

**Laajakaistaisille sähkö- ja magneettikentille altistuminen työympäristössä,  
erityisesti sähkön tuotannon, siirron ja jakelun työpaikoilla**

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



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
Sähkötekniikka ja terveys -laboratorio  
Tampere 2002

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

WWW-versio julkaistu 2.7.2003

## Sisällysluettelo

[Pääsivu](#)

[Tiivistelmä](#)

[Abstract](#)

[Alkusanat](#)

### [1. Johdanto](#)

[1.1 Työntekijäaltistumisen suositusarvot sähkö- ja magneettikentille](#)

[1.2 Säteilyturvakokeskuksen kehittämä painotetun kentän mittaamenetelmä](#)

### [2. Sähkö- ja magneettikentät työympäristössä](#)

[2.1. Sähkön tuotannon sähkö- ja magneettikentälähteet](#)

[2.2. Siirto- ja jakelujohtojen sähkö- ja magneettikentät](#)

[2.3. Sähköasemien sähkö- ja magneettikentät](#)

[2.4. Magneettikentille altistuminen työympäristössä](#)

### [3. Sähkön tuotannossa, siirrossa ja jakelussa esiintyvät yliaallot](#)

[3.1. Yliaaltolähteet](#)

### [4. Laajakaistaisten kenttien mittaaminen](#)

[4.1 Laajakaistaisten kenttien mittauspisteiden valinta](#)

[4.2 Yksittäisten harmonisten kenttien mittaamenetelmä](#)

[4.3 Painotetun kentän mittaamenetelmä](#)

### [5. Mittaustuloksia sähkön tuotannon laajakaistaista kentistä](#)

[5.1 Vesivoimalaitoksen LM-1 laajakaistamittaus](#)

### [6. Mittaustuloksia sähköasemien laajakaistaista kentistä](#)

[6.1 400 kV kytkinsähköaseman LM-2 laajakaistamittaus](#)

[6.2 110 kV GIS:n LM-3 laajakaistamittaus](#)

[6.3 400 kV kytkinsähköaseman LM-4 laajakaistamittaus](#)

[6.4 400/110 kV muuntosähköaseman LM-5 laajakaistamittaus](#)

[6.5 400 kV kytkinsähköaseman LM-6 laajakaistamittaus](#)

[6.6 110 kV kytkinsähköaseman LM-7 laajakaistamittaus](#)

[6.7 400/110 kV muuntosähköaseman LM-8 laajakaistamittaus](#)

### [7. Mittaustuloksia teollisuuden laajakaistaista kentistä](#)

[7.1 Paperiteollisuuden yhtiön LM-9 laajakaistamittaus](#)

[7.2 Paperiteollisuuden yhtiön LM-10 laajakaistamittaus](#)

[7.3 Metalliteollisuuden yhtiön LM-11 laajakaistamittaus](#)

[7.4 Metalliteollisuuden yhtiön LM-12 laajakaistamittaus](#)

[7.5 Metalliteollisuuden yhtiön LM-13 laajakaistamittaus](#)

### [8. Pohdinta](#)

[8.1 Työympäristön laajakaistaisten kenttien mittaustulokset](#)

[8.2 Työympäristön laajakaistaisten kenttien mittaamenetelmän kehittäminen](#)

[Lähteet](#)

[Liitteet](#)

## Tiivistelmä

Kenttien mahdollisten terveysvaikutusten tähden ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) on julkaissut suosituksen, jossa on esitetty työntekijöiden altistuksen suositusarvot. Sen mukaan 50 Hz sähkö- ja magneettikentille altistumisen suositusarvot ovat 10 kV/m ja 500  $\mu$ T. 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 pientaajuisille sähkö- ja magneettikentille altistumiselle, mutta työntekijät on jätetty tämän asetuksen ulkopuolelle.

Tämän tutkimuksen päätavoitteena oli tutkia, millaisia tarpeita on vähentää laajakaistaisille sähkö- ja magneettikentille altistumista uusien suositusten tähden. Tutkimuksessa keskityttiin sähköntuotantoon, siirtoon ja jakeluun. Tässä raportissa kuvataan, minkälaisia tuloksia on saatu työympäristössä tehdyistä mittauksista. Mittauksia on tehty vesivoimalaitoksella, sähköasemilla, sekä metalli- ja paperiteollisuudessa. Mittauksissa on käytetty ICNIRP:n suosituksen mukaista yksittäisten harmonisten yliaaltojen mittausmenetelmää sekä magneettikentälle Säteilyturvakeskuksen (STUK) käyttämää painotetun kentän menetelmää.

Sähkön tuotannon osalta tehtiin yksi sähkö- ja magneettikentille altistumisen mittaus. Sähkön tuotannon kentille altistumisen mittaukset tehtiin vesivoimalaitoksen sisätiloissa. Altistumisen kannalta mitatut sähkö- ja magneettikentät jäivät selvästi alle suositusarvojen.

Sähköasemien osalta mittauksia tehtiin 400 kV ja 110 kV sähköasemien kytkinkentillä. Sähkö- ja magneettikentille altistumisen mittauksissa (13 mittauslinjaa, joissa paljon mittauksia, 11 laajakaistamittausta) sähkökentät ovat yleensä suositusarvoihin nähden magneettikenttiä suurempia. Sähkökenttä ylitti altistumissuhteen suositusarvon kahdessa mittauksessa. Molemmat suositusarvojen ylitykset olivat 400 kV sähköasemalla. 110 kV sähköasemalla sähkökentät olivat selvästi alle suositusarvojen. Suurimmat magneettikenttäaltistumiset mitattiin 110 kV GIS:n kytkinkentältä ja kaapelitunnelista. Magneettikentät jäivät kuitenkin kaikissa sähköasemien kentille altistumisen mittauksissa selvästi alle suositusarvojen.

Teollisuuden työtehtävissä mittauksia tehtiin metalli- ja paperiteollisuudessa (8 tehdasta, 17 laajakaistamittausta). Metalliteollisuudessa mittauksia tehtiin lähellä metallin työstölaitteita ja erilaisia lämmittimiä, esimerkiksi valokaariuuni, induktiokuumennin ja vastusuuni. Paperitehtaalla mittauksia tehtiin paperikoneiden moottorien läheisyydessä ja paperikoneita syöttävien muuntamoiden lähellä. ICNIRP:n suosituksen suositusarvo ylitettiin kahdessa magneettikentälle altistumisen mittauksessa. Altistumisen kannalta mitatut magneettikentät jäivät muissa mittauksissa selvästi alle suositusarvojen. Sähkökentät jäivät kaikissa teollisuuden kentille altistumisen mittauksissa selvästi alle suositusarvojen.

Johtopäätöksinä voidaan todeta, että joissakin erityisissä teollisuusprosesseissa, joissa on huomattavat kuormitusvirrat, voi esiintyä ICNIRP:n magneettikentän suositusarvojen ylityksiä. Mitatuista kohteista tällaisia havaittiin metalliteollisuudessa erilaisten lämmittimien lähellä. Altistumissuhde ylitti suosituksen suositusarvon valokaariuunin lähellä tehdyssä magneettikentälle altistumisen mittauksessa. Sähkökentillä suosituksen suositusarvo saattaa ylittyä 400 kV sähköasemilla, joissa suositusarvon ylityksiä mitattiin kahdessa mittauksessa. Tutkituissa altistumiskohteissa suositusarvojen laajakaistaisuudesta ei kuitenkaan seuraa odottamattomia sähkö- ja magneettikenttien pienentämistarpeita. Pienentämistarpeet voidaan yleensä todeta jo perustaajuisen kentän mittausten perusteella.

## Abstract

Due to the possible health effects of electric and magnetic fields, the ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) has published guidelines, in which the upper limits for occupational exposure have been presented. Based on this, the upper limits for exposure to 50 Hz electric and magnetic fields are 10 kV/m and 500  $\mu$ T. 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 are confirmed in the new decree, but workers have been excluded from the decree.

The main aim of this project was to study what kind of needs there are to reduce exposure to broadband electric and magnetic fields, due to the new recommendations. The study concentrates on electricity production, transmission and distribution. This report describes the results received from the measurements in working environment. Measurements have been carried out in hydro power station, electric substations, and the metal and paper industry. In measurements, an individual harmonics measurement method based on the ICNIRP guidelines was used, and for magnetic fields, a weighted field method used by Radiation and Nuclear Safety Authority of Finland.

In the electricity production, one electric and magnetic field exposure measurement has been carried out. Measurements in electricity production were carried out inside a hydro power station. From the exposure point of view, the measured electric and magnetic fields were clearly below the upper limits.

In the electric substation, measurements were carried out in 400 kV and 110 kV switchyards of electric substations. In electric and magnetic field exposure measurements (13 measurement lines, in which number of measurements, 11 broadband measurements), electric fields were more significant than magnetic fields. The electric field exceeded the upper limits in two measurements. In both cases, the exceeding of the upper limits took place in 400 kV electric substations. In 110 kV electric substations, the electric fields were clearly below the upper limits. The highest magnetic field exposures were measured in a switchyard and in a cable tunnel of a 110 kV GIS. However, magnetic fields were clearly below the upper limits in all exposure measurements of electric substations.

For industrial work, measurements were carried out in the metal and paper industry (8 factories, 17 broadband measurements). In the metal industry, the measurements were carried out nearby a metal working machine and nearby different kinds of metal heaters, like an arc furnace, an induction heater and a resistance furnace. In the paper mill, the measurements were carried out near the motors of the paper machine and near indoor distribution substations feeding paper machines. The upper limits of the ICNIRP guidelines were exceeded in two exposure measurement. From the exposure point of view, the measured magnetic fields were clearly below the upper limits in the other measurements. Electric fields were clearly below the upper limits in all exposure measurements of industry.

As a conclusion, it can be stated that in the case of some special industrial processes, where the load currents are significant, the ICNIRP guidelines may be exceeded for magnetic field. In the measurements these were found near different kinds of heaters in the metal industry. The exposure ratio exceeded the upper limit of the guidelines in the magnetic field exposure measurement close to an arc furnace. For electric fields, the upper limit of the guidelines may be exceeded at 400 kV

electric substations, where exceeding of the upper limits was measured in two measurements. In studied exposure environments the broadband measurement does not cause unexpected needs for decreasing the electric and magnetic fields. Decreasing needs can usually be recognised 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 sähköjärjestelmien laajakaistaisille kentille altistuminen työympäristössä (erityisesti sähkön tuotannon, siirron ja jakelun työpaikoilla). 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 Finergy), Risto Vesala (Pohjolan Voima Oy) ja Leena Korpinen (Tampereen teknillinen korkeakoulu).

Hankkeen johtajana on toiminut prof. Leena Korpinen ja tutkijoina ovat olleet DI Tommi Keikko ja DI Tuomas Sauramäki ja tutkimusapulaisina tekn.yo Sampsa Kuusiluoma sekä IAESTE-harjoittelijat Márgus Norbert ja Eneko Izquierdo Ereno. Raportin toteutuksessa ovat avustaneet Riitta Lehtelä, Leena Luoma ja Leila Virolainen.

Hankkeen toteutuksessa ovat avustaneet Tampereen sähkölaitos, Fingrid Oyj, Georgia Pacific, ATA Gears, Metso Tampereen telatehdas, Raflatac, Metso Lokomo Steels, Säteilyturvakeskus ja Tampereen aluetyöterveyslaitos. Johtoryhmälle ja kaikille mukana olleille henkilöille parhaat kiitokset.

## **1. Johdanto**

Viime aikoina on esiintynyt laajaa keskustelua työntekijöiden altistumisesta sähkö- ja magneettikentille. Suomessa kentille altistumisen rajoittamiseksi työntekijöiden osalta on edelleen voimassa sosiaali- ja terveysministeriön (STM) päätös (1474/1991), joka asettaa enimmäisarvot muille paitsi pientaajuisille kentille.

ICNIRP:in (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) on vuonna 1998 julkaissut myös työntekijöitä koskevat suositusarvot sähkö- ja magneettikenttäaltistukselle 0 - 300 GHz taajuusalueella /4/. ICNIRP:in suosituksen mukaan työntekijöiden 50 Hz kentille altistumisen suositusarvot ovat sähkökentälle 10 kV/m ja magneettikentälle 500 mT. Suosituksessa esitetään myös suositusarvot useampaa kuin yhtä taajuutta sisältäville sähkö- ja magneettikentille eli laajakaistaisille kentille.

ICNIRP:n suosituksessa laajakaistaisten kenttien osalta ei oteta huomioon eri taajuuksien kenttien vaihe-eroja. STM:n uudessa asetuksessa 'ionisoimattoman säteilyn väestölle aiheuttaman altistumisen rajoittamisesta' on esitetty menetelmä, joka ottaa huomioon kentän huippuarvot vaihekulmineen /20, 21/. Mahdollisesti myös ICNIRP on valmistelemassa uudistettua suositusta laajakaistaisille sähkö- ja magneettikentille altistumiselle, jossa altistumisen määräytyminen perustuu saman tyyppiseen menetelmään kuin on esitetty STM:n uudessa asetuksessa. Myös

Euroopan unioni on valmistelemassa direktiiviä, joka mahdollisesti asettaa suositusarvot sähkö- ja magneettikentille altistumiselle työympäristössä.

Tämän tutkimuksen päätavoitteena oli tutkia, millaisia tarpeita on vähentää laajakaistaisille sähkö- ja magneettikentille altistumista uusien suositusten tähden. Laajakaistaisten sähkö- ja magneettikenttien suuruuden mittaamiseksi on selvitetty myös mittausmenetelmiä.

Laajakaistaisten kenttien mittaamiseen on kaksi vaihtoehtoista mittausmenetelmää: ICNIRP:n suosituksen mukainen yksittäisten harmonisten kenttien mittausmenetelmä ja STM:n asetuksen mukainen STUK:n kehittämä painotetun kentän mittausmenetelmä.

ICNIRP:n suosituksen mukaisesti yksittäisten harmonisten kenttien menetelmällä saatua altistumissuhteen arvoa verrataan ICNIRP:n suosituksen mukaisesti. Harmoniset kentät tarkoittavat kenttäkomponentteja, jotka esiintyvät perustaaajuuden (50 Hz) monikertojen taajuuksilla. Toinen menetelmä on Säteilyturvakeskuksen (STUK) kehittämä painotetun kentän mittausmenetelmä, jossa mittaussignaali suodatetaan RC-suodattimen kautta ennen signaalin analysointia.

Tässä tutkimuksessa on käytetty molempia menetelmiä. Menetelmät on esitetty tarkemmin luvussa 4. Näillä menetelmillä on tehty mittauksia voimalaitoksella, sähköasemilla, sekä paperi- ja metalliteollisuuden yrityksissä.

## 1.1 Työntekijäaltistumisen suositusarvot sähkö- ja magneettikentille

ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) on määritellyt suositusarvot työntekijöiden sähkö- ja magneettikenttäaltistuksen (0 Hz - 300 GHz) rajoittamiseksi. Taulukossa 1.1 on esitetty sähkö- ja magneettikentille altistumisen viitearvot. Viitearvojen ylittyessä on tarpeellista tarkastella altistumista ja altistumistilannetta tarkemmin. /4/

*Taulukko 1.1.* ICNIRP:n suositusarvot (viitearvot) työntekijöiden sähkö- ja magneettikenttäaltistumisen (0 Hz - 300 GHz) rajoittamiseksi (häiriintymätön kenttä) /4/.

*Table 1.1.* ICNIRP guidelines (reference levels) to limit occupational exposure to electric and magnetic fields (0 Hz - 300 GHz, undisturbed field) /4/.

Taajuus	Sähkökentän voimakkuus E (V/m)	Magneettikentän voimakkuus H (A/m)	Magneettivuon tiheys B (μT)
0-1 Hz	-	$1,63 \times 10^5$	$2 \times 10^5$
1-8 Hz	20 000	$1,63 \times 10^5 / f^2$	$2 \times 10^5 / f^2$
8-25 Hz	20 000	$2 \times 10^4 / f$	$2,5 \times 10^4 / f$
0,025-0,82 kHz	500/f	20/f	25/f
0,82-65 kHz	610	24,4	30,7
0,065-1 MHz	610	1,6/f	2/f
1-10 MHz	610/f	1,6/f	2/f
10-400 MHz	61	0,16	0,2

400-2000 MHz	$3f^{1/2}$	$0,008f^{1/2}$	$0,01f^{1/2}$
2-300 GHz	137	0,36	0,45

Taulukon mukaan suositusarvo esimerkiksi 50 Hz sähkökentän voimakkuudelle yksikössä V/m saadaan jakamalla 500 yksikössä kHz esitettyllä taajuudella, eli arvolla 0,050. Suositusarvoksi saadaan 10 000 V/m eli 10 kV/m.

Laajakaistaisia kenttiä tarkasteltaessa taulukossa 1.1 esitettyjen suositusarvojen täyttymisen toteamiseksi määritellään kentille altistumissuhde R. Altistumissuhteen laskemista varten mitataan kentän taajuussisältö. ICNIRP:n suosituksen mukainen altistumissuhteen määrittämistapa /6/ olettaa, että harmonisten yliaaltojen derivaattojen maksimit esiintyvät yhtäaikaaisesti. Usealle eritaajuiselle kentälle (taajuus alle 10 MHz) eli laajakaistaiselle kentälle altistumissuhteen R arvo saadaan yhtälöiden 1.1 ja 1.2 avulla /3, 4, 6/.

$$R = \sum_{i=1}^{10\text{MHz}} \frac{E_i}{E_{L,i}} + \sum_{i>10\text{MHz}} \frac{E_i}{a} \leq 1 \quad (1.1)$$

missä  $E_i$  on sähkökentän voimakkuus taajuudella  $i$ ,

$a$  on työaltistukselle vakio 610 V/m ja

$E_{L,i}$  on taulukossa 1.1 esitetty sähkökentän voimakkuuden viitearvo.

$$R = \sum_{i=1}^{65\text{kHz}} \frac{H_i}{H_{L,i}} + \sum_{i>65\text{kHz}} \frac{H_i}{b} \leq 1 \quad (1.2)$$

missä  $H_i$  on magneettikentän voimakkuus taajuudella  $i$ ,

$b$  on työaltistukselle vakio 24,4 A/m (30,7  $\mu$ T) ja

$H_{L,i}$  on taulukossa 1.1 esitetty magneettikentän voimakkuuden viitearvo.

## 1.2 Säteilysuojituksen kehittämä painotetun kentän mittausmenetelmä

STUK on kehittänyt painotetun kentän mittausmenetelmän, jossa kentän taajuussisältö ja vaihekulma vaikuttavat altistumisen arviointiin. Käytännön mittaamista STUK:n kehittämän painotetun kentän mittausmenetelmän avulla käsitellään myöhemmin tässä raportissa. STUK:n menetelmässä laajakaistaisiin kenttiin voidaan soveltaa yhtälön 1.3 mukaista vaatimusta /20, 21/.

$$R = \left| \sum_n \frac{A_n \cos(2\pi f_n t + \theta_n + \varphi_n)}{A_{L,n}} \right| \leq 1 \quad (1.3)$$

missä  $t$  on aika,  
 $n$  on harmonisen yliaallon järjestysluku,  
 $A_n$  on sähkö- tai magneettikentän taajuuskomponentin tehollisarvo,  
 $f_n$  on vastaava taajuus,  
 $\theta_n$  on vastaava vaihekulma,  
 $A_{L,n}$  kentän viitearvo ja  
painotusfunktion vaihekulma  $\varphi_n$  saadaan yhtälöstä 1.4

$$\varphi_n = \pi / 2 - \arctan(f_n / f_c) \quad (1.4)$$

missä  $f_c$  on suositusarvon lineaarisen taajuusriippuvuuden rajataajuus.

Koska STUK:n kehittämän menetelmän avulla voidaan ottaa huomioon kenttäkomponenttien vaihekulma, sillä mitattujen tulosten pitäisi teoriassa olla miltei aina pienempiä kuin ICNIRP:n suosituksen mukaisesti yliaaltokomponenttien avulla määritettyjen tulosten.

## 2. Sähkö- ja magneettikentät työympäristössä

Sähköverkko yhdistää kaikki tärkeimmät voimalaitokset ja sähkön kuluttajat. Kulutusalueilla paikalliset sähköyhtiöt huolehtivat sähkön siirrosta pienkuluttajille. 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 /23/. Siirtoverkossa oli 400 kV jännitetasolla 57 sähköasemaa ja alueverkossa 740 sähköasemaa.

### 2.1. Sähkön tuotannon sähkö- ja magneettikentälähteet

Voimalaitoksissa magneettikentät ovat yleensä lähempänä suositusarvoja kuin sähkökentät, koska voimalaitoksessa siirretään yleensä suuria tehoja suhteellisen pienellä 10 kV tai 20 kV jännitteellä. Erään tutkimuksen mukaan Suomessa voimalaitoksilta mitatut magneettikentät ovat olleet välillä 2 - 156  $\mu\text{T}$  /9/. Toisessa tutkimuksessa voimalaitosten työskentelytiloista on mitattu 0,1 - 13  $\mu\text{T}$  suuruisia magneettikenttiä /17/. Magneettikentän lähteitä voimalaitoksilla ovat esimerkiksi generaattorikiskot, joissa siirretään generaattorin tuottama sähköteho generaattorimuuntajalle.

Voimalaitoksella voidaan joutua työskentelemään käytössä olevien virrallisten johtimien läheisyydessä, jolloin työssä saatetaan altistua melko suurillekin magneettikentille. Esimerkkejä voimalaitoksen magneettikentistä on esitetty taulukossa 2.1.

Taulukko 2.1. Mitattuja magneettikenttien suuruuksia voimalaitoksella. /19, 17/

Table 2.1. Magnetic fields measured in power plant. /10, 17/

Lähde	Etäisyys, m	B, $\mu\text{T}$
Työskentelytilat	-	0,1 - 13
Generaattori	1	7 - 35

Konekatkaisija	1	148 - 156
Magnetointihuone	1	1 - 14
Putkikisko	1	42 - 53

Taulukossa esitetyt arvot ovat melko suuria, mutta kaikki selvästi alle ICNIRP:n suositusarvon 500  $\mu\text{T}$ . Sähkökenttä voi jäädä voimalaitoksen sisätiloissa melko pieneksi, sillä sisätiloissa sähkökenttä yleensä vaimenee melko pieneksi. Koska sähkökenttä muodostuu eri potentiaalissa olevien osien välille, sisätiloissa esiintyvät sähkökentät ovat hyvin paikallisia.

## 2.2. Siirto- ja jakelujohtojen sähkö- ja magneettikentät

Suomessa käytetään 110 - 400 kV johdoilla pääasiassa harustettuja portaalipylväitä. Sähkö- ja magneettikenttä on kuitenkin portaalipylväällä yleensä suurempi kuin vastaavilla vapaasti seisovilla pylväillä, jotka ovat yleisempiä esimerkiksi Keski-Euroopassa /2/. Sähkö- ja magneettikentän suuruus riippuu johtimien etäisyydestä maahan. Siksi sähkö- ja magneettikentät ovat suurimpia johtojen pylväsvälin keskellä, jossa riippuma on suurin.

Sähkökentän voimakkuus on 400 kV portaali johdolla metrin korkeudella maasta suurimmillaan 10 kV/m ja magneettivuon tiheys 20  $\mu\text{T}$ . Magneettikenttä pienenee portaali johdolla kääntäen verrannollisesti etäisyyden neliöön. Magneettikenttä on 400 kV portaali johdon sivulla 20 - 30 m etäisyydellä kuormituksesta riippuen suuruusluokaltaan 0,3 - 4  $\mu\text{T}$  ja 60 m etäisyydellä alle 1  $\mu\text{T}$ . Vastaavat arvot sähkökentälle ovat 20 - 30 m etäisyydellä 0,5 - 2 kV/m ja 60 m etäisyydellä 0,05 - 0,2 kV/m. /9/

Sähkökentän voimakkuus on 110 kV portaali johdolla metrin korkeudella maasta suurimmillaan 3 kV/m. Sähkökenttä on 110 kV portaali johdon sivulla 20 - 30 m etäisyydellä 0,05 - 0,3 kV/m ja 60 m etäisyydellä 0,01 - 0,1 kV/m. Magneettikenttä on suurimmillaan 5  $\mu\text{T}$ , kuormituksesta riippuen suuruusluokaltaan 20 - 30 m etäisyydellä 0,05 - 1  $\mu\text{T}$  ja 60 m etäisyydellä alle 0,3  $\mu\text{T}$ .

Yleensä 20 kV jakelujohtojen alla sähkökentän voimakkuus on maanpinnalla tasoa 0,1 kV/m. Edelleen pienempien jännitetasojen eli pienjännitejärjestelmien, esimerkiksi kotitalouksien sähköverkon aiheuttamat taustakentät ovat tasoa 0,01 kV/m /9/.

## 2.3. Sähköasemien sähkö- ja magneettikentät

Sähköasemien sähkökentät ovat voimajohtojen kenttiä suurempia, koska sähköasemien kytkinkentillä vaihejohtimet ovat lähempänä maan pintaa /9/. Tampereen teknillisen korkeakoulun (TTKK) aikaisemmissa tutkimuksissa on kartoitettu sähköasemien sähkö- ja magneettikenttiä työntekijöiden altistumisnäkökulmasta /8/.

TTKK:n aikaisemmissa tutkimuksissa 400 kV sähköasemalla kartoituksessa suoritettiin 251 mittausta. Suurin mitattu sähkökentän arvo tällä sähköasemalla oli 9,9 kV/m, jolloin sähköaseman kiskoston jännite oli 404,6 kV. Suurin mitattu magneettikentän arvo tällä sähköasemalla oli 9,19  $\mu\text{T}$ . /8/

110 kV sähköasemalla suoritettiin sähkökentän mittaus 90 pisteestä. Sähköasemalla mitattu suurin sähkökentän arvo oli 4,6 kV/m, kun sähköaseman kiskoston jännite oli 116,0 kV. Magneettikenttä mitattiin 202 pisteessä. Tällä sähköasemalla suurin mitattu magneettikentän arvo oli 18,6  $\mu\text{T}$ . /8/

## 2.4. Magneettikentille altistuminen työympäristössä

TTKK:ssa on mitattu myös sähkö- ja magneettikenttiä työntekijöiden altistumisnäkökulmasta. Osana kenttien terveysvaikutustutkimusta on kuvattu erilaisia töitä ja niissä esiintyviä altistuksia /10/. Taulukossa 2.2 on esitetty sähköasemalta mitattuja sähkö- ja magneettikenttiä, joihin työntekijät ovat altistuneet erilaisissa työtilanteissa. Mittarit olivat IVO:n valmistamia.

Taulukko 2.2. Työntekijöiden altistuminen sähkö- ja magneettikentille erilaisissa työtehtävissä. /10/  
Table 2.2. Electric and magnetic field exposure of workers in different tasks. /10/

Työntekijä	Työn kuvaus	E, kV/m	B, $\mu$ T
I001 - I003	Johdon rakennustyö, uudet johtimet vanhojen 110 kV tilalle	0,35 - 1,12	1,72 - 3,47
I004	Kaapelin asennus, lähellä 110 kV sähköasemaa ja johtoa	0,35	1,97
I005	Johdon rakennustyö, uudet johtimet vanhojen 110 kV tilalle	0,87	2,66
I006	Johdon rakennustyö, uudet johtimet vanhojen 110 kV tilalle	0,85 - 0,87	2,64 - 2,66
I007	Aseman laajennustyö, 110 kV sähköasema	1,3	2,11
I008	Johdon rakennustyö, uudet johtimet vanhojen 110 kV tilalle samassa pylväässä	0,14	0,57
I009	Johdon rakennustyö, uudet johtimet vanhojen 110 kV tilalle	0,85	2,64
I010	Aseman laajennustyö, 110 kV sähköasema	0,14 - 0,26	0,97 - 1,02
I011	Aseman laajennustyö, 400 kV ja 110 kV sähköasema	2,78 - 10,21	2,40 - 10,92
I012, I013	Huoltotyö, 220 kV sähköasema	5,57 - 7,44	4,42 - 6,89
I014	Aseman laajennustyö, 400 kV ja 110 kV sähköasema	2,78 - 11,2	2,40 - 16,2
I015	Aseman laajennustyö, 110 kV sähköasema	0,54	1,90
I016	Aseman laajennustyö, 110 kV sähköasema	0,54	1,90
I017	Aseman laajennustyö, 110 kV sähköasema	0,58	2,01
I018	Aseman laajennustyö, 110 kV sähköasema	0,55	2,01
I019	Aseman laajennustyö, 110 kV sähköasema	2,95	2,20
I020	Aseman laajennustyö, 400 kV sähköasema	1,53 - 8,45	1,43 - 10,92
I021	Aseman laajennustyö, 400 kV sähköasema	1,53 - 8,64	1,43 - 10,92
I022, I023	Aseman laajennustyö, 400 kV sähköasema	7,26 - 8,64	6,16 - 15,43

I024, I025	Aseman laajennustyö, 400 kV sähköasema	7,21 - 9,18	6,30 - 10,93
I026, I027	Aseman laajennustyö, 400 kV sähköasema	6,83 - 8,62	4,74 - 8,71

Taulukon perusteella voidaan todeta, että sähköasemalla työskenneltäessä ICNIRP:n suosituksen 50 Hz sähkökentän suositusarvo (10 kV/m) saattaa ylittyä. Magneettikenttien arvot ovat sitä vastoin varsin kaukana 50 Hz suositusarvosta (500  $\mu$ T).

Mäkinen ym. 1991 on tutkinut 50 Hz sähkö- ja magneettikenttäaltistusta dosimetrimittauksia käyttäen. Sähköasema- ja voimalaitostyöntekijöille mitattu keskimääräinen magneettikenttä oli välillä 0,9 - 2,6  $\mu$ T ja sähkökenttä välillä 0,013 - 0,58 kV/m. Suurin dosimetrimittauksen maksimiarvo oli kuitenkin 48 kV/m, joka oli mitattu 220 kV johdolla työskentelyssä /14/. Mitattu suurin arvo ylittää ICNIRP:n suosituksen suositusarvon (10 kV/m) varsin selvästi.

TTKK:n tutkimusprojektissa "Teknologian kehittäminen pientaajuisten magneettikenttien vähentämiseksi sähkönsiirrossa ja jakelussa" vuonna 2000 tehtiin myös magneettikenttien pitkäaikaismittauksia Radians Innova ML-1 -mittareilla. Mittauksia tehtiin sähköyhtiössä sekä metalli-, paperi- ja valmistavassa sähköteollisuudessa /17/. Työntekijämittauksien tarkoituksena oli saada selville teollisuuden työntekijä- ja vapaa-ajan altistus yhden vuorokauden ajalta.

Työntekijäaltistuksen mittauksessa ICNIRP:n suositusarvo 500  $\mu$ T ylittyi sähköyhtiön työntekijöillä (33 altistustapausta 30 työntekijälle) hetkellisesti viidessä mittauksessa. Lisäksi kolmessa muussa tapauksessa ylittyi väestöaltistuksen suositusarvo 100  $\mu$ T. Metalliteollisuudessa (22 työntekijälle) mitatun magneettivuon tiheyden maksimiarvo ylitti 10  $\mu$ T kolmessa mittauksessa. Kahdessa näistä ylittyi hetkellisesti väestöaltistuksen ICNIRP:n suositusarvo 100  $\mu$ T.

Paperiteollisuudessa (22 työntekijälle) mitatun magneettivuon tiheyden maksimiarvo ylitti 10  $\mu$ T neljässä mittauksessa. Yhdellä työntekijällä ylittyi väestöaltistuksen ICNIRP:n suositusarvo työmatkalla.

Valmistavan sähköteollisuuden työntekijämittauksissa (13, kuudesta ei saatu tuloksia mittarin käyttövirheestä johtuen) suurimmat magneettivuon tiheyden maksimiarvot olivat alle 40  $\mu$ T. Yleisesti maksimiarvot olivat alle viiden mikroteslan ja keskiarvot olivat kaikilla mitatuilla henkilöillä alle 1  $\mu$ T. /17/

*Taulukko 2.3.* Yhteenveto onnistuneiden altistusmittausten tuloksista, metalliteollisuus, paperiteollisuus ja valmistavasta sähköteollisuus (n on työntekijöiden määrä) /17/.

*Table 2.3.* Summary for the successful exposure measurement results, metal industry, paper industry and producer electric industry (n is the amount of the workers) /17/.

Työntekijöitä	Altistuksen maksimi < 0,1 $\mu$ T n	Altistuksen maksimi < 1 $\mu$ T n	Altistuksen maksimi < 10 $\mu$ T n	Altistuksen maksimi < 100 $\mu$ T n	Altistuksen maksimi > 100 $\mu$ T n
<b>Metalliteollisuus(20)</b>	0	4	13	0	3

<b>Paperiteollisuus(13)</b>	0	0	10	2	1
<b>Valmistava sähköteollisuus (4)</b>	0	0	2	2	0

Tässä luvussa esitettyjä tuloksia on hyödynnetty tässä tutkimuksessa valittaessa laajakaistamittauksiin uusia mittauskohteita.

### 3. Sähkön tuotannossa, siirrossa ja jakelussa esiintyvät yliaallot

Puhdas sinimuotoinen jännite tai virta sisältää vain perustaajuista jännitettä tai virtaa. Niiden käyrämuoto vääristyy eli säröytyy, kun siinä esiintyy jotakin muuta taajuuskomponenttia perustaajuisen komponentin lisäksi. Sähkölaitteet on tavallisesti suunniteltu toimimaan sinimuotoisella jännitteellä. Nykyään entistä useampi laite vaatii virheetöntä jännitettä toimiakseen oikein. Yliaaltoja sähkönsiirto- ja jakeluverkkoon synnyttävät virran tai jännitteen suhteen epälineaariset virtapiirin osat. Jännitteessä esiintyvät yliaallot siirtyvät virran yliaalloiksi myös lineaarisissa virtapiirissä osissa, kun ne kytketään virtapiiriin. Toisaalta, esimerkiksi taajuusmuuttajat, jotka häiriintyvät yliaalloista helposti, saattavat aiheuttaa verkkoon yliaaltoja.

Verkon yliaaltojen lähteitä ovat puolijohdetekniikalla toteutetut tehonohjauslaitteet sähkövoimansiirrossa, teollisuudessa ja kodeissa. Suuntaajien lisäksi yliaaltoja synnyttävät muun muassa purkauslamput, valokaariuunit, generaattorit sekä ylikuormitetut muuntajat /13/. Häiriöiden lisäksi jännite- ja virtayliaallot synnyttävät ympäristöönsä sähkö- ja magneettikenttiä, joiden summautuminen perustaajuisiin sähkö- ja magneettikenttiin saattaa aiheuttaa suositusarvojen ylittymisen.

Yliaaltojen matemaattinen käsittely voidaan perustaa Fourier-analyysiin ja virtalähdejatteluun. Fourier-analyysin avulla funktio voidaan hajottaa komponentteihinsa, joiden järjestysluku on n. Virtalähdejattelun mukaan yliaaltovirran kohdatessa verkossa taajuutensa perusteella määräytyvän yliaaltoimpedanssin, siitä aiheutuu virran taajuuden mukainen tietty jännitehäviö. Näin syntyvät jännitteen yliaallot, jotka summautuessaan perusaaltoon aiheuttavat jännitteen käyrämuodon vääristymisen eli säröytymisen. /13/

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 maksimit eivät esiinny yhtäaikaaisesti ja näin ollen yliaallot voivat jopa kumota toisiaan /6/. 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 /22/.

Sähköenergialiitto ry (SENER) on julkaissut vuonna 1999 taulukon 3.1 mukaiset ylärajat suurjänniteverkon (vähintään 110 kV) harmonisille yliaalloille /19/. Taulukon arvot perustuvat CIGRE:n (International Council on Large Electric Systems) suositukseen vuodelta 1980 /1/. Taulukossa yliaallot on jaettu kolmeen eri sarakkeeseen. Peruseriaatteena on, että alemman järjestysluvun harmonisia yliaaltoja sallitaan eniten.

*Taulukko 3.1.* Ylärajat suurjänniteverkon (vähintään 110 kV) harmonisille yliaalloille /19/.

*Table 3.1.* Upper limits for the harmonic levels of the high voltage network (at least 110 kV). /19/

Parittomat kolmella jaottomat yliaallot			Parittomat kolmella jaolliset yliaallot			Parilliset yliaallot		
N	Jännite %	Virta %	N	Jännite %	Virta %	N	Jännite %	Virta %
5	2	4	3	2	4	2	1,5	3
7	2	4	9	1	2	4	1	2
11	1,5	2,25	15	0,3	0,6	6	0,5	1
13	1,5	2,25	21	0,2	0,4	8	0,2	0,4
17	1	1,5	>21	0,2	0,4	10	0,2	0,4
19	1	1,5	-	-	-	12	0,2	0,4
23	0,7	0,7	-	-	-	>12	0,2	0,4
25	0,7	0,7						
>25	0,1+12,5/n	0,1+12,5/n						
<b>Jännitteen kokonaisharmoninen särö &lt; 3%</b>								
<b>Virran kokonaissärö &lt; 6%</b>								

Parittomista kolmella jaollisista yliaalloista kolmannelle yliaallolle sallitaan suurimmat arvot. Kolmatta yliaaltoa tuottavat muun muassa kyllästyneet magneettiipiirit, generaattorit, tietokoneiden hakkuriteholähteet ja purkauslamput.

### 3.1. Yliaaltolähteet

Seuraavaksi esitellään tarkemmin erilaisia yliaaltolähteitä.

#### Suuntaajat yliaaltojen lähteinä

Suuntaajakäytöt toteutetaan puolijohdetekniikalla. Ne ovat yleistyneet erityisesti 1980- ja 1990-luvuilla. Nykyaikaiset teollisuusprosessit vaativat yhä parempia ja tarkempia säätömenetelmiä hyvän laatutason ja kannattavuuden saavuttamiseen. Suuntaajakäyttöjen ominaisuuksia ovat säädön nopeus ja tarkkuus, sekä pieni tilantarve ja taloudellisuus. Lisäksi suuntaajissa ei ole kuluvia osia. Suuntaajat voidaan toteuttaa ilman ohjausta diodisuuntaajilla tai ohjattuina tyristorisuuntaajina. Lisäksi voidaan käyttää puoliksi ohjattuja suuntaajia, joissa osa tyristoreista on korvattu diodeilla. Suuntaajien sovelluksia käytetään esimerkiksi elektroniikkalaitteiden teholähteissä (TV, tietokoneet, laturit) ja moottorien pyörimisnopeuden säätämiseen teollisuudessa. Teollisuuden

suuntaajat ovat useimmiten 3-vaiheisia 6-pulssisuuntaajia. Parittomat kolmella jaottomat yliaallot ovat pääasiassa suuntaajien aiheuttamia. Suuntaajista aiheutuvien yliaaltojen järjestysluku  $n$  voidaan laskea yhtälöllä 3.2.

$$n = kp \pm 1 \quad (3.2)$$

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

Tyristoreja voidaan käyttää myös sähkökytkiminä teollisuudessa ja kotitalouksissa resistiivisten kuormien ohjauksessa, esimerkiksi valonhimentimissä. Hyvistä ominaisuuksiensa lisäksi suuntaajakäytöt synnyttävät yliaaltoja. Ohjatut suuntaajat kuluttavat myös loistehoa.

### **Valokaariuunit yliaaltojen lähteinä**

Teollisuudessa käytettävät sulatusuunit ovat vastus-, induktio- ja valokaariuuneja. Vastusuuni ei kuormana tuota yliaaltoja, mutta sen ohjaukseen tarvittava tekniikka sitä vastoin voi niitä tuottaa. Induktiouuni toimii verkon kannalta moottorikuorman tavoin /13/. Valokaariuunissa käytettävät jännitteet ovat suhteellisen pieniä, joten suuri teho tuotetaan suurta virtaa käyttäen. Virta voi olla jopa sata kiloampeeria.

Valokaariuunin sulatettavan materiaalin epähomogeenisuudesta ja epätasaisesta lämpiämisestä johtuen uunin verkosta ottama teho ja virta vaihtelevat erittäin nopeasti. Virta myös säröytyy jopa niin paljon, että virran käyrämuotoa tutkittaessa voi olla vaikeaa löytää kahta samanlaista peräkkäistä jaksoa. Harmonisten yliaaltojen lisäksi valokaariuuni tuottaa epäharmonisia yliaaltoja, eli virran spektri on jatkuva.

### **Muuntajat yliaaltojen lähteinä**

Muuntajassa yliaaltoja aiheuttaa muuntajan rautasydämen magneettinen epälineaarisuus. Muuntajan magneettinen epälineaarisuus tarkoittaa sitä, että rautasydämen magneettivuon tiheys ei kasva lineaarisesti magneettikentän voimakkuuden kasvaessa. Kun tietty magneettivuon tiheys on saavutettu, se ei kasva magneettikentän voimakkuutta kasvattamalla eli rautasydän on kyllästynyt. Tämä ilmiö johtuu muuntajan rautasydämen hystereesistä.

Hystereesistä johtuen muuntajan magnetointivirta ei noudata syöttöjännitteen käyrämuotoa ja sisältää ainoastaan parittomia yliaaltoja. Suurilla tehomuuntajilla jatkuvan tilan magnetointivirta on tavallisesti luokkaa selvästi alle 1% nimellisvirrasta. Pienillä muuntajilla (luokkaa 10 kVA) jatkuvan tilan magnetointivirta voi olla jopa 10% nimellisvirrasta /24/.

Magnetointivirran yliaaltoihin vaikuttavat syöttöjännite ja sen käyrämuoto, kuormitusvirran tasavirtakomponentti, muuntajan sydämen rakenne ja materiaali sekä muuntajan kytkentäryhmä. Syöttöjännitteen käyrämuoto voidaan tavallisesti olettaa sinimuotoiseksi, koska jännitteessä on yleensä vain vähän yliaaltoja. Sen sijaan yliaallot kasvavat huomattavasti muuntajan rautasydämen kyllästysalueella.

Jakelumuuntajan sydän tehdään taloudellisista syistä magneettisesti epäsymmetrisiksi. Tällöin kolmipylväsmuuntajan keskipylyvään reluktanssi ja samoin myös magnetointivirta on pienempi kuin reunapylyväiden. Samoin eri vaiheiden yliaaltovirrat eroavat toisistaan. /12, 24/

Muuntajan kytkennällä ja tähtipisteen maadoituksella on suuri vaikutus magnetointivirran käyrämuotoon ja siten yliaaltoihin sekä niiden leviämiseen. Suomessa jakelumuuntajat ovat pääosin Dyn-kytkettyjä. Suomessa 400 kV verkossa tehomuuntajien kytkentäryhmä on yleensä YNynd11. Verkosta otettu magnetointivirta sisältää myös kolmella jaollisia yliaaltoja jos tähteen kytketyn muuntajan ensiön tähtipiste on maadoitettu. Maadoituksen kautta kolmella jaollisille yliaalloille löytyy kulkutie maahan. Jos ensiössä ei ole maadoitusta, magnetointivirrassa ei voi olla kolmatta yliaaltoa. Sen sijaan rautasydämen magneettivuossa on kolmatta yliaaltoa, joten sitä on myös alajännitepuolen vaihejännitteessä /12, 24/.

Toision kolmiokytkentään ja muuntajan kolmiokytkettyyn tertiääriin syntyy kiertävä kolmas yliaaltovirta. Verkosta otettu magnetointivirta ei sisällä kolmella jaollisia yliaaltoja, jos muuntajan ensiökäämitys on kytketty kolmioon /12/. Yksivaiheisilla epälineaarilla kuormilla kuormitettaessa, esimerkiksi toimistorakennuksissa, Dyn-kytketty muuntaja ylikuumentuu helposti, sillä nollassa johtoon summautuvat yliaaltovirrat kulkeutuvat magneettisesti myös ensiöön ja synnyttävät sinne kiertävän yliaaltovirran /12/.

### **Loiste- ja purkauslamput yliaaltojen lähteinä**

Tavalliset hehku- ja halogeenilamput eivät synnytä yliaaltoja, sillä ne ovat resistiivisiä kuormia. Loiste- ja purkauslamput ovat sitä vastoin epälineaarisia kuormia. Toimiakseen ne vaativat esimerkiksi lampun kanssa sarjaan kytketyn kuristimen, johon syntyyvä jännitepiikki sytyttää sähköpurkauksen. Toinen vaihtoehto lampun sytyttämiseen on elektroninen liitännälaitte. Elektroninen liitännälaitte nostaa taajuuden noin 30 kHz tai korkeammalle. Se korvaa sytyttimen, kuristimen, kompensointikondensaattorin ja häiriönpoistokondensaattorin, sekä toimii noin 25% pienemmällä energialla. Koska elektronisen liitännälaitteen toiminta perustuu tasasuunnatun verkkojännitteen vaihtosuuntaamiseen, aiheuttaa elektroninen liitännälaitte yliaaltoja. Tästä syystä laitteissa käytetään yliaaltosuodatinta.

### **Pyörivät koneet yliaaltojen lähteinä**

Generaattoreiden tuottama jännite poikkeaa aina jonkin verran sinimuodosta. Yliaaltovirtojen suuruus puolestaan riippuu kuormitusten yliaaltoimpedansseista. Sähköntuotantoon käytettävät generaattorit eivät kuitenkaan normaalissa käyttötilanteessa aiheuta juurikaan yliaaltoja. Sitä vastoin yliaallot vaikuttavat generaattoreihin aiheuttaen lisähäviöitä /12, 24/.

Oikosulku- ja tahtimoottoreissa yliaaltoja syntyy urakäämityksestä ja raudan magneettisesta epälineaarisuudesta johtuen. Urakäämityksestä johtuen moottorin ilmapälin vuontiheysjakauma on porrasmainen, jolloin myös lähdejännite poikkeaa sinimuodosta. Erilaisin käämitysteknisin keinoin voidaan vuontiheysaallon muotoa muuttaa ja siten estää jonkun tietyn yliaaltovirran esiintyminen. Yliaallot eivät ole suuria normaalikäytössä /12, 24/.

## **4. Laajakaistaisten kenttien mittaaminen**

Kenttien tehollisarvon mittaamiseen soveltuvia kaupallisia mittareita löytyy markkinoilta useita erilaisia. Niiden ominaisuudet saattavat erota huomattavasti esimerkiksi päästökaistan, mittausalueen ja herkkyuden osalta. Sitä vastoin laajakaistaisten kenttien mittaamiseen suoraan soveltuvaa kaupallista sähkö- ja magneettikentän mittaria ei ole vielä olemassa. Tässä tutkimuksessa on käytetty kahta vaihtoehtoista laajakaistaisten magneettikentän mittaamenetelmää: ICNIRP:n suosituksen mukaista yksittäisten harmonisten kenttien menetelmää ja STM:n asetuksen mukaista STUK:n kehittämää painotetun kentän menetelmää. Painotetun kentän menetelmä on

kuvattu tarkemmin tämän projektin toisessa raportissa, jossa on käsitelty väestön sähkö- ja magneettikentille altistumisen mittaamista ja mittaustuloksia /18/. Kaikki mittaukset tehtiin yhden metrin mittauskorkeudelta.

Työperäinen sähkökenttäaltistuminen on lähinnä 50 Hz kentälle altistumista, koska työperäinen altistuminen tapahtuu lähinnä avorakenteisten sähkönsiirtojärjestelmien läheisyydessä. Koska kaikki eristävät ja johtavat rakenteet vaikuttavat sähkökenttään, sähkökenttäaltistumista ei juuri esiinny sisätiloissa työskennellessä. Lähinnä sähkökenttiä voi esiintyä sisäasennettujen avokojeistojen yhteydessä, mutta niiden sähkökentät jäävät kuitenkin varsin pieniksi. Mahdollisia altistumistilanteita ovat sähköasemien avorakenteisilla ulkokytkinlaitoksilla ja siirtojohdoilla jännitteisinä tapahtuvat huoltotoimenpiteet. Työperäistä magneettikenttäaltistumista sitä vastoin tapahtuu lähes kaikissa työympäristöissä, joissa käytetään jotakin sähkölaitetta. Magneettikenttään vaikuttavat ferromagneettiset ja johtavat materiaalit, jotka eivät kuitenkaan yleensä eliminoi magneettikenttää.

Tässä tutkimuksessa laajakaistaiset sähkökentät on mitattu ainoastaan yksittäisten harmonisten kenttien mittausmenetelmällä. Syy pelkän yksittäisten harmonisten kenttien mittausmenetelmän käyttämiseen sähkökenttien osalta oli painotetun sähkökentän mittauksissa todettu sähkömagneettinen yhteensopivuusongelma. Yhteensopivuusongelma ilmeni sähkökenttämittarissa ja mittariin kytketyssä suodattimessa. Yhteensopivuusongelman seurauksena painotetun kentän mittauksesta luovuttiin.

#### **4.1 Laajakaistaisten kenttien mittauspisteiden valinta**

Sopivia laajakaistaisten kenttien mittauspisteitä lähdettiin selvittämään tekemällä kyseiseen työympäristöön soveltuva yleisempi kentän mittaus tai kartoitus. Kentistä mitattiin kentän perinteinen tehollisarvo (5 Hz - 30 kHz). Työympäristöön soveltuvia mittauksia ovat esimerkiksi laitteen kentän mittaus, katselmusmittaus, kartoitusmittaus ja huoneen kentän mittaus /11/. Mittauksen valinta tehdasrakennuksissa tai voimalaitosympäristössä riippuu paljon mittajien kokemuksista. Sitä vastoin esimerkiksi teollisuusympäristössä olevan muuntamon yläpuolisen tilan mittaukseen tai sähköaseman kytkinkentän mittauksessa mittauspisteiden valinta on helpompi, sillä mittauspisteiden sijainti riippuu kohteen virtateiden sijainnista.

Laajakaistaisen kentän mittaamiseen valittiin ne pisteet, joissa perinteinen kentän tehollisarvo (5 Hz - 30 kHz) oli suurin, sekä ne pisteet, joiden läheisyydessä oli mahdollisesti yliaaltoja tuottavia laitteita. Jos kentät olivat pieniä jossakin kohteessa, mittajat käyttivät harkintaa laajakaistaisten kenttien mittauspisteiden valinnassa. Erityisesti sisätiloissa tehdyt sähkökenttämittaukset olivat sellaisia, joissa mittajat valitsivat sopivimman mittauspisteiden, koska kentät olivat joissakin tapauksissa hyvin pieniä. Tavallisesti tällaisessa kohteessa sähkökentän mittauspisteeksi valittiin magneettikentän mittauspiste.

Ennen kuin laajakaistaista kenttää lähdettiin mittaamaan valitusta pisteestä, perinteinen kentän tehollisarvo mitattiin vielä uudestaan. Aika näiden kahden kentän perinteisen tehollisarvon mittausten välillä saattoi laajassa teollisuustilan mittauksessa olla useitakin tunteja. Tällä uusintamittauksella pyrittiin varmistamaan se, että samat kenttälähteet olivat edelleen käytössä ja että mittauspiste oli mahdollisimman lähellä sitä pistettä, josta aikaisemmassa kentän perinteisen tehollisarvon mittauksessa kenttä oli mitattu.

#### **4.2 Yksittäisten harmonisten kenttien mittausmenetelmä**

Yksittäisten harmonisten kenttien mittausmenetelmän perustana on ICNIRP:n suositusarvot sähkö- ja magneettikenttäaltistuksen (0 Hz - 300 GHz) rajoittamiseksi /4/. Suosituksessa on kohta, jossa määritellään perusrajoitus yhtäaikaista altistumisesta usealle eritaajuiselle kentälle. Sen mukaan taajuuden ollessa alle 10 MHz ei altistumissuhde saa ylittää arvoa 1 edellä luvussa 1 esitettyjen yhtälöiden 1.1 ja 1.2 mukaisesti /4/. Mittauksissa käytettiin kuvassa 4.1 näkyvää Wandel&Goltermann EFA-3 mittaria (tarkkuus magneettikentälle  $\pm 8\%$ , sähkökentälle  $\pm 5\%$ , kalibroitu 12.2.1998), jonka taajuusalue on 5 Hz - 30 kHz (3 dB).



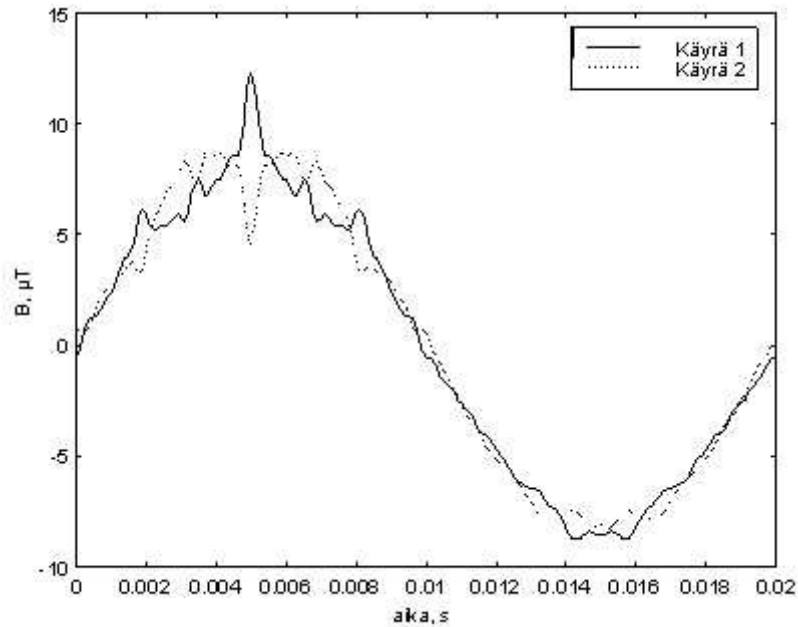
*Kuva 4.1.* Esimerkki sähkökenttämittauksesta Wandel&Goltermann EFA-3 mittarilla.

*Figure 4.1.* Example for electric field measurement with Wandel&Goltermann EFA-3 meter.

Sähkö- ja magneettikentät mitattiin 50 Hz välein taajuusalueella 50-2000 Hz. Koska käytössä ollut mittari ei pystynyt mittaamaan haluttuja taajuuksia yhtäaikaan, suoritettiin mittaukset siten, että ensiksi mitattiin kentän arvo 50 Hz taajuudella, sitten 100 Hz taajuudella ja näin jatkettiin 2000 Hz taajuuteen asti. Seuraavassa on havainnollistettu, kuinka altistumissuhde määritetään mitatuista arvoista: 5,93  $\mu\text{T}$  (50 Hz), 0,02  $\mu\text{T}$  (100 Hz), 0,12  $\mu\text{T}$  (150 Hz), 0,03  $\mu\text{T}$  (200 Hz), 0,31  $\mu\text{T}$  (250 Hz). Mittauksia on jatkettu 50 Hz välein 2000 Hz asti, josta mitattu arvo on 0,01  $\mu\text{T}$ . Seuraavassa altistumissuhde on laskettu mitatuista arvoista yhtälön 1.2 mukaisesti.

$$R = \frac{5,93}{25 \cdot 10^3} + \frac{0,02}{25 \cdot 10^3} + \frac{0,12}{25 \cdot 10^3} + \frac{0,03}{25 \cdot 10^3} + \frac{0,31}{25 \cdot 10^3} + \dots + \frac{0,01}{30,7} = 0,073 \quad (4.1)$$

Altistumissuhteen laskemisessa ei huomioida eri harmonisten magneettikenttäkomponenttien välisiä vaihe-eroja. Tästä syystä magneettikentän käyrämuoto saattaa näyttää hyvin erilaiselta, vaikka altistumissuhteen arvo olisi sama. Seuraavassa kuvassa 4.2 on esitetty kaksi esimerkkiä siitä, millaisilla magneettikentän käyrämuodoilla altistumissuhteen arvo on sama kuin edellisessä yhtälössä 4.1.



*Kuva 4.2.* Esimerkkejä magneettikentän käyrämuodoista, joilla altistumissuhteen arvo on 0,073.

*Figure 4.2.* Examples for the magnetic field curves, where the exposure ratio is 0.073.

Esimerkkikuvaajissa on oletettu, että harmoniset magneettikentät riippuvat toisistaan. Käyrällä 1 magneettikentän harmonisten huippuarvot esiintyvät samanaikaisesti ja käyrällä 2 huippuarvot vähentävät 50 Hz huippuarvoa. Käytännössä kuitenkin harmonisten sähkö- ja magneettikenttien vaihesiirto on satunnaisempi suure kuin edellisissä esimerkkikuvaajissa.

Joissakin mittaustulosten analysointia häiritsi tuloksissa esiintynyt kohina. Kohina on mittarin ominaisuus, joka kuitenkin varsinkin sähkökentän mittauksissa, erityisesti pieniä sähkökentän arvoja mitattaessa, vaikuttaa tuloksiin huomattavasti. Sähkökentän osalta yksittäisiä taajuuskomponentteja mitattaessa EFA-3 -mittari antaa kaikille taajuuksille jonkin nolasta poikkeavan arvon. Sähkökentän taajuuskomponenttien kohinataso oli mittarin käyttöohjeissa määritelty tasoon 0,0005 kV/m. Mitatuista taajuuskomponenttiarvoista kohinaksi saattoi tunnistaa helposti arvot 0,0002 kV/m saakka. Mitä enemmän eri taajuuskomponentteja mitataan, sitä enemmän kohinasta aiheutuvaa lisäystä summautuu myös altistumissuhteen arvoon. Esimerkiksi, jos kaikilla yksittäisillä taajuuskomponenteilla 50 Hz arvosta 2000 Hz arvoon mitataan 0,0005 kV/m sähkökenttä, vaikuttaa se altistumissuhteen summan arvoon 0,0265 verran. Tätä pienempiä sähkökentän altistumissuhteen tuloksia voidaan pitää merkityksettöminä. Vastaava altistumissuhteen summan arvo 0,0002 kV/m sähkökentän kohinatasolle on 0,0106. Sähkökentän altistumissuhteen epätarkkuus on vähintään tämän suuruinen. Jos mitattavan sähkökentän perinteinen tehollisarvo on samaa suuruusluokkaa kuin sähkökenttämittauksen kohinataso, tulokset vääristyvät huomattavasti. Vaikka kenttä olikin monissa tapauksissa hyvin pieni, mittauksia jatkettiin alkuperäisen suunnitelman mukaisilla taajuuksilla.

Myös yksittäisten taajuuskomponenttien magneettikenttämittaukseen käytetylle EFA-3 -mittarille on valmistaja määritellyt kohinataso. Valmistajan mukaan kohinaa on arvot 0,05  $\mu\text{T}$  saakka. Mitatuista taajuuskomponenttiarvoista kohinaksi saattoi tunnistaa helposti arvot 0,02  $\mu\text{T}$  saakka,

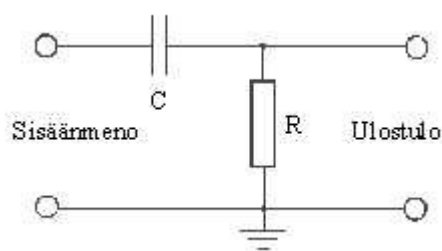
mutta kohinalta vaikuttavia tuloksia mitattiin aina mittarin valmistajan esittämään kohinatasoon saakka. Jos kaikilla yksittäisillä taajuuskomponenteilla 50 Hz arvosta 2000 Hz arvoon mitataan 0,05  $\mu\text{T}$  magneettikenttä, vaikuttaa se altistumissuhteen summaan 0,0527 verran. Tätä pienemmillä magneettikentän altistumissuhteen tuloksilla ei ole merkitystä. Vastaava altistumissuhteen summan arvo 0,02  $\mu\text{T}$  magneettikentän kohinatasolle on 0,0211. Magneettikentän altistumissuhteen epätarkkuus on vähintään tämän suuruinen.

Toinen yksittäisiä taajuuskomponentteja mitattaessa esiintynyt ja tuloksia häirinnyt mittaustekninen ongelma oli parillisten yliaaltojen esiintyminen. Parillisia yliaaltoja esiintyi ilman selvää syytä. Yksi mahdollinen syy parillisten yliaaltojen esiintymiselle on mittarin kohinasta johtuva päästökaistan leviäminen yksittäisiä yliaaltoja mitattaessa, jolloin verkossa tyypillinen pariton yliaalto saattaa kohinan seurauksena näkyä myös parillisen yliaaltotaajuuden mittaustuloksessa. Ongelma ei ilmennyt kaikissa mittauksissa eikä kaikilla harmonisilla taajuuksilla, koska sen esiintyminen riippuu kytketymismekanismista, jolla se mittaustulokseen vaikuttaa.

### 4.3 Painotetun kentän mittausmenetelmä

Laajakaistaiset magneettikentät mitattiin myös toisella tavalla. Tämä mittausmenetelmä on uuden STM:n asetuksen mukainen STUK:n kehittämä painotetun kentän mittausmenetelmä /20, 21/. Painotetun kentän mittausmenetelmän mukaisesti mitattaessa myös harmonisten magneettikenttien vaihesiirron satunnaisuus saadaan paremmin huomioitua, koska mittaus perustuu kentän käyrämuodon huomioivaan mittaukseen. Painotetun kentän mittausmenetelmä perustuu kentän suodattamiseen ylipäästösuodattimella. Painotettu kentänvoimakkuus eli suodatetun signaalin suurin arvo (määritetään 10 minuutin aikajaksolla) ei saa ylittää mittausmenetelmälle määritettyä vertailuarvoa.

Painotetun kentän mittausmenetelmän mittauksissa magneettivuon tiheyden mittaamiseen käytettiin Narda 8532 -mittaria (tarkkuus  $\pm 5\%$ , kalibroitu vuonna 1998). Kyseisen mittari pystyy mittaamaan magneettivuon tiheyden taajuusalueelta 12 Hz - 50 kHz. Mittarilta saadaan ulostulona analoginen jännitesignaali, joka syötetään ylipäästösuodattimelle. Kuvassa 4.3 on esitetty mittauksissa käytetyn yksiasteisen RC-suodattimen sijaiskytkentä.



*Kuva 4.3.* Yksiasteisen RC-ylipäästösuodattimen sijaiskytkentä. Käytetyt komponenttien arvot ovat:  $R = 4,22 \text{ kW}$  ja  $C = 47 \text{ nF}$ .

*Figure 4.3.* Basic circuit arrangement of the first degree RC high pass filter. Used component values were:  $R = 4.22 \text{ kW}$  and  $C = 47 \text{ nF}$ .

Suoraan komponenttiarvoista laskettu suodattimien 3 dB rajataajuus on 802 Hz. Koska komponenteilla on toleranssi, jonka sisällä todelliset komponenttiarvot voivat olla, ei suodattimen rajataajuus ole kuitenkaan tarkasti teoreettisesti lasketun suuruinen.

Vaikka ICNIRP:n suosituksessa rajataajuutena on 820 Hz, ei tästä aiheudu juurikaan virhettä mittaukselle. Syynä käytössä olleen RC-suodattimen ICNIRP:n suosituksesta poikkeavaan rajataajuuteen on STM:n asetuksessa oleva ero rajataajuuksissa. STM:n asetuksessa rajataajuus on 800 Hz ja suodatin on rakennettu asetuksen mukaisia mittauksia varten.

Mittauksissa ylipäästösuodattimelta tuleva analoginen signaali tallennettiin National Instrumentsin toimittaman mittauskortin /15/ ja LabView-ohjelmiston /16/ avulla kannettavan tietokoneen kovalevyille 50 kHz näytteenottotaajuudella 10 minuutin ajan. Kuvassa 4.4 on esitetty valokuva mittaustilanteesta.



*Kuva 4.4.* Esimerkki magneettikenttäaltistumisen laajakaistamittauksesta.

*Figure 4.4.* Example for broadband magnetic field exposure measurement.

Kuvassa erottuvat kolmijalkaan kiinnitetty Narda 8532 -mittari, metrin korkeudelle kiinnitetty mittarin anturi, kolmijalan edessä on RC-suodatin ja tietokone.

Aineisto tallennettiin tietokoneen kovalevyille, joten sen kokoa ei haluttu kasvattaa kovin suureksi. Tästä syystä 50 kHz näytteenottotaajuus katsottiin riittäväksi. Nyquistin näytteenottoeteoreeman mukaisesti 50 kHz näytteenottotaajuus riittää 25 kHz taajuuksien ilmiöiden toistamiseen näytteen laskostumatta. Tämän lisäksi yksittäisten harmonisten kenttien mittausmenetelmällä mitattaessa todettiin kenttä yleensä pieneksi kohinaan verrattuna taajuuden mennessä yli 650 Hz (13 yliaalto), joten suurempaan kuin 50 kHz näytteenottotaajuuteen ei ollut tarvetta.

Mitatusta datasta laskettiin puolijaksoittain (10 ms) esiintyvien huippuarvojen itseisarvojen aikakeskiarvo 10 minuutin ajalta. Mitatusta signaalista laskettua jännitteen keskiarvoa verrattiin ICNIRP:n suosituksen viitearvoilla STM:n asetuksen mukaisesti laskettuun altistumissuhteen R arvoon 1.

Altistumissuhteen laskemista varten järjestelmän tuottamalle jännitesignaalille määritettiin vertailuarvo. Painotetun kentän menetelmä on kuvattu tarkemmin tämän projektin toisessa raportissa, jossa on käsitelty väestön sähkö- ja magneettikentille altistumisen mittaamista ja mittaustuloksia /18/. STM:n asetuksen mukaisilla viitearvoilla määritetty magneettikentän mittaussignaalin vertailuarvo on väestön altistumismittausta varten. Työaltistuksen vastaava vertailuarvo saatiin kertomalla väestöaltistuksen vertailuarvo viidellä.

## 5. Mittaustuloksia sähkön tuotannon laajakaistaisista kentistä

### 5.1 Vesivoimalaitoksen LM-1 laajakaistamittaus

Vesivoimalaitos on otettu käyttöön vuonna 1932, jonka jälkeen sitä on uusittu. Putouskorkeus on 7,0 metriä ja virtaama 140 m<sup>3</sup>/s. Vesivoimalaitoksella on kaksi Kaplaniturbiinia, joista toinen (turbiini 2) oli mittauksien aikana huollossa. Asentaja työskenteli mittauksen aikana turbiinin kotelon sisällä. Asentajan työskentelyä seuraamalla voitiin päätellä myös mahdollisia altistumistilanteita, joka vaikutti mittauspisteiden valintaan.

#### Katselmusmittaus

Ensin tehtiin katselmusmittaus, jossa mitattiin magneettikentän perinteistä tehollisarvoa. Mittaukset tehtiin sellaisista paikoista, joissa työntekijät liikkuvat työpaikalla ollessaan, mutta mittaajien turvallisuuden varmistamiseksi esimerkiksi sähköasentajalle varsin tyypillisestä altistumistilanteesta, jännitetyöstä, ei tehty mittauksia. Katselmusmittauksessa mitattiin sähkö- ja magneettikenttä vesivoimalaitoksen valvomosta, turbiinihallista, turbiinin 1 kotelon sisältä sekä ulkopuolelta, voimalaitoksen eri kerroksista ja turbiinin juoksupyörältä. Taulukossa 5.1 on esitetty katselmusmittauksen tulokset vesivoimalaitoksella.

*Taulukko 5.1.* Katselmusmittauksen tulokset vesivoimalaitoksella LM-1 yhden metrin korkeudelta.

*Table 5.1.* Results in a survey measurement in water power plant LM-1 at the height of one meter.

Paikka	B, $\mu\text{T}$	E, kV/m
Valvomo, työpiste (PC:n näyttö)	0,19	0,006
Turbiinihalli, turbiinin 1 ovi	0,40	0,006
Turbiinin 1 kotelon sisätila	0,33	0,003
Turbiinin 1 kotelon sisätila, pj-kytkentäkotelo, 0,5 m	1,46	0,006
Turbiinin 1 kotelon sisätila, generaattorin päävirtapiiri	16,8	0,002
Välikerros	0,40	0,002
Pohjakerros, muuntajan alajännitekaapeli, 1 m	0,51	0,002
Pohjakerros, muuntajan alajännitekaapeli, 1m	2,36	0,002
Välikerros, juoksupyörä, vesipumppukäytöt	0,80	0,013

Sähkökenttä todettiin varsin pian merkityksettömän pieneksi, koska sähkökenttä vaimenee kaikissa rakenteissa. Erityisesti sisätiloissa tällaisia sähkökenttää vaimentavia rakenteita oli paljon. Vesivoimalaitoksella ei myöskään ollut juurikaan paljaita jännitteisiä johtimia, joista sähkökenttä olisi päässyt leviämään. Tästä huolimatta sähkökentän laajakaistaisten arvojen mittauksia jatkettiin.

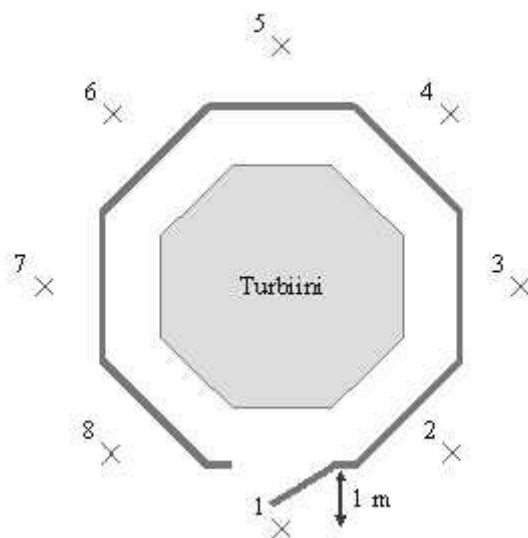
Suurin magneettikentän perinteinen tehollisarvo mitattiin turbiinihallista turbiinin 1 kotelon sisällä olevasta tilasta. Kuvassa 5.1 on valokuva kotelon sisällä olevasta tilasta.



*Kuva 5.1.* Valokuva vesivoimalaitoksen LM-1 turbiinin suojakuoren sisältä.

*Figure 5.1.* Photograph inside the turbine protective shell of the water power station LM-1.

Katselmusmittauksen perusteella valittiin tarkemman perinteisen tehollisarvon määrittämiseen turbiinihallista turbiinin 1 kotelon ulkopuoli. Mittaukset tehtiin kahdeksankulmaisen kotelon sivujen suunnassa. Etäisyydeksi koteloon valittiin yksi metri. Mittauskorkeus mittauksissa oli yksi metri. Kuva 5.2 esittää turbiinihallin mittauspisteitä ja taulukko 5.2 pisteistä mitattujen magneettikenttien tuloksia.



*Kuva 5.2.* Mittauspisteiden sijainti turbiinin suojakuoren ympärillä.

*Figure 5.2.* Location of the measurement points around the turbine protective shell.

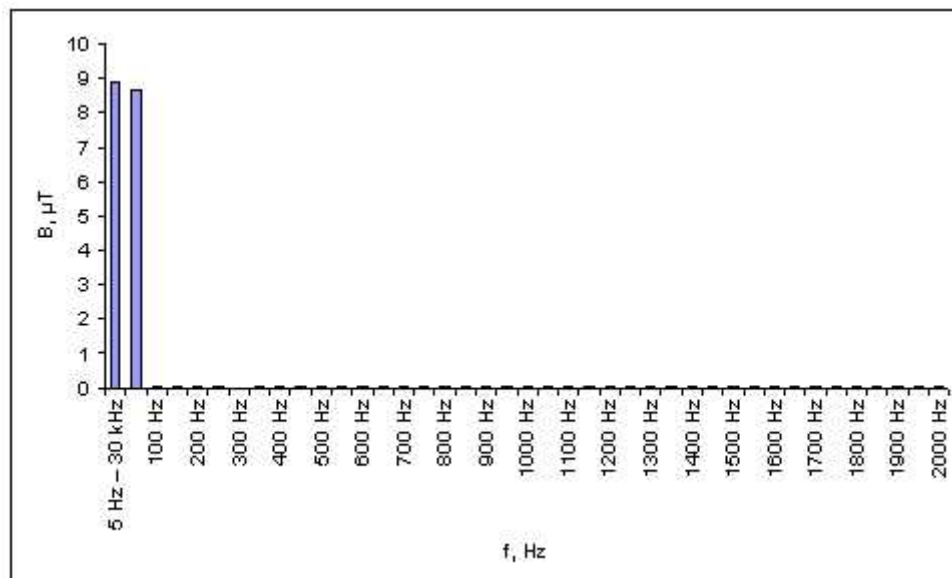
*Taulukko 5.2.* Turbiinin ympäriltä mitattujen magneettikenttien tehollisarvot yhden metrin korkeudelta.

Table 5.2. Magnetic field (RMS) results measured around turbine at the height of one meter.

Mittauspiste	Laite, B, $\mu\text{T}$	Mittauspiste	Laite, B, $\mu\text{T}$
1	0,33	5	0,34
2	1,40	6	0,22
3	0,96	7	0,35
4	0,70	8	1,18

### Laajakaistaiset sähkö- ja magneettikenttäaltistumiset

Turbiinin 1 suojakuoren sisältä tehdyissä katselmusmittauksissa mitattiin suurempia magneettikenttäarvoja. Laajakaistaiset sähkö- ja magneettikenttäaltistumiset tehtiin katselmusmittauksen perusteella suojakuoren sisältä generaattorin päävirtapiiriin vierestä. Kuvassa 5.3 on esitetty laajakaistaisten magneettikenttäaltistumismittausten tulokset.



Kuva 5.3. Magneettivuon tiheyden taajuuskomponentit vesivoimalaitoksella LM-1.

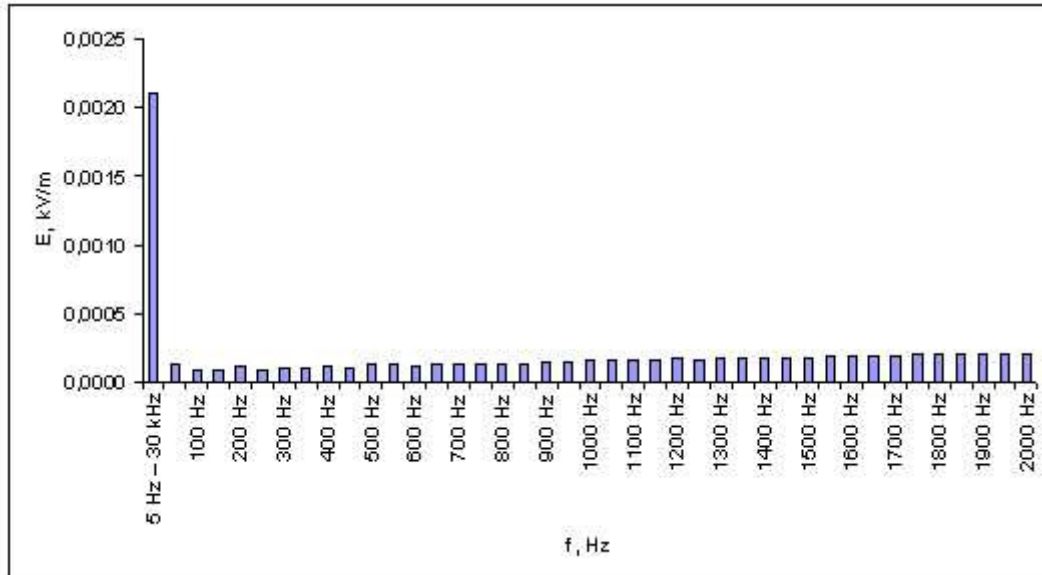
Figure 5.3. Harmonics of magnetic flux density in the water power station LM-1.

Magneettikentässä esiintyi vain pieniä yliaaltoja, joista suurin oli 3. yliaalto. Altistumissuhteet jäivät melko pieniksi, koska kenttäarvot olivat melko pieniä ICNIRP:n suositusarvoihin verrattuna ja yliaaltoja oli varsin vähän.

Magneettivuon tiheyden perinteinen tehollisarvo oli  $8,89 \mu\text{T}$ . ICNIRP:n suosituksen mukaisesti yksittäisten harmonisten kenttien menetelmällä lasketut altistumissuhteet olivat 0,03 (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) sekä samasta pisteestä STUK:n kehittämällä painotetun kentän mittausmenetelmällä STM:n asetuksen mukaisesti määritetty altistumissuhde oli likimain nolla. Altistumissuhteet eivät saisi ylittää arvoa yksi. STUK:n kehittämällä STM:n asetuksen mukaisella menetelmällä

määritetyssä altistumisessa altistussuhteen arvo on pieni magneettikentän pelkkään 50 Hz tehollisarvoon verrattuna, koska tehollisarvo jaettuna 50 Hz viitearvolla on 0,02. Myös voimalaitoksen teho vaihteli STUK:n kehittämällä STM:n asetuksen mukaisella menetelmällä tehdyn 10 minuutin mittauksen aikana.

Sähkökentän laajakaistaiset mittaukset tehtiin samasta pisteestä kuin magneettikenttämittaus. Yksittäisten harmonisten sähkökenttäkomponenttien mittauksen tulokset on esitetty kuvassa 5.4.



Kuva 5.4. Sähkökentän voimakkuuden taajuuskomponentit vesivoimalaitokselle LM-1.  
Figure 5.4. Harmonics of the electric field strength for the water power station LM-1.

Kuvan 5.4 perusteella sähkökentässä esiintyi paljon kohinaa, joka vääristi tuloksia. Kohina on mittarin ominaisuus, joka sähkökentän mittauksessa johtui siitä, että mittari antaa jokaiselle mitattavalle taajuudelle nolasta poikkeavan lukuarvon. Pienissä kentissä pieni lisä vääristää ylemmillä taajuuksilla altistumissuhdetta huomattavasti.

Sähkökentän voimakkuuden perinteinen tehollisarvo oli 0,002 kV/m. Taajuuskomponenteista ICNIRP:n 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 eivät saisi ylittää arvoa yksi. Koska taajuuden kasvaessa myös kohinan merkitys altistumissuhdetta laskettaessa kasvaa, on suuremmilla taajuuksilla suhteessa enemmän merkitystä altistussuhteen arvoon. Tästä syystä altistumissuhteen tulokset poikkeavat huomattavasti toisistaan. Koska kuitenkin altistumissuhde on hyvin pieni, ei sähkökentillä ole työnteijäaltistumisen kannalta merkitystä.

## 6. Mittaustuloksia sähköasemien laajakaistaisista kentistä

Tutkimuksessa mitattiin seitsemän sähköasemaa. Mitattuja ulkokytinkenttiä oli kuudella sähköasemalla, joissa mitattiin viidellä 400 kV kytinkentällä ja kahdella 110 kV kytinkentällä. Yhdellä 400 kV sähköasemalla tehtiin mittauksia sekä 400 kV että 110 kV kytinkentillä. Lisäksi tehtiin kaksi mittausta kallioluolaan louhitun 110 kV GIS:n kytinkentillä. Aluksi sähkö- ja

magneettikenttien yksittäiset harmoniset taajuuskomponentit mitattiin vain 650 Hz asti, mutta myöhemmin alettiin mitata taajuuskomponentit 2000 Hz asti. Ensimmäisissä painotetun magneettikentän mittauksissa käytettiin magneettikentälle HI-3604 -mittaria, joka kuitenkin myöhemmin todettiin liian epätarkaksi. Siksi HI-3604 -mittarilla mitattuja painotetun kentän tuloksia ei ole tässä esitetty. Mittauksia ehdittiin tekemään HI-3604 -mittarilla, koska mittausongelma selvisi vasta mittausten aikana. Myöhemmissä magneettikenttämittauksissa käytettiin Narda 8532 -mittaria.

### 6.1 400 kV kytkinsähköaseman LM-2 laajakaistamittaus

Sähköasemamittaus LM-2 tehtiin 400 kV muuntosähköaseman ulkokytkinlaitoksella, jossa oli myös DC-linkki. Sähköasemalla oli kaksikatkaisijajärjestelmä (duplex), kolme 400 kV johtolähtöä, kaksi 400/110 kV muuntajaa ja DC-lähtöä varten tasasuuntaukseen tyristorihalli. Lisäksi sähköasemalla oli 110 kV kytkinkentät. Kuvassa 6.1 on esitetty valokuva huoltokäytävältä sähköaseman 400 kV pääkiskon suuntaan.

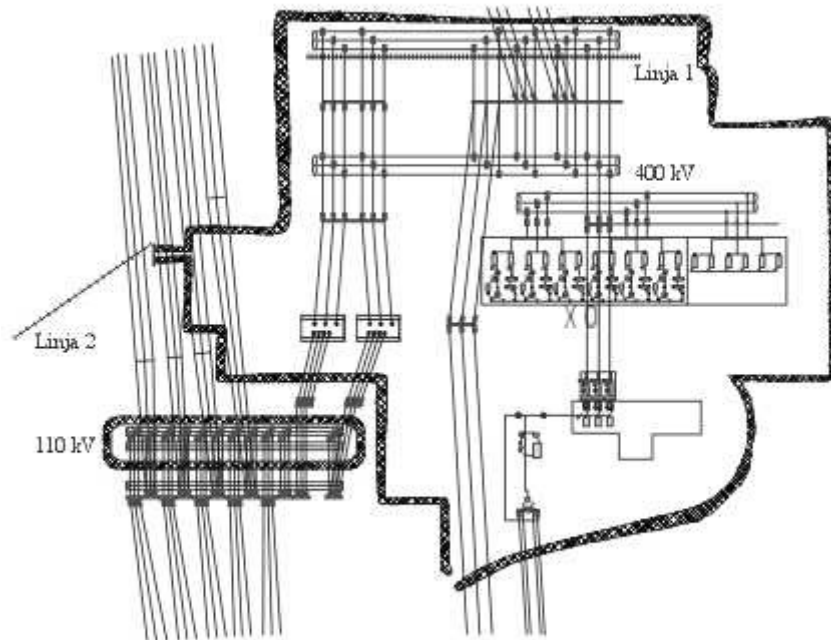


*Kuva 6.1.* Valokuva 400 kV sähköaseman LM-2 kytkinkentästä.

*Figure 6.1.* Photograph from the switchyard of the 400 kV substation LM-2.

Sähköasemalla tehtiin sähkö- ja magneettikenttien perinteisen tehollisarvon mittaukset kahdelta mittauslinjalta (linja 1 ja 2), sekä tyristorihallin ulkopuolelta. Mittauspisteiden valinta mittauslinjoilla perustui sähköaseman rakenteeseen ja huoltokäytävien sijaintiin. Työntekijät käyttävät huoltokäytäviä kytkinkentillä liikkuessaan, joten huoltokäytävät oli valittu mittauksiin työntekijöiden altistumisen perusteella. Tyristorihallin ulkopuolelta arveltiin löytyvän juurikaan yliaaltoja, mistä syystä se valittiin yhdeksi mittauspaikaksi. Mittauspisteiden väli mittauslinjoilla oli mittauksessa 2 metriä. Mittaukseen valitut mittauslinjat 1 ja 2 on esitetty kuvassa 6.2.

Tyristorihallin edessä olevat  
mittauspisteet:  
Magneettikenttä o  
Sähkökenttä x



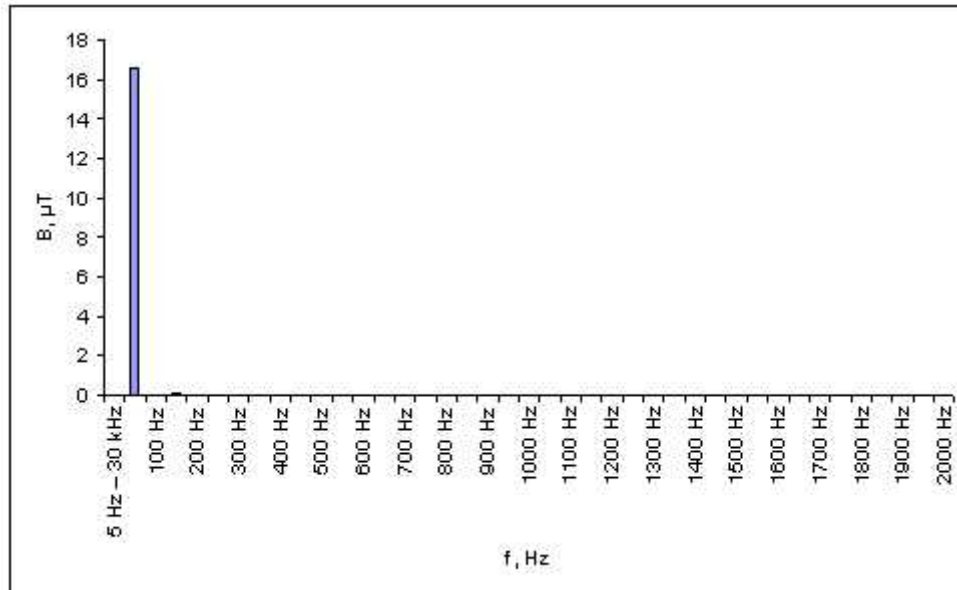
Kuva 6.2. Mittauspisteiden sijainti sähköasemalla LM-2.

Figure 6.2. Location of the measurement points at the substation LM-2.

Mittauslinja 2 oli sähköaseman aidan ulkopuolella. Sen tarkoituksena oli selvittää sähköasemasta aiheutuvaa väestöaltistumista /7/. Suurimmat arvot olivat  $1,74 \mu\text{T}$  ja  $0,80 \text{ kV/m}$ . Tarkemmin linjan 2 tuloksia ei esitetä tässä raportissa. Linjalla 1 suurimmat arvot olivat  $16,5 \mu\text{T}$  (piste 53, 104 metriä kytkinkenttien reunalta) ja  $7,73 \text{ kV/m}$  (piste 42, 82 metriä kytkinkenttien reunalta).

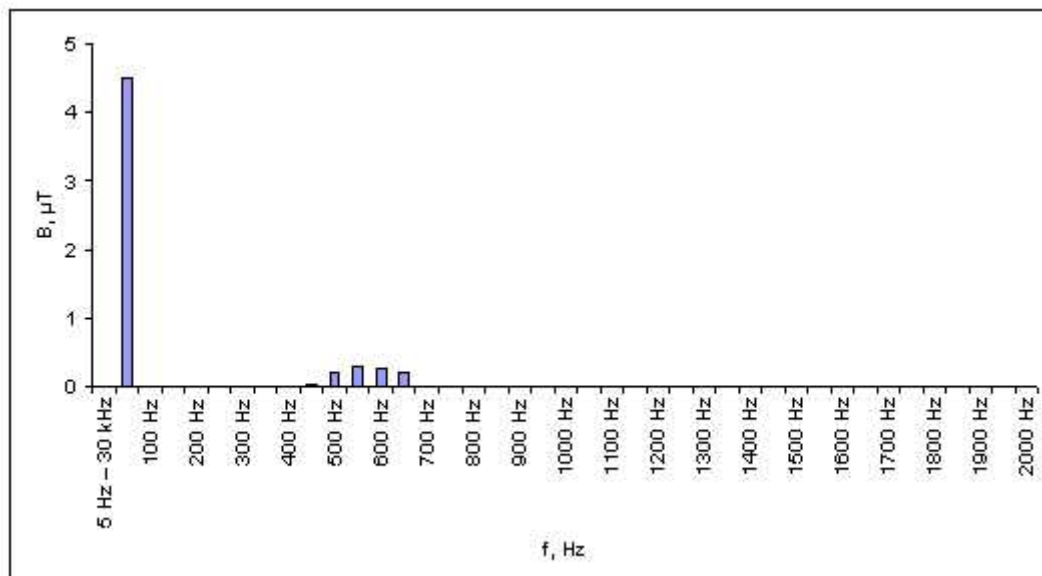
Magneettikentän perinteisen tehollisarvon mittauksista valittiin laajakaistaisiin mittauksiin piste, jossa kentän arvo oli suurin. Toinen laajakaistaisiin mittauksiin valittu piste oli tyristorihallin lähellä. Yksittäiset harmoniset magneettikenttäkomponentit mitattiin 650 Hz asti.

Magneettikenttämittausten tulokset mittauslinjalta 1 on esitetty kuvassa 6.3 ja tyristorihallin läheltä kuvassa 6.4. Altistumissuhteiden tulokset on esitetty taulukossa 6.1.



*Kuva 6.3.* Magneettivuon tiheyden taajuuskomponentit 650 Hz asti sähköaseman LM-2 kytkinkentälle (linja 1).

*Figure 6.3.* Magneettivuon tiheyden taajuuskomponentit 650 Hz asti sähköasemalle LM-2 (tyristorihallin lähellä).



*Kuva 6.4.* Magneettivuon tiheyden taajuuskomponentit 650 Hz asti sähköasemalle LM-2 (tyristorihallin lähellä).

*Figure 6.4.* Harmonics of the magnetic flux density up to 650 Hz for the substation LM-2 (near thyristor building).

*Taulukko 6.1.* Taajuuskomponenteista ICNIRP:n suosituksen mukaisesti lasketut altistumissuhteet. Suosituksen mukaan ne eivät saa ylittää arvoa yksi.

*Table 6.1.* Exposure ratios from the harmonic components calculated based on the ICNIRP

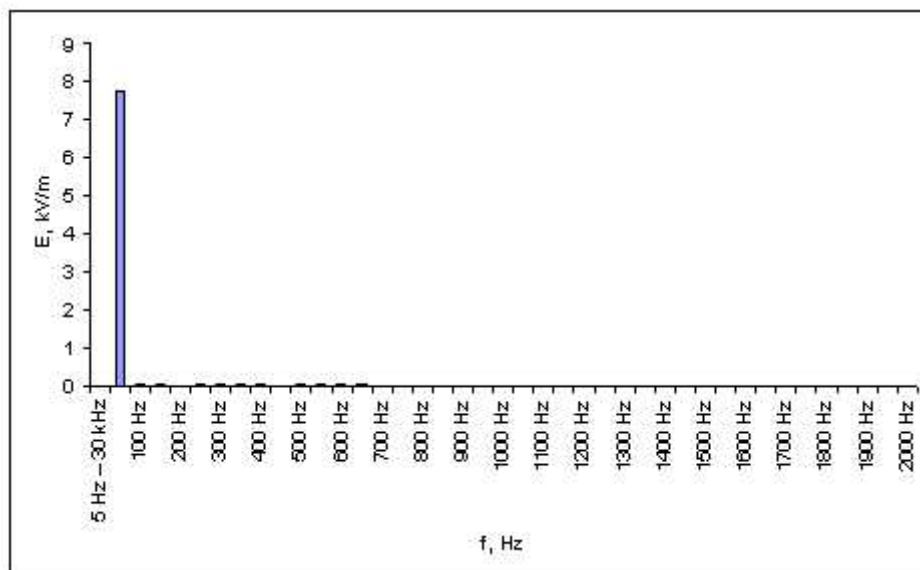
guidelines. Based on guidelines values are not allowed to exceed one.

	B, $\mu\text{T}$	Työntekijäaltistus ICNIRP:n suosituksen mukaan**
Linja 1	16,6	0,03
Tyristorihalli	-	0,02

\*\* taajuudet on laskettu 100 Hz välein 650 Hz saakka

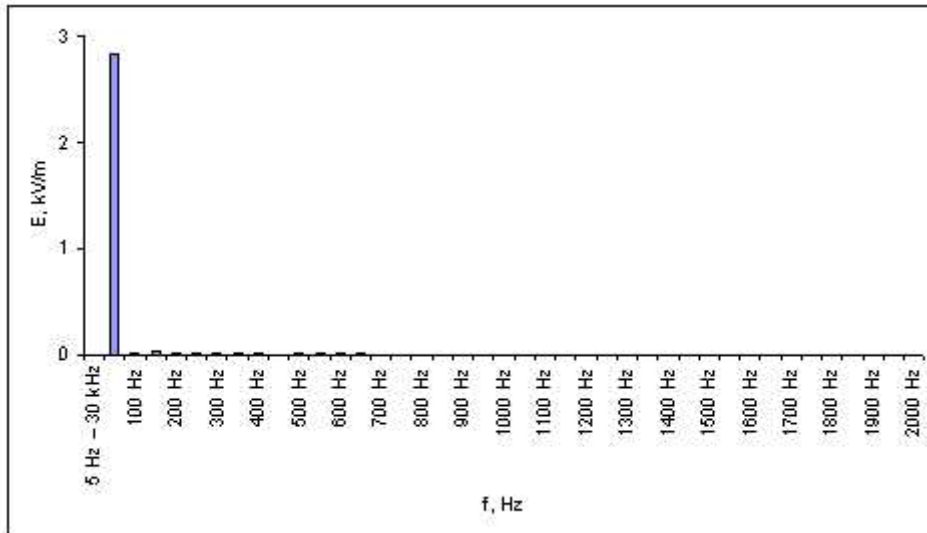
Linjalla 1 magneettikentässä esiintyi eniten 3. yliaaltoa. Sitä vastoin tyristorihallin lähellä tehdyssä mittauksessa oli odotusten mukaisesti magneettikentässä runsaasti yliaaltoja. Tyristorihallin lähellä perinteisen tehollisarvon mittaukset epäonnistuivat. Tyristorihallin lähellä magneettikentän suurimmat harmoniset olivat 10. - 13. yliaalto. Parilliset yliaallot eivät voi johtua tyristorihallissa olleesta 12-pulssisuuntaajasta. Yksi mahdollinen syy on mittarin kohinasta johtuva päästökaistan leviäminen yksittäisiä yliaaltoja mitattaessa, koska suurimmat parilliset yliaallot esiintyvät aina vielä suuremman parittoman yliaaltotaajuuden lähellä. Yliaalloista huolimatta altistumissuhteet jäävät melko pieniksi, koska kenttäarvot ovat melko pieniä ICNIRP:n suositusarvoihin verrattuna.

Sähkökentän laajakaistaiset mittaukset tehtiin linjan 1 pisteessä 42, jossa kentän arvo oli suurin, sekä tyristorihallin läheltä. Yksittäisten harmonisten sähkökenttäkomponenttien mittauksen tulokset linjalta 1 on esitetty kuvassa 6.5 ja tyristorihallin läheltä kuvassa 6.6. Altistumissuhteiden tulokset on esitetty taulukossa 6.2.



Kuva 6.5. Sähkökentän voimakkuuden taajuuskomponentit 650 Hz asti sähköaseman LM-2 kytkinkentällä (linja 1).

Figure 6.5. Harmonics of the electric field strength up to 650 Hz in the substation LM-2 switchyard (line 1).



*Kuva 6.6.* Sähkökentän voimakkuuden taajuuskomponentit 650 Hz asti sähköaseman LM-2 kytkinkentällä (tyristorihallin läheltä).

*Figure 6.6.* Harmonics of the electric field strength up to 650 Hz in the substation LM-2 switchyard (near thyristor building).

*Taulukko 6.2.* Taajuuskomponenteista ICNIRP:n suosituksen mukaisesti lasketut altistumissuhteet. Suosituksen mukaan ne eivät saa ylittää arvoa yksi.

*Table 6.2.* Exposure ratios from the harmonic components calculated based on the ICNIRP guidelines. Based on guidelines values are not allowed to exceed one.

	E, kV/m	Työntekijäaltistus ICNIRP:n suosituksen mukaan**
Linja 1	7,73	0,82
Tyristorihalli	-	0,31

\*\* taajuudet on laskettu 100 Hz välein 650 Hz saakka

Sähkökentässä suurimmat harmoniset olivat 3. ja 5. yliaalto. Kuitenkin taulukon 6.2 linjan 1 osalta voidaan todeta, että yliaalloilla ei ole suurta merkitystä sähkökenttäaltistusta määritettäessä, mutta kentän perinteiset tehollisarvot ovat melko suuria. Molemmissa mittauksissa työntekijäaltistumisen tulokset jäävät selvästi alle yhden.

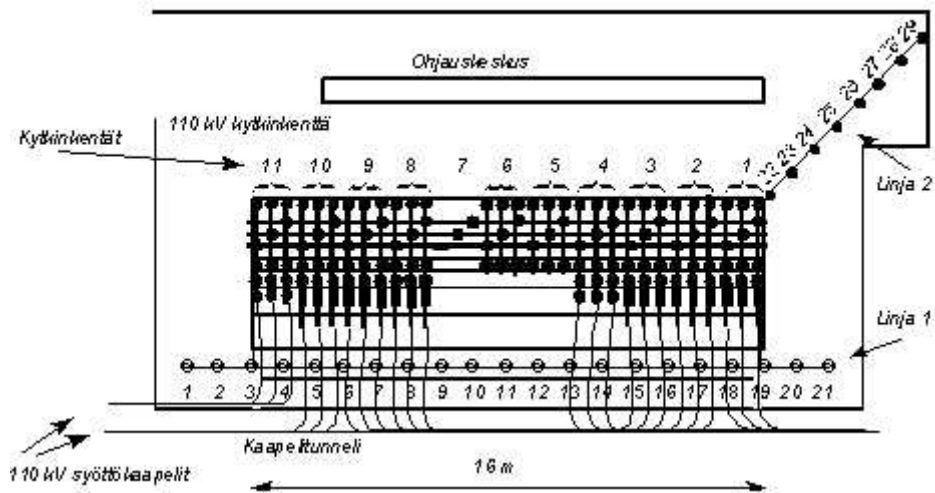
## 6.2 110 kV GIS:n LM-3 laajakaistamittaus

Sähköasemamittaus LM-3 tehtiin kallioluolaan louhitun 110 kV kaasueristeisen sähköaseman (GIS) kytkinkentällä johtolähdöllä. Sähköasemalla oli kahdeksan 110 kV johtolähtöä, joista kaksi oli generaattorilähtöjä. Kumpikin generaattorilähtö oli poissa käytöstä mittausten aikana. Kuvassa 6.7 on esitetty valokuva johtolähtöjen alta.



*Kuva 6.7.* Valokuva sähköaseman LM-3 sähkö- ja magneettikentän mittaustilanteesta.  
*Figure 6.7.* Photograph from the electric and magnetic measurements of the substation LM-3.

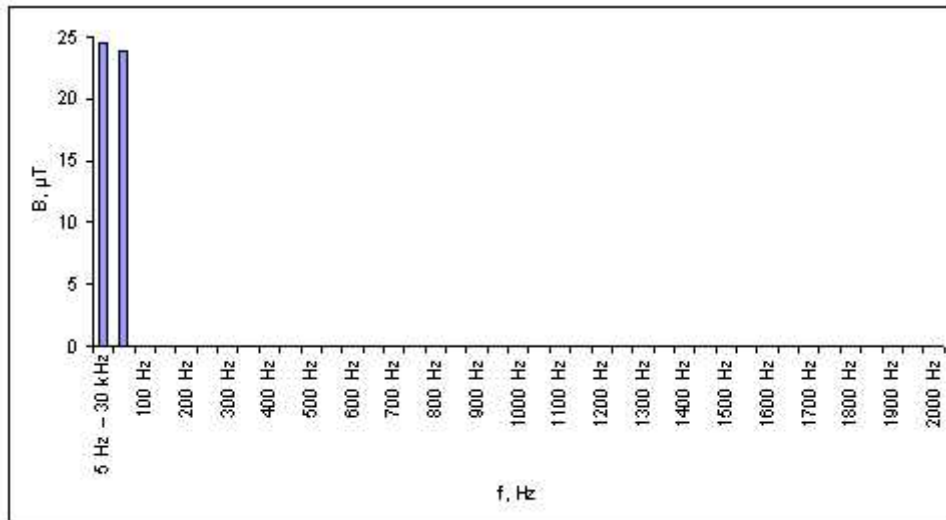
Sähköasemalla tehtiin sähkö- ja magneettikenttien perinteisen tehollisarvon mittaukset kahdelta mittauslinjalta (linja 1 ja 2), sekä sähköaseman kaapelitunnelista kaapeleiden läheltä. Mittauspisteiden valinta mittauslinjoilla perustui sähköaseman rakenteeseen. Mittaukseen valitut mittauslinjat 1 ja 2 on esitetty kuvassa 6.8.



*Kuva 6.8.* Mittauspisteiden sijainti sähköasemalla LM-3.  
*Figure 6.8.* Location of the measurement points at the substation LM-3.

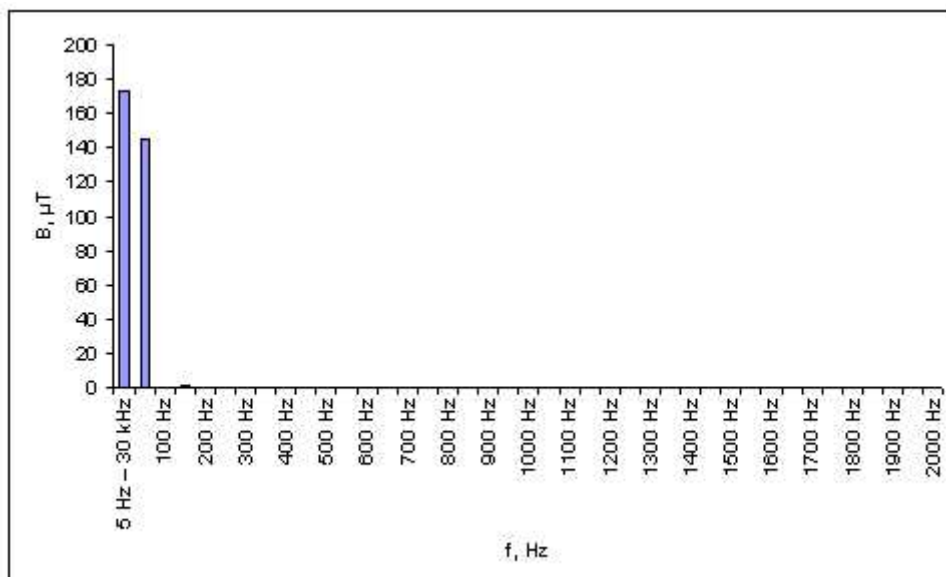
Kaapelitunnelin mittaus perustui sähköasemalla aikaisemmin tehtyyn katselmusmittaukseen [17]. Työntekijät käyttävät kaapelitunnelia matkansa varrella vaihtoehtoisena reittinä sähköasemalle. Myös autotunnelin kautta oli mahdollista kulkea sähköasemalle. Mittauspisteiden väli mittauslinjoilla oli mittauksessa 1 metri.

Linjalla 1 suurimmat arvot olivat 24,5  $\mu\text{T}$  (piste 17) ja 0,002 kV/m (piste 20) ja linjalla 2 arvot olivat 0,85  $\mu\text{T}$  (piste 23) ja 0,014 kV/m (piste 24). Magneettikentän perinteisen tehollisarvon mittauksista valittiin laajakaistaisiin mittauksiin piste, jossa kentän arvo oli suurin. Toinen laajakaistaisiin mittauksiin valittu piste oli kaapelitunnelissa. Yksittäiset harmoniset magneettikenttäkomponentit mitattiin 650 Hz asti. Magneettikenttämittausten tulokset mittauslinjalta 1 on esitetty kuvassa 6.9 ja kaapelitunnelista kuvassa 6.10. Altistumisuhteiden tulokset on esitetty taulukossa 6.3.



*Kuva 6.9.* Magneettivuon tiheyden taajuuskomponentit 650 Hz asti sähköaseman LM-3 syöttöjen alta (linja 1).

*Figure 6.9.* Harmonics of the magnetic flux density up to 650 Hz for the substation LM-3 under the feeders (line 1).



*Kuva 6.10.* Magneettivuon tiheyden taajuuskomponentit 650 Hz asti sähköasemalle LM-3 (kaapelitunneli).

*Figure 6.10.* Harmonics of the magnetic flux density up to 650 Hz for the substation LM-3 (cable tunnel).

*Taulukko 6.3.* Taajuuskomponenteista ICNIRP:n suosituksen mukaisesti lasketut altistumissuhteet. Suosituksen mukaan ne eivät saa ylittää arvoa yksi.

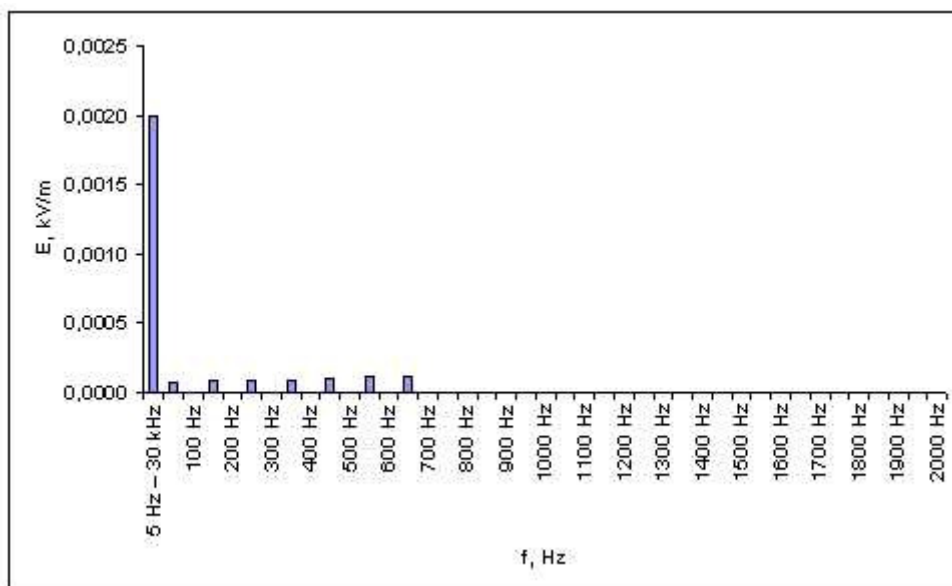
*Table 6.3.* Exposure ratios from the harmonic components calculated based on the ICNIRP guidelines. Based on guidelines values are not allowed to exceed one.

	<b>B, <math>\mu\text{T}</math></b>	<b>Työntekijäaltistus ICNIRP:n suosituksen mukaan**</b>
Linja 1	24,5	0,05
Kaapelitunneli	173	0,30

\*\* taajuudet on laskettu 100 Hz välein 650 Hz saakka

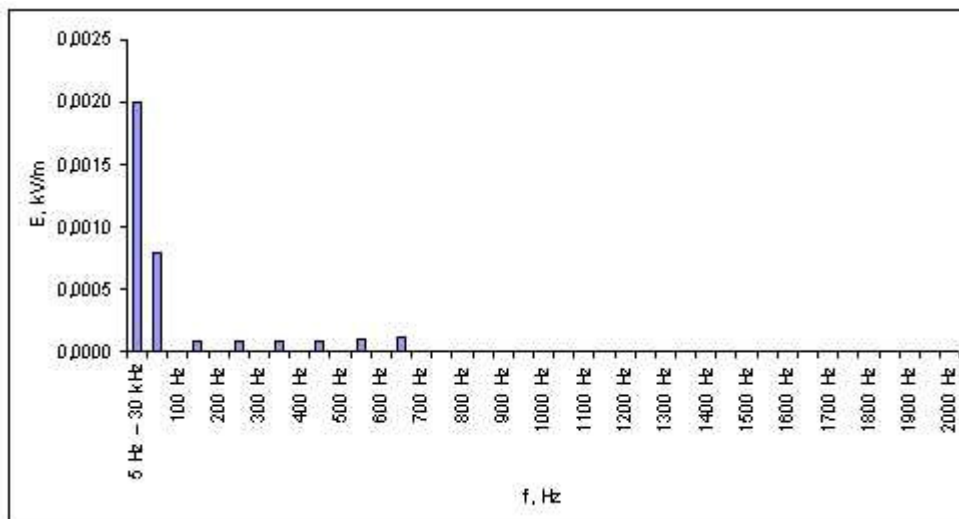
Molemmissa mittauksissa magneetikentässä esiintyi eniten 3. yliaaltoa. Mittauslinjalla 1 altistumissuhde jäi melko pieneksi, koska kenttäarvot ovat melko pieniä ICNIRP:n suositusarvoihin verrattuna. Sitä vastoin kaapelitunnelissa tehdyssä mittauksessa altistumissuhde oli suurempi kuin syöttöjen lähellä, mutta kuitenkin huomattavasti alle yhden.

Sähkökentän laajakaistaiset mittaukset tehtiin linjan 1 pisteessä 20, jossa kentän arvo oli suurin johtolähtöjen alla mitattu, sekä kaapelitunnelissa. Yksittäisten harmonisten sähkökenttäkomponenttien mittauksen tulokset linjalta 1 on esitetty kuvassa 6.11 ja kaapelitunnelista kuvassa 6.12. Altistumissuhteiden tulokset on esitetty taulukossa 6.4.



*Kuva 6.11.* Sähkökentän voimakkuuden taajuuskomponentit 650 Hz asti sähköaseman LM-3 syöttöjen alta (linja 1).

*Figure 6.11.* Harmonics of the electric field strength up to 650 Hz for the substation LM-3 under the feeders (line 1).



*Kuva 6.12.* Sähkökentän voimakkuuden taajuuskomponentit 650 Hz asti sähköasemalle LM-3 (kaapelitunneli).

*Figure 6.12.* Harmonics of the electric field strength up to 650 Hz for the substation LM-3 (cable tunnel).

*Taulukko 6.4.* Taajuuskomponenteista ICNIRP:n suosituksen mukaisesti lasketut altistumissuhteet. Suosituksen mukaan ne eivät saa ylittää arvoa yksi.

*Table 6.4.* Exposure ratios from the harmonic components calculated based on the ICNIRP guidelines. Based on guidelines values are not allowed to exceed one.

	E, kV/m	Työntekijäaltistus ICNIRP:n suosituksen mukaan**
Linja 1	0,002	0,00
Kaapelitunneli	0,002	0,00

\*\* taajuudet on laskettu 100 Hz välein 650 Hz saakka

Mitatut sähkökentän arvot eivät varsinaisesti liity 110 kV kenttiin, vaan kuvaavat paremminkin maadoituksen toimivuutta. Tulokset olivat niin pieniä, että yliaalloilla ei ole suurta merkitystä sähkökenttäaltistukseen. Suurin osa mitatuista arvoista näyttäisi olevan kohinaa, jonka merkitys korostuu erityisesti näin pieniä arvoja mitattaessa. Kohinaksi voi laskea kaikki muut mitatut arvot, paitsi 50 Hz arvo. GIS:lla voidaankin todeta, että sähkökenttäaltistus on merkityksettömän pieni.

### 6.3 400 kV kytkinsähköaseman LM-4 laajakaistamittaus

Sähköasemamittaus LM-4 oli 400 kV sähköaseman ulkokytkinlaitos. Sähköasemalla oli kaksikatkaisijajärjestelmä (duplex), neljä 400 kV johtolähtöä ja kaksi 400/110 kV (400 MVA) muuntajaa. Sähköasemalla ei ollut ilmasydämistä kompensointikelaa. Kuvassa 6.13 on esitetty valokuva sähköaseman pääkiskon suuntaan.

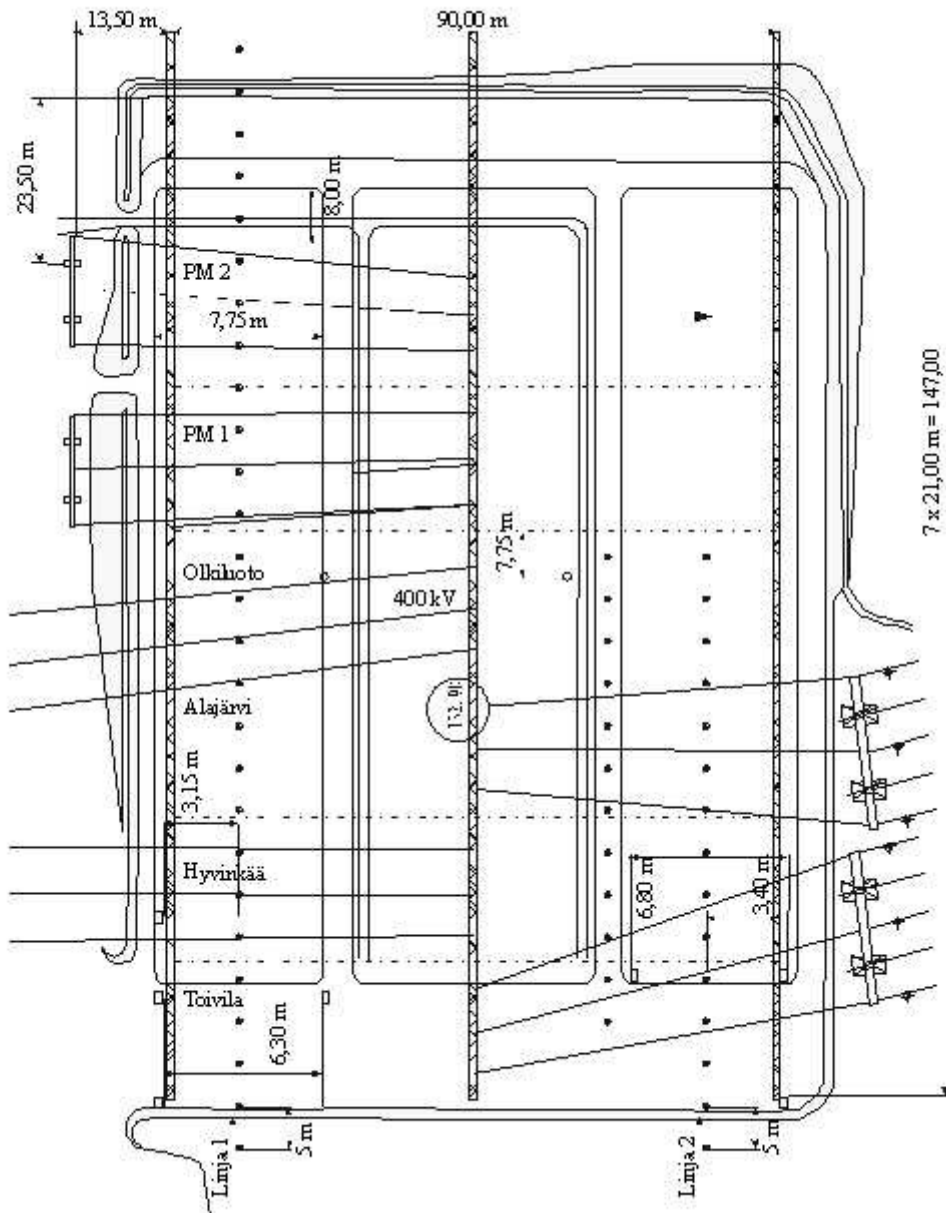


*Kuva 6.13.* Valokuva sähköaseman LM-4 pääkiskostosta.

*Figure 6.13.* Photograph from the main bus bars of the substation LM-4.

Sähköasemalla oli tehty aikaisemmin vuonna 1998 mittaus, jossa oli mitattu sähkö- ja magneettikenttä kolmelta mittauslinjalta kytkinkenttiä vastaan kohtisuoraan suuntaan (3 mittauslinjaa, joissa jokaisessa 71 mittauspistettä) ja yhdeltä linjalta kytkinkenttien suuntaisesti (38 mittauspistettä) /8/. Mittauspisteiden valinta aikaisemmassa mittauksessa perustui sähköaseman rakenteeseen ja huoltokäytävien sijaintiin. Mittauspisteiden väli oli mittauksessa 2 metriä.

Tämän tutkimuksen mittauskohteeksi sähköasema valittiin, koska aikaisemmassa tutkimuksessa mitatut sähkökentän arvot olivat varsin lähellä ICNIRP:n suosituksen työntekijäaltistumisen suositusarvoa 10 kV/m. Tähän tutkimukseen valittiin aikaisemmasta tutkimuksesta kaksi mittauslinjaa kytkinkenttiä vastaan kohtisuoraan suuntaan, joista ensin tehtiin kenttien perinteisen tehollisarvon mittaukset. Mittaukseen valitut mittauslinjat on esitetty kuvassa 6.14.

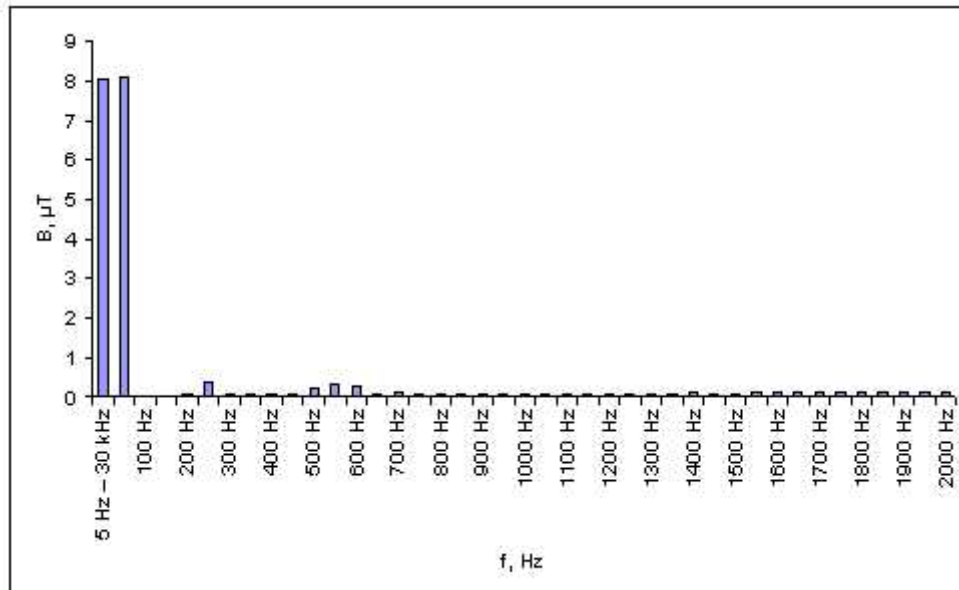


Kuva 6.14. Mittauspisteiden sijainti sähköasemalla LM-4.

Figure 6.14. Location of the measurement points at the substation LM-4.

Linjalla 1 suurimmat arvot olivat  $8,36 \mu\text{T}$  (piste 38, 74 metriä kytkinkenttien reunalta) ja  $8,36 \text{ kV/m}$  (piste 8, 14 metriä kytkinkenttien reunalta). Linjalla 2 suurimmat arvot olivat  $7,61 \mu\text{T}$  (piste 39, 76 metriä kytkinkenttien reunalta) ja  $8,73 \text{ kV/m}$  (piste 7, 12 metriä kytkinkenttien reunalta). Mittauksen tulokset vastasivat varsin hyvin TTKK:n aikaisemmin mittaamia sähkökentän arvoja /8/.

Magneettikentän perinteisen tehollisarvon mittauksista valittiin laajakaistaisiin mittauksiin linjan 1 piste 38, jossa kentän arvo oli suurin. Yksittäisten harmonisten magneettikenttäkomponenttien mittauksen tulokset on esitetty kuvassa 6.15.



Kuva 6.15. Magneettivuon tiheyden taajuuskomponentit sähköaseman LM-4 kytkinkentällä.

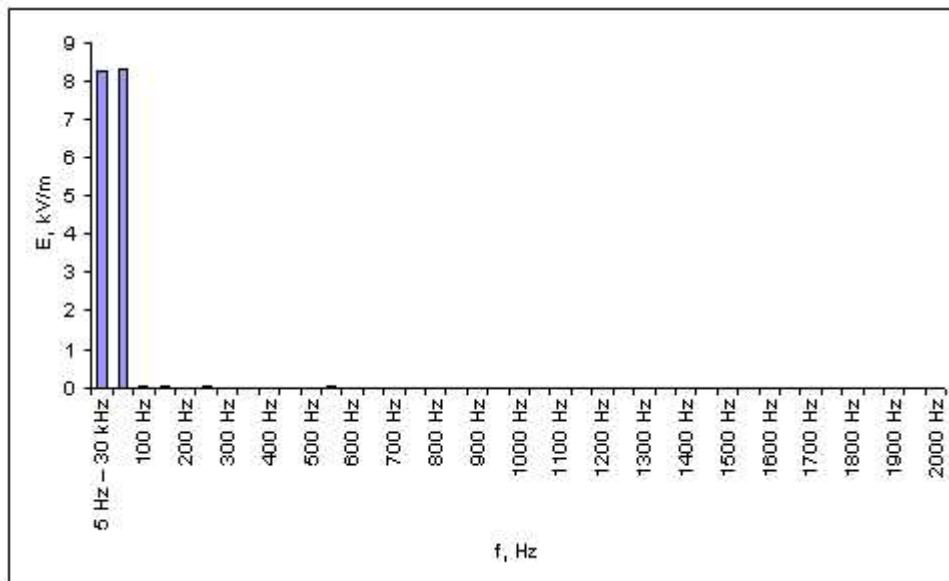
Figure 6.15. Harmonics of the magnetic flux density in the substation LM-4 switchyard.

Magneettivuon tiheyden perinteinen tehollisarvo oli  $8,04 \mu\text{T}$ . Tulosten suuruusluokka on sama kuin aikaisemmissa mittauksissa [8]. Magneettikentän suurimmat harmoniset olivat 5., 10., 11. ja 12. yliaalto. Niiden lisäksi magneettikentässä oli useita muitakin havaittavissa olevia harmonisia yliaaltoja. Kuvan 6.15 perusteella magneettikentässä voidaan havaita vielä 2000 Hz taajuudella arvoja. Näin suurien taajuuksien esiintyminen magneettikentässä vaikuttaa kuitenkin epätodennäköiseltä. Myös parilliset 10. ja 12. yliaalto eivät voi johtua sähköaseman laitteistosta. Yksi mahdollinen syy niiden esiintymiselle on mittarin kohinasta johtuva päästökaistan leviäminen yksittäisiä yliaaltoja mitattaessa, koska suurimmat parilliset yliaallot esiintyvät aina vielä suuremman parittoman yliaaltotaajuuden lähellä.

ICNIRP:n suosituksen mukaisesti yksittäisten harmonisten kenttien menetelmällä lasketut altistumissuhteet olivat 0,13 (taajuudet on laskettu 50 Hz:n välein 2000 Hz:iin saakka) ja 0,03 (taajuudet on laskettu 100 Hz:n välein 650 Hz:iin saakka) sekä samasta pisteestä STM:n asetuksen mukaisella STUK:n kehittämällä painotetun kentän mittaumenetelmällä määritetty altistumissuhde oli 0,01.

Kun altistumissuhde lasketaan taajuuskomponenteista ICNIRP:n suosituksen mukaisesti 50 Hz välein 2000 Hz saakka, arvo on lähes kertaluokkaa suurempi kuin laskettaessa 100 Hz välein 650 Hz saakka. Syynä tähän on se, että taajuuden kasvaessa yliaallon ja kohinan merkitys kasvaa altistumissuhdetta laskettaessa. STUK:n kehittämällä STM:n asetuksen mukaisella menetelmällä työntekijäaltistusta määritettäessä jäädytään puolestaan vielä pienempään arvoon kuin yksittäisten harmonisten magneettikenttäkomponenttien arvoista laskettaessa. Tämän perusteella magneettikentän harmoniset komponentit eivät ainakaan kaikki vahvista toisiaan tai magneettikenttä on muuttunut kymmenen minuutin mittauksen aikana. Harmoniset komponentit eivät vahvista toisiaan myöskään sen perusteella, että kuvan 6.15 perusteella magneettikentän perinteinen tehollisarvo (5 Hz - 30 kHz) on pienempi kuin pelkän 50 Hz arvo.

Sähkökentän laajakaistaiset mittaukset tehtiin linjan 1 pisteessä 8. Linja 1 valittiin mittaukseen, koska siltä mitattu suurin arvo oli lähes yhtä suuri kuin linjalta 2 mitattu suurin arvo. Yksittäisten harmonisten sähkökenttäkomponenttien mittauksen tulokset on esitetty kuvassa 6.16.



Kuva 6.16. Sähkökentän voimakkuuden taajuuskomponentit sähköaseman LM-4 kytinkentällä.

Figure 6.16. Harmonics of the electric field strength in the substation LM-4 switchyard.

Sähkökentän voimakkuuden perinteinen tehollisarvo oli 8,28 kV/m, mikä vastasi varsin hyvin aikaisemmin tehdyn mittauksen tuloksia /8/. Sähkökentässä ei esiintynyt juurikaan harmonisia yliaaltoja. Kuvan 6.16 perusteella voidaan todeta, että sähkökentän perinteinen tehollisarvo (5 Hz - 30 kHz) on saman suuruinen kuin pelkän 50 Hz arvo.

Taajuuskomponenteista ICNIRP:n suosituksen mukaisesti yksittäisten harmonisten kenttien menetelmällä lasketut altistumissuhteet olivat 0,88 (taajuudet on laskettu 50 Hz:n välein 2000 Hz:iin saakka) ja 0,86 (taajuudet on laskettu 100 Hz:n välein 650 Hz:iin saakka). Koska sähkökentän perinteinen tehollisarvo (5 Hz - 30 kHz) on saman suuruinen kuin pelkän 50 Hz arvo, myös 50 Hz välein 2000 Hz saakka laskettu altistumissuhde on likimain saman suuruinen kuin 100 Hz välein 650 Hz saakka laskettu altistumissuhde.

#### 6.4 400/110 kV muuntosähköaseman LM-5 laajakaistamittaus

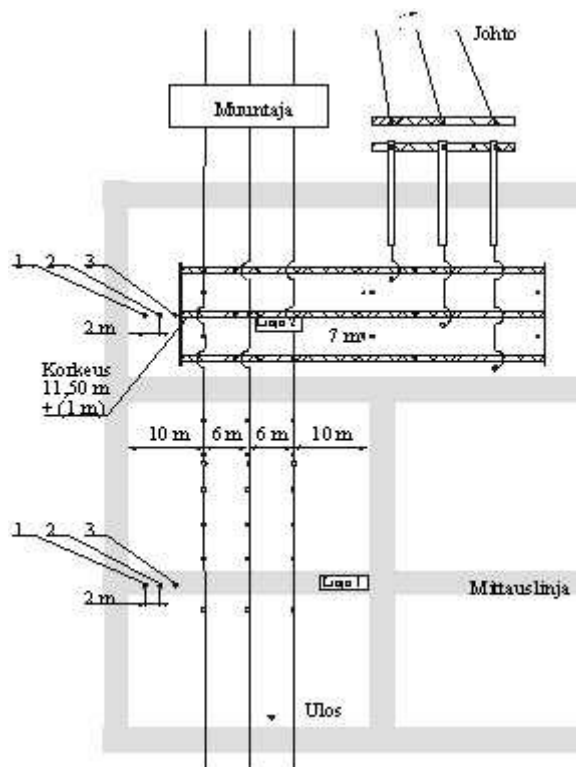
Sähköasemamittaus LM-5 tehtiin 400 kV sähköaseman sekä 400 kV että 110 kV kytinkentillä. Sähköasemalla oli kaksi 400 kV johtolähtöä, yksi 400/110 kV muuntajaa ja viisi 110 kV johtolähtöä. Kuvassa 6.17 on esitetty valokuva sähköaseman 400 kV pääkiskon suuntaan.



*Kuva 6.17.* Valokuva sähköaseman LM-5 pääkiskostosta (400 kV).

*Figure 6.17.* Photograph from the main bus bars of the substation LM-5 (400 kV).

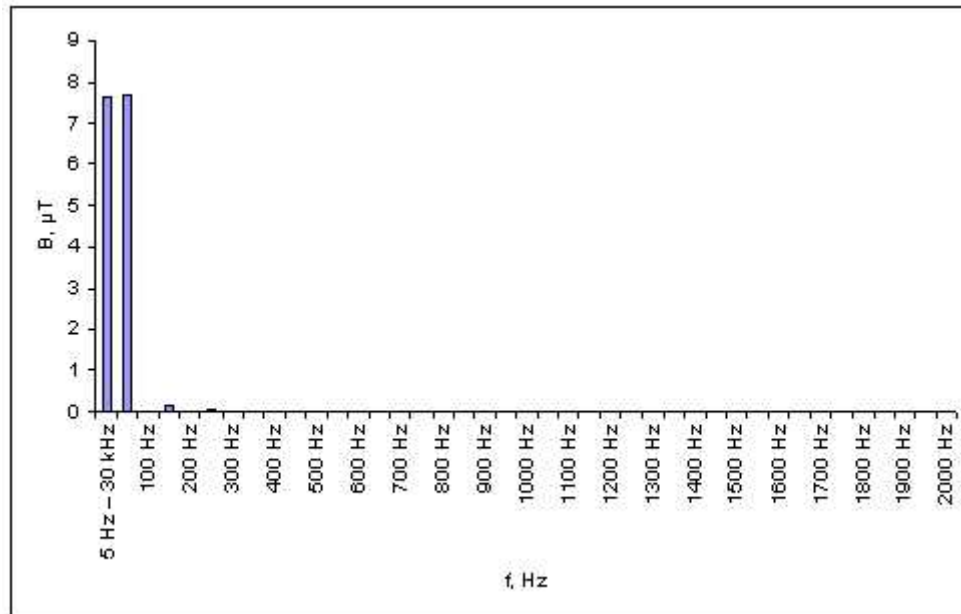
Sähköasemalla tehtiin sähkö- ja magneettikenttien perinteisen tehollisarvon mittaukset kahdelta mittauslinjalta (linja 1 ja 2). Mittauspisteiden valinta perustui sähköaseman rakenteeseen ja huoltokäytävien sijaintiin. Linjan 1 valinta perustui huoltokäytävän sijainnin lisäksi kytkinkentän lähdön kiskoihin, jotka olivat matalimmillaan mittauslinjan kohdalla. Mittauspisteiden väli oli mittauksessa 2 metriä. Mittaukseen valitut mittauslinjat 1 ja 2 on esitetty kuvassa 6.18.



*Kuva 6.18.* Mittauspisteiden sijainti sähköasemalla LM-5 (400 kV).

*Figure 6.18.* Location of the measurement points at the substation LM-5 (400 kV).

Linjalla 1 suurimmat arvot olivat 7,97  $\mu\text{T}$  (piste 6, 10 metriä kytkinkenttien reunalta) ja 7,95 kV/m (piste 13, 24 metriä kytkinkenttien reunalta). Linjalla 2 suurimmat arvot olivat 5,59  $\mu\text{T}$  (piste 10, 18 metriä kytkinkenttien reunalta) ja 8,85 kV/m (piste 12, 22 metriä kytkinkenttien reunalta). Magneettikentän perinteisen tehollisarvon mittauksista valittiin laajakaistaisiin mittauksiin linjan 1 piste 6, jossa kentän arvo oli suurin. Yksittäisten harmonisten magneettikenttäkomponenttien mittauksen tulokset on esitetty kuvassa 6.19.



*Kuva 6.19.* Magneettivuon tiheyden taajuuskomponentit sähköasemalle LM-5 (400 kV kytkinkenttä).

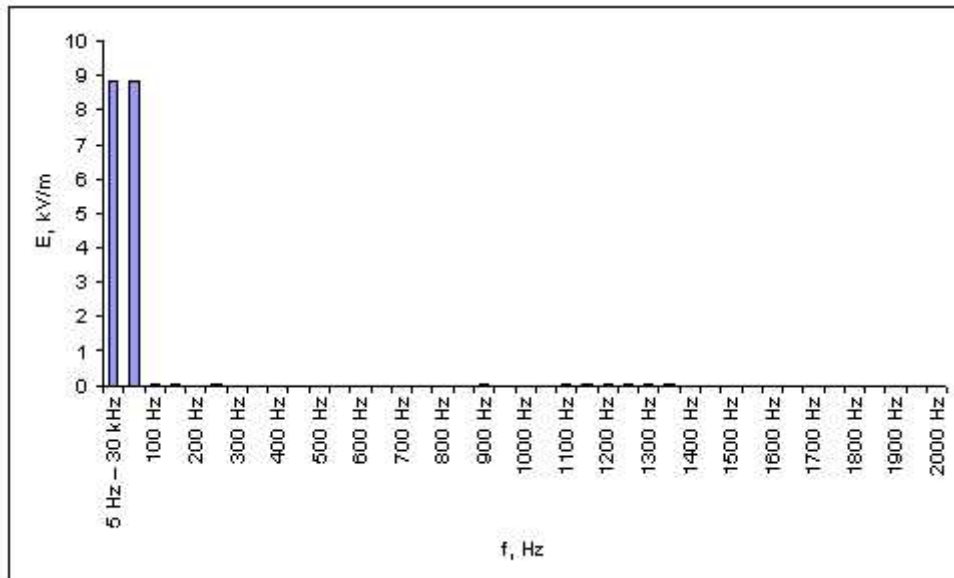
*Figure 6.19.* Harmonics of the magnetic flux density for the substation LM-5 (400 kV switchyard).

Magneettikentän suurimmat harmoniset olivat 3. ja 5. yliaalto. Magneettikentän perinteinen tehollisarvo (5 Hz - 30 kHz) on hieman pienempi kuin pelkän 50 Hz arvo.

Magneettivuon tiheyden perinteinen tehollisarvo oli 7,65  $\mu\text{T}$ . ICNIRP:n suosituksen mukaisesti yksittäisten harmonisten kenttien menetelmällä lasketut altistumissuhteet olivat 0,03 (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) sekä samasta pisteestä STM:n asetuksen mukaisella STUK:n kehittämällä painotetun kentän mittaamenetelmällä määritetty altistumissuhde oli 0,01.

Laskettaessa altistumissuhde taajuuskomponenteista ICNIRP:n suosituksen mukaisesti 50 Hz välein 2000 Hz saakka, arvo on puolta suurempi kuin laskettaessa altistumissuhde 100 Hz välein 650 Hz saakka. Syynä tähän on se, että taajuuden kasvaessa yliaallon ja myös kohinan merkitys kasvaa altistumissuhdetta laskettaessa. STUK:n kehittämällä STM:n asetuksen mukaisella menetelmällä työntekijäaltistusta määritettäessä jäädytään puolestaan vielä pienempään arvoon kuin yksittäisten harmonisten magneettikenttäkomponenttien arvoista laskettaessa. Pienintä STUK:n kehittämällä STM:n asetuksen mukaisella menetelmällä saatua työntekijäaltistuksen arvoa tukee kuva 6.19, jonka perusteella harmoniset komponentit eivät vahvista toisiaan, koska magneettikentän perinteinen tehollisarvo (5 Hz - 30 kHz) on pienempi kuin pelkän 50 Hz arvo.

Sähkökentän laajakaistaiset mittaukset tehtiin linjan 2 pisteessä 12, jossa kentän arvo oli suurin. Yksittäisten harmonisten sähkökenttäkomponenttien mittausten tulokset on esitetty kuvassa 6.20.



*Kuva 6.20.* Sähkökentän voimakkuuden taajuuskomponentit sähköasemalle LM-5 (400 kV kytkinkenttä).

*Figure 6.20.* Harmonics of the electric field strength for the substation LM-5 (400 kV switchyard).

Sähkökentässä ei esiintynyt juurikaan harmonisia yliaaltoja. Kuvan 6.20 perusteella voidaan todeta, että sähkökentän perinteinen tehollisarvo (5 Hz - 30 kHz) on saman suuruinen kuin pelkän 50 Hz arvo.

Sähkökentän voimakkuuden perinteinen tehollisarvo oli 8,82 kV/m. Taajuuskomponenteista ICNIRP:n suosituksen mukaisesti yksittäisten harmonisten kenttien menetelmällä lasketut altistumissuhteet olivat 1,10 (taajuudet on laskettu 50 Hz:n välein 2000 Hz:iin saakka) ja 0,91 (taajuudet on laskettu 100 Hz:n välein 650 Hz:iin saakka).

50 Hz välein 2000 Hz saakka laskettu altistumissuhde ylittää yhden. Taulukossa 100 Hz välein 650 Hz saakka laskettu altistumissuhde ei ylitä yhtä, mutta on kuitenkin varsin lähellä sitä. Syynä eroon on se, että taajuuden kasvaessa yliaallon ja myös kohinan merkitys kasvaa altistumissuhdetta laskettaessa.

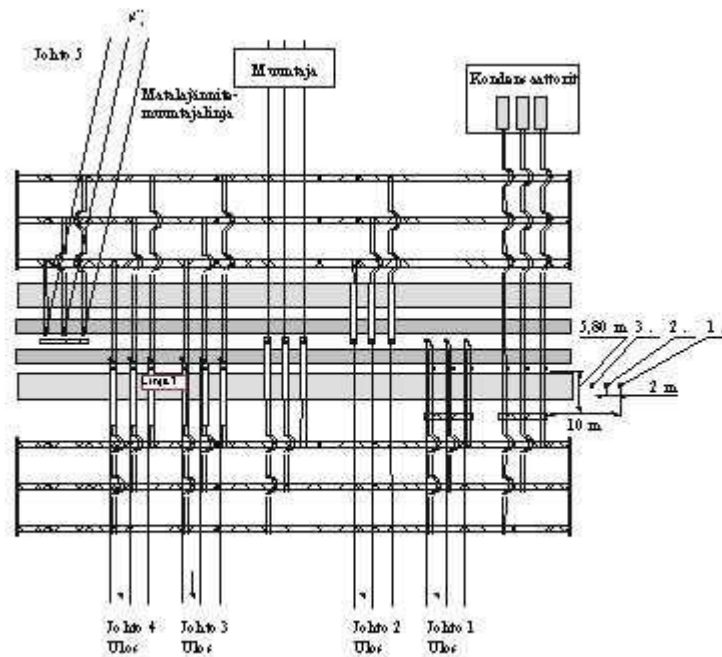
Sähköasemalla LM-5 tehtiin myös sähköaseman 110 kV kytkinkentillä mittauksia. Kuvassa 6.21 on esitetty valokuva sähköaseman 110 kV pääkiskon suuntaan.



*Kuva 6.21.* Valokuva sähköaseman LM-5 pääkiskostosta (110 kV).

*Figure 6.21.* Photograph from the main bus bars of the substation LM-5 (110 kV).

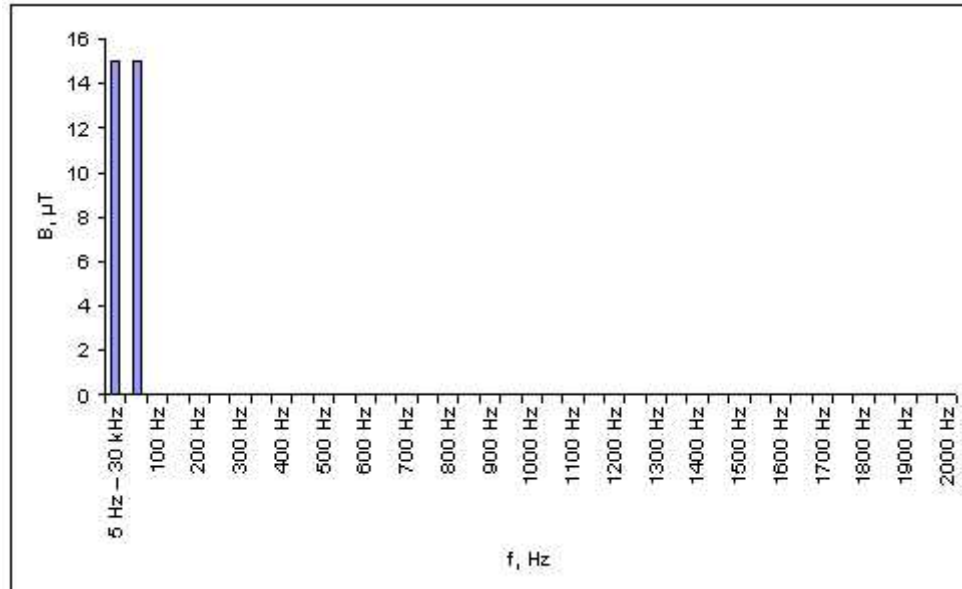
Sähköaseman 110 kV kytkinkentillä tehtiin sähkö- ja magneettikenttien perinteisen tehollisarvon mittaukset yhdeltä mittauslinjalta (linja 3). Mittauspisteiden valinta perustui sähköaseman rakenteeseen ja huoltokäytävien sijaintiin. Mittauspisteiden väli oli mittauksessa 2 metriä. Mittaukseen valittu mittauslinja 3 on esitetty kuvassa 6.22.



*Kuva 6.22.* Mittauspisteiden sijainti sähköasemalla LM-5 (110 kV kytkinkenttä).

*Figure 6.22.* Location of the measurement points at the substation LM-5 (110 kV switchyard).

Linjalla 3 suurimmat arvot olivat 14,31  $\mu\text{T}$  (piste 21, 40 metriä kytkinkenttien reunalta) ja 2,29 kV/m (piste 19, 36 metriä kytkinkenttien reunalta). Magneettikentän perinteisen tehollisarvon mittauksista valittiin laajakaistaisiin mittauksiin piste, jossa kentän arvo oli suurin. Yksittäisten harmonisten magneettikenttäkomponenttien mittauksen tulokset on esitetty kuvassa 6.23.



*Kuva 6.23.* Magneettivuon tiheyden taajuuskomponentit sähköasemalle LM-5 (110 kV kytkinkenttä).

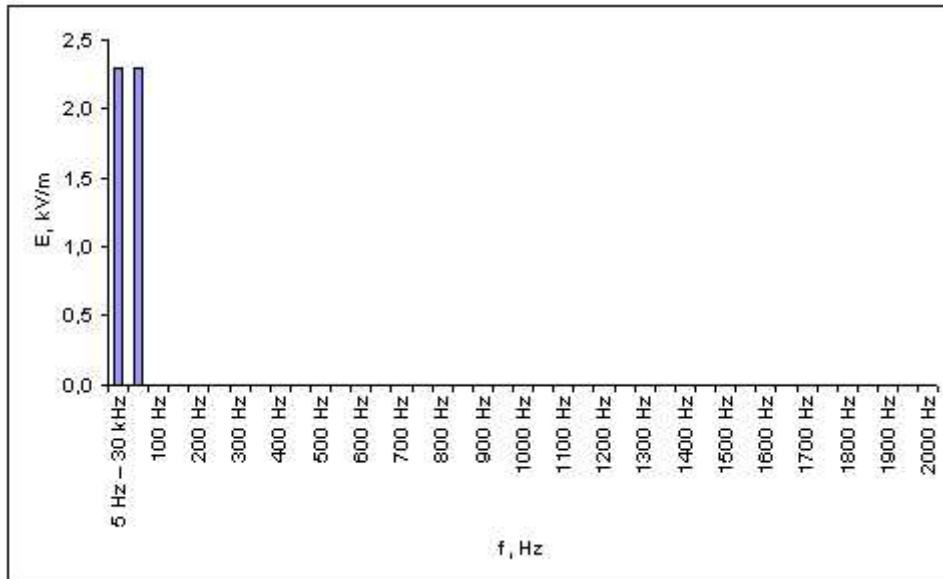
*Figure 6.23.* Harmonics of the magnetic flux density for the substation LM-5 (110 kV switchyard).

Magneettikentässä ei esiintynyt juurikaan harmonisia yliaaltoja. Kuvan 6.23 perusteella voidaan todeta, että magneettikentän perinteinen tehollisarvo (5 Hz - 30 kHz) on saman suuruinen kuin pelkän 50 Hz arvo.

Magneettivuon tiheyden perinteinen tehollisarvo oli 15,0  $\mu\text{T}$ . ICNIRP:n suositusten mukaisesti yksittäisten harmonisten kenttien menetelmällä lasketut altistumissuhteet olivat 0,04 (taajuudet on laskettu 50 Hz:n välein 2000 Hz:iin saakka) ja 0,03 (taajuudet on laskettu 100 Hz:n välein 650 Hz:iin saakka) sekä samasta pisteestä STM:n asetuksen mukaisella STUK:n kehittämällä painotetun kentän mittausmenetelmällä määritetty altistumissuhde oli 0,03.

Altistumissuhteet taajuuskomponenteista ICNIRP:n suositusten mukaisesti 50 Hz välein 2000 Hz saakka ja 100 Hz välein 650 Hz saakka ovat samaa suuruusluokkaa. Myös STUK:n kehittämällä STM:n asetuksen mukaisella menetelmällä työntekijäaltistusta määritettäessä samaa suuruusluokkaa olevia arvoja kuin yksittäisten harmonisten magneettikenttäkomponenttien arvoista laskettaessa.

Sähkökentän laajakaistaiset mittaukset tehtiin linjan 3 pisteessä 19, jossa kentän arvo oli suurin. Yksittäisten harmonisten sähkökenttäkomponenttien mittauksen tulokset on esitetty kuvassa 6.24.



*Kuva 6.24.* Sähkökentän voimakkuuden taajuuskomponentit sähköasemalle LM-5 (110 kV kytkinkenttä).

*Figure 6.24.* Harmonics of the electric field strength for the substation LM-5 (110 kV switchyard).

Sähkökentässä ei esiintynyt juurikaan harmonisia yliaaltoja. Kuvan 6.24 perusteella voidaan todeta, että sähkökentän perinteinen tehollisarvo (5 Hz - 30 kHz) on hiukan pienempi kuin pelkän 50 Hz arvo.

Sähkökentän voimakkuuden perinteinen tehollisarvo oli 2,30 kV/m. Taajuuskomponenteista ICNIRP:n suosituksen mukaisesti yksittäisten harmonisten kenttien menetelmällä lasketut altistumissuhteet olivat 0,24 (taajuudet on laskettu 50 Hz:n välein 2000 Hz:iin saakka) ja 0,23 (taajuudet on laskettu 100 Hz:n välein 650 Hz:iin saakka).

Taulukossa 50 Hz välein 2000 Hz saakka laskettu altistumissuhde on likimain saman suuruinen kuin 100 Hz välein 650 Hz saakka laskettu altistumissuhde. Tässä mittauksessa kohinalla ei näyttäisi olevan juurikaan vaikutusta, vaikka mitatut arvot ovat melko pieniä.

## 6.5 400 kV kytkinsähkösäman LM-6 laajakaistamittaus

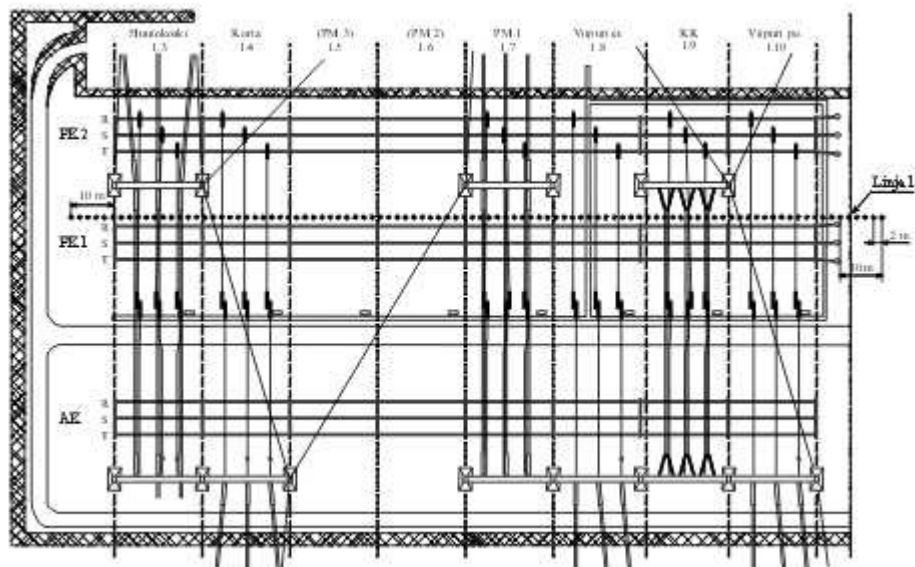
Sähkösämanmittaus LM-6 oli 400 kV säkösäman ulkokytkinlaitos. Sähkösämanalla oli kaksikisko-apukiskojärjestelmä, neljä johtolähtöä ja yksi 400/110 kV muuntajaa. Kuvassa 6.25 on esitetty valokuva säkösäman pääkiskon suuntaan.



*Kuva 6.25.* Valokuva säkösäman LM-6 kiskostoista.

*Figure 6.25.* Photograph from the bus bars of the substation LM-6.

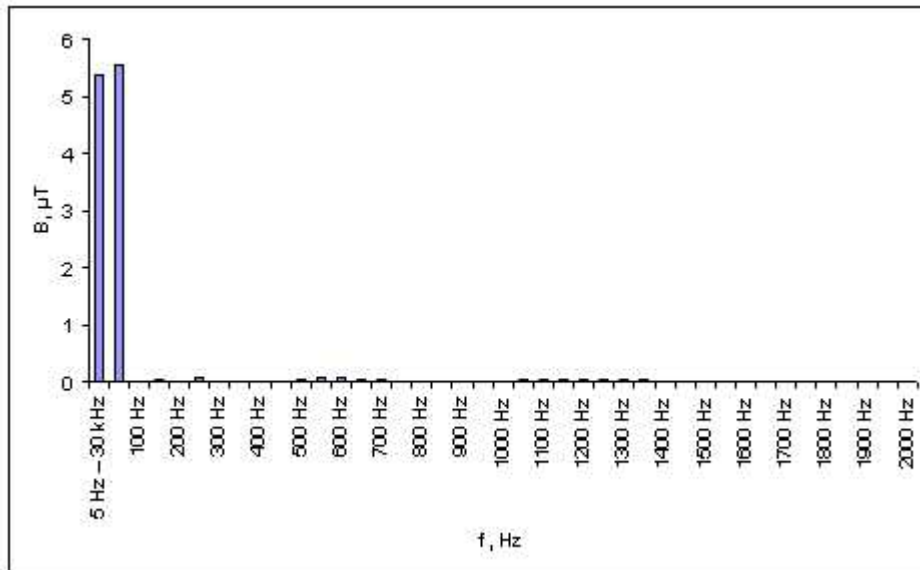
Sähkösämanalla tehtiin sähkö- ja magneettikenttien perinteisen tehollisarvon mittaukset yhdeltä mittauslinjalta (linja 1). Mittauspisteiden valinta perustui säkösäman rakenteeseen ja huoltokäytävien sijaintiin. Mittauspisteiden väli oli mittauksessa 2 metriä. Mittaukseen valittu mittauslinja 1 on esitetty kuvassa 6.26.



Kuva 6.26. Mittauspisteiden sijainti sähköasemalla LM-6.

Figure 6.26. Location of the measurement points at the substation LM-6.

Linjalla 1 suurimmat arvot olivat  $5,59 \mu\text{T}$  (piste 89, 176 metriä kytkinkenttien reunalta) ja  $9,34 \text{ kV/m}$  (piste 90, 178 metriä kytkinkenttien reunalta). Magneettikentän perinteisen tehollisarvon mittauksista valittiin laajakaistaisiin mittauksiin piste, jossa kentän arvo oli suurin. Yksittäisten harmonisten magneettikenttäkomponenttien mittauksen tulokset on esitetty kuvassa 6.27.



Kuva 6.27. Magneettivuon tiheyden taajuuskomponentit sähköaseman LM-6 kytkinkentällä.

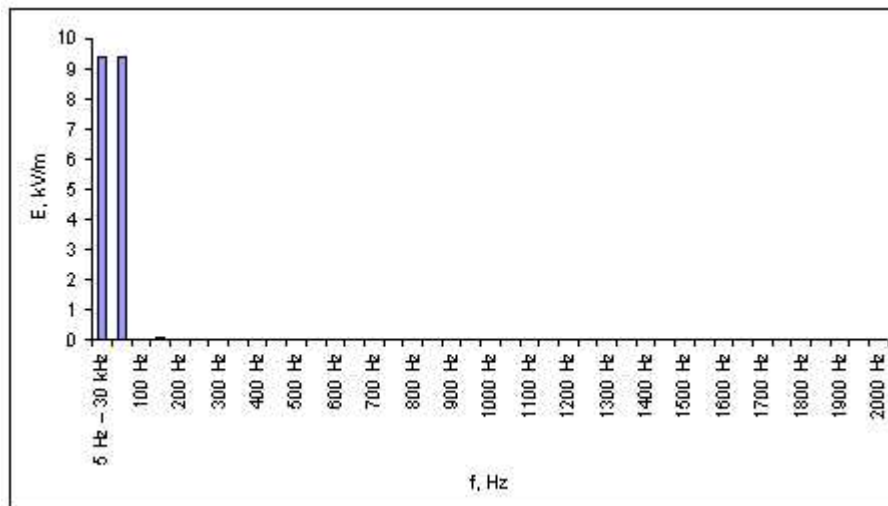
Figure 6.27. Harmonics of the magnetic flux density for the substation LM-6 switchyard.

Magneettivuon tiheyden perinteinen tehollisarvo oli  $5,37 \mu\text{T}$ . Magneettikentällä ei esiintynyt huomattavan suuria harmonisia yliaaltoja, mutta kohinasta erottuvat harmoniset yliaallot olivat 3., 5., 10. - 14. ja 23. - 25 yliaalto. Kuvan 6.27 perusteella voidaan todeta, että magneettikentän perinteinen tehollisarvo (5 Hz - 30 kHz) on selvästi pienempi kuin pelkän 50 Hz arvo. ICNIRP:n suosituksen mukaisesti yksittäisten harmonisten kenttien menetelmällä lasketut altistumissuhteet olivat 0,04 (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) sekä samasta pisteestä STM:n asetuksen mukaisella STUK:n kehittämällä painotetun kentän mittausmenetelmällä määritetty altistumissuhde oli 0,01.

Laskettaessa altistumissuhde 50 Hz välein 2000 Hz saakka, arvo on kaksinkertainen verrattuna siihen, kun altistumissuhde lasketaan 100 Hz välein 650 Hz saakka. Syynä tähän on yli 650 Hz taajuudella esiintyvät pienet yliaallot, joiden merkitys kuitenkin kasvaa altistumissuhdetta laskettaessa taajuuden kasvaessa. STUK:n kehittämällä STM:n asetuksen mukaisella menetelmällä työntekijäaltistusta määritettäessä jäädytään puolestaan vielä pienempään arvoon kuin yksittäisten harmonisten magneettikenttäkomponenttien arvoista laskettaessa. Tämän perusteella magneettikentän harmoniset komponentit eivät vahvista toisiaan. Myös kuvan 6.27 perusteella

harmoniset komponentit eivät vahvista toisiaan, sillä magneettikentän perinteinen tehollisarvo (5 Hz - 30 kHz) on pienempi kuin pelkän 50 Hz arvo.

Sähkökentän laajakaistaiset mittaukset tehtiin linjan 1 pisteessä 90, jossa kentän arvo oli suurin. Harmonisten sähkökenttäkomponenttien mittaustulokset on esitetty kuvassa 6.28.



*Kuva 6.28.* Sähkökentän taajuuskomponentit sähköaseman LM-6 kytkinkentällä.

*Figure 6.28.* Harmonics of the electric field in the substation LM-6 switchyard.

Sähkökentän voimakkuuden perinteinen tehollisarvo oli 9,39 kV/m, joka alittaa ICNIRP:n suosituksen 50 Hz suositusarvon sähkökentälle. Sähkökentässä esiintyi 3., 7. ja 11. - 14. harmonista yliaaltoa. Kuvan 6.28 perusteella voidaan kuitenkin todeta, että sähkökentän perinteinen tehollisarvo (5 Hz - 30 kHz) on saman suuruinen kuin pelkän 50 Hz arvo. Taajuuskomponenteista ICNIRP:n suosituksen mukaisesti yksittäisten harmonisten kenttien menetelmällä lasketut altistumissuhteet olivat 1,40 (taajuudet on laskettu 50 Hz:n välein 2000 Hz:iin saakka) ja 1,07 (taajuudet on laskettu 100 Hz:n välein 650 Hz:iin saakka). 50 Hz välein 2000 Hz saakka laskettu altistumissuhde ja 100 Hz välein 650 Hz saakka laskettu altistumissuhde ylittävät arvon yksi. Arvojen erot johtuvat siitä, että taajuuden kasvaessa yliaallon ja myös kohinan merkitys kasvaa altistumissuhdetta laskettaessa.

## 6.6 110 kV kytkinsähköaseman LM-7 laajakaistamittaus

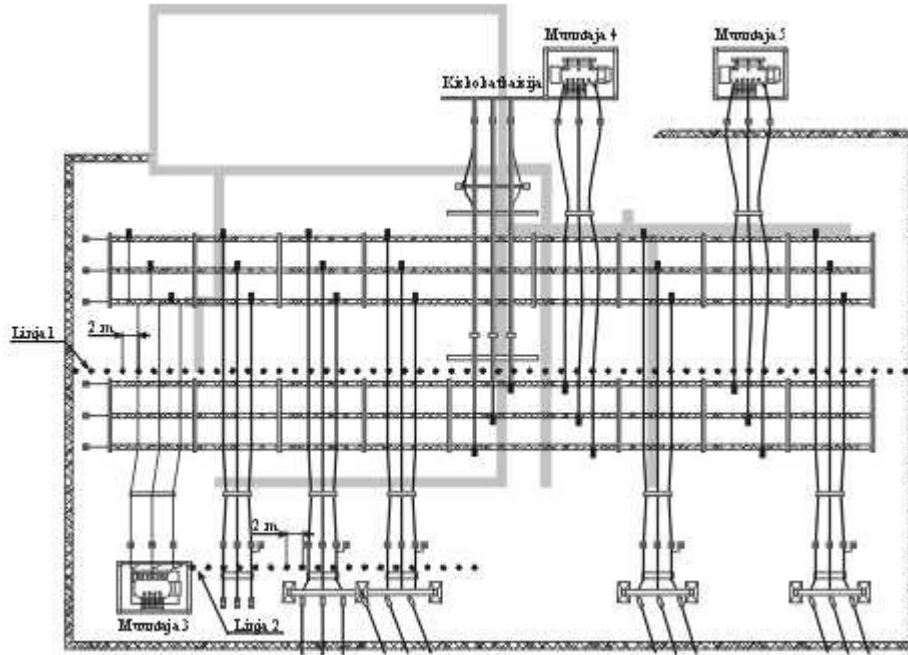
Sähköasemamittaus LM-7 oli 110 kV sähköaseman ulkokytkinlaitos. Sähköasemalla oli kaksikiskojärjestelmä, viisi 110 kV johtolähtöä ja kolme 110/20 kV muuntajaa. Kuvassa 6.29 on esitetty valokuva sähköaseman kytkinkentistä ja huoltorakennuksesta.



*Kuva 6.29.* Valokuva sähköasemasta LM-7.

*Figure 6.29.* Photograph from the substation LM-7.

Sähköasemalla oli tehty aikaisemmin vuosina 1997 ja 1998 kenttien perinteisen tehollisarvon mittauksia, jossa oli mitattu sähkö- ja magneettikenttiä kumpiakin kahdelta mittauslinjalta sekä kartoitettu kenttiä /5/. Magneettikenttä oli kartoitettu 176 pisteestä (11 mittauspistettä  $\times$  16 mittauspistettä) ja sähkökenttä 48 pisteestä (6 mittauspistettä  $\times$  8 mittauspistettä). Mittauspisteiden väli oli magneettikenttämittauksessa 2 metriä ja sähkökenttämittauksessa 4 metriä. Tähän tutkimukseen valittiin aikaisemman tutkimuksen perusteella kaksi mittauslinjaa kytkinkenttiä vastaan kohtisuoraan suuntaan. Mittaukseen valitut mittauslinjat on esitetty kuvassa 6.30.



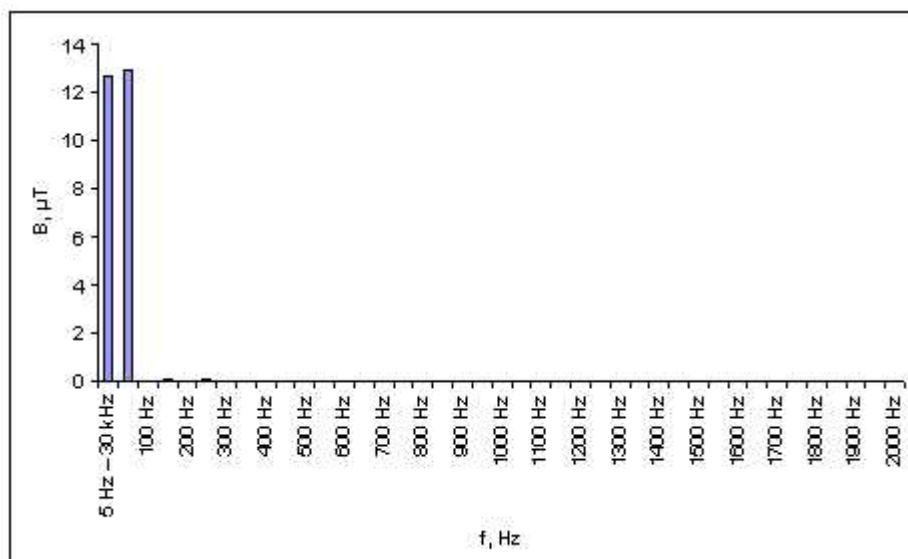
Kuva 6.30. Mittauspisteiden sijainti sähköasemalla LM-7.

Figure 6.30. Location of the measurement points at the substation LM-7.

Linjalla 1 suurimmat arvot olivat  $12,4 \mu\text{T}$  (piste 34, 66 metriä kytkinkenttien reunalta) ja  $3,67 \text{ kV/m}$  (piste 12, 22 metriä kytkinkenttien reunalta). Linjalla 2 suurimmat arvot olivat  $8,97 \mu\text{T}$  (piste 2, 1 metri muuntamon 3 seinästä) ja  $2,19 \text{ kV/m}$  (piste 14, 26 metriä muuntamon 3 seinästä).

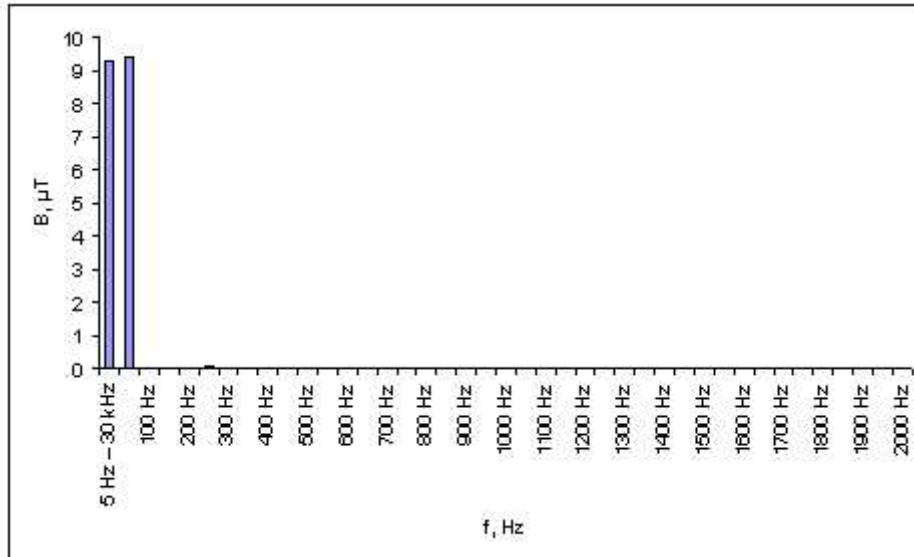
Magneettikentän perinteisen tehollisarvon mittauksista valittiin laajakaistaisiin mittauksiin molemmilta linjoilta pisteet, jossa kentän arvo oli suurin. Yksittäisten harmonisten magneettikenttäkomponenttien mittauksen tulokset on esitetty kuvassa 6.31 ja 6.32.

Altistumissuhteiden tulokset on esitetty taulukossa 6.5. Taulukossa 6.5 on esitetty myös painotetun kentän mittausmenetelmällä saadut tulokset.



*Kuva 6.31.* Magneettivuon tiheyden taajuuskomponentit sähköaseman LM-7 kytkinkentällä (linja 1, piste 34).

*Figure 6.31.* Harmonics of the magnetic flux density in the substation LM-7 switchyard (line 1, point 34).



*Kuva 6.32.* Magneettivuon tiheyden taajuuskomponentit sähköaseman LM-7 kytkinkentällä (linja 2, piste 2).

*Figure 6.32.* Harmonics of the magnetic flux density in the substation LM-7 switchyard (line 2, point 2).

*Taulukko 6.5.* Taajuuskomponenteista ICNIRP:n suosituksen mukaisesti lasketut altistumissuhteet sekä samasta pisteestä STM:n asetuksen mukaisesti määritetty altistumissuhde. Altistumissuhteet eivät saa ylittää arvoa yksi.

*Table 6.5.* Exposure ratios from the harmonic components calculated based on the ICNIRP guidelines and exposure ratio based on the decree from the same point. The exposure ratios are not allowed to exceed value one.

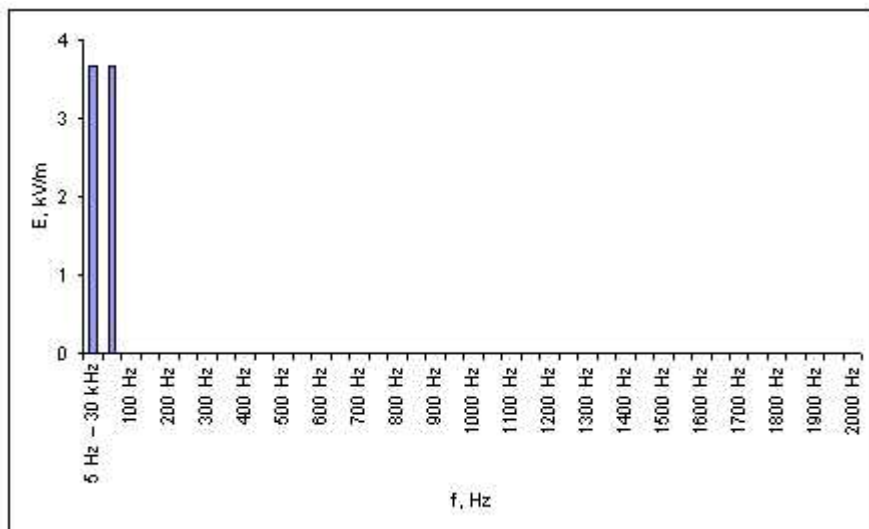
	<b>B, μT</b>	<b>Työntekijäaltistus ICNIRP:n suosituksen mukaan*</b>	<b>Työntekijäaltistus ICNIRP:n suosituksen mukaan**</b>	<b>Työntekijäaltistus määritetty STM:n asetuksen mukaisella menetelmällä</b>
Linja 1	12,7	0,04	0,03	0,02
Linja 2	9,30	0,03	0,02	0,01

\* taajuudet on laskettu 50 Hz välein 2000 Hz saakka

\*\* taajuudet on laskettu 100 Hz välein 650 Hz saakka

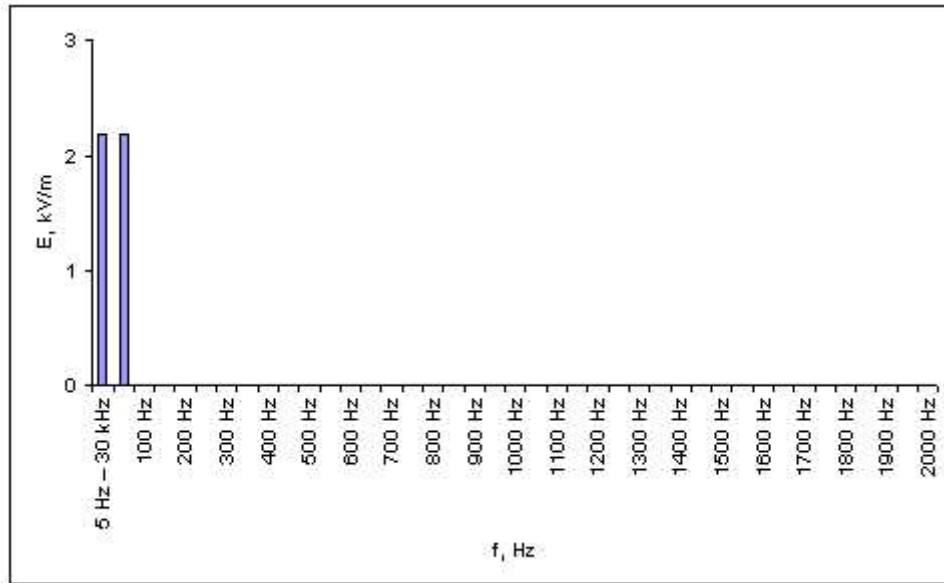
Magneettikentän suurimmat harmoniset olivat 3., ja 5. yliaalto. Kuvien 6.31 ja 6.32 perusteella yliaallot ovat kuitenkin hyvin pieniä. Tästä syystä altistumissuhde on samaa kertaluokkaa taajuuskomponenteista ICNIRP:n suosituksen mukaisesti laskettaessa. STUK:n kehittämällä STM:n asetuksen mukaisella menetelmällä työntekijäaltistusta määritettäessä jäädytään puolestaan pienempään arvoon kuin yksittäisten harmonisten magneettikenttäkomponenttien arvoista laskettaessa. Tämän perusteella magneettikentän harmoniset komponentit eivät vahvista toisiaan. Myös magneettikentän perinteinen tehollisarvo (5 Hz - 30 kHz) on pienempi kuin pelkän 50 Hz arvo.

Sähkökentän laajakaistaiset mittaukset tehtiin linjan 1 pisteessä 12 ja linjan 2 pisteessä 14. Yksittäisten harmonisten sähkökenttäkomponenttien mittauksen tulokset on esitetty kuvissa 6.33 ja 6.34. Altistumissuhteiden tulokset on esitetty taulukossa 6.6.



*Kuva 6.33.* Sähkökentän voimakkuuden taajuuskomponentit sähköaseman LM-7 kytkinkentällä (linja 1, piste 12).

*Figure 6.33.* Harmonics of the electric field strength in the substation LM-7 switchyard (line 1, point 12).



*Kuva 6.34.* Sähkökentän voimakkuuden taajuuskomponentit sähköaseman LM-7 kytkinkentällä (linja 2, piste 14).

*Figure 6.34.* Harmonics of the electric field strength in the substation LM-7 switchyard (line 2, point 14).

*Taulukko 6.6.* Taajuuskomponenteista ICNIRP:n suosituksen mukaisesti lasketut altistumissuhteet sekä samasta pisteestä STM:n asetuksen mukaisesti määritetty altistumissuhde. Altistumissuhteet eivät saa ylittää arvoa yksi.

*Table 6.6.* Exposure ratios from the harmonic components calculated based on the ICNIRP guidelines and exposure ratio based on the decree from the same point. The exposure ratios are not allowed to exceed value one.

	E, kV/m	Työntekijäaltistus ICNIRP:n suosituksen mukaan*	Työntekijäaltistus ICNIRP:n suosituksen mukaan**
Linja 1	3,67	0,37	0,37
Linja 2	2,19	0,22	0,22

\* taajuudet on laskettu 50 Hz välein 2000 Hz saakka

\*\* taajuudet on laskettu 100 Hz välein 650 Hz saakka

Sähkökentässä ei esiintynyt juurikaan harmonisia yliaaltoja. Kuvien 6.33 ja 6.34 perusteella voidaan todeta, että sähkökentän perinteiset tehollisarvot (5 Hz - 30 kHz) ovat saman suuruisia kuin pelkän 50 Hz arvot. Tästä syystä myös taulukossa 50 Hz välein 2000 Hz saakka laskettu altistumissuhde on saman suuruinen kuin 100 Hz välein 650 Hz saakka laskettu altistumissuhde.

## 6.7 400/110 kV muuntosähkösäman LM-8 laajakaistamittaus

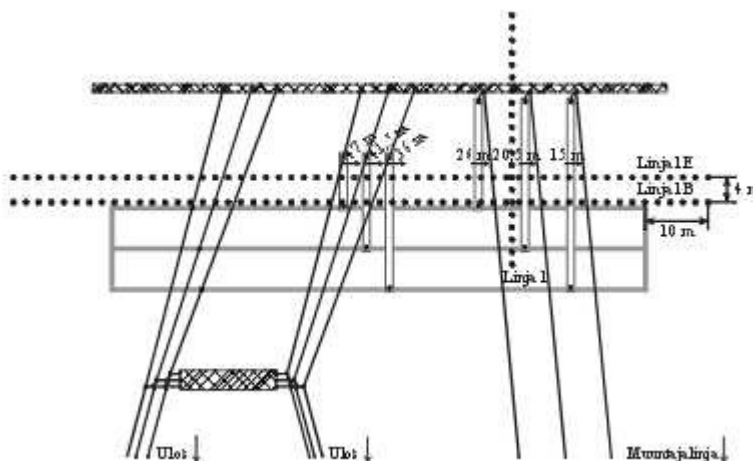
Sähkösämanmittaus LM-8 tehtiin 400 kV säkösäamalla. Sähkösäamalla oli kaksi 400 kV johtolähtöä ja yksi 400/110 kV muuntaja. Kuvassa 6.35 on esitetty valokuva säkösäman 400 kV pääkiskoista ja kytkinkentästä.



*Kuva 6.35.* Valokuva säkösäman LM-8 pääkiskoista ja kytkinkentästä.

*Figure 6.35.* Photograph from the main bus bars and switchyard of the substation LM-8.

Sähkösäamalla tehtiin sähkö- ja magneettikenttien perinteisen tehollisarvon mittaukset ensin pääkiskoa vastaan kohtisuoraan (linja 1). Mittaukseen valitut mittauslinjat 1, 1E ja 1B on esitetty kuvassa 6.36.



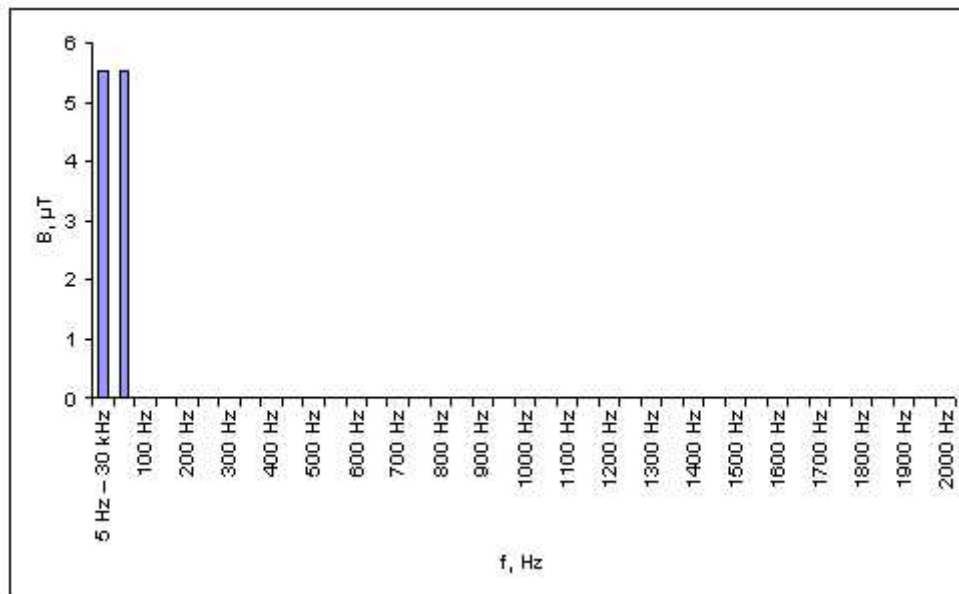
*Kuva 6.36.* Mittauspisteiden sijainti säkösäamalla LM-8.

*Figure 6.36.* Location of the measurement points at the substation LM-8.

Mittauspisteiden valinta linjalla 1 perustui säkösäman rakenteeseen. Linjan 1 suurimpien mittaus tulosten kohdalta tehtiin kytkinkenttiä vastaan kohtisuorassa suunnassa sähkö- ja

magneettikenttien perinteisen tehollisarvon mittaukset. Suurimmat arvot olivat eri kohdissa, joten perinteisen tehollisarvon mittauksia jatkettiin eri mittaussinjoilta (linja 1E ja linja 1B) ja niiden välinen etäisyys oli 4 metriä. Mittauspisteiden väli oli mittauksessa 2 metriä.

Linjalla 1 suurimmat arvot olivat  $5,35 \mu\text{T}$  (piste 6, 10 metriä kytkinkenttien reunalta) ja  $4,82 \text{ kV/m}$  (piste 8, 14 metriä kytkinkenttien reunalta). Linjalla 1B suurin magneettikentän arvo oli  $5,43 \mu\text{T}$  (piste 10, 18 metriä kytkinkenttien reunalta), josta mitattiin myös magneettikentän laajakaistainen mittausta. Linjalla 1E suurin sähkökentän arvo oli  $7,00 \text{ kV/m}$  (piste 26, 50 metriä kytkinkenttien reunalta). Yksittäisten harmonisten magneettikenttäkomponenttien mittauksen tulokset on esitetty kuvassa 6.37.



*Kuva 6.37.* Magneettivuon tiheyden taajuuskomponentit sähköaseman LM-8 kytkinkentällä.

*Figure 6.37.* Harmonics of the magnetic flux density in the substation LM-8 switchyard.

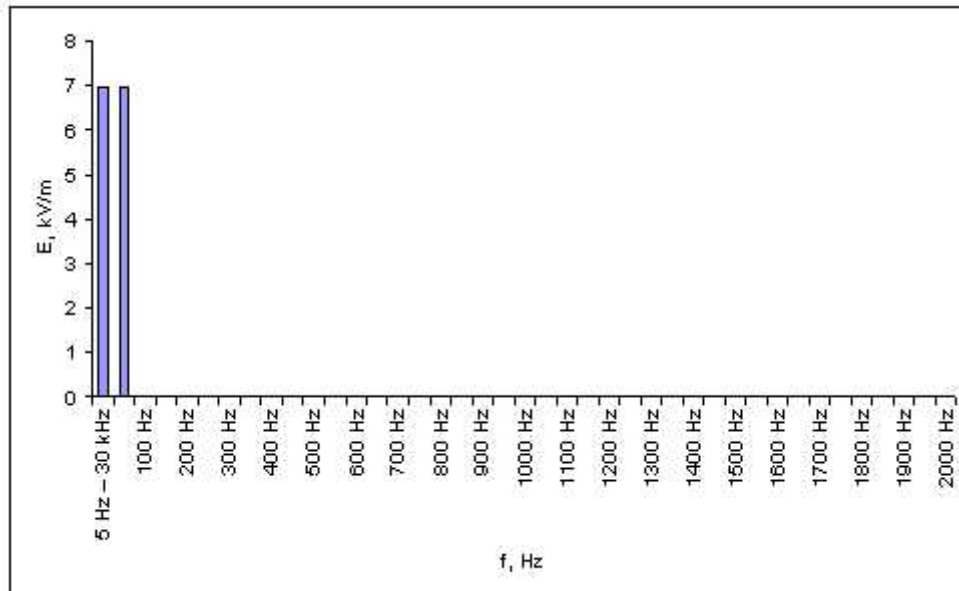
Magneettikentällä ei esiintynyt juurikaan harmonisia yliaaltoja. Kuvan 6.37 perusteella voidaan todeta, että magneettikentän perinteinen tehollisarvo (5 Hz - 30 kHz) on saman suuruinen kuin pelkän 50 Hz arvo.

Magneettivuon tiheyden perinteinen tehollisarvo oli  $5,53 \mu\text{T}$ . ICNIRP:n suosituksen mukaisesti yksittäisten harmonisten kenttien menetelmällä lasketut altistumissuhteet olivat 0,02 (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) sekä samasta pisteestä STM:n asetuksen mukaisella STUK:n kehittämällä painotetun kentän mittaumenetelmällä määritetty altistumissuhde oli 0,01.

Laskettaessa altistumissuhde taajuuskomponenteista ICNIRP:n suosituksen mukaisesti 50 Hz välein 2000 Hz saakka, arvo on kaksinkertainen verrattuna siihen, kun altistumissuhde lasketaan 100 Hz välein 650 Hz saakka. Syynä tähän on kohina, jonka merkitys kasvaa altistumissuhdetta laskettaessa taajuuden kasvaessa. Altistumissuhteen arvot olivat kuitenkin pieniä, joten kohinalla ei tässä mittauksessa ollut suurta merkitystä. STUK:n kehittämällä STM:n asetuksen mukaisella menetelmällä työntekijäaltistusta määritettäessä jäädytään vielä pienempään arvoon kuin yksittäisten

harmonisten magneettikenttäkomponenttien arvoista laskettaessa. Kuvan 6.37 perusteella magneettikentän perinteinen tehollisarvo (5 Hz - 30 kHz) on saman suuruinen kuin pelkän 50 Hz arvo.

Sähkökentän laajakaistaiset mittaukset tehtiin linjan 1 pisteessä 90, jossa kentän arvo oli suurin. Yksittäisten harmonisten sähkökenttäkomponenttien mittausten tulokset on esitetty kuvassa 6.38.



Kuva 6.38. Sähkökentän voimakkuuden taajuuskomponentit sähköaseman LM-8 kytkinkentällä.

Figure 6.38. Harmonics of the electric field strength in the substation LM-8 switchyard.

Sähkökentässä ei esiintynyt juurikaan harmonisia yliaaltoja. Kuvan 6.38 perusteella voidaan todeta, että sähkökentän perinteinen tehollisarvo (5 Hz - 30 kHz) on saman suuruinen kuin pelkän 50 Hz arvo.

Sähkökentän voimakkuuden perinteinen tehollisarvo oli 6,96 kV/m. Taajuuskomponenteista ICNIRP:n suosituksen mukaisesti yksittäisten harmonisten kenttien menetelmällä lasketut altistumissuhteet olivat 0,88 (taajuudet on laskettu 50 Hz:n välein 2000 Hz:iin saakka) ja 0,73 (taajuudet on laskettu 100 Hz:n välein 650 Hz:iin saakka). Arvojen erot johtuvat siitä, että taajuuden kasvaessa yliaallon ja myös kohinan merkitys kasvaa altistumissuhdetta laskettaessa.

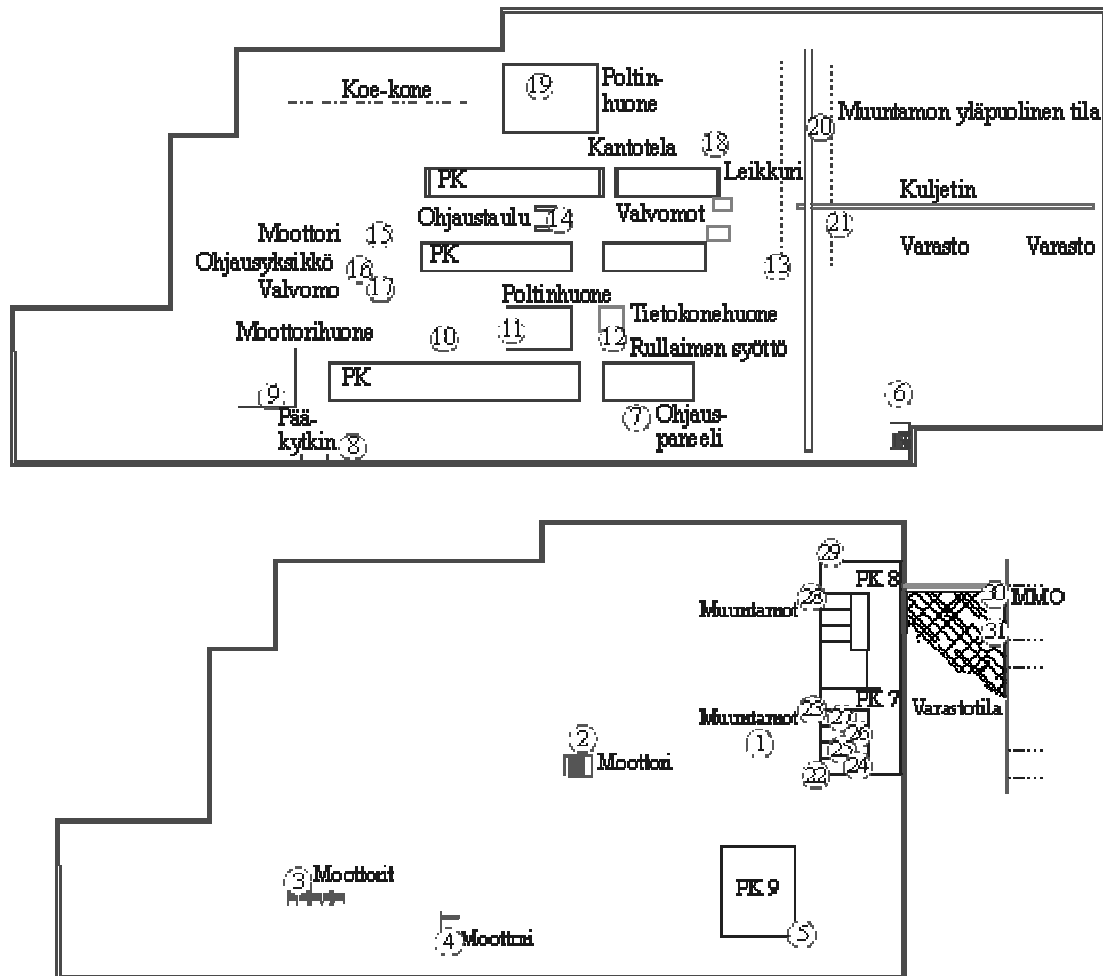
## 7. Mittaustuloksia teollisuuden laajakaistaisista kentistä

Teollisuuden laajakaistaisia kenttiä mitattiin seitsemässä eri kohteessa (teollisuuden LM-9 - LM-13). Kaksi laajakaistamittausta tehtiin paperiteollisuudessa ja kolme metalliteollisuudessa.

### 7.1 Paperiteollisuuden yhtiön LM-9 laajakaistamittaus

Teollisuusmittaus LM-9 tehtiin pehmapaperitehtaalla. Tehtaalla ei saanut liikesalaisuuksien vuoksi kuvata, joten kohteista ei ole valokuvia. Keskuksilta mitatut kuormitusvirrat on esitetty liitteessä 1.

Ensiksi tehtaalla tehtiin katselmusmittaus suurien kenttien löytämiseksi. Kuvassa 7.1 on esitetty katselmusmittauksen mittauspisteet.



Kuva 7.1. Mittauspisteiden sijainti teollisuuskohteen LM-9 työskentelytiloissa.

Figure 7.1. Location of the measurement points in the working area of the industrial place LM-9.

Seuraavassa taulukossa 7.1 on esitetty katselmusmittauksessa mitatut magneettikentän perinteiset tehollisarvot. Sähkökentät todettiin heti mittauksen alussa merkityksettömiksi, joten niiden mittaamista ei jatkettu.

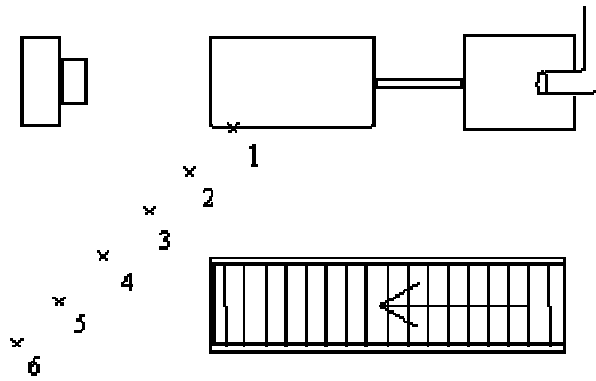
Taulukko 7.1. Teollisuuskohteessa LM-9 mitattujen magneettivuon tiheyksien arvot.

Table 7.1. Magnetic flux densities from the industrial place LM-9.

Mittauspiste	B, $\mu\text{T}$	Kuvaus
1	5,04	Muuntamon vieressä
2	0,92	Moottorin vieressä
3	1,92	Moottorien vieressä

4	2,58	Moottorin vieressä
5	0,89	Varaston vieressä
6	1,68	Portaikon vieressä
7	0,45	Ohjauspaneelin edessä
8	1,98	Nousujohto, pääkytkin
9	2,13	Moottorihuone
10	0,66	Käytävä
11	1,12	Poltinhuone, moottorit
12	1,59	Rullaimen syöttö
13	8,12	Muuntamon yläpuolella
14	0,61	Ohjaustaulun vieressä
15	6,67	Moottori
16	0,93	Ohjausyksikkö
17	0,63	Valvomo
18	1,31	Kantotela
19	2,96	Poltinhuone
20	5,42	Muuntamon yläpuolella
21	4,95	Muuntamon yläpuolella
22	2,67	Muuntamon vieressä
23	5,29	Muuntamon vieressä
24	8,63	Muuntamo
25	15,64	Muuntamo
26	15,66	Muuntamo
27	41,24	Muuntamo
28	2,59	Muuntamon vieressä
29	0,98	Muuntamon vieressä
30	4,66	Muuntamon vieressä
31	3,85	Muuntamon vieressä

Pisteessä 15 (oikosulkumoottori) päätettiin tehdä lisämittauksia, koska se sijaitsi käytävällä. Moottorin kaapelisyöttö tuli ylhäältä, joten siitä ei saatu mittaussuunnan valinnalle tukea. Mittaukset päätettiin tehdä käytävän suuntaan, koska moottorin läheisyydessä ei ollut kenenkään varsinainen työpiste. Seuraavassa kuvassa 7.2 on esitetty mittauspisteet oikosulkumoottorin vierestä tehdyssä mittauksessa.



*Kuva 7.2.* Mittauspisteiden sijainti teollisuuskohteessa LM-9.

*Figure 7.2.* Location of the measurement points in the industrial place LM-9.

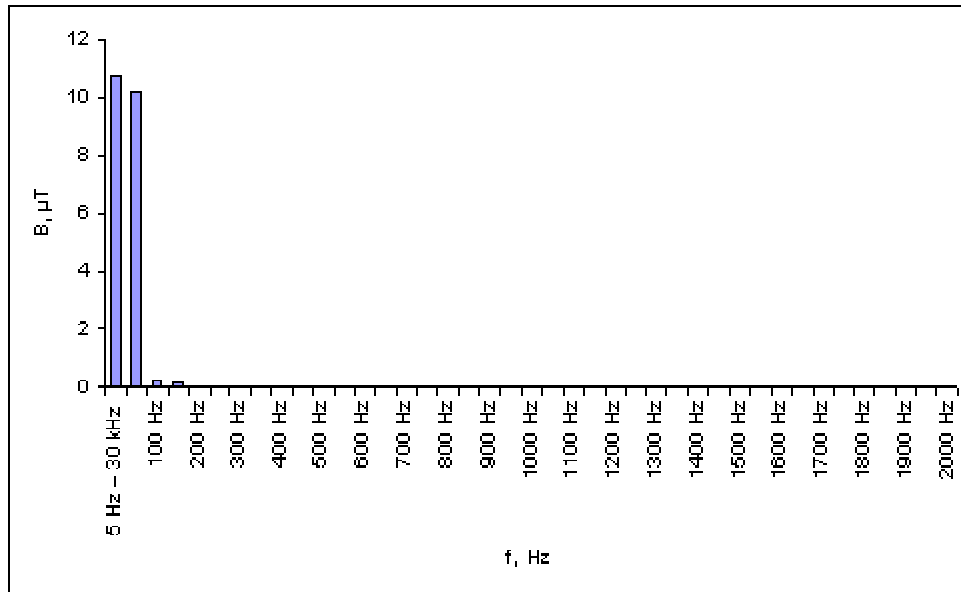
Seuraavassa taulukossa 7.2 on esitetty mittaustulokset yhden metrin korkeudelta. Mittauspisteiden välinen etäisyys oli yksi metri. Mittauspiste 1 oli 0,40 metrin etäisyydellä oikosulkumoottorista. Oikosulkumoottoria tai sen pyörittämää puhallinta huollettaessa huoltomies saattoi joutua työskentelemään myös tätä lähempänä. Mittauksia ei kuitenkaan tehty tätä lähempänä, koska se ei ole mittausteknisesti suositeltavaa STUK:in antamien ohjeiden mukaan. STUK:in ohjeiden mukaan sähkö- ja magneettikentät pitää mitata niin kaukaa kentän lähteestä, että lähteen aiheuttama altistuminen vaikuttaa koko kehoon.

*Taulukko 7.2.* Teollisuuskohteessa LM-9 mitattujen magneettikenttien arvot yhden metrin korkeudelta.

*Table 7.2.* Magnetic flux densities at the height of one meter from the industrial place LM-9.

Mittauspiste	B, $\mu\text{T}$
1	15,64
2	1,54
3	0,45
4	0,35
5	0,29
6	0,24

Oikosulkumoottorin lähellä tehdyistä mittauksista valittiin laajakaistaisiin mittauksiin piste 1, jossa kentän arvo oli suurin. Yksittäisten harmonisten magneettikenttäkomponenttien mittauksen tulokset on esitetty kuvassa 7.3.



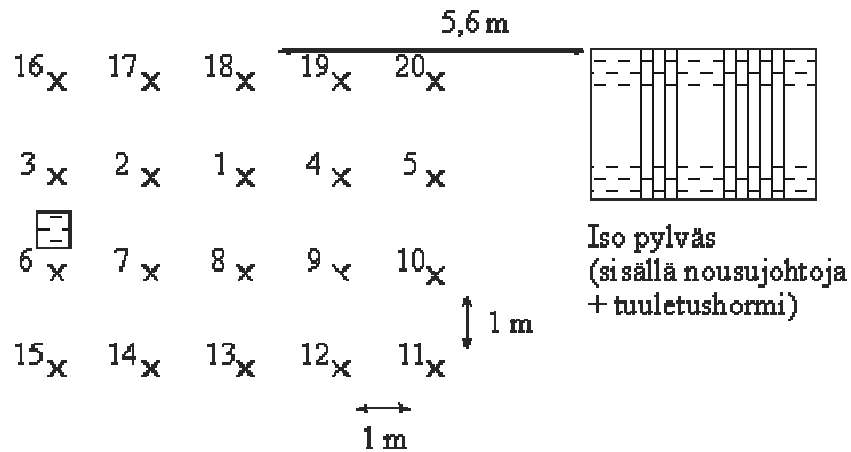
*Kuva 7.3.* Magneettivuon tiheyden taajuuskomponentit oikosulkumoottorin lähellä teollisuuskohteessa LM-9.

*Figure 7.3.* Harmonics of magnetic flux density in the industrial place LM-9 near a short circuit motor.

Magneettivuon tiheyden perinteinen tehollisarvo oli 10,71  $\mu\text{T}$ . Magneettikentän suurimmat harmoniset olivat 2., 3., ja 5. - 7. yliaalto, joista kolme jälkimmäistä taajuutta ei kuvasta voi erottaa. Huomionarvoista oli myös 100 Hz magneettikenttäkomponentin suhteellisen suuri osuus, jolle ei kuitenkaan löytynyt selvää syytä, koska kuormitusvirroissa, joita on esitetty liitteessä 1, ei esiintynyt lainkaan parillisia yliaaltoja. Toisaalta yksittäisen oikosulkumoottorin kuormitusvirta ei vaikuta keskuksen virtaan kovinkaan paljoa.

Parillisille yliaalloille yksi mahdollinen syy on mittarin kohinasta johtuva päästökaistan leviäminen yksittäisiä yliaaltoja mitattaessa. Kuvan 7.3 perusteella magneettikentän perinteinen tehollisarvo (5 Hz - 30 kHz) on selvästi suurempi kuin pelkän 50 Hz arvo. Mittauksen perusteella magneettikentän harmoniset komponentit näyttäisivät vahvistavan toisiaan. ICNIRP:n suosituksen mukaisesti yksittäisten harmonisten kenttien menetelmällä lasketut altistumissuhteet olivat 0,04 (taajuudet 50 Hz:n välein 2000 Hz:iin saakka) ja 0,02 (taajuudet 100 Hz:n välein 650 Hz:iin saakka). Arvojen erot johtuvat siitä, että taajuuden kasvaessa yliaallon ja myös kohinan merkitys kasvaa altistumissuhdetta laskettaessa.

Seuraavaksi mittauksia tehtiin katselmusmittauksen pisteessä 13, koska siinä mitattiin muuntamoiloja lukuun ottamatta katselmusmittauksen suurimmat magneettikenttäarvot. Paikka oli pakkausalueella ja sen alapuolella oli paperikoneen muuntamo (muuntamo 2), joka oli pääasiallinen magneettikentän lähde kyseisessä katselmusmittauksen pisteessä. Pakkausalueella työskenteli paperirullien pakkaaja koko sen ajan, jona aikana sähkö- ja magneettikenttämittauksia tehtiin. Mittauspisteiden sijainti on esitetty kuvassa 7.4.



*Kuva 7.4.* Mittauspisteiden sijainti teollisuuskohteessa LM-9 (muuntamon 2 yläpuolella).

*Figure 7.4.* Location of the measurement points in the industrial place LM-9 (above indoor distribution substation 2).

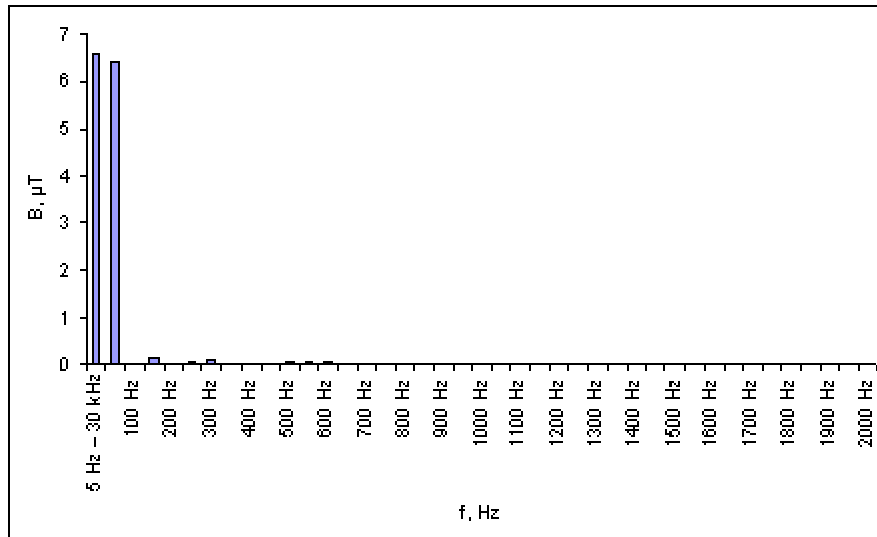
Pakkausalueelta paperikoneen muuntamon yläpuolisesta tilasta magneettikentät mitattiin kuvan pisteistä yhden metrin korkeudelta. Seuraavassa taulukossa 7.3 on esitetty mittaustulokset.

*Taulukko 7.3.* Teollisuuskohteessa LM-9 mitattujen magneettivuon tiheyksien arvot yhden metrin korkeudelta.

*Table 7.3.* Magnetic flux densities measured from the industrial place LM-9 at the height of one meter.

Mittauspiste	B, $\mu\text{T}$	Mittauspiste	B, $\mu\text{T}$
1	6,06	11	1,88
2	6,31	12	2,41
3	6,63	13	2,70
4	6,50	14	2,87
5	4,20	15	2,99
6	5,09	16	6,08
7	4,95	17	6,35
8	4,54	18	6,39
9	4,00	19	5,64
10	3,09	20	4,22

Laajakaistainen magneettikenttäaltistuminen päätettiin mitata muuntamon yläpuolisesta tilasta pisteestä 3. Seuraavassa kuvassa 7.5 on esitetty pisteestä 3 mitatut magneettivuon tiheyden taajuuskomponentit.

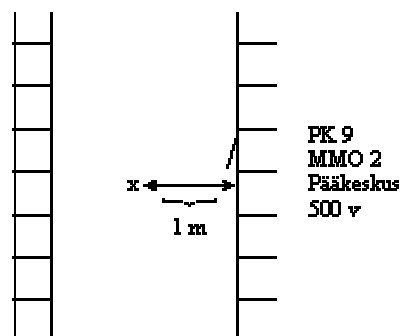


*Kuva 7.5.* Magneettivuon tiheyden taajuuskomponentit teollisuuskohteessa LM-9 muuntamon yläpuolisessa tilassa.

*Figure 7.5.* Harmonics of magnetic flux density in the industrial place LM-9 in the space above distribution substation.

Magneettivuon tiheyden perinteinen tehollisarvo oli  $6,57 \mu\text{T}$ . Magneettikentän suurimmat harmoniset olivat 2., 3., 5. - 7. ja 9. - 14. yliaalto. Lisäksi magneettikentässä voidaan havaita 33. ja 40. yliaalto, joita ei kuitenkaan kuvasta voi erottaa. Parillisille yliaalloille yksi mahdollinen syy on mittarin kohinasta johtuva päästökaistan leviäminen yksittäisiä yliaaltoja mitattaessa. Suuresta eri taajuuksien yliaaltojen lukumäärästä huolimatta kuvan 7.5 perusteella magneettikentän perinteinen tehollisarvo (5 Hz - 30 kHz) on vain hieman suurempi kuin pelkän 50 Hz arvo. ICNIRP:n suositusten mukaisesti yksittäisten harmonisten kenttien menetelmällä lasketut altistumissuhteet olivat 0,03 (taajuudet 50 Hz:n välein 2000 Hz:iin saakka) ja 0,02 (taajuudet 100 Hz:n välein 650 Hz:iin saakka). Arvojen erot ovat yliaalloista huolimatta melko pieniä, vaikka taajuuden kasvaessa yliaallon merkitys kasvaa altistumissuhdetta laskettaessa.

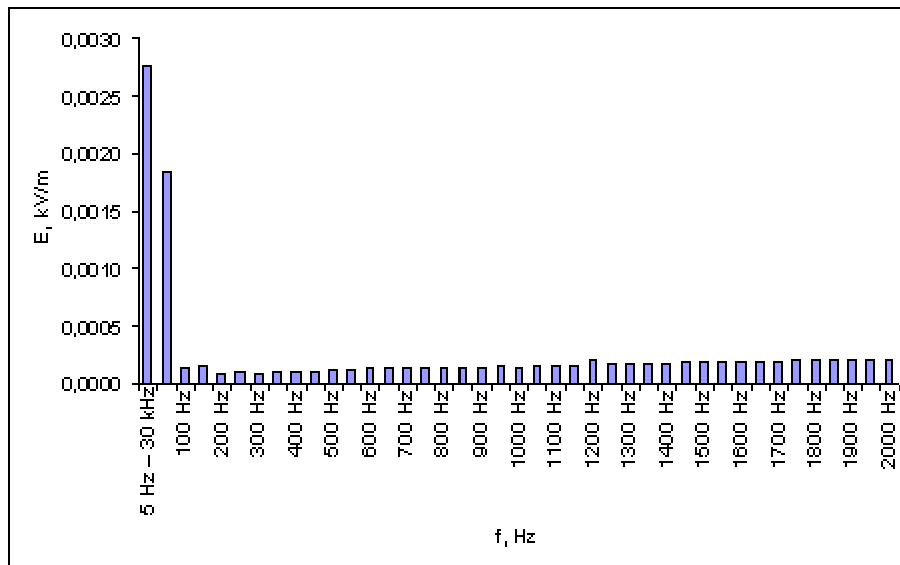
Laajakaistaisen sähkökentän mittauspaijaksi valittiin pääkeskuksen tila. Kuvassa 7.6 on esitetty sähkökentän mittauspisteen sijainti keskuskaappien välissä. Valokuva mittauspaijasta on esitetty aiemmin kuvassa 4.1.



*Kuva 7.6.* Mittauspisteen sijainti teollisuuskohteessa LM-9 (sähköpääkeskus).

Figure 7.6. Location of the measurement point in the industrial place LM-9 (main electricity centre).

Tila valittiin sähkökentän mittauspaijaksi, koska siellä oletettiin olevan muuta ympäristöä suurempia sähkökenttiä avorakenteisesta kiskostosta johtuen. Avoimen 500 V kiskoston lähellä tehtiin yhden metrin korkeudella keskustilan lattiasta sähkökentän laajakaistainen altistumismittaus. Mittauksissa ei mittaajien sähköturvallisuuden varmistamiseksi tehty avoimien kiskojen korkeudelta, koska sitä varten olisi jouduttu kiipeämään tikkailla keskuksen yläreunan tasalle. Seuraavassa kuvassa 7.7 on esitetty sähkökentän voimakkuuden taajuuskomponentit.

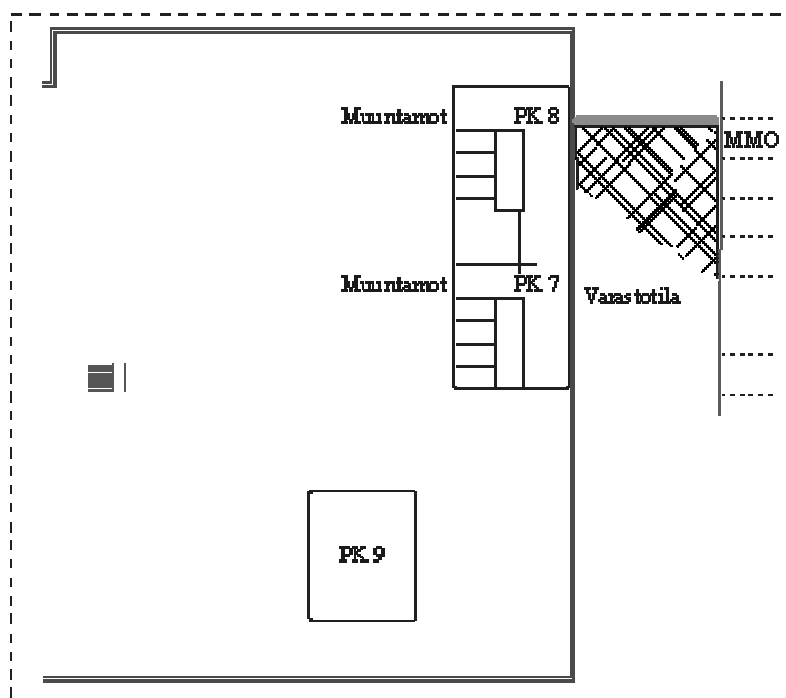


Kuva 7.7. Sähkökentän voimakkuuden taajuuskomponentit teollisuuskohteen LM-9 pääkeskuksessa.

Figure 7.7. Harmonics of electric field strength for the industrial place LM-9 in main electricity centre.

Sähkökentän voimakkuuden perinteinen tehollisarvo oli 0,0028 kV/m. Taajuuskomponenteista ICNIRP:n suosituksen mukaisesti yksittäisten harmonisten kenttien menetelmällä lasketut altistumissuhteet olivat 0,01 (taajuudet 50 Hz:n välein 2000 Hz:iin saakka) ja likimain nolla (taajuudet 100 Hz:n välein 650 Hz:iin saakka). Arvojen erot johtuvat siitä, että taajuuden kasvaessa yliaallon ja myös kohinan merkitys kasvaa altistumissuhdetta laskettaessa. Sen lisäksi, että arvot jäävät altistumissuhdetta laskettaessa mittarin kohinavaikutusta pienemmiksi, näin pienillä arvoilla ei ole altistumisen kannalta mitään merkitystä.

Seuraavaksi tehtiin mittauksia pääkeskuksien yläpuolisissa tiloissa kolmen muuntamon yläpuolella. Mittaukset tehtiin siten, että ensiksi mitattiin magneettikentän arvot yhden metrin ruudukolla yläpuolisesta tilasta riittäväksi katsotulta alueelta ja sen jälkeen tehtiin paikasta, josta suurin kentän arvo löytyi, laajakaistaiset mittaukset sähkö- ja magneettikentille. Pääkeskuksien sijainti on esitetty seuraavassa kuvassa 7.8.



*Kuva 7.8.* Pääkeskuksien sijainti teollisuuskohteessa LM-9.

*Figure 7.8.* Location of main electricity exchange in the industrial place LM-9.

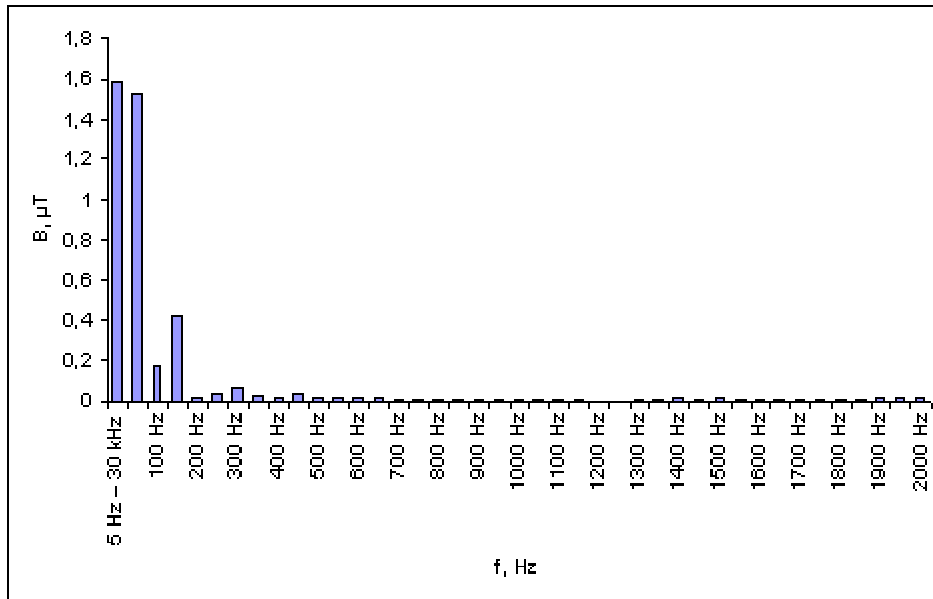
Ensin mitattiin magneettikenttä muuntamon ja pääkeskus 7:n yläpuolisesta tilasta. Mittausruudukon piste 1 on muuntajan alajännitepuolen vaiheen L2 läpiviennin kohdalla muuntamon yläpuolisessa tilassa. Mittaukset tehtiin yhden metrin ruudukolla. Taulukossa 7.4 on esitetty mitatut magneettivuon tiheyksien arvot.

*Taulukko 7.4.* Teollisuuskohteessa LM-9 pääkeskus 7:n yläpuolisesta tilasta mitattujen magneettikenttien arvot yhden metrin korkeudelta

*Table 7.4.* Magnetic fields measured from the industrial place LM-9 in the space above main electricity centre 7 at the height of one meter.

Mittauspiste	B, $\mu\text{T}$	Mittauspiste	B, $\mu\text{T}$
1	0,96	6	1,33
2	1,17	7	1,44
3	1,57	8	1,20
4	1,62	9	1,02
5	1,50	10	0,87

Suurin magneettikenttä mitattiin pisteestä 4, josta tehtiin laajakaistaiset altistumismittaukset. Seuraavassa kuvassa 7.9 on esitetty pisteestä 4 mitatut magneettivuon tiheyden taajuuskomponentit.



*Kuva 7.9.* Magneettivuon tiheyden taajuuskomponentit teollisuuskohteessa LM-9 (pääkeskus 7).

*Figure 7.9.* Harmonics of the magnetic flux density in the industrial place LM-9 (main electricity centre 7).

Kuvasta havaitaan, että magneettikentässä esiintyy runsaasti yliaaltoja. Myös parillisia yliaaltoja esiintyy runsaasti. Yksi mahdollinen syy parillisten yliaaltojen esiintymiselle on mittarin kohinasta johtuva päästökaistan leviäminen yksittäisiä yliaaltoja mitattaessa, koska parilliset yliaallot esiintyivät yleensä vielä suuremman parittoman yliaaltotaajuuden lähellä.

Suurimmat taajuuskomponentit perustaajuisen kentän (50 Hz) lisäksi ovat 2. (100 Hz), 3. (150 Hz), 5. (250 Hz) ja 6. (300 Hz) yliaalto. Kuvan 7.9 perusteella magneettikentän perinteinen tehollisarvo (5 Hz - 30 kHz) on vain hieman suurempi kuin pelkän 50 Hz arvo, joten yliaallot eivät täysin vahvista toisiaan.

Magneettivuon tiheyden perinteinen tehollisarvo oli  $1,58 \mu\text{T}$ . ICNIRP:n suosituksen mukaisesti yksittäisten harmonisten kenttien menetelmällä lasketut altistumissuhteet olivat 0,02 (taajuudet 50 Hz:n välein 2000 Hz:iin saakka) ja 0,01 (taajuudet 100 Hz:n välein 650 Hz:iin saakka). Samasta pisteestä STUK:n kehittämällä STM:n asetuksen mukaisella menetelmällä määritetty altistumissuhde oli likimain nolla.

Sähkökenttä mitattiin samasta pisteestä 4. Sähkökentän voimakkuuden perinteinen tehollisarvo oli  $0,0021 \text{ kV/m}$ . Taajuuskomponenteista ICNIRP:n suosituksen mukaisesti yksittäisten harmonisten kenttien menetelmällä lasketut altistumissuhteet olivat 0,01 (taajuudet 50 Hz:n välein 2000 Hz:iin saakka) ja likimain nolla (taajuudet 100 Hz:n välein 650 Hz:iin saakka). Arvojen erot johtuvat yliaalloista ja kohinasta.

Seuraavaksi magneettikenttä mitattiin muuntamon ja pääkeskus 8:n yläpuolisesta tilasta. Mittaukset tehtiin yhden metrin ruudukolla. Mittausruudukon piste 1 on muuntajan alajännitepuolen vaiheen

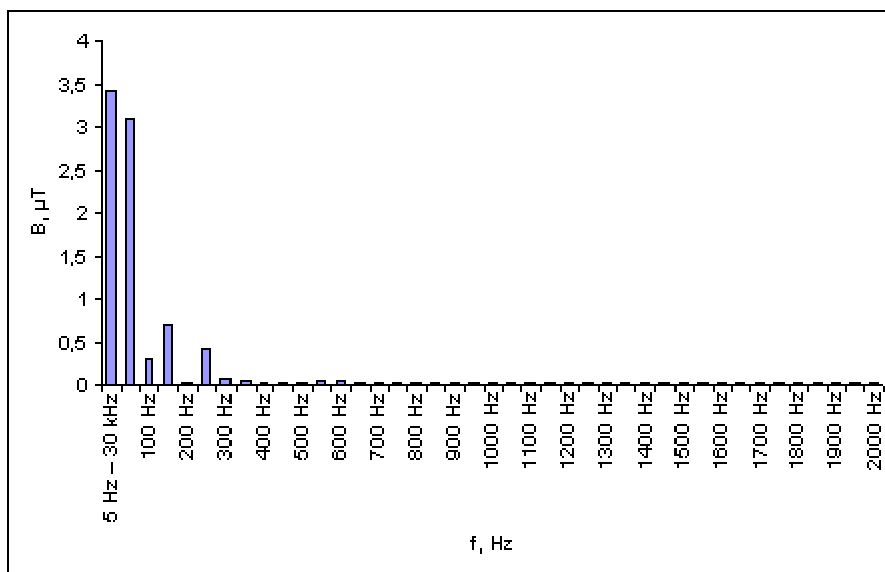
L2 läpiviennin kohdalla muuntamon yläpuolisessa tilassa. Taulukossa 7.5 on esitetty magneettikentän perinteisen tehollisarvon mittaustulokset.

*Taulukko 7.5.* Teollisuuskohteessa LM-9 pääkeskus 8:n yläpuolisesta tilasta mitattujen magneettikenttien arvot yhden metrin korkeudelta.

*Table 7.5.* Magnetic fields measured from the industrial place LM-9 in the space above main electricity centre 8 at the height of one meter.

Mittauspiste	B, $\mu\text{T}$	Mittauspiste	B, $\mu\text{T}$
1	2,23	6	2,23
2	3,28	7	2,53
3	3,43	8	2,59
4	3,24	9	2,65
5	3,28	10	2,92

Suurin arvo mitattiin pisteessä 3. Seuraavassa kuvassa 7.10 on esitetty pisteestä 3 mitatut magneettivuon tiheyden taajuuskomponentit.



*Kuva 7.10.* Magneettivuon tiheyden taajuuskomponentit teollisuuskohteessa LM-9 (pääkeskus 8).

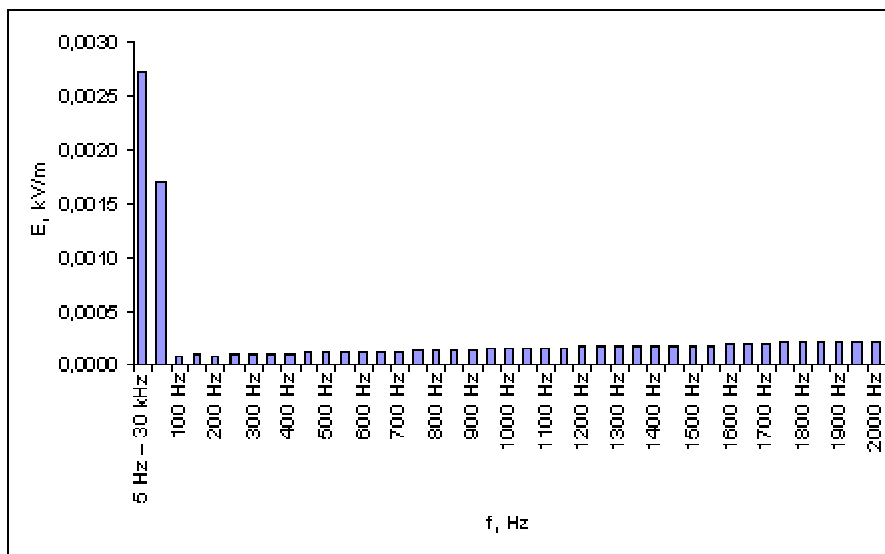
*Figure 7.10.* Harmonics of the magnetic flux density in the industrial place LM-9 (main electricity centre 8).

Kuvasta havaitaan, että magneettikentässä esiintyy runsaasti teollisuusverkolle tyypillisiä yliaaltoja, mutta myös parillisia yliaaltoja esiintyy runsaasti. Yksi mahdollinen syy parillisten yliaaltojen esiintymiselle on mittarin kohinasta johtuva päästökaistan leviäminen yksittäisiä yliaaltoja mitattaessa, koska suuret parilliset yliaallot esiintyvät vielä suuremman parittoman yliaaltotaajuuden lähellä. Suurimmat taajuuskomponentit perustaaajuksen kentän (50 Hz) lisäksi ovat

2. (100 Hz), 3. (150 Hz) ja 5. (250 Hz) yliaalto. Kuvan 7.10 perusteella magneettikentän perinteinen tehollisarvo (5 Hz - 30 kHz) on jonkin verran suurempi kuin pelkän 50 Hz arvo, mutta kuitenkin yliaallot eivät täysin vahvista toisiaan.

Magneettivuon tiheyden perinteinen tehollisarvo oli  $3,11 \mu\text{T}$ . ICNIRP:n suosituksen mukaisesti yksittäisten harmonisten kenttien menetelmällä lasketut altistumissuhteet olivat 0,04 (taajuudet 50 Hz:n välein 2000 Hz:iin saakka) ja 0,02 (taajuudet 100 Hz:n välein 650 Hz:iin saakka). Samasta pisteestä STUK:n kehittämällä STM:n asetuksen mukaisella menetelmällä määritetty altistumissuhde oli 0,01.

Sähkökenttä mitattiin samasta pisteestä 3. Seuraavassa kuvassa 7.11 on esitetty pisteestä 3 mitatut sähkökentän voimakkuuden taajuuskomponentit.



*Kuva 7.11.* Sähkökentän voimakkuuden taajuuskomponentit teollisuuskohteessa LM-9 (pääkeskus 8).

*Figure 7.11.* Harmonics of electric field strength in the industrial place LM-9 (main electricity centre 8).

Sähkökentän voimakkuuden perinteinen tehollisarvo oli 0,0027 kV/m. Taajuuskomponenteista ICNIRP:n suosituksen mukaisesti yksittäisten harmonisten kenttien menetelmällä lasketut altistumissuhteet olivat 0,01 (taajuudet 50 Hz:n välein 2000 Hz:iin saakka) ja likimain nolla (taajuudet 100 Hz:n välein 650 Hz:iin saakka).

Kolmas pääkeskuksen yläpuolelta tehty mittaus oli muuntamon ja pääkeskus 9:n yläpuolisesta tilasta. Mittaukset tehtiin yhden metrin ruudukolla. Mittausruudukon piste 1 on muuntajan alajännitepuolen vaiheen L2 läpiviennin kohdalla muuntamon yläpuolisessa tilassa. Taulukossa 7.6 on esitetty mitatut magneettikentän perinteiset tehollisarvot.

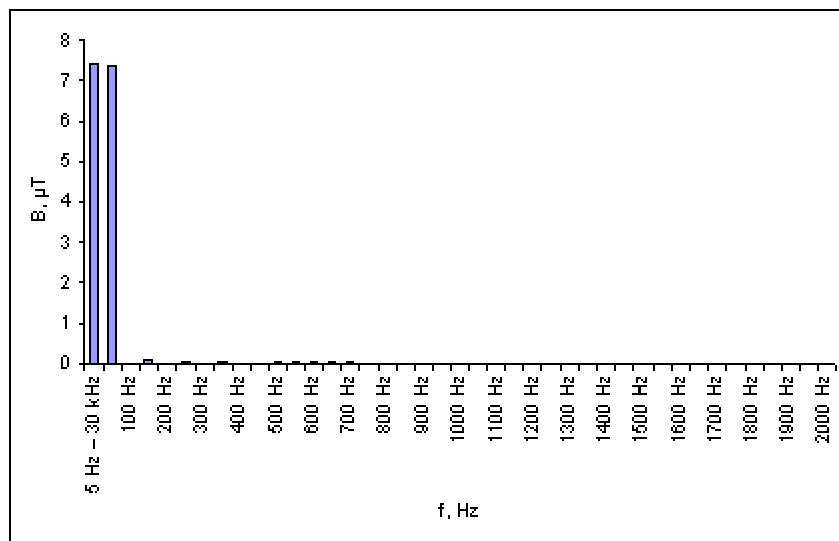
*Taulukko 7.6.* Teollisuuskohteessa LM-9 pääkeskus 9:n yläpuolisesta tilasta mitattujen magneettikenttien arvot yhden metrin korkeudelta.

*Table 7.6.* Magnetic fields measured from the industrial place LM-9 in the space above main

electricity centre 9 at the height of one meter.

Mittauspiste	B, $\mu\text{T}$	Mittauspiste	B, $\mu\text{T}$
1	5,53	13	5,06
2	6,83	14	3,83
3	7,17	15	2,77
4	4,33	16	6,23
5	3,22	17	5,90
6	3,11	18	5,18
7	4,21	19	4,03
8	5,47	20	3,05
9	6,87	21	5,13
10	7,41	22	6,07
11	6,71	23	6,27
12	6,22	24	5,88

Suurin arvo mitattiin pisteestä 10. Seuraavassa kuvassa 7.12 on esitetty pisteestä 10 mitatut magneettivuon tiheyden taajuuskomponentit.



*Kuva 7.12.* Magneettivuon tiheyden taajuuskomponentit teollisuuskohteessa LM-9 (pääkeskus 9).

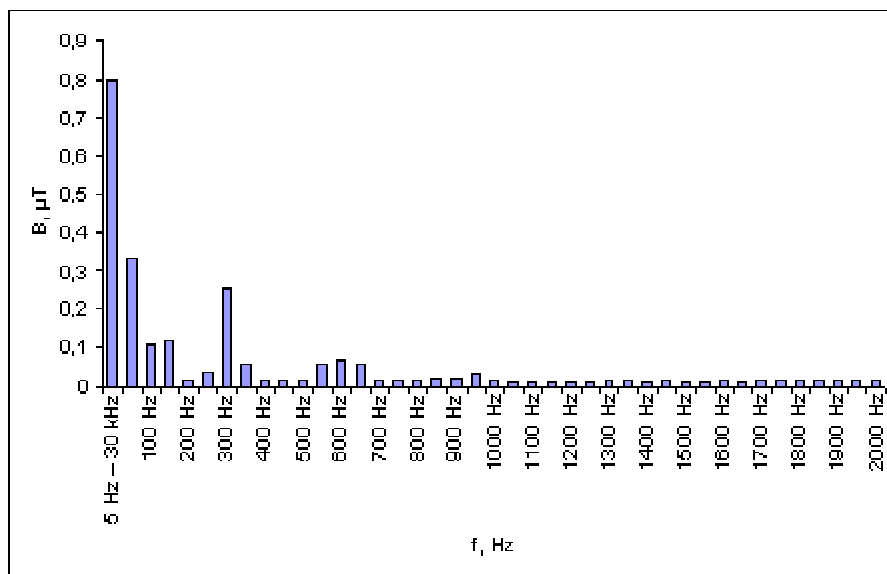
*Figure 7.12.* Harmonics of the magnetic flux density in the industrial place LM-9 (main electricity centre 9).

Kuvasta havaitaan, että magneettikentässä esiintyy hieman 3. yliaaltoa. Magneettivuon tiheyden perinteinen tehollisarvo oli  $7,35 \mu\text{T}$ . ICNIRP:n suosituksen mukaisesti yksittäisten harmonisten kenttien menetelmällä lasketut altistumissuhteet olivat 0,03 (taajuudet 50 Hz:n välein 2000 Hz:iin

saakka) ja 0,02 (taajuudet 100 Hz:n välein 650 Hz:iin saakka). Samasta pisteestä STUK:n kehittämällä menetelmällä määritetty altistumissuhde oli 0,01.

Seuraavaksi mitattiin pisteestä 10 sähkökentän voimakkuuden taajuuskomponentit. Sähkökentän voimakkuuden perinteinen tehollisarvo oli 0,0021 kV/m. Taajuuskomponenteista ICNIRP:n suosituksen mukaisesti yksittäisten harmonisten kenttien menetelmällä lasketut altistumissuhteet olivat 0,01 (taajuudet 50 Hz:n välein 2000 Hz:iin saakka) ja likimain nolla (taajuudet 100 Hz:n välein 650 Hz:iin saakka). Arvojen erot johtuvat yliaalloista ja kohinasta.

Seuraava laajakaistainen altistumismittaus tehtiin paperikoneen leikkurin moottorin vierestä, koska siellä epäiltiin kentässä olevan paljon yliaaltoja. Kuvassa 7.13 on esitetty tehtyjen laajakaistamittausten magneettivuon tiheyden taajuuskomponentit.



*Kuva 7.13.* Magneettivuon tiheyden taajuuskomponentit teollisuuskohteen LM-9 moottorin vierestä.

*Figure 7.13.* Harmonics of the magnetic flux density in the industrial place LM-9 near motor.

Kuvasta havaitaan, että magneettikentässä esiintyy varsin runsaasti yliaaltoja. Myös tässä mittauksessa esiintyi parillisia yliaaltoja runsaasti. Yksi mahdollinen syy parillisten yliaaltojen esiintymiselle on mittarin kohinasta johtuva päästökaistan leviäminen yksittäisiä yliaaltoja mitattaessa. Magneettivuon tiheyden perinteinen tehollisarvo oli 0,80  $\mu\text{T}$ . ICNIRP:n suosituksen mukaisesti yksittäisten harmonisten kenttien menetelmällä lasketut altistumissuhteet olivat 0,02 (taajuudet 50 Hz:n välein 2000 Hz:iin saakka) ja likimain nolla (taajuudet 100 Hz:n välein 650 Hz:iin saakka). Samasta pisteestä STUK:n kehittämällä STM:n asetuksen mukaisella menetelmällä määritetty altistumissuhde oli likimain nolla. Arvojen erot johtuvat yliaalloista.

Sähkökenttä mitattiin samasta pisteestä leikkurin moottorin vierestä. Sähkökentän perinteinen tehollisarvo oli 0,0032 kV/m. Taajuuskomponenteista ICNIRP:n suosituksen mukaisesti yksittäisten harmonisten kenttien menetelmällä lasketut altistumissuhteet olivat 0,01 (taajuudet 50 Hz:n välein 2000 Hz:iin saakka) ja likimain nolla (taajuudet 100 Hz:n välein 650 Hz:iin saakka). Arvot olivat varsin pieniä. Niiden erot johtuvat yliaalloista ja kohinasta.

## 7.2 Paperiteollisuuden yhtiön LM-10 laajakaistamittaus

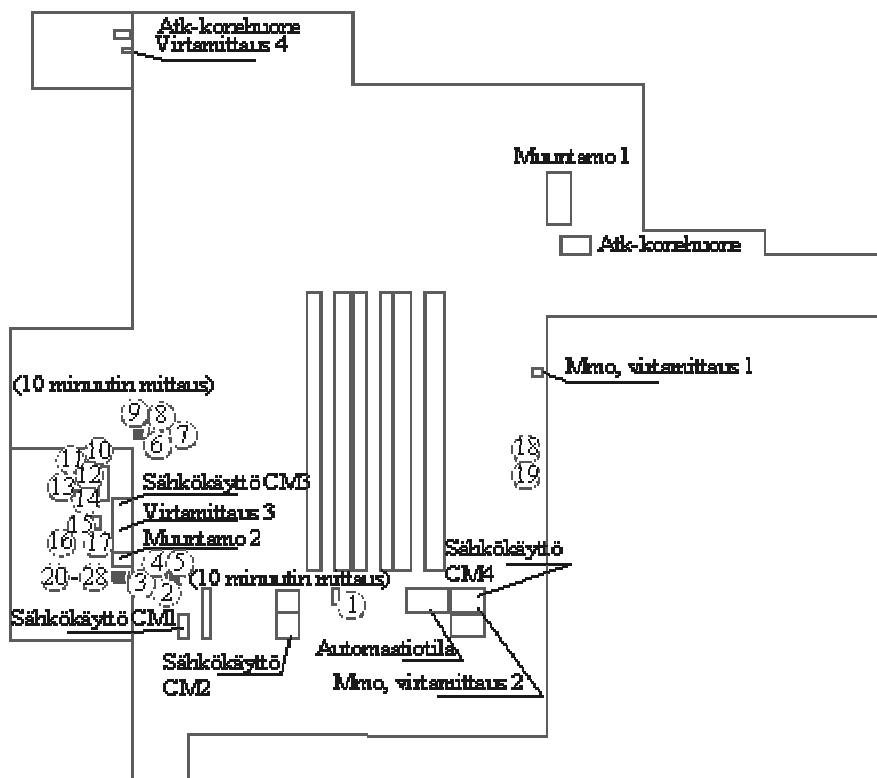
Teollisuusmittaus LM-10 tehtiin tarralaminaattia tuottavassa paperinjalostustehtaassa. Liitteessä 2 on esitetty mitatut kuormitusvirrat. Kuvassa 7.14 on esitetty valokuva tehtaalta.



Kuva 7.14. Valokuva teollisuuskohteesta LM-10 (paperiteollisuus).

Figure 7.14. Photograph from the industrial place LM-10 (paper industry).

Mittaukset aloitettiin tekemällä katselmusmittaus suurimpien kenttien löytämiseksi. Kuvassa 7.15 on esitetty layout-piirustus tehtaasta ja katselmusmittauksen mittauspisteet.



*Kuva 7.15.* Mittauspisteiden sijainti teollisuuskohteessa LM-10 (katselmusmittaus).

*Figure 7.15.* Location of the measurement points in the industrial place LM-10 (survey measurement).

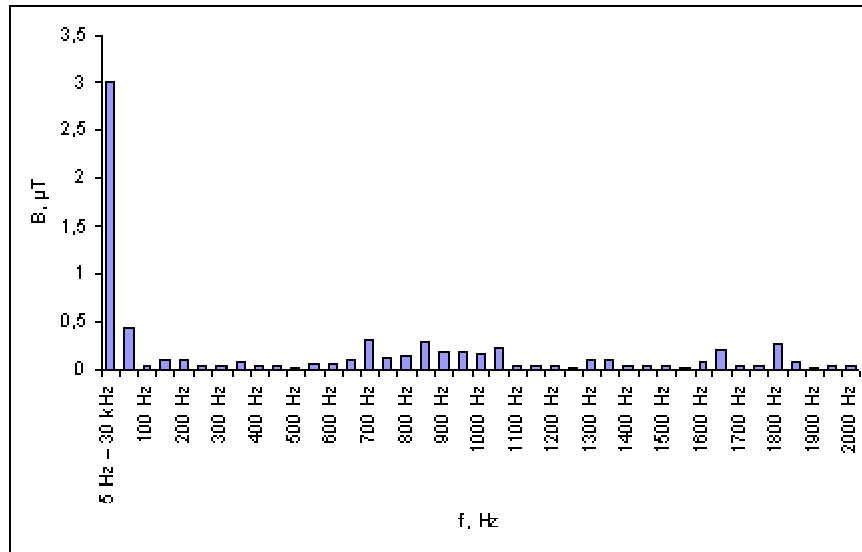
Katselmusmittauksessa mitattiin magneettikentän arvot kuvan mittauspisteistä. Seuraavassa taulukossa 7.7 on esitetty magneettivuon tiheyden perinteiset tehollisarvot katselmusmittauksessa.

*Taulukko 7.7.* Teollisuuskohteessa LM-10 mitattujen magneettikenttien arvot yhden metrin korkeudelta.

*Table 7.7.* Magnetic fields measured from the industrial place LM-10 at the height of one meter.

Mittauspiste	B, $\mu\text{T}$	Mittauspiste	B, $\mu\text{T}$
1. Sähkökeskus	1,91	15. Kompressori	0,74
2. Moottori	2,71	16. Kompressori	0,77
3. Moottori	0,72	17. Kompressori	1,94
4. Moottori	0,50	18. Moottori	2,03
5. Moottori	0,83	19. Moottori	0,88
6. Moottori	1,35	20. Moottori	0,43
7. Moottori	0,23	21. Moottori	1,80
8. Moottori	0,77	22. Moottori	1,24
9. Moottori	0,26	23. Moottori	0,64
10. Sähkökeskus	2,05	24. Moottori	0,40
11. Sähkökeskus	1,24	25. Moottori	6,40
12. Jäävesikone	1,10	26. Moottori	3,92
13. Jäävesikone	0,57	27. Moottori	3,60
14. Jäävesikone	1,32	28. Moottori	3,07

Suurimmat magneettivuon tiheyden arvot mitattiin kompressoria käyttävän moottorin ympäriltä (pisteet 25-28). Moottori kuitenkin sammutettiin katselmusmittauksen jälkeen, eikä siitä näin ollen voitu tehdä laajakaistamittauksia. Laajakaistamittauksien paikoiksi valittiinkin pisteet 2 (moottori) ja 10 (sähkökeskus). Seuraavassa kuvassa 7.16 on esitetty pisteestä 2 mitatut magneettivuon tiheyden taajuuskomponentit.



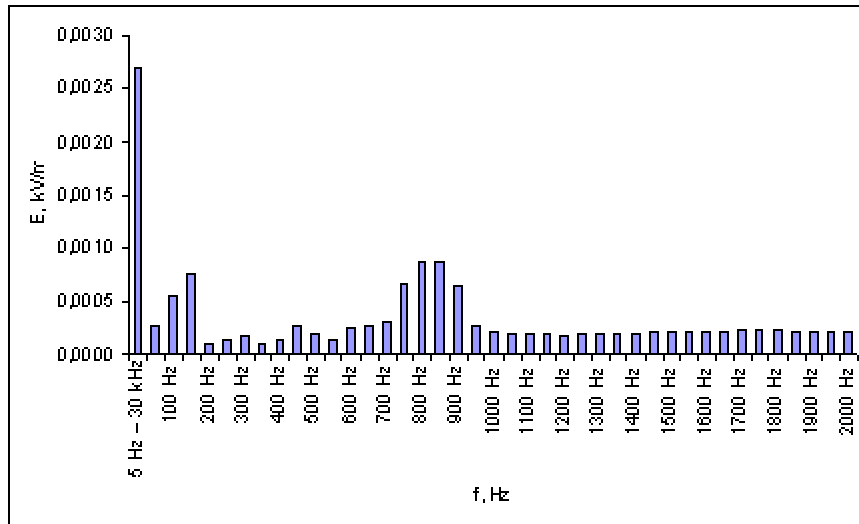
*Kuva 7.16.* Magneettivuon tiheyden taajuuskomponentit teollisuuskohteen LM-10 moottorin lähellä.

*Figure 7.16.* Harmonics of the magnetic flux density for the industrial place LM-10 near motor.

Kuvasta havaitaan, että magneettikentässä esiintyy runsaasti kohinasta erottuvia yliaaltoja. Myös parillisia yliaaltoja esiintyy runsaasti. Esimerkiksi 700 Hz magneettikentän arvo on lähes yhtä suuri kuin 50 Hz arvo. Kuitenkin kuormitusvirroissa esiintyi liitteen 2 mukaisesti parillisia yliaaltoja vain atk-huoneeseen lähtevässä syötössä. Pääkeskuksessa 2, josta moottoria syötetään, ei kuitenkaan esiintynyt parillisia yliaaltoja.

Magneettivuon tiheyden perinteinen tehollisarvo oli  $3,00 \mu\text{T}$ . ICNIRP:n suosituksen mukaisesti yksittäisten harmonisten kenttien menetelmällä lasketut altistumissuhteet olivat 0,10 (taajuudet 50 Hz:n välein 2000 Hz:iin saakka) ja 0,01 (taajuudet 100 Hz:n välein 650 Hz:iin saakka). Samasta pisteestä STUK:n kehittämällä STM:n asetuksen mukaisella menetelmällä määritetty altistumissuhde oli 0,01. Tulosten perusteella voidaan sanoa, että yliaaltojen huippuarvot eivät esiinny samaan aikaan.

Sähkökenttä mitattiin samasta pisteestä 2. Seuraavassa kuvassa 7.17 on esitetty pisteestä 2 mitatut sähkökentän voimakkuuden taajuuskomponentit.

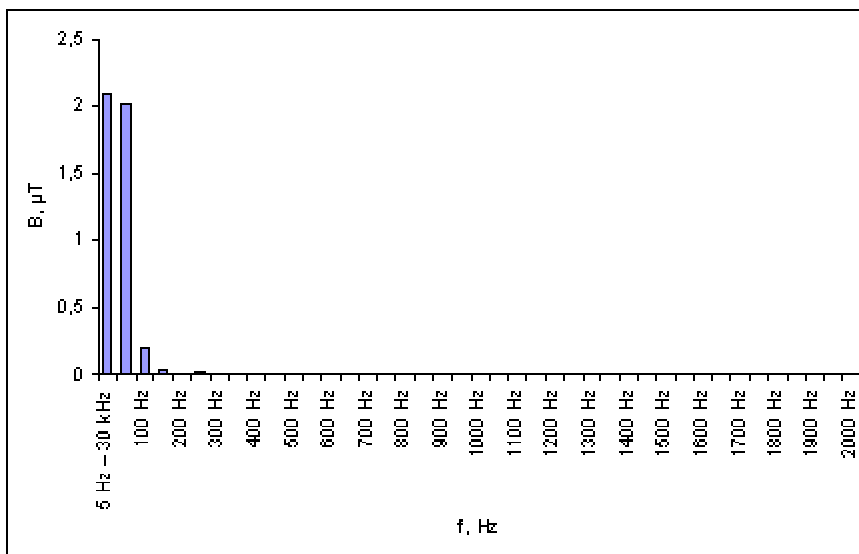


*Kuva 7.17.* Sähkökentän voimakkuuden taajuuskomponentit teollisuuskohteen LM-10 moottorin lähellä.

*Figure 7.17.* Harmonics of electric field strength for the industrial place LM-10 near motor.

Sähkökentän voimakkuuden perinteinen tehollisarvo oli 0,0027 kV/m. Sähkökentässä voidaan havaita 3. ja 15. - 18. yliaaltoja, joiden taso ylittää selvästi kohinan tason. Taajuuskomponenteista ICNIRP:n suosituksen mukaisesti yksittäisten harmonisten kenttien menetelmällä lasketut altistumissuhteet olivat 0,01 (taajuudet 50 Hz:n välein 2000 Hz:iin saakka) ja likimain nolla (taajuudet 100 Hz:n välein 650 Hz:iin saakka). Arvojen erot johtuvat yliaalloista ja kohinasta.

Seuraavaksi mitattiin magneettikenttä pisteestä 10 sähköpääkeskuksen 2 läheisyydestä. Kuvassa 7.18 on esitetty pisteestä 10 mitatut magneettivuon tiheyden taajuuskomponentit.



*Kuva 7.18.* Magneettivuon tiheyden taajuuskomponentit teollisuuskohteen LM-10 pääkeskuksen lähellä.

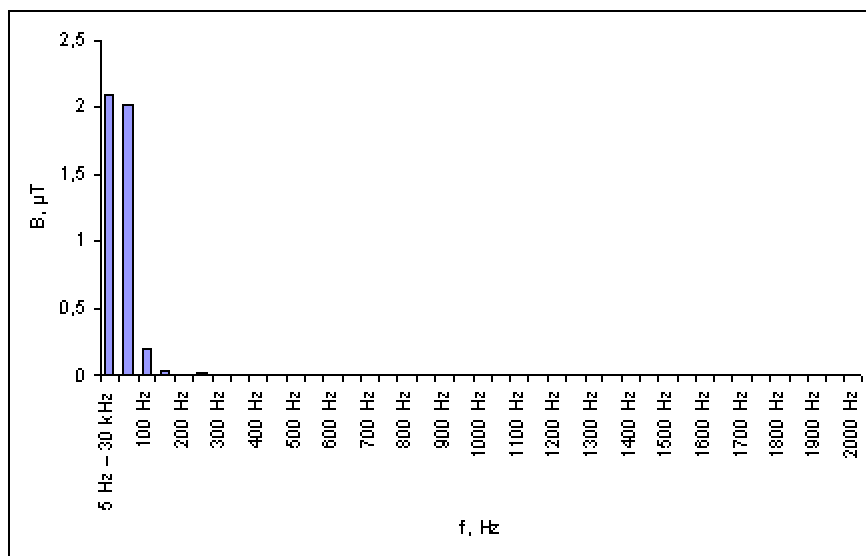
Figure 7.18. Harmonics of the magnetic flux density for the industrial place LM-10 near main electricity centre.

Kuten edellä, myöskään tässä tapauksessa selvää syytä parillisten yliaaltojen esiintymiseen ei löydetty. Magneettivuon tiheyden perinteinen tehollisarvo oli  $2,09 \mu\text{T}$ . ICNIRP:n suosituksen mukaisesti yksittäisten harmonisten kenttien menetelmällä lasketut altistumissuhteet olivat 0,01 (taajuudet 50 Hz:n välein 2000 Hz:iin saakka) ja likimain nolla (taajuudet 100 Hz:n välein 650 Hz:iin saakka). Samasta pisteestä STUK:n kehittämällä STM:n asetuksen mukaisella menetelmällä määritetty altistumissuhde oli likimain nolla.

Sähkökenttä mitattiin samasta pisteestä 10. Sähkökentän voimakkuuden perinteinen tehollisarvo oli  $0,0022 \text{ kV/m}$ . Taajuuskomponenteista ICNIRP:n suosituksen mukaisesti yksittäisten harmonisten kenttien menetelmällä lasketut altistumissuhteet olivat 0,01 (taajuudet 50 Hz:n välein 2000 Hz:iin saakka) ja likimain nolla (taajuudet 100 Hz:n välein 650 Hz:iin saakka). Arvojen erot johtuvat yliaalloista ja kohinasta.

### 7.3 Metalliteollisuuden yhtiön LM-11 laajakaistamittaus

Teollisuusmittaus LM-11 tehtiin metalliteollisuuden yrityksessä. Tehtaalla ei saanut liikesalaisuuksien vuoksi kuvata, joten kohteista ei ole valokuvia. Syöttökiskosta mitatut kuormitusvirrat on esitetty liitteessä 3. Sähkö- ja magneettikenttämittauksiin valittiin laakerien lämmittämiseen tarkoitettu induktiokuumentin ja CNC-sorviin (sorvissa tietokoneohjattu numeerinen ohjaus) kuulunut oikosulkumoottori. Seuraavassa kuvassa 7.19 on esitetty mittauspisteet induktiokuumentimen ympäriltä. Piste 3 on induktiokuumentimen yläpuolella yhden metrin etäisyydellä kuumentimesta.

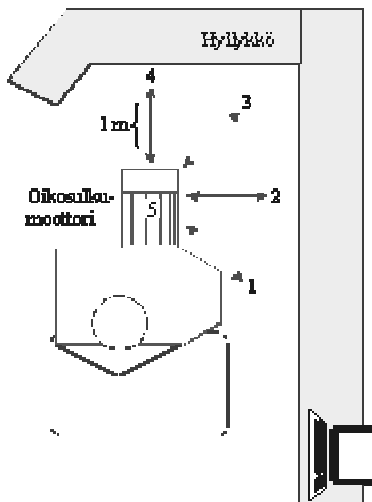


Kuva 7.19. Mittauspisteiden sijainti teollisuuskohteessa LM-11 (induktiokuumentin).

Figure 7.19. Location of the measurement points in the industrial place LM-11 (induction heater).

Magneettikentän perinteiset tehollisarvot olivat 115  $\mu\text{T}$  (piste 1), 70,7  $\mu\text{T}$  (piste 2) ja 62,6  $\mu\text{T}$  (piste 3). Pisteestä 1 STUK:n kehittämällä STM:n asetuksen mukaisella menetelmällä määritetty altistumissuhde oli 0,12.

Sähkökentän voimakkuuden perinteinen tehollisarvo oli 0,0090 kV/m. Taajuuskomponenteista ICNIRP:n 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). Arvojen erot johtuvat siitä, että taajuuden kasvaessa yliaallon ja myös kohinan merkitys kasvaa altistumissuhdetta laskettaessa. Seuraavassa kuvassa 7.20 on esitetty mittauspisteet metallinjyrsimen oikosulkumoottorin ympäriltä.



*Kuva 7.20.* Mittauspisteiden sijainti teollisuuskohteessa LM-11 oikosulkumoottorin ympärillä.

*Figure 7.20.* Location of the measurement points in the industrial place LM-11 around a short circuit motor.

Mittauspisteet sijaitsivat moottorista yhden metrin etäisyydellä kohdassa, josta työntekijä saattoi kiertää jyrsintä. Metallinjyrsimen sähkönsyöttö tuli ylhäältä päin. Pääasiassa työntekijä kuitenkin istui näyttöpäätteen vieressä, jossa kohdin magneettikenttä oli selvästi mittauspisteistä mitattuja arvoja pienempi. Seuraavassa taulukossa 7.8 on esitetty magneettivuon tiheyden perinteiset tehollisarvot kuvan mittauspisteissä.

*Taulukko 7.8.* Teollisuuskohteessa LM-11 (oikosulkumoottori) mitattujen magneettikenttien arvot yhden metrin korkeudelta.

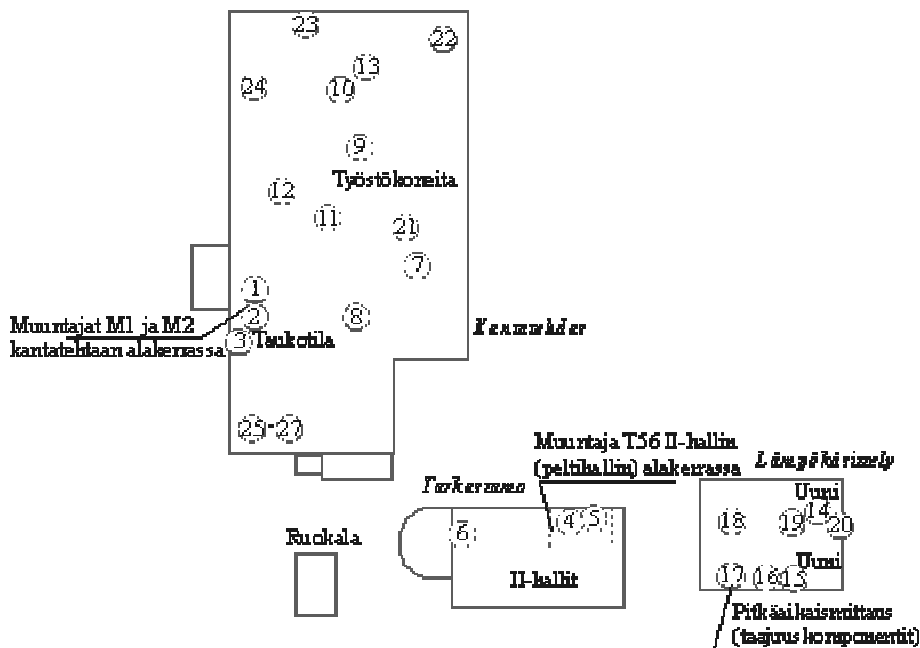
*Table 7.8.* Magnetic fields measured from the industrial place LM-11 (short circuit motor) at the height of one meter.

Mittauspiste	B, $\mu\text{T}$	Mittauspiste	B, $\mu\text{T}$
1	2,1	4	1,7
2	3,6	5	2,2
3	2,0		

Pisteestä 2 STUK:n kehittämällä STM:n asetuksen mukaisella menetelmällä määritetty painotetun kentän altistumissuhde oli 0,01. Samasta pisteestä mitattiin sähkökentän voimakkuudeksi 0,0001 kV/m, joka on käytännössä kohinaa.

#### 7.4 Metalliteollisuuden yhtiön LM-12 laajakaistamittaus

Teollisuusmittaus LM-12 tehtiin metalliteollisuuden yrityksessä. Tehtaalla ei saanut liikesalaisuuksien vuoksi kuvata, joten kohteista ei ole valokuvia. Muuntamoilta 1 ja 2 sekä muuntamolta T56 mitatut kuormitusvirrat on esitetty liitteessä 4. Mittaukset aloitettiin tekemällä katselmusmittaus suurien kenttien löytämiseksi. Seuraavassa kuvassa 7.21 on esitetty layout -piirustus tehtaasta ja mittauspisteet. Kuvaa seuraavassa taulukossa 7.9 on esitetty magneettivuon tiheyden arvot mittauspisteistä.



Kuva 7.21. Mittauspisteiden sijainti teollisuuskohteessa LM-12 (katselmusmittaus).

Figure 7.21. Location of the measurement points in the industrial place LM-12 (survey measurement).

Taulukko 7.9. Teollisuuskohteessa LM-12 mitattujen magneettivuon tiheyksien arvot 1 m korkeudelta.

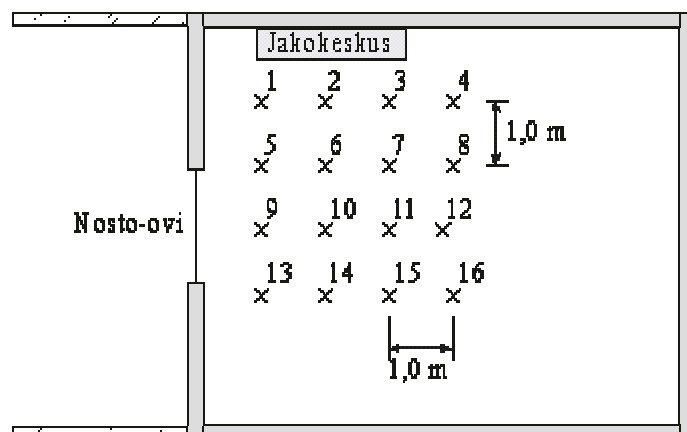
Table 7.9. Magnetic fields measured from the industrial place LM-12 at the height of 1 m.

Mittauspiste	B, $\mu$ T	Kuvaus
1	0,84	Hammastuskone, etäisyys 5 m
2	7,22	Hammastuskone, kulkureitti, etäisyys 1 m
3	1,38	Taukotila, muuntamon yläpuolella
4	1,12	Ilmanvaihtokeskus, etäisyys 1 m, muuntamon T56 yläpuolelta

5	3,27	Mmon yläpuolelta
6	0,03	Peltihalli, kulkureitti
7	0,35	Hammastuskone, etäisyys 1 m
8	0,38	CNC-sorvi, etäisyys 1 m
9	0,19	Hammastuskone, etäisyys 1 m
10	0,05	Hammastuskone, etäisyys 1 m
11	0,08	Kärkisorvi, etäisyys 1 m
12	0,27	Hammastuskone, etäisyys 1 m
13	0,64	Hammastuskone, etäisyys 1 m
14	0,45	Uuni 2, vastukset sisässä, etäisyys 1 m
15	0,32	Uuni 3, etäisyys 1 m
16	10,65	Uuni 1, kulkuväylä, etäisyys 30 cm
17	25,55	Uuni 6, ohjauspaneelin edestä kulkuväylältä, etäisyys 0,5 m
18	2,97	Kammiouunien välistä, kulkuväylä
19	3,22	Uuni 5, etäisyys 2 m
20	4,57	Uuni 2, ohjauskopin edestä, taajuusmuuttajan etäisyys 2 m
21	1,25	Hiomakone
22	0,19	Karusellisorvi
23	0,20	CNC-sorvi
24	0,09	Terähiomakone
25	2,54	Magnetointilaite, etäisyys 1 m
26	119,7	Käsimagnetointilaite, ies kädessä, kesto noin 5 s, etäisyys 0,4 m
27	161,0	Käsimagnetointilaite, ies kädessä, kesto noin 5 s, etäisyys 0,4 m

Suurimmat magneettivuon tiheyden arvot mitattiin käsimagnetointilaitetta käytettäessä. Käsimagnetointilaite on kerralla käytössä 5 - 10 sekuntia, joten siitä ei voinut tehdä yksittäisten yliaaltokomponenttien mittausta tai STUK:n menetelmän mukaista painotetun kentän 10 minuutin mittausta.

Koska käsimagnetointilaitetta käytettäessä altistus oli hyvin lyhytaikaista päätettiin laajakaistaiset mittaukset tehdä pisteissä 5 (muuntamon T56 yläpuolinen tila) ja 17 (tyristoriohjauksen ohjauspaneeli). Seuraavassa kuvassa 7.22 on esitetty muuntamon yläpuolisen tilan mittauspisteet.



*Kuva 7.22.* Mittauspisteiden sijainti teollisuuskohteessa LM-12 (peltihallin tarkastamo muuntamon T56 yläpuolelta).

*Figure 7.22.* Location of the measurement points in the industrial place LM-12 (testing station of the sheet shed above indoor distribution substation T56).

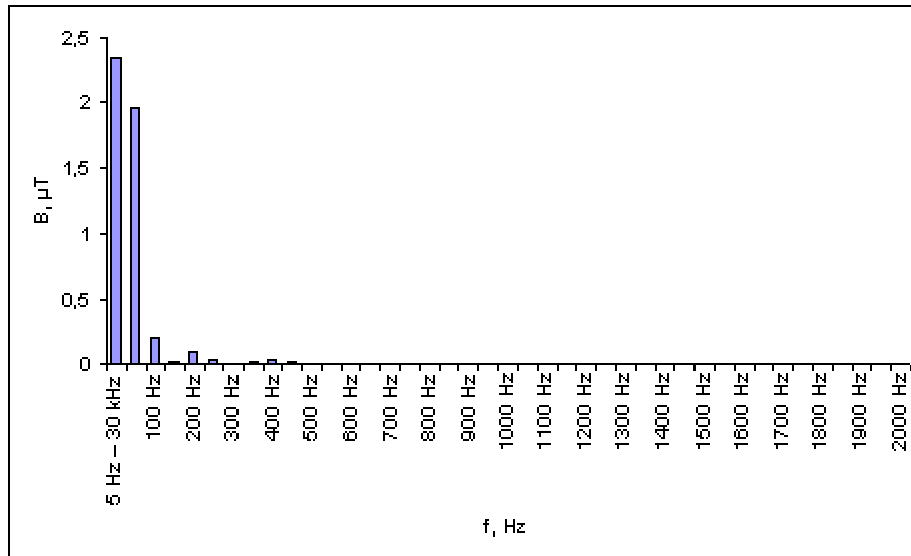
Seuraavassa taulukossa 7.10 on esitetty magneettivuon tiheyden arvot mittauspisteistä.

*Taulukko 7.10.* Teollisuuskohteessa LM-12 mitattujen magneettivuon tiheyksien arvot yhden metrin korkeudelta.

*Table 7.10.* Magnetic fields measured from the industrial place LM-12 at the height of one meter.

Mittauspiste	B, $\mu\text{T}$	Mittauspiste	B, $\mu\text{T}$
1	1,31	9	0,64
2	1,85	10	0,94
3	3,07	11	1,29
4	2,51	12	1,61
5	0,96	13	0,43
6	1,82	14	0,54
7	3,46	15	0,69
8	3,76	16	0,52

Suurin magneettikentän arvo mitattiin pisteestä 8. Seuraavassa kuvassa 7.23 on esitetty pisteestä 8 mitatut magneettivuon tiheyden taajuuskomponentit.



*Kuva 7.23.* Magneettivuon tiheyden taajuuskomponentit teollisuuskohteen LM-12 muuntamon yläpuolisessa tilassa.

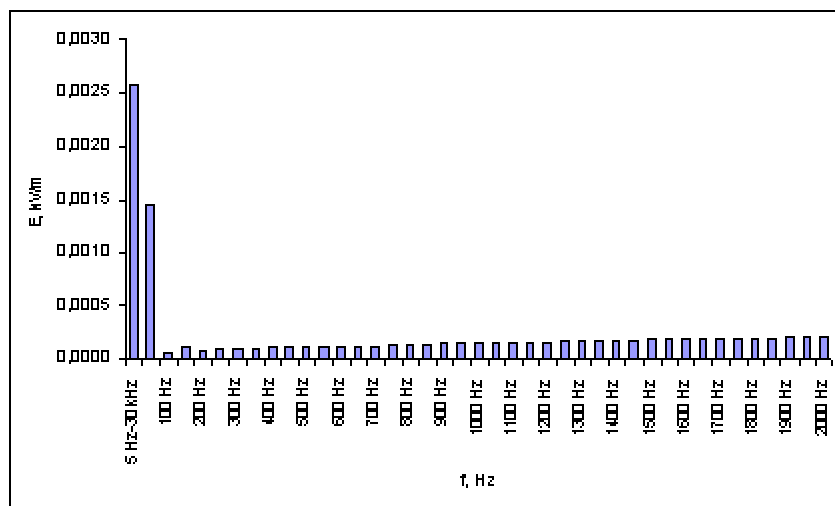
*Figure 7.23.* Harmonics of the magnetic flux density for the industrial place LM-12 in the space above indoor distribution substation.

Magneettivuon tiheyden perinteinen tehollisarvo oli 2,35  $\mu\text{T}$ . Magneettikentän perinteinen tehollisarvo (5 Hz - 30 kHz) oli huomattavasti suurempi kuin pelkän 50 Hz arvo. Lisäksi kentässä oli melko suuret 100 Hz ja 200 Hz yliaallot.

Magneettikentästä mitattujen yliaaltojen arveltiin johtuvan muuntamon syöttämästä lämpökäsittelyuunista, koska niiden yhteydessä virrassa saattaa olla parillisia yliaaltoja. Myös muuntamon T56 kuormitusvirrassa, joka on esitetty liitteessä 4, voidaan havaita huomattavia parillisia yliaaltokomponentteja.

ICNIRP:n suosituksen mukaisesti yksittäisten harmonisten kenttien menetelmällä lasketut altistumissuhteet olivat 0,02 (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). Samasta pisteestä STUK:n kehittämällä STM:n asetuksen mukaisella menetelmällä määritetty altistumissuhde oli likimain nolla.

Seuraavassa kuvassa 7.24 on esitetty samasta pisteestä mitatut sähkökentän voimakkuuden taajuuskomponentit.

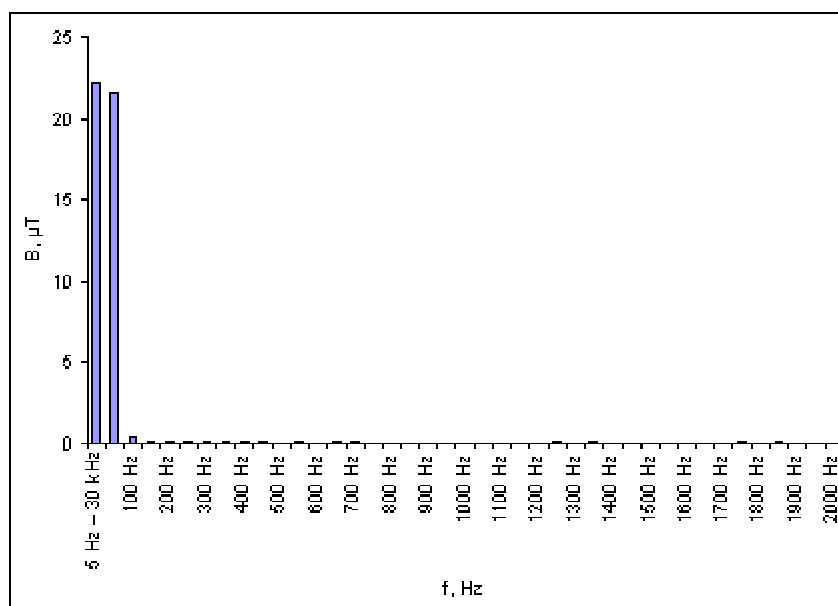


*Kuva 7.24.* Sähkökentän voimakkuuden taajuuskomponentit teollisuuskohteen LM-12 muuntamon yläpuolisessa tilassa.

*Figure 7.24.* Harmonics of electric field strength for the industrial place LM-12 in the space above indoor distribution substation.

Sähkökentän voimakkuuden perinteinen tehollisarvo oli 0,0026 kV/m. Taajuuskomponenteista ICNIRP:n suosituksen mukaisesti 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). Yliaallot ja kohina vaikuttavat arvojen eroon.

Seuraavassa kuvassa 7.25 on esitetty magneettivuon tiheyden taajuuskomponentit uunin tyristoriohjauksen ohjauspaneelin edestä (piste 17).



*Kuva 7.25.* Magneettivuon tiheyden taajuuskomponentit teollisuuskohteessa LM-12 (tyristoriohjaus).

*Figure 7.25.* Harmonics of the magnetic flux density in the industrial place LM-12 (thyristor controller).

Magneettivuon tiheyden perinteinen tehollisarvo oli  $22,11 \mu\text{T}$ . Ainoa magneettikentästä selvästi erottuva yliaalto oli 2. yliaalto, jonka esiintyminen johtui lämpökäsittelyuunista. Liitteessä 4 esitetystä muuntamon T56 kuormitusvirrassa voidaan myös havaita selvä 2. Yliaaltokomponentti. ICNIRP:n suosituksen mukaisesti yksittäisten harmonisten kenttien menetelmällä lasketut altistumissuhteet olivat 0,07 (taajuudet on laskettu 50 Hz:n välein 2000 Hz:iin saakka) ja 0,05 (taajuudet on laskettu 100 Hz:n välein 650 Hz:iin saakka). Samasta pisteestä STUK:n kehittämällä STM:n asetuksen mukaisella menetelmällä määritetty altistumissuhde oli 0,06. Arvojen erot ovat varsin pieniä.

Sähkökentän voimakkuuden perinteinen tehollisarvo oli  $0,0025 \text{ kV/m}$ . Taajuuskomponenteista ICNIRP:n 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).

### **7.5 Metalliteollisuuden yhtiön LM-13 laajakaistamittaus**

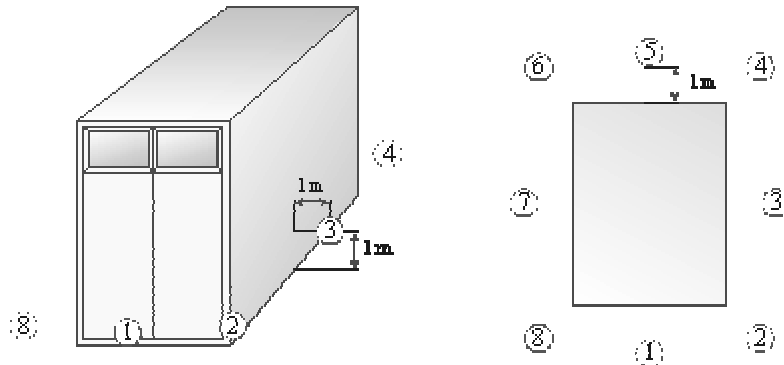
Teollisuusmittaus LM-13 tehtiin metalliteollisuuden yrityksessä, jossa muun muassa sulatetaan ja lämmitetään metallia vastus- ja valokaariuunilla. Uunien syötöistä ja tehdasta syöttävästä jakelumuuntajasta mitatut kuormitusvirrat on esitetty liitteessä 5. Uunien kuormitusvirrat vaihtelivat mittauksessa huomattavasti. Kuvassa 7.26 on esitetty valokuva tehtaan muuntamosta, mutta valokuvia ei esitetä tuotantotiloista.



*Kuva 7.26.* Valokuva teollisuuskohteen LM-13 muuntamosta (metalliteollisuus).

*Figure 7.26.* Photograph from the indoor distribution substation of the industrial place LM-13 (metal industry).

Mittaukset aloitettiin tekemällä perinteisen tehollisarvon mittauksia sellaisista kohteista, joissa oletettiin löytyvän suuria kenttiä tai paljon yliaaltoja. Seuraavassa kuvassa 7.27 on esitetty mittauspisteet vastusuunin lähellä tehdystä mittauksesta.



*Kuva 7.27.* Mittauspisteiden sijainti teollisuuskohteen LM-13 vastusuunilla.

*Figure 7.27.* Location of the measurement points in the industrial place LM-13 in resistance furnace.

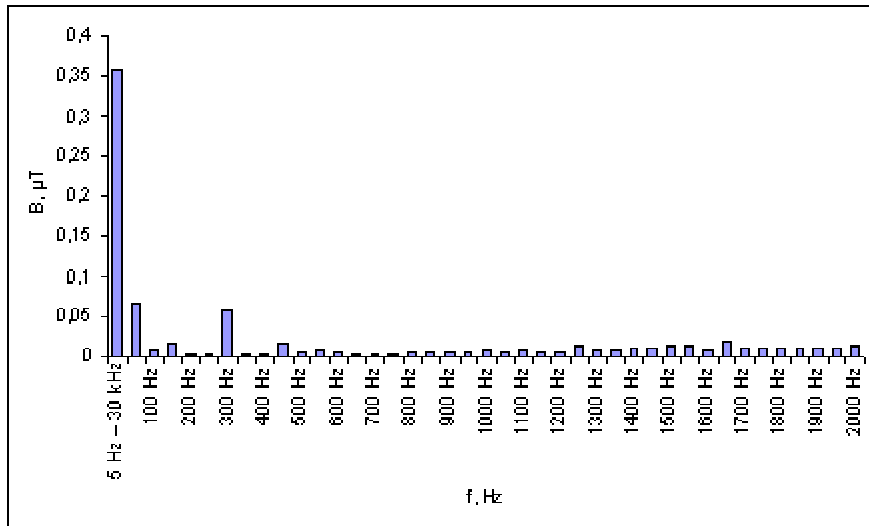
Seuraavassa taulukossa 7.11 on esitetty sähkökentän voimakkuuden ja magneettivuon tiheyden arvot mittauspisteistä.

*Taulukko 7.11.* Teollisuuskohteessa LM-13 vastusuunilta mitattujen sähkökentän voimakkuuden ja magneettivuon tiheyden arvot yhden metrin korkeudelta.

*Table 7.11.* Electric and magnetic fields measured from the resistance furnace of the industrial place LM-13 at the height of one meter.

Mittauspiste	E, kV/m	B, $\mu\text{T}$	Mittauspiste	E, kV/m	B, $\mu\text{T}$
1	0,002	0,35	5	0,004	0,15
2	0,003	0,31	6	0,003	0,21
3	0,003	0,47	7	0,002	0,67
4	0,004	0,07	8	0,002	0,27

Suurin magneettikentän arvo mitattiin pisteestä 7. Seuraavassa kuvassa 7.28 on esitetty pisteestä 7 mitatut magneettivuon tiheyden taajuuskomponentit.



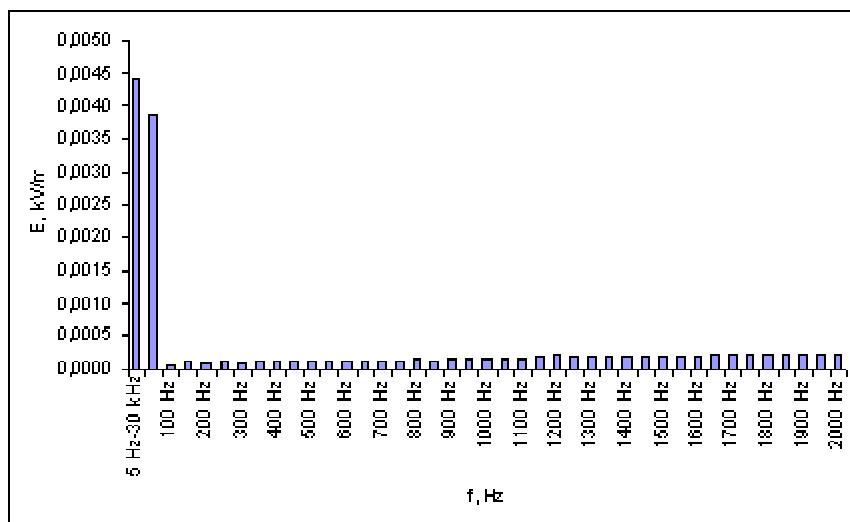
*Kuva 7.28.* Magneettikentän taajuuskomponentit teollisuuskohteessa LM-13 (vastusuuni).

*Figure 7.28.* Harmonics of the magnetic field in the industrial place LM-13 (resistance furnace).

Kuvasta havaitaan, että magneettikentässä esiintyy runsaasti yliaaltoja, joiden arvot ovat kuitenkin varsin pieniä. Tyypillisten teollisuusverkossa esiintyvien yliaaltojen lisäksi magneettikentässä oli myös parillisia yliaaltoja. Kuormitusvirrassa, joka on esitetty liitteessä 5, esiintyy 2. yliaaltokomponentti, mutta esimerkiksi kentän 6. yliaallon esiintymiselle ei varsinaista syytä löydetty.

Magneettivuon tiheyden perinteinen tehollisarvo oli  $0,36 \mu\text{T}$ . ICNIRP:n suosituksen mukaisesti yksittäisten harmonisten kenttien menetelmällä laskettu altistumissuhde oli 0,01 (taajuudet 50 Hz:n välein 2000 Hz:iin saakka). Kun taajuudet määritettiin 100 Hz:n välein 650 Hz:iin saakka, altistumissuhde oli likimain nolla. Myös samasta pisteestä STUK:n kehittämällä STM:n asetuksen mukaisella menetelmällä määritetty altistumissuhde oli likimain nolla. Arvoilla ei ollut kovin suurta eroa.

Suurin sähkökentän arvo mitattiin pisteestä 4. Seuraavassa kuvassa 7.29 on esitetty pisteestä 4 mitatut magneettivuon tiheyden taajuuskomponentit.

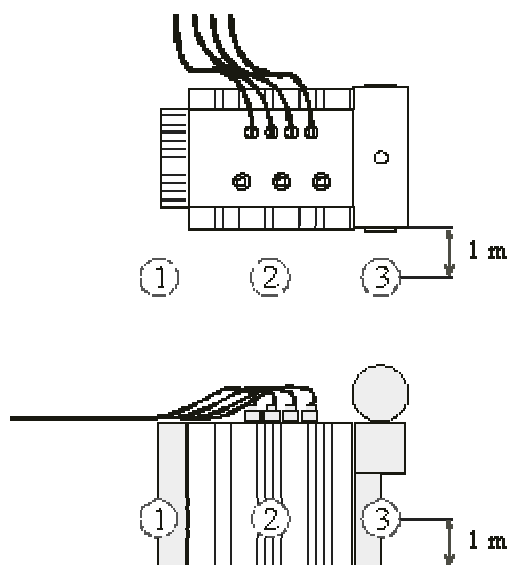


*Kuva 7.29.* Sähkökentän voimakkuuden taajuuskomponentit teollisuuskohteessa LM-13 (vastusuuni).

*Figure 7.29.* Harmonics of electric field strength in the industrial place LM-13 (resistance furnace).

Sähkökentän voimakkuuden perinteinen tehollisarvo oli 0,0044 kV/m. Taajuuskomponenteista ICNIRP:n 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). Arvojen erot johtuvat yliaalloista ja kohinasta.

Seuraavaksi mittauksia tehtiin teollisuushallin sisällä olleen muuntajan (20/0,4 kV, 600 kVA) läheltä. Seuraavassa kuvassa 7.30 on esitetty mittauspisteet muuntajan lähellä tehdystä mittauksesta.

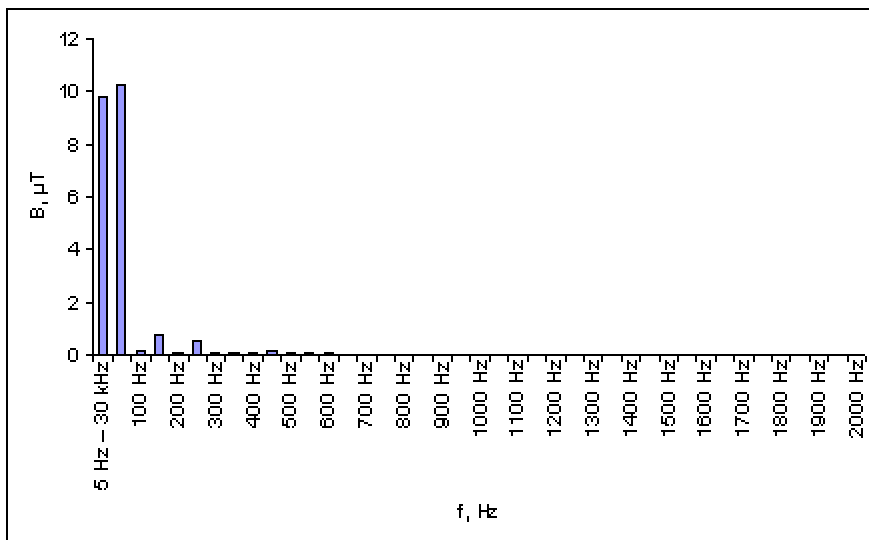


*Kuva 7.30.* Mittauspisteiden sijainti teollisuuskohteessa LM-13 (muuntaja).

Figure 7.30. Location of the measurement points in the industrial place LM-13 (transformer).

Mitatut kolme pistettä sijaittivat sähkötilassa muuntajan edessä niin, että sähköasentaja saattoi mittauspisteistä tarkastaa muuntajan kuntoa. Mittaajien turvallisuuden takia mittauksia ei tehty tämän lähempää muuntajia. Syöttökaapelit lähtivät muuntajan taakse, joten syöttökaapelin läheltä ei päästy mittaamaan. Tähän vaikutti myös muuntajan 20 kV napojen läheisyys.

Magneettivuon tiheyden arvot olivat 7,57  $\mu\text{T}$  (piste 1), 9,35  $\mu\text{T}$  (2) ja 4,99  $\mu\text{T}$  (3). Seuraavassa kuvassa 7.31 on esitetty pisteestä 2 mitatut magneettivuon tiheyden taajuuskomponentit.



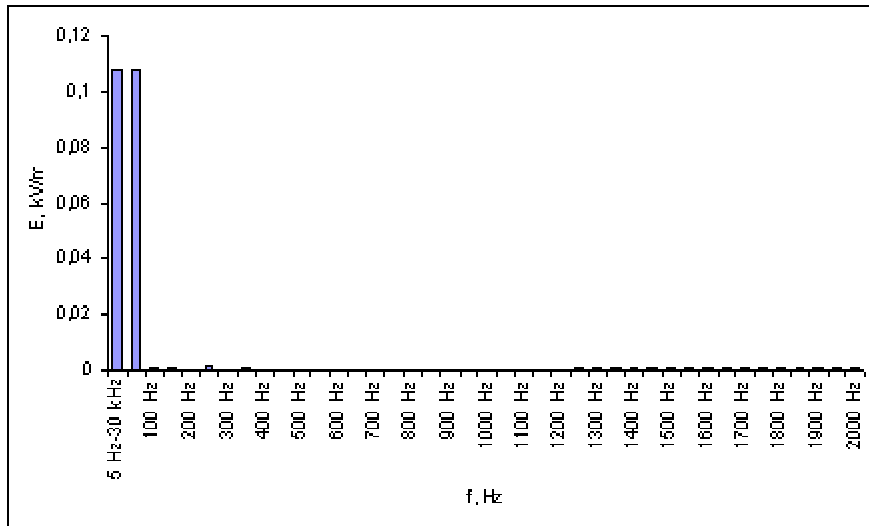
Kuva 7.31. Magneettivuon tiheyden taajuuskomponentit teollisuuskohteessa LM-13 (muuntaja).

Figure 7.31. Harmonics of the magnetic flux density in the industrial place LM-13 (transformer).

Kuvasta havaitaan, että magneettikentässä esiintyy joitakin tyypillisiä teollisuusverkon yliaaltoja. Yliaaltokomponentit olivat samoja, joita oli muuntajan kuormitusvirrassa liitteessä 5.

Magneettivuon tiheyden perinteinen tehollisarvo oli 9,85  $\mu\text{T}$ . ICNIRP:n suosituksen mukaisesti yksittäisten harmonisten kenttien menetelmällä lasketut altistumissuhteet olivat 0,06 (taajuudet 50 Hz:n välein 2000 Hz:iin saakka) ja 0,04 (taajuudet 100 Hz:n välein 650 Hz:iin saakka). Myös samasta pisteestä STUK:n kehittämällä STM:n asetuksen mukaisella menetelmällä määritetty altistumissuhde oli 0,04. Arvoilla ei ollut kovin suurta eroa.

Sähkökentän voimakkuuden arvot olivat 0,11 kV/m (piste 1), 0,08 kV/m (piste 2) ja 0,02 kV/m (piste 3). Seuraavassa kuvassa 7.32 on esitetty pisteestä 1 mitatut sähkökentän voimakkuuden taajuuskomponentit.



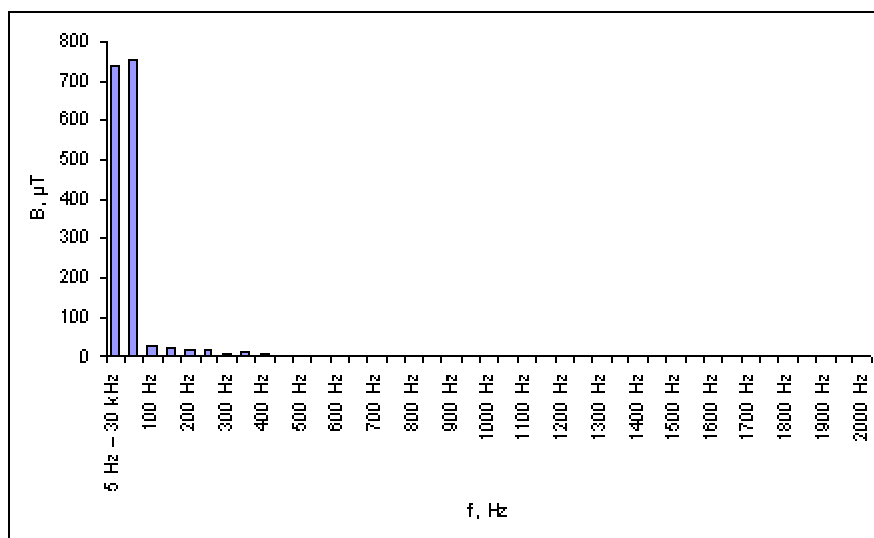
*Kuva 7.32.* Sähkökentän taajuuskomponentit teollisuuskohteessa LM-13 (muuntaja).

*Figure 7.32.* Harmonics of electric field in the industrial place LM-13 (transformer).

Sähkökentässä ei esiintynyt juurikaan yliaaltoja. Sähkökentän voimakkuuden perinteinen tehollisarvo oli 0,11 kV/m. Myös 50 Hz arvo ylitti selvästi mittarin kohinatason.

Taajuuskomponenteista 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). Arvojen erot johtuvat kuitenkin kohinasta, jonka voi havaita myös kuvasta.

Seuraavaksi mittauksia tehtiin valokaariuunin (VKU) D läheisyydessä. Mittaukset tehtiin yhden metrin etäisyydellä uunin pinnasta uunia kiertävältä käytävältä. Suurin magneettikenttä oli 38  $\mu$ T. Sen jälkeen mitattiin magneettikenttä metrin etäisyydeltä syöttökaapelista paikasta, jossa työntekijät saattoivat altistua valokaariuunin syöttökaapelin aiheuttamille kentille. Kuvassa 7.33 on esitetty tästä pisteestä mitatut magneettivuon tiheyden taajuuskomponentit.



*Kuva 7.33.* Magneettikentän taajuuskomponentit teollisuuskohteessa LM-13 (VKU D).

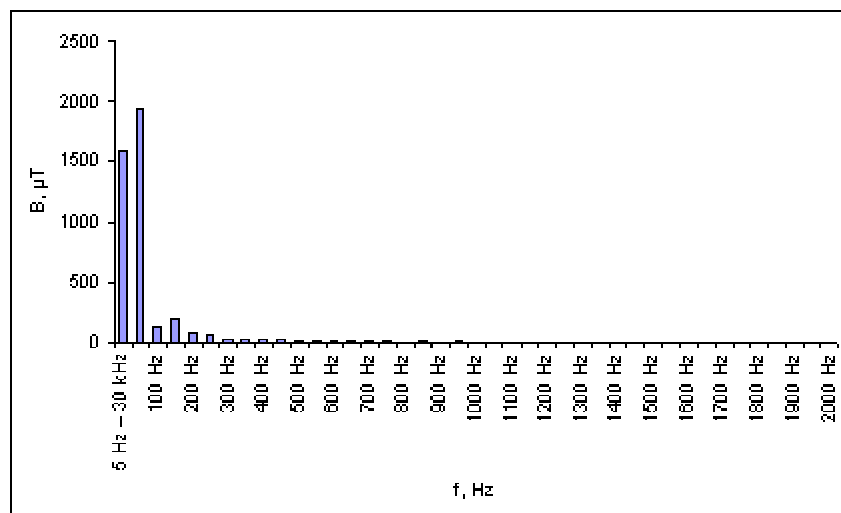
Figure 7.33. Harmonics of the magnetic flux density in the industrial place LM-13 (arc furnace D).

Kuvasta havaitaan, että magneettikentässä esiintyy jonkin verran tyypillisiä teollisuusverkon yliaaltoja ja sen lisäksi myös parillisia yliaaltoja. Myös valokaariuunin D kuormitusvirroissa esiintyi samoja yliaaltotaajuuksia, joten yksi parillisten yliaaltojen esiintymisen syy oli kuormitusvirta. Toinen mahdollinen syy magneettikentän parillisten yliaaltojen esiintymisen on mittarin kohinasta johtuva päästökaistan leviäminen yksittäisiä yliaaltoja mitattaessa, koska suurimmat parilliset yliaallot esiintyivät vielä suuremman parittoman yliaaltotaajuuden lähellä. Magneettikentän perinteinen tehollisarvo (5 Hz - 30 kHz) on pienempi kuin pelkkä 50 Hz arvo, joten magneettikenttäkomponentit osittain vähentävät toisiaan.

Magneettivuon tiheyden perinteinen tehollisarvo oli 739  $\mu\text{T}$ . ICNIRP:n suosituksen mukaisesti yksittäisten harmonisten kenttien menetelmällä lasketut altistumissuhteet olivat 3,55 (taajuudet 50 Hz:n välein 2000 Hz:iin saakka) ja 2,23 (taajuudet 100 Hz:n välein 650 Hz:iin saakka). Arvot ylittivät selvästi ICNIRP:n suosituksen suositusarvot, koska ylitys on jo 50 Hz arvossa.

Samasta pisteestä tehtiin myös sähkökenttämittaus. Sähkökentässä esiintyy jonkin verran yliaaltoja sekä kohinaa. Sähkökentän voimakkuuden perinteinen tehollisarvo oli 0,070 kV/m. Taajuuskomponenteista ICNIRP:n suosituksen mukaisesti yksittäisten harmonisten kenttien menetelmällä lasketut altistumissuhteet olivat 0,07 (taajuudet on laskettu 50 Hz:n välein 2000 Hz:iin saakka) ja 0,03 (taajuudet on laskettu 100 Hz:n välein 650 Hz:iin saakka). Arvojen erot johtuvat kohinasta.

Viimeisenä tehtiin vastaava mittaus valokaariuunille A. Mittaus tehtiin puolen metrin etäisyydeltä syöttökaapelista. Työntekijät saattoivat tällä kohtaa altistua valokaariuunin syöttökaapelin aiheuttamille kentille. Seuraavassa kuvassa 7.34 on esitetty tästä pisteestä mitatut magneettivuon tiheyden taajuuskomponentit.

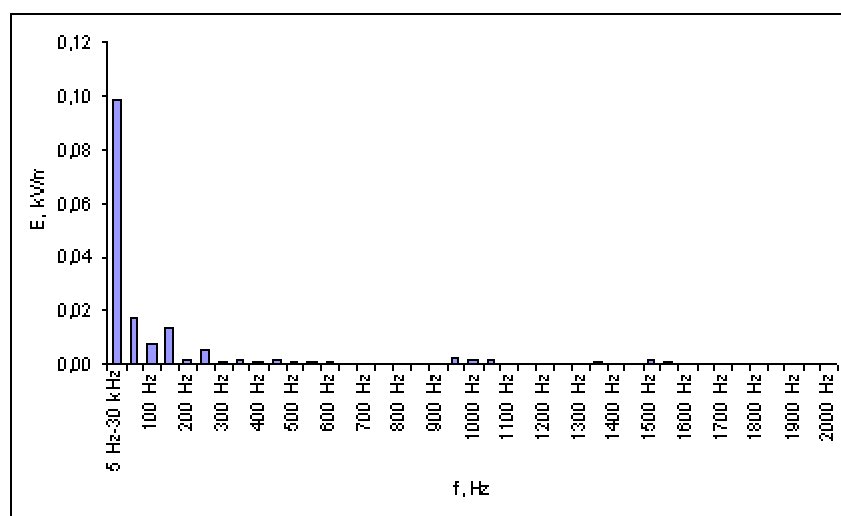


Kuva 7.34. Magneettikentän taajuuskomponentit teollisuuskohteessa LM-13 (VKU A).

Figure 7.34. Harmonics of the magnetic field in the industrial place LM-13 (arc furnace A).

Kuvasta havaitaan, että magneettikentässä esiintyy jonkin verran yliaaltoja. Myös valokaariuunin A kuormitusvirroissa esiintyi samoja yliaaltotaajuuksia, joten parillisten yliaaltojen esiintymisen syy oli kuormitusvirta. Magneettikentän perinteinen tehollisarvo (5 Hz - 30 kHz) on selvästi pienempi kuin pelkkä 50 Hz arvo, joten magneettikenttäkomponentit vähentävät huomattavasti toisiaan. Magneettivuon tiheyden perinteinen tehollisarvo oli 1585  $\mu\text{T}$ . ICNIRP:n suosituksen mukaisesti yksittäisten harmonisten kenttien menetelmällä lasketut altistumissuhteet olivat 12,0 (taajuuudet 50 Hz:n välein 2000 Hz:iin saakka) ja 6,83 (taajuuudet 100 Hz:n välein 650 Hz:iin saakka). Myös tässä valokaariuunimittauksessa arvot ylittävät ICNIRP:n suosituksen suositusarvot, koska ylitys on jo 50 Hz arvossa.

Samasta pisteestä mitatut sähkökentän voimakkuuden perinteinen tehollisarvo jäi myös tässä mittauksessa varsin pieneksi. Koska arvo oli kuitenkin 0,099 kV/m, sähkökentän tulokset on esitetty kuvassa 7.35.



Kuva 7.35. Sähkökentän taajuuskomponentit teollisuuskohteessa LM-13 (VKU A).

Figure 7.35. Harmonics of electric field in the industrial place LM-13 (arc furnace A).

Sähkökentässä esiintyy jonkin verran yliaaltoja ja kohinaa. Tässä mittauksessa yliaallot erottuvat selvästi kohinasta. Paritonta yliaaltotaajuuksia seuraa parillinen, johon yksi mahdollinen syy on mittarin kohinasta johtuva päästökaistan leviäminen yksittäisiä yliaaltoja mitattaessa.

Taajuuskomponenteista ICNIRP:n suosituksen mukaisesti yksittäisten harmonisten kenttien menetelmällä lasketut altistumissuhteet olivat 0,05 (taajuuudet on laskettu 50 Hz:n välein 2000 Hz:iin saakka) ja 0,01 (taajuuudet on laskettu 100 Hz:n välein 650 Hz:iin saakka). Arvojen erot johtuvat yliaalloista ja kohinasta.

## 8. Pohdinta

Yleisenä johtopäätöksenä tutkimuksesta voidaan todeta, että sähkö- ja magneettikentät alittavat yleensä työaltistumisen suositusarvot riippumatta siitä, käytetäänkö mittauksessa sosiaali- ja terveysministeriön asetuksen mukaista STUK:n kehittämää painotetun kentän mittausmenetelmää vai ICNIRP:n suosituksen mukaista yksittäisten harmonisten kenttien mittausmenetelmää. ICNIRP:n suosituksen suositusarvot työntekijäaltistumiselle ovat 10 kV/m ja 500  $\mu\text{T}$ . Suositusarvot

ylittyivät magneettikenttien osalta metalliteollisuudessa käytettävien suurivirtaisten lämmittimien lähellä. Ylitykset mitattiin kahden valokaariuunin lähellä tehdyissä magneettikentän mittauksissa. Sähkökenttien osalta tässä projektissa tehdyissä mittauksissa kentät olivat varsin lähellä suositusarvoja.

Joissakin tässä raportissa esitetyistä mittauskohteista oli käyty mittaamassa sähkö- ja magneettikenttien altistumista myös aikaisempien projektien yhteydessä. Aikaisemmin oli mitattu ainoastaan kentän perinteistä tehollisarvoa. Mittaukset olivat olleet hetkellisarvon mittauksia tai pitkäaikaismittauksia. Tämän raportin käsittelemistä työntekijäaltistumisen mittauspaikoista ei oltu aikaisemmissa mittauksissa tehty kenttien laajakaistaisia mittauksia.

Aikaisemmissa mittauksissa sähköasemien kytkinkentillä tehtyjen mittauksien tulokset ovat olleet sähkökenttien osalta lähellä 10 kV/m arvoa. Myös sähköyhtiön GIS-laitoksella tehdyssä magneettikentän pitkäaikaismittauksessa ylitettiin 500  $\mu$ T. Aikaisemmin teollisuudessa tehdyissä mittauksissa valokaariuunin magneettikentän arvot ovat ylittäneet 500  $\mu$ T. Sitä vastoin muissa tutkituissa teollisuusympäristöissä ei ole löydetty yhtä suuria magneettikenttiä.

### 8.1 Työympäristön laajakaistaisten kenttien mittaustulokset

Mittauksia tehtäessä oltiin erityisen varovaisia sen suhteen, etteivät mittaajat olleet vaarassa mittauksissa. Tämän takia esimerkiksi sähköasemalla kenttiä mitattaessa ei kiihretty tikkailla sellaisiin paikkoihin, joihin sähköasentajat työssään saattavat mennä, eikä voimajohdoilla kiihretty pylväisiin. Myös teollisuuden kenttien mittauksissa ei otettu sähköturvallisuuden kannalta mitään riskejä, vaan esimerkiksi katselmusmittauksissa kuljettiin sellaisista paikoista, joihin yhtiön edustaja päästi mittaajat.

Mittauskohteita valittiin TTKK:ssa aikaisemmin tehtyjen mittausten perusteella. Aikaisemmin tehtyjen mittausten perusteella erilaisten lämmittimien lähellä saattaa magneettikenttien osalta esiintyä ICNIRP:n suositusarvojen ylityksiä. Sähkökenttien osalta suurimpia arvoja oli mitattu 400 kV sähköasemien kytkinkentältä. Suurimmat sähkökentän arvot olivat olleet alimpien 400 kV johtimien kohdalla. Laajakaistaisia sähkö- ja magneettikenttiä mitattiin yhdestä vesivoimalaitoksesta (vesivoimalaitoksen kenttien mittaus LM-1), seitsemästä sähköasemasta (sähköasemamittaus LM-2 - LM-8) ja viidestä teollisuusyriyteksestä (teollisuuden kenttien mittaus LM-9 - LM-13). Taulukkoon 8.1 on koottu tässä projektissa mitatut laajakaistaisten sähkö- ja magneettikenttien mittaustulokset.

*Taulukko 8.1.* Laajakaistaisten työntekijäaltistumisen mittaustulokset.

*Table 8.1.* Broadband occupational exposure measurement results.

Mittaus	V, kV	Paikka	B, $\mu$ T	E,kV/m	ICNIRP:n mukaan*		ICNIRP:n mukaan**		STM:n asetuksen mukaisella menetelmällä, B
					B	E	B	E	
<b>Voimalaitos</b>									
LM-1	5	Turbiinin suojakuori	8,89	0,002	0,03	0,01	0,02	0,00	0,00
<b>Sähköasemat</b>									
LM-2	400	Kytkinkenttä	16,6	7,73	-	-	0,03	0,82	-

		Tyristorihalli	-	-	-	-	0,02	0,31	-
<b>LM-3</b>	<b>110</b>	Kytkinkenttä	24,5	0,002	-	-	0,05	0,00	-
		Kaapelitunneli	173	0,002	-	-	0,30	0,00	-
<b>LM-4</b>	<b>400</b>	Kytkinkenttä	8,04	8,28	0,13	0,88	0,03	0,86	0,01
<b>LM-5</b>	<b>400</b>	Kytkinkenttä	7,65	8,82	0,03	1,10	0,02	0,91	0,01
	<b>110</b>	Kytkinkenttä	15,0	2,30	0,04	0,24	0,03	0,23	0,03
<b>LM-6</b>	<b>400</b>	Kytkinkenttä	5,37	9,39	0,04	1,40	0,02	1,07	0,01
<b>LM-7</b>	<b>110</b>	Kytkinkenttä	12,7	3,67	0,04	0,37	0,03	0,37	0,02
		Kytkinkenttä	9,30	2,19	0,03	0,22	0,02	0,22	0,01
<b>LM-8</b>	<b>400</b>	Kytkinkenttä	5,53	6,96	0,02	0,88	0,01	0,73	0,01
<b>Teollisuuden mittauskohteet</b>									
<b>LM-9</b>	<b>0,5</b>	Oikosulku- moottori	10,71	-	0,04	-	0,02	-	-
	<b>0,5</b>	Muuntamon yläp.	6,57	-	0,03	-	0,02	-	-
	<b>0,5</b>	Sähkökeskus	-	0,003	-	0,01	-	0,00	-
	<b>0,5</b>	Sähkökeskuks. yläp.	1,58	0,002	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00
	<b>0,5</b>	Sähkökeskuks. yläp.	3,11	0,003	0,04	0,01	0,02	0,00	0,01
	<b>0,5</b>	Sähkökeskuks. yläp.	7,35	0,002	0,03	0,01	0,02	0,00	0,01
	<b>0,5</b>	Leikkurin moottori	0,80	0,003	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00
<b>LM-10</b>	<b>0,4</b>	Moottori	3,00	0,003	0,10	0,01	0,01	0,00	0,01
	<b>0,4</b>	Sähkökeskus	2,09	0,002	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00
<b>LM-11</b>	<b>0,4</b>	Moottori	3,60	0,0001	-	0,01	-	0,00	0,01
	<b>0,4</b>	Induktio- kuumennin	115	0,009	-	0,01	-	0,00	0,12
<b>LM-12</b>	<b>0,4</b>	Muuntamon yläp.	2,35	0,003	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00
	<b>0,4</b>	Tyristori-ohjaus	22,11	0,003	0,07	0,01	0,05	0,00	0,07
<b>LM-13</b>	<b>0,4</b>	Uuni	0,36	0,004	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00
	<b>0,4</b>	Muuntaja	9,84	0,011	0,06	0,03	0,04	0,01	0,02
	<b>0,4</b>	Valokaariuuni	739	0,070	3,55	0,07	2,23	0,03	-
	<b>0,4</b>	Valokaariuuni	1585	0,099	12,0	0,05	6,83	0,01	-

\* harmoniset komponentit on laskettu 50 Hz välein 2000 Hz saakka

\*\* harmoniset komponentit on laskettu 100 Hz välein 650 Hz saakka

Mittauksissa magneettikenttä ei ylittänyt altistussuhteen arvoa yksi mitatulla vesivoimalaitoksella eikä millään sähköasemalla. Lisäksi yleisesti magneettikentästä voidaan todeta, että 110 kV sähköasemilla työntekijäaltistukset olivat suurempia kuin 400 kV sähköasemilla. Teollisuuden kenttien mittauksessa altistussuhteen arvoa yksi ylittyi selvästi valokaariuunin syöttöjohdon lähellä tehdyssä mittauksessa. Sähkökentällä altistussuhteen arvo yksi ylittyi kahdella 400 kV sähköasemalla. Sitä vastoin 110 kV sähköasemilla työntekijäaltistukset jäivät pienemmiksi kuin 400 kV sähköasemilla. Muissa mittauksissa sähkökentän altistussuhteen arvot jäivät varsin pieniksi.

Yksittäisten yliaaltojen mittausten menetelmällä ICNIRP:n suosituksen mukaisissa mittauksissa käytetyn mittarin valmistajan ilmoittama kohinataso oli magneettikentälle 0,05  $\mu$ T. Tämän suuruinen kohina vaikutti altistumissuhteen summan arvoon 0,05 verran. Tätä suurempia magneettikentän altistumissuhteen tuloksia oli kahdella sähköasemalla, yhdessä paperiteollisuuden yrityksessä ja kahdessa metalliteollisuuden yrityksessä. Lisäksi yhdessä metalliteollisuuden yrityksessä, jossa ei tehty mittauksia yksittäisten yliaaltojen mittausten menetelmällä, STUK:n kehittämällä painotetun kentän menetelmällä mitattiin yli 0,05 suuruinen altistumissuhteen arvo. Alle 0,05 altistumissuhteen tuloksia voidaan pitää merkityksettömän pieninä.

Mittarin valmistajan ilmoittama kohinataso sähkökentälle oli 0,0005 kV/m yksittäisten yliaaltojen mittausten menetelmällä. Tämän suuruinen kohina vaikutti altistumissuhteen summan arvoon 0,03 verran. Tätä suurempia sähkökentän altistumissuhteen tuloksia oli kuudella sähköasemalla ja yhdessä metalliteollisuuden yrityksessä. Alle 0,03 altistumissuhteen tuloksia voidaan pitää merkityksettömän pieninä.

Mittaustulosten perusteella sähkö- ja magneettikenttäaltistumisen vähentämistarpeet keskittyvät magneettikenttien osalta teollisuuden erittäin suurien yksittäisten sähkönkulutusten ja niiden syöttöjohtojen läheisyyteen. Sähkökenttien osalta vähentämistarpeita on lähinnä 400 kV sähköjärjestelmien läheisyydessä. Toisaalta näissä sähköjärjestelmän osissa jo perustajuiset kentät ovat varsin suuria, eikä laajakaistaisten kenttien vaikutuksesta aiheutunut suositusarvojen ylityksiä. Yleisesti vähentämistarpeet ovat melko hyvin jo ennalta tiedossa, eikä laajakaistaista ohjearvoista näyttäisi mittausten perusteella tulevan ainakaan tutkituissa tapauksissa mitään yllättäviä vähentämistarpeita.

Mittauksia ei tehty sähköturvallisuuden asettamista rajoista lähtien, vaan oltiin erityisen varovaisia turvallisuuden suhteen. Myöskään yritysten edustajat eivät halunneet ottaa mitään riskejä turvallisuuden suhteen. Samalla yritykset halusivat varmistua siitä, ettei mittauksesta missään tapauksessa aiheudu esimerkiksi käyttökeskeytyksiä. Koska tutkimuksessa keskityttiin sellaisiin mittauspaikkoihin, joissa yrityksen edustaja antoi mittauksia tehdä, jäi esimerkiksi sähköasentajan työssä mahdollisia altistumistilanteita mittaamatta.

Yksi mittauksien tekemistä vaikeuttanut seikka oli mittaukseen suostuneiden yritysten pieni määrä. Syitä mittauksista kieltäytymiseen olivat esimerkiksi mahdollisten suositusarvojen ylitysten seurauksena tulevat vaikeudet, työntekijöiden suhtautuminen mahdollisiin suositusarvojen ylityksiin, mittauksen vaatimat yrityksen resurssit ja työpaineet yrityksessä.

## **8.2 Työympäristön laajakaistaisten kenttien mittausten menetelmän kehittäminen**

Työperäiselle pientaajuiselle sähkö- ja magneettikenttäaltistumiselle ei ole olemassa määräyksiä, vaan ohjearvot ovat suosituksia. Työperäisen sähkö- ja magneettikenttäaltistumisen suositukset on esitetty ICNIRP:in vuonna 1998 julkaisemissa uusissa suositusarvoissa 0 - 300 GHz taajuuskaistalla, jossa on myös esitetty usealle taajuudelle samanaikaisesti altistumisen

summaaminen. ICNIRP:in suosituksessa kenttien yhdistäminen tehdään summaamalla eri taajuuksien kenttien amplitudit keskenään. Yhdistämiseen aiheuttaa kuitenkin virhettä se, että sähkö- ja magneettikentät esiintyvät yleensä 50 Hz harmonisina taajuuksina, jotka ovat riippumattomia toisistaan ja niiden vaihekulmat esiintyvät satunnaisesti. ICNIRP:in suosituksessa kuitenkin oletetaan vaihekulmat toisistaan riippuviksi ja vielä huippuarvot samanaikaisiksi.

ICNIRP:in suosituksessa viitearvot, joihin mitattuja sähkö- ja magneettikentän arvoja verrataan on esitetty sähkökentän voimakkuutena ja magneettivuon tiheytenä sekä magneettikentän voimakkuutena. Kenttien yhdistäminen tehdään summaamalla eri taajuuksien kenttien amplitudit keskenään aina 1 Hz - 10 MHz taajuusalueella. Tällaisiin mittauksiin ei kuitenkaan ole olemassa kaupallista mittaria. Mittarit eivät pysty yleensä edes pienemmällä taajuuskaistalla sekä mittaamaan kentät että tallentamaan mittarin muistiin taajuuskomponentit kaikilta kokonaislukutaajuuksilta tai 50 Hz harmonisilta taajuuksilta. Siksi mittauksissa joudutaan tyytymään yksittäisten harmonisten kenttien eriaikaiseen mittaamiseen.

Harmonisten kenttien eriaikaiseen mittaamiseen liittyen mittauksissa jouduttiin pohtimaan, mihin harmoniseen taajuuteen saakka mittauksia jatketaan. Käytännössä harmonisia mitattiin 50 Hz välein aina 2000 Hz asti. Erityisesti teollisuusympäristön magneettikentät vaihtelevat paljon sekä paikallisesti että ajallisesti. Tästä syystä yksittäisiä harmonisia komponentteja mitattaessa kenttä saattoi muuttua huomattavasti mittauksen aikana. Toisaalta yli 650 Hz (13. harmoninen yliaalto) taajuuksilla ei käytännössä näyttänyt olevan juurikaan merkitystä kokonaisaltistumisen kannalta, vaan sitä suurempitaajuiset kenttäkomponentit toimivat lähes kohinan tavoin. Myös arvoon vaikuttava mittarin virhe ja sen merkitys kenttien yhdistämisessä kasvaa sitä mukaan, mitä korkeampia taajuuskomponentteja mitataan.

STM:n asetuksen mukainen STUK:n kehittämä painotetun kentän mittaamenetelmä on teoreettisesti paremmalla pohjalla kuin ICNIRP:n suosituksen mukainen yksittäisten harmonisten kenttien mittaamenetelmä. Myöskään STM:n asetuksen mukaiseen STUK:n kehittämään painotetun kentän mittaamenetelmään ei ole olemassa soveltuvaa kaupallista mittaria. Sen takia tässä tutkimuksessa käytettiin painotetun kentän mittauksissa TTKK:lla valmistettua RC-tyyppistä ylipäästösuodatinta, jolla mitattu kenttäsignaali suodatettiin. STM:n asetuksen mukaista STUK:n kehittämää painotetun kentän mittaamenetelmää käytettäessä kentän taajuuskomponentit mitataan samanaikaisina niiden vaihekulmat huomioiden, joten teoreettisesti tarkasteltuna menetelmä on parempi kuin yksittäisten harmonisten kenttien mittaamenetelmä.

Painotetun kentän mittaamenetelmällä järjestelmälle on määritettävä mitatun suodatetun signaalin vertailuarvo, jota verrataan mittaustilanteessa mitattuun suodatettuun signaaliin. Vertailuarvo pitää määrittää järjestelmälle uudestaan, jos siihen tehdään rakenteellisia muutoksia. Esimerkiksi, jos järjestelmään lisätään alipäästösuodatin suodattamaan mitattavan kaistan yläpuolisia taajuuksia, vertailuarvo pitää tarkastaa. Vertailuarvon määrittämistä varten on oltava ajallisesti ja paikallisesti tasaisena pysyvä kenttä, jonka suuruus ja taajuus tunnetaan tarkasti tai voidaan määrittää tarkasti. Magneettikentällä vertailuarvon määrittäminen on tehty Helmholtzin kelalla.

Sähkökentän osalta painotetun kentän mittaamenetelmä jouduttiin hylkäämään mittaustilanteissa ilmenneen sähkömagneettisen yhteensopivuusongelman takia. Yhteensopivuusongelmaa on kuvattu tämän projektin toisessa raportissa, jossa on käsitelty väestön sähkö- ja magneettikentille altistumisen mittaamista ja mittaustuloksia /18/. Tämän takia sähkökentän laajakaistaisessa altistumismittauksessa käytettiin ainoastaan yksittäisten harmonisten komponenttien mittaamista.

Laajakaistaisten kenttien mittaamiseen sopisi parhaiten kaupallinen mittari, joka pystyy mittaamaan sekä perinteistä tehollisarvoa että laajakaistaista altistumista. Mittarin tulisi pystyä jatkuvan laajakaistaisen altistumismittauksen lisäksi laskemaan datasta aikakeskiarvoa. Aikakeskiarvon laskemista varten mittarin pitäisi pystyä tallentamaan suodattimen läpi ohjattua kenttäsignaalia asetuksen mukaisesti 10 minuutin ajan. Toisaalta laskostumisen estämiseksi näytteenottotaajuuden tulisi olla riittävän suuri, esimerkiksi 100 kHz saakka mitattaessa tulisi käyttää vähintään 200 kHz näytteenottotaajuutta Nyquistin näytteenottoteoreeman mukaisesti.

Jos mittari olisi kolmiakselinen, myös mittarin suuntauksessa esiintyvät vaikeudet voitaisiin selvittää. Mittarin suuntaukseen liittyviä vaikeuksia ovat esimerkiksi se, että suurimman kentän suunnan löytäminen on työlästä ja suurimman kentän suunta saattaa vaihdella jatkuvasti. Toisaalta kolmiakselisen mittarin valmistamisessa voi tulla vaikeuksia.

Tulevaisuudessa mittausjärjestelmään olisi hyvä liittää alipäästösuodatin, jonka avulla alipäästösuodattimen rajataajuutta ylemmät häiritsevät taajuudet saisi suodatettua mitatusta signaalista pois. Alipäästösuodattimen rajataajuuden valinta ei kuitenkaan ole täysin yksiselitteinen asia, sillä mitausta häiritsevät taajuudet riippuvat käytetystä mittausjärjestelmästä.

Selvintä laajakaistaisten kenttien mittaaminen olisi, jos markkinoille tulisi luotettava uusi mittari laajakaistaisten kenttien mittaamiseen.

## Lähteet

1. 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.
2. Elovaara J., Laiho Y. 1988. Sähkölaitostekniikan perusteet. Otakustantamo. 487 s.
3. Euroopan Unionin neuvosto. Neuvoston suositus väestön sähkömagneettisille kentille (0 Hz - 300 GHz) altistumisen rajoittamisesta (1999/519/EY). Euroopan yhteisöjen virallinen lehti L199, 12.7.1999, s. 59-70
4. 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, pp. 494-522.
5. Keikko T., Isokorpi J., Korpinen L. 1997. Pientaajuisten magneettikenttähäiriöiden pienentämismenetelmiä. Tampereen teknillinen korkeakoulu, sähkövoimatekniikka, Raportti 9-97, Tampere. 76 s.
6. Keikko T., Isokorpi J., Korpinen L., Elovaara J., Vanhala P. 2000, Considering Electric and Magnetic Fields in Electric Power System Design in Finland, Session- 38th CIGRE, 27.8.-1.9.2000, Pariisi, Ranska, 36-102/7 s.
7. Keikko, T., Kuusiluoma, S., Sauramäki, T. & Korpinen, L. 2002. Comparison of Electric and Magnetic Fields Near 400 kV Electric Substation with Exposure Recommendations of the European Union. IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: Asia Pacific, Yokohama, Japani, 6.-10.10.2002. Vol 2., s. 1230-1234.

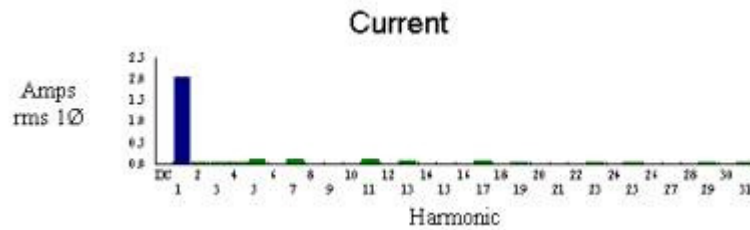
8. Korpinen L., Isokorpi J., Keikko T. 1998. Kartoitus pientaajuisista sähkökentistä elin- ja työympäristössä. Tampereen teknillinen korkeakoulu, sähkövoimatekniikka, Raportti 6-98, Tampere. 35 s.
9. Korpinen L., Hietanen M., Jokela K., Juutilainen J., Valjus J. 1994. Voimajohtojen sähkö- ja magneettikentät ympäristössä. Kauppa- ja teollisuusministeriö, Energiaosasto. Helsinki, 207 s.
10. Korpinen L., Isokorpi J., Keikko T. 1999. Calculation of induced currents in a human body represented by a spheroidal model. Computational Methods and Experimental Measurements IX (CMEM 99), Sorrento, Italia, 27.-29.4.1999, s.19-26
11. Korpinen L. 2000. Laitteiden ja elinympäristön sähkö- ja magneettikenttien mittaaminen. Kauppa- ja teollisuusministeriön tutkimuksia ja raportteja. 9/2000, 134 s.
12. Lehmusvirta J. Yliaallot Tampereen kaupungin sähkölaitoksen verkossa. Diplomityö TTKK 1982, 91 s.
13. Mikkola M., Korpinen L. 1996. Sähköverkossa esiintyvät yliaallot. Tampere, Tampereen teknillinen korkeakoulu, sähköenergiajärjestelmät 13-96. 45 s.
14. Mäkinen P., Järvinen P., Valjus J. 1991. 50 Hz sähkö- ja magneettikenttäaltistus suurjännitetöissä. Imatran Voima Oy, Tutkimusraportteja, Helsinki. 54 s.
15. National Instruments. 2001. DAQCARD-AI-16XE-50. Austin, Texas.
16. National Instruments. 2000. User Manual, LabVIEW 6i. Austin, Texas.
17. Sauramäki T., Hiltunen J., Kivelä T., Halinen S., Pulakka A., Keikko T., Korpinen L. 2000. Kokemuksia magneettikenttäaltistusmittauksista. Tampereen teknillinen korkeakoulu, Teollisuuden sähkötekniikka, Raportti 5-2000. Tampere. 66 s.
18. Sauramäki T., Keikko T., Korpinen L. 2002. Väestön altistuminen laajakaistaisille sähkö- ja magneettikentille. Sähkötekniikka ja terveys, Raportti 2-2002, Tampere.
19. SENER. 1999. Loistehon kompensointi ja yliaaltojen rajoittaminen, Sähköenergialiitto ry, Helsinki.
20. Sosiaali- ja terveysministeriö. Väestön ionisoimatonta säteilyaltistusta rajoittavan sosiaali- ja terveysministeriön NIR-asiantuntijaryhmän muistio, Sosiaali- ja terveysministeriön työryhmämuistioita 2001:38, Helsinki 2002, 64 s.
21. Sosiaali- ja terveysministeriö. Sosiaali- ja terveysministeriön asetus ionisoimatonta säteilyn väestölle aiheuttaman altistumisen rajoittamisesta. Helsinki, 4.4.2002.
22. Suomalaiset ABB-yhtiöt. 2000. Teknisiä tietoja ja taulukoita, Vaasa, 626 s.
23. Sähkö ja kaukolämpö 2000, Helsinki: Adato Energia, 2000, s. 60
24. Tamsi L. Tasasuuntaaja- ja tyristorikäyttöjen aiheuttamat lisähäviöt syöttävässä muuntajassa. Diplomityö TTKK 1978, 79 s.

## Liitteet

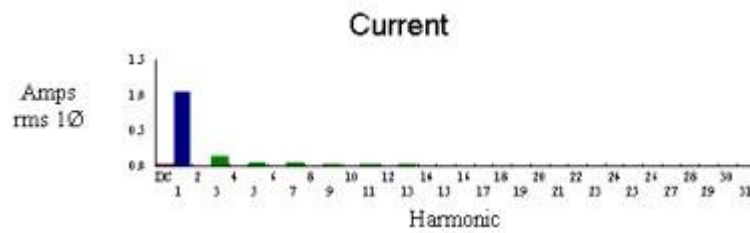
## LIITE 1

### Paperiteollisuuden mittauksen LM-9 virran taajuuskomponentit

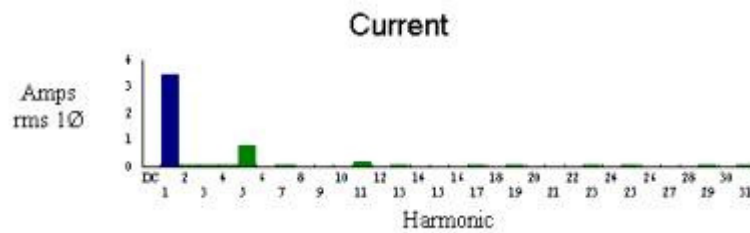
Pääkeskus 9, muuntamo 5



Pääkeskus 7, muuntamo 4



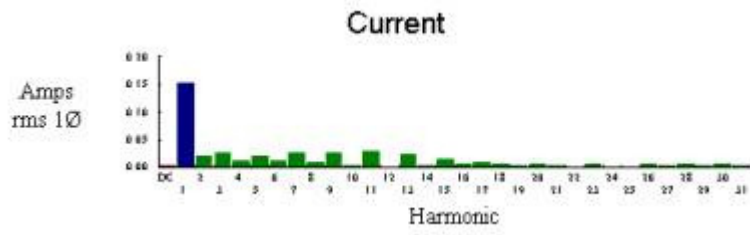
Pääkeskus 8, muuntamo 3



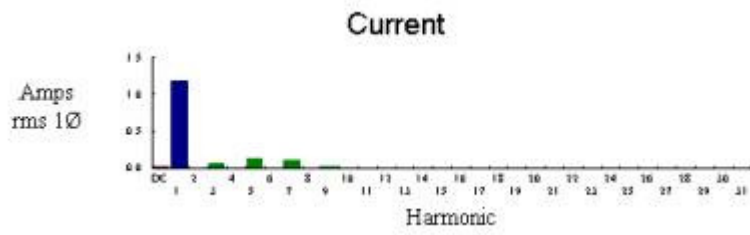
## LIITE 2

### Paperiteollisuuden mittauksen LM-10 virran taajuuskomponentit

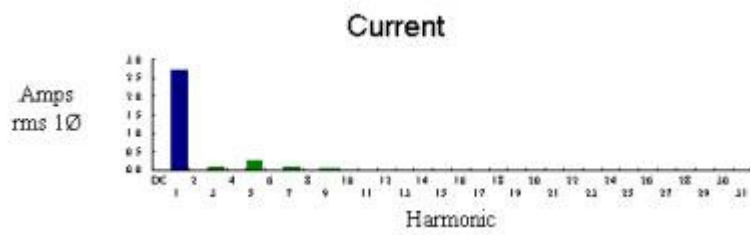
Atk-huone



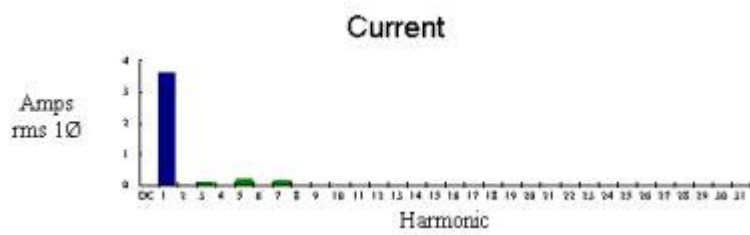
Pääkeskus 1



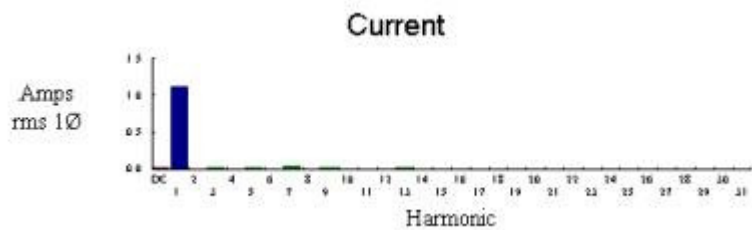
Pääkeskus 2



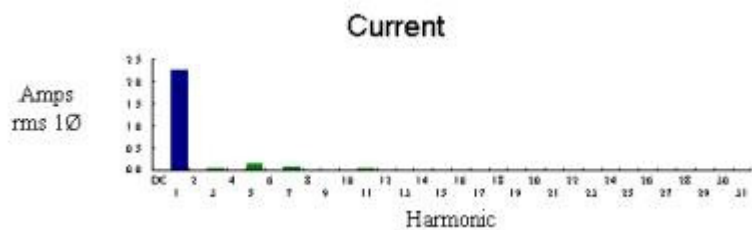
Pääkeskus 3



Pääkeskus 4



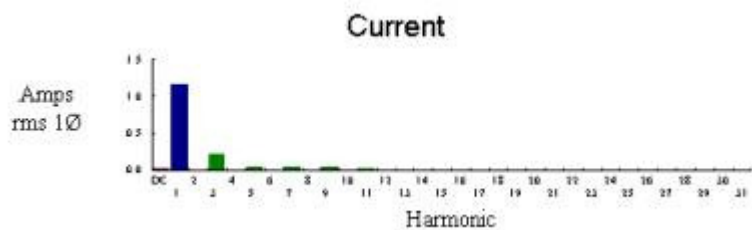
Pääkeskus 5



**LIITE 3**

**Metalliteollisuuden mittauksen LM-11 virran taajuuskomponentit**

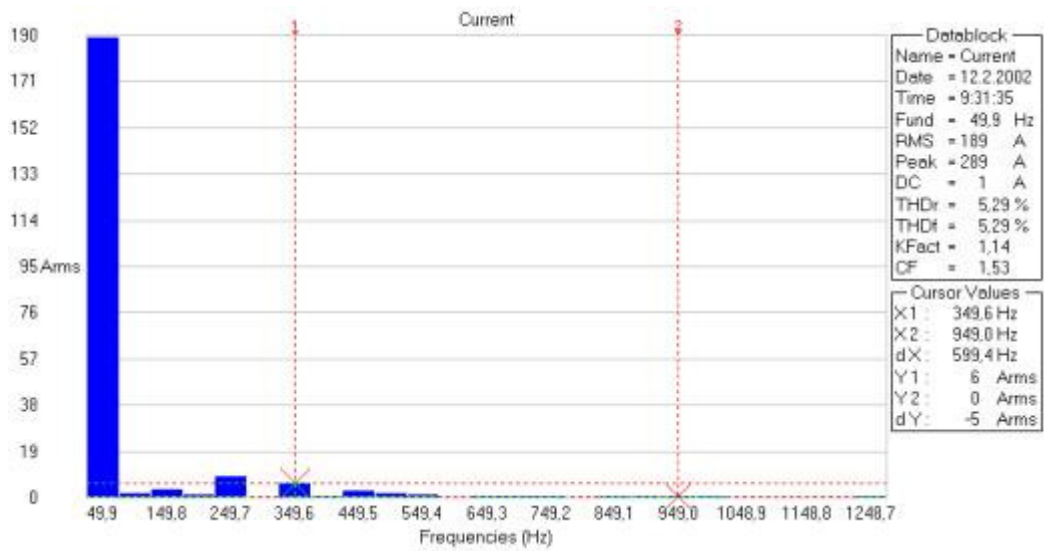
Syöttökisko



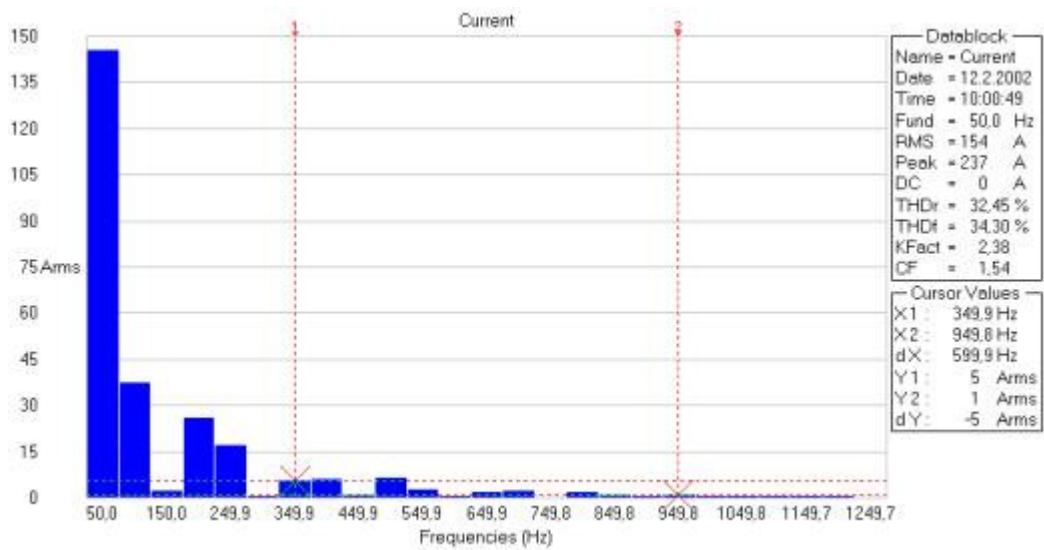
**LIITE 4**

**Metalliteollisuuden mittauksen LM-12 virran taajuuskomponentit**

Muuntamoiden 1 ja 2 vaihevirta



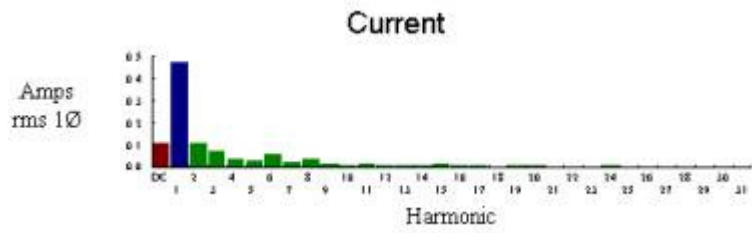
Muuntamon T56 vaihevirta



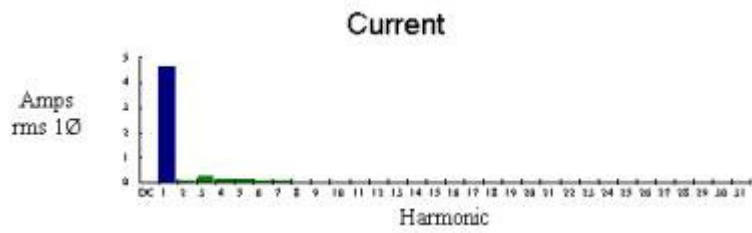
LIITE 5

### Metalliteollisuuden mittauksen LM-13 virran taajuuskomponentit

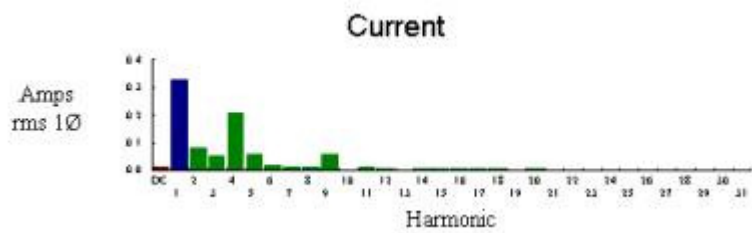
A valokaariuuni, vaihe L1



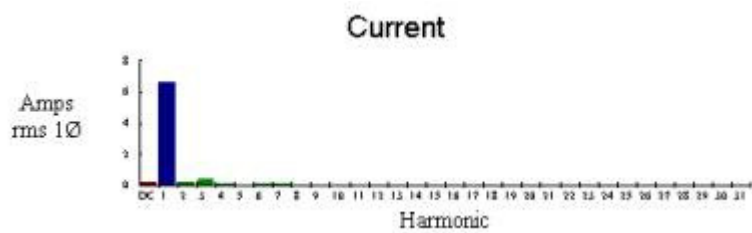
A valokaariuuni, vaihe L2



A valokaariuuni, vaihe L3

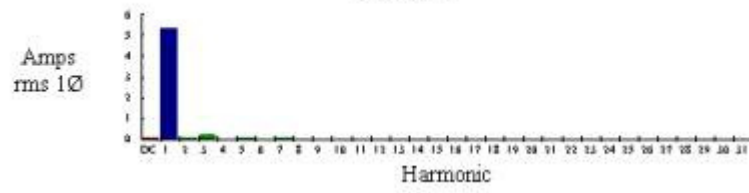


D valokaariuuni, vaihe L1



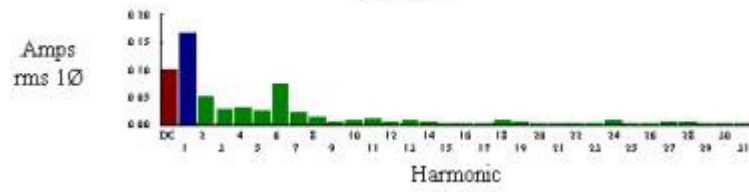
D valokaariuuni, vaihe L2

### Current



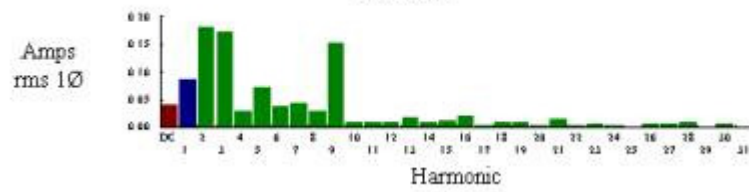
D valokaariuuni, vaihe L3

### Current



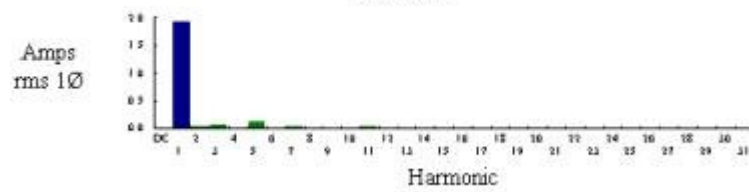
D valokaariuuni, vaihe N

### Current



Muuntaja

### Current



Vastusuuni

# Current

