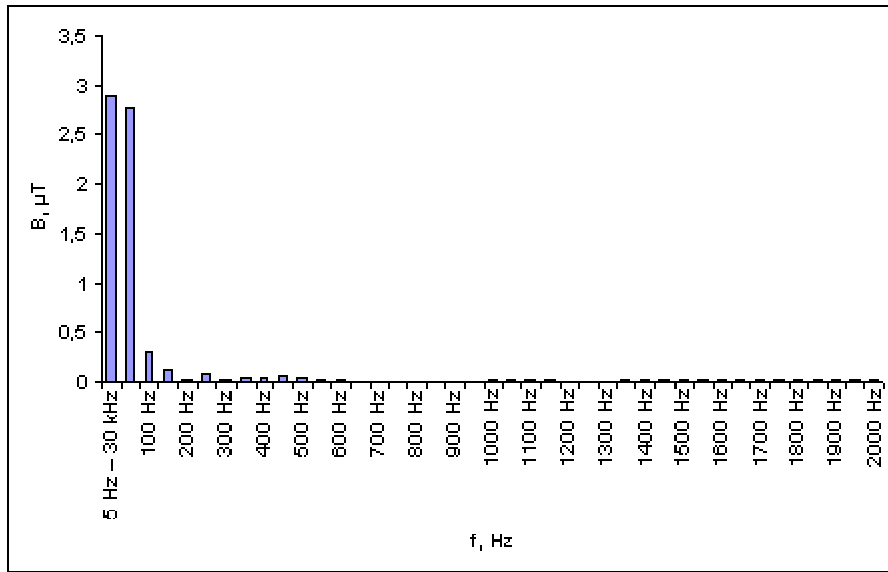
Vaihe 3 ennen mittausta



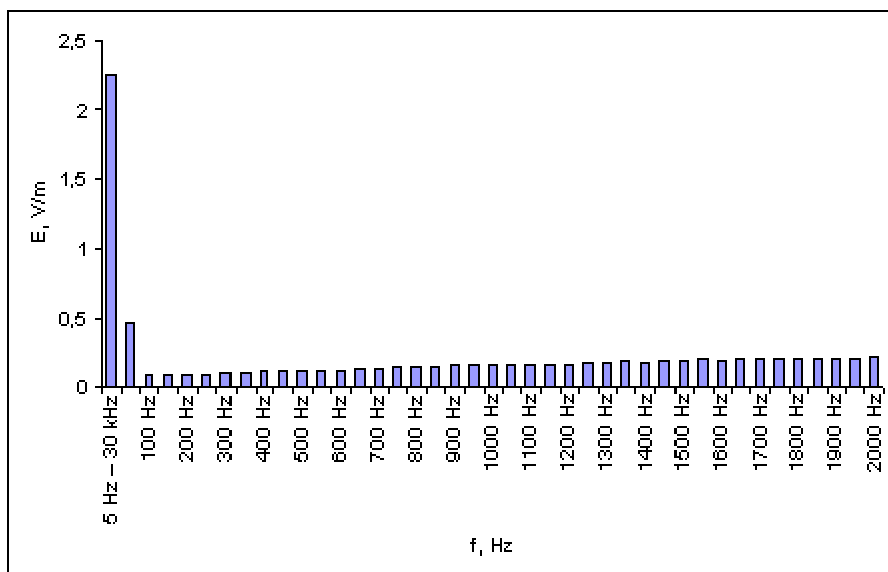
Vaihe 3 mittauksen jälkeen



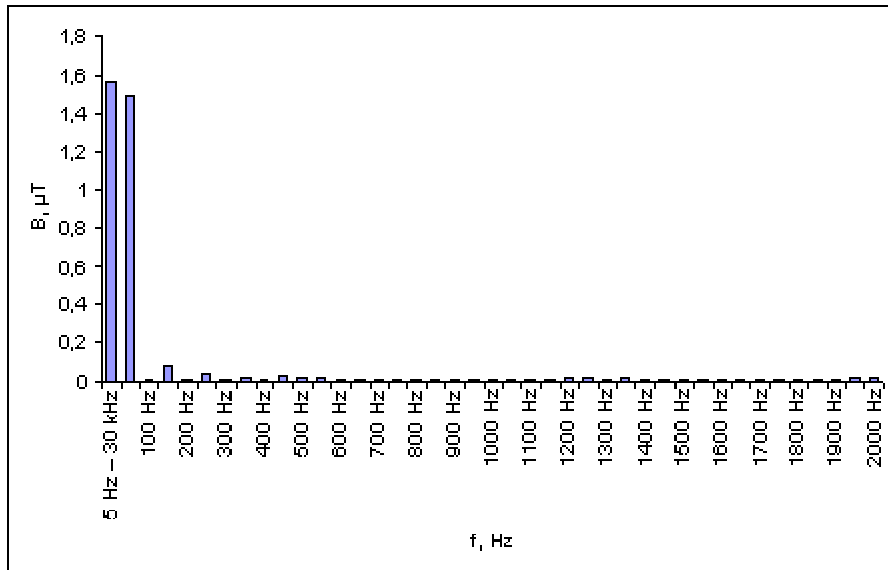
Muuntamon LM-9 olohuoneen pisteestä 3 yhden metrin korkeudelta mitatut magneettivuon tiheyden taajuuskomponentit



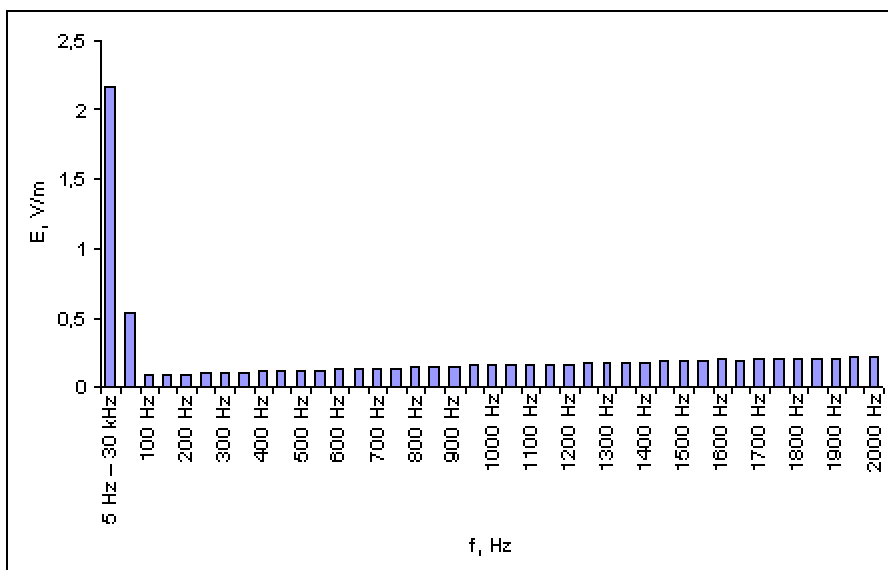
Muuntamon LM-9 sähkökentän voimakkuuden taajuuskomponentit, jotka on mitattu samasta pisteestä kuin magneettivuon tiheyden taajuuskomponentit (olohuone).



Muuntamon LM-9 makuuhuoneen pisteestä 3 yhden metrin korkeudelta mitatut magneettivuon tiheyden taajuuskomponentit



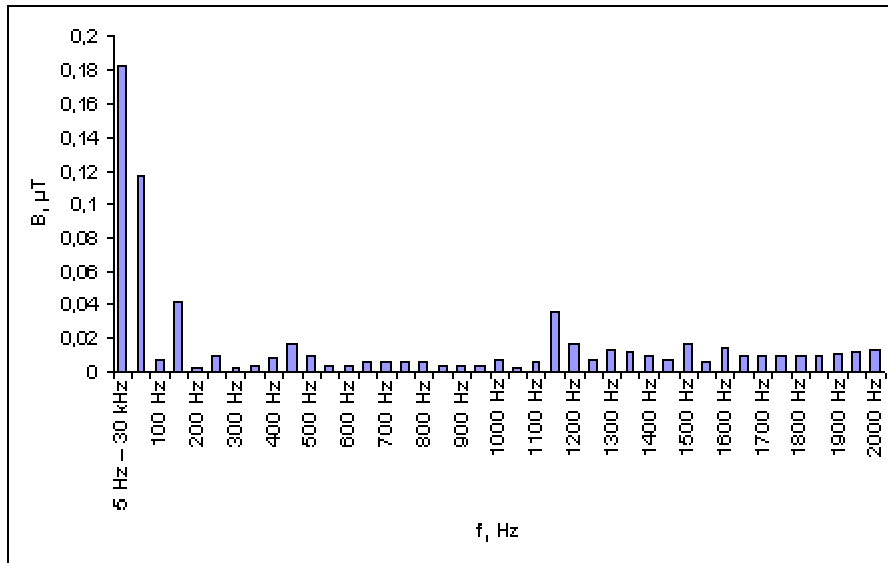
Muuntamon LM-9 makuuhuoneen pisteestä 3 yhden metrin korkeudelta mitatut sähkökentän voimakkuuden taajuuskomponentit



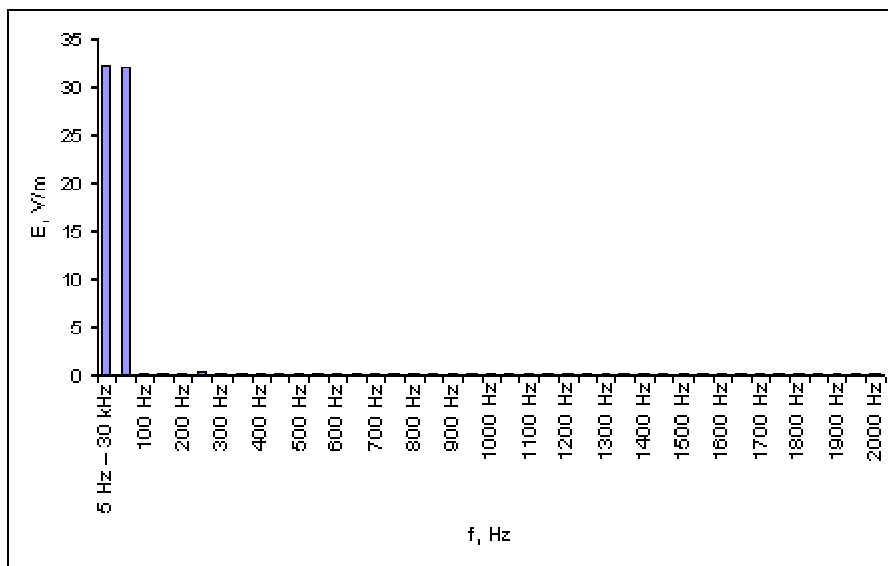
## LIITE 10

### Kerrostalon laajakaistamittaukset LM-10

Kerrostalomittauksen LM-10 olohuoneen magneettikentän maksikohdasta mitatut magneettivuon tiheyden taajuuskomponentit



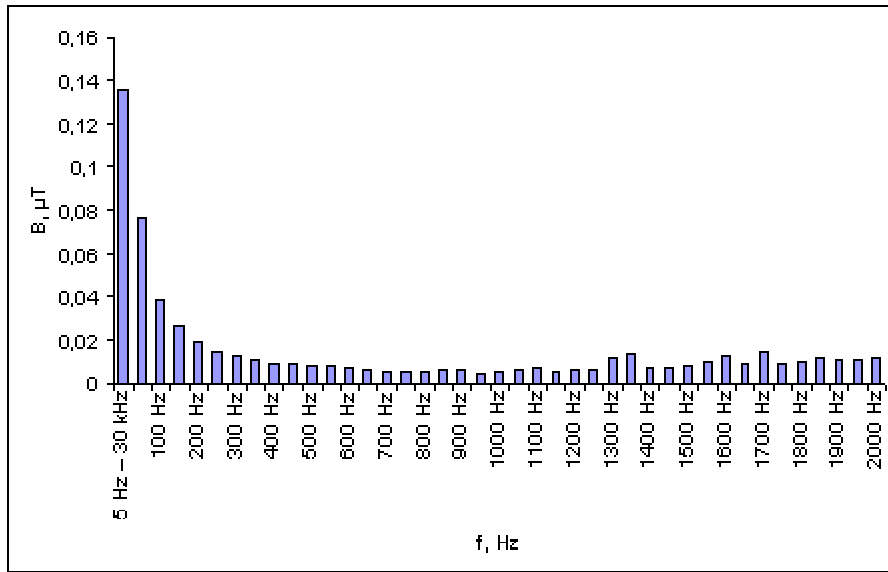
Kerrostalomittauksen LM-10 olohuoneen sähkökentän maksikohdasta mitatut sähkökentän voimakkuuden taajuuskomponentit



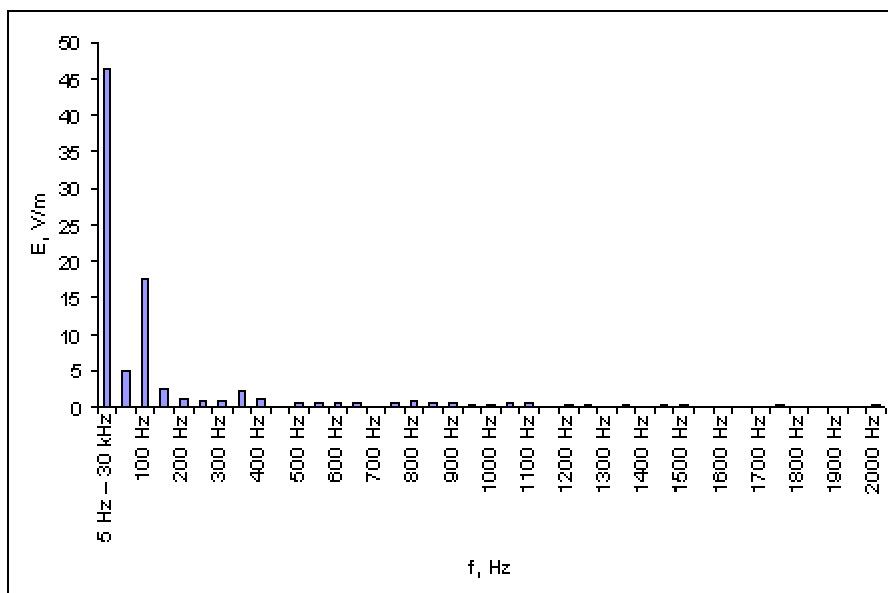
## LIITE 11

### Kerrostalon laajakaistamittaukset LM-11

Kerrostalomittauksen LM-11 magneettikentän maksikohdasta mitatut magneettivuon tiheyden taajuuskomponentit



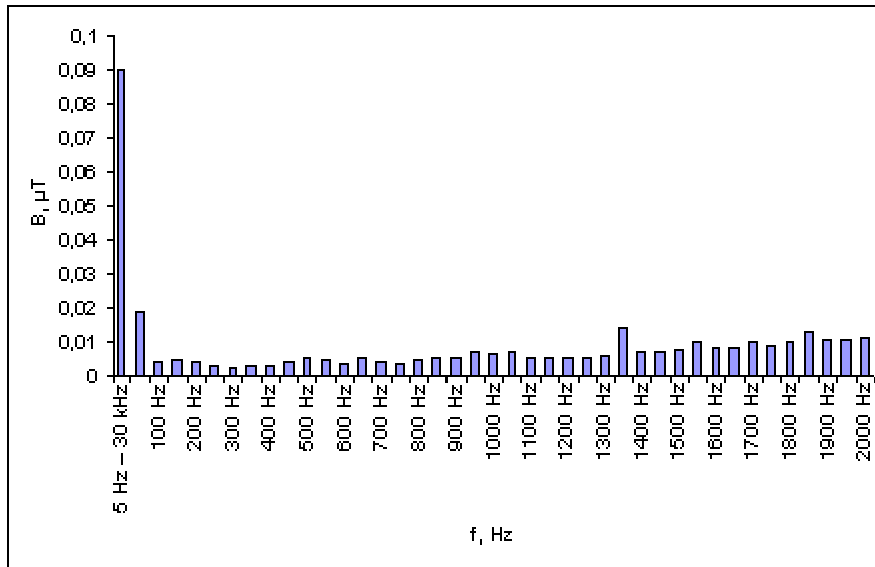
Kerrostalomittauksen LM-11 sähkökentän maksikohdasta mitatut sähkökentän voimakkuuden taajuuskomponentit



## LIITE 12

### Omakotitalon laajakaistamittaukset LM-12

Omakotitalon LM-12 eteisestä pisteestä 3 mitatut magneettivuon tiheyden taajuuskomponentit, kun lattialämmitys oli päällä



Omakotitalon LM-12 eteisestä pisteestä 4 mitatut magneettivuon tiheyden taajuuskomponentit, kun lattialämmitys oli päällä

