



Magneettikenttien mittaus

Magneettikenttien mittaus ja riskiarviointi suurtehosähkölaboratoriossa

Esko-Ensio Makkonen

OPINNÄYTETYÖ
Marraskuu 2023

Sähkö- ja automaatiotekniikka
Sähkövoimatekniikka

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma
Sähkövoimatekniikka

MAKKONEN, ESKO-ENSIO:

Magneettikenttien mittaus

Magneettikenttien mittaus ja riskiarviointi suurtehosähkölaboratoriossa

Opinnäytetyö 36 sivua

Marraskuu 2023

Tässä opinnäytetyössä käsitellään magneettikenttien mittausta ja niiden terveyshaittojen riskiarviointia sähkölaboratoriossa. Työ tehtiin yhteistyössä ABB:n kanssa. Magneettikenttämittaukset suoritettiin Helsingissä ABB:n suurtehosähkölaboratoriossa. Laboratorion käyttötarkoituksena on testata suuritehoisia taajuusmuuttajia, joita käytetään muun muassa tuulivoimaloissa ja teollisuudessa.

Työssä esitellään sähkömagneettisten kenttien haitallisia terveysvaikutuksia. Sähkömagneettisistä kentistä mahdollisesti johtuvat terveysvaikutukset voidaan jaotella taajuuksien perusteella. Taajuudet jaotellaan staattisiin, pienitaajuisiin ja radiotaajuisiin kenttiin.

Työssä kerrotaan ohjeet sähkömagneettisten kenttien mittaamiseen erilaisissa tilanteissa. Mittausten ohjeet ovat IEC-standardien mukaiset. Sähkö- ja magneettikenttien mittauksiin soveltuvia mittalaitteita esitellään kolme kappaletta. Esitellyt mittalaitteet soveltuvat eritaajuisien kenttien mittaamiseen.

Työssä verrataan magneettikenttämittausten tuloksia ICNIRP:in (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) julkaisemiin magneettikenttien altistumisen raja-arvoihin ja selvitettiin, mihin toimenpiteisiin sähkölaboratoriossa joudutaan.

Asiasanat: magneettikenttä, magneettikenttä mittaus, terveysvaikutus

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Electrical and Automation Engineering
Electrical Power Engineering

MAKKONEN, ESKO-ENSIO:
Magnetic Field Measurement
Magnetic Field Measurement and Risk Assessment in High Power Laboratory

Bachelor's thesis 36 pages
November 2023

This thesis studied the measurement of magnetic fields and the risk assessment of its health effects in an electrical laboratory. The work was commissioned by ABB. The magnetic field measurements were carried out in ABB's high-power laboratory in Helsinki. The laboratory was intended for testing high-power frequency converter's used, for example, in wind turbines and industry.

The thesis introduced the harmful health effects of electromagnetic fields. The potential health effects of electromagnetic fields can be categorized based on frequencies. Frequencies are divided into static, low-frequency, and radiofrequency fields.

The thesis provided guidelines on how electromagnetic fields should be measured in various situations. The measurement guidelines followed the IEC standards. Three types of measuring devices suitable for electric and magnetic field measurements were presented. The presented devices were suitable for measuring fields at different frequencies.

At the end of the work, the results of magnetic field measurements were compared to the exposure limits published by the International Commission on Non-ionizing Radiation Protection (ICNIRP), and the necessary actions in the electrical laboratory were determined.

Key words: magnetic field, measurement guidelines, health effects

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	6
2	TEORIA	7
2.1	Magnetomotorinen voima.....	7
2.2	Magneettikentän voimakkuus.....	7
2.3	Magneettivuo.....	8
2.4	Magneettivuon tiheys	8
2.5	Voimavaikutukset	9
3	Magneettikenttien terveysvaikutukset	10
3.1	Staattinen magneettikenttä	10
3.2	Pienitaajuiset sähkömagneettiset kentät	10
3.2.1	Hyvin pienitaajuiset sähkömagneettiset kentät.....	10
3.2.2	Välitaajuiset sähkömagneettiset kentät	12
3.3	Radiotaajuiset kentät.....	13
4	MAGNEETTIKENTTÄ MITTAUKSET	14
4.1	Mittausympäristö	14
4.2	Mittalaitteet.....	16
4.2.1	Magneettikenttämittari Narda HP-01	16
4.2.2	Sähkö- ja magneettikenttämittari Narda EHP-50F.....	18
4.2.3	Sähkö- ja magneettikenttämittari Narda EHP-200AC	19
4.3	Mittausmenetelmät.....	20
4.3.1	Yksipistemittaus.....	21
4.3.2	Kolmepistemittaus	21
4.3.3	Viisipistemittaus.....	22
4.4	Mittautulokset	23
5	TULOSTEN KÄSITTELY	29
6	TOIMENPITEET	33
	LÄHTEET.....	35

LYHENTEET JA TERMIT

EEG	Elektroenkefalografia, aivosähkökäyrätutkimus
ELF	Extremely Low Frequency, hyvin pienitaajuinen
FFT	Fast Fourier Transform, nopea fourier-muunnos
IARC	International Agency for Research on Cancer, kansainvälinen syöväntutkimuslaitos
ICNIRP	International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, kansainvälinen ionisoimattoman säteilyn toimikunta
IF	Intermediate Frequency, välitaajuinen
INU	Inverter Unit, vaihtosuuntaaja
RF	Radio Frequency, radiotaajuinen

1 JOHDANTO

Tämä opinnäytetyö käsittelee magneettikenttienmittausta ja magneettikentistä syntyvien terveyshaittojen riskiarviointia suurtehosähkölaboratoriossa. Työ tehdään ABB:lle ja mittaukset suoritetaan ABB:n suurtehosähkölaboratoriossa Pitäjänmäellä Helsingissä.

Suurteholaboratorion käyttötarkoituksena on testata suuritehoisia taajuusmuuttajia. Suuritehoisia taajuusmuuttajia käytetään muun muassa tuulivoimaloissa ja erilaisissa teollisuuskäytöissä. Testattavien taajuusmuuttajien käyttötehot voivat olla jopa 4 megawattia ja virrat 4000 ampeerin luokkaa.

Suurien tehojen aikaansaamiseksi tarvitaan suuria virtoja, kun toimitaan pienjännitteillä. Virrat aiheuttavat taas magneettikenttiä. Työn tarkoituksena on mitata ja selvittää aiheuttaako nämä suurien virtojen synnyttämät magneettikentät haitallisia terveysvaikutuksia työntekijöille. Työssä otetaan huomioon myös henkilöt, joilla on lääkinällisiä laitteita, kuten sydämentahdistin. Tällaiset lääkinälliset laitteet voivat häiriintyä magneettikentästä ja täten luoda rajoituksia suurtehosähkölaboratorion sisälle pääsyyn.

2 TEORIA

Sähkömagneettisilla kentillä viitataan staattisiin sähkökenttiin, staattisiin magneettikenttiin sekä ajallisesti vaihteleviin sähkökenttiin, magneettikenttiin ja sähkömagneettisiin kenttiin, joiden taajuus on enintään 300 gigahertsiä.

Staattinen sähkökenttä muodostuu paikallaan pysyvän sähkövarauksen ympärille. Staattinen magneettikenttä taas muodostuu tasavirtajohtimen tai magneetin ympärille. Nopeudeltaan muuttuvat sähkövaraukset, kuten vaihtovirta johtimessa, muodostaa värähtelevän sähkömagneettisen kentän.

Sähkömagneettiset kentät jaetaan taajuuden ja muutosnopeuden perusteella ryhmiin. Ryhmät eroavat toisistaan kentän käyttötarkoituksen ja vaikutusten perusteella. Sähköjärjestelmien sähkö- ja magneettikentät ovat yleensä käyttötaajuuksia 50 hertsiä. (Työsuojeluhallinnon verkkopalvelu)

2.1 Magnetomotorinen voima

Magnetomotorisen voiman tunnus on F_m ja yksikkö A eli ampeeri. Magnetomotoriseksi voimaksi kutsutaan käämikierrosten ja -virran tuloa. (Ahoranta 2012, 234.)

$$F_m = I \cdot N \quad 2$$

F_m =magnetomotorinen voima

I =sähkövirta

N =käämin kierrosluku

2.2 Magneettikentän voimakkuus

Magneettikentän voimakkuuden tunnus on H ja yksikkö A/m eli ampeeri/metri. Magnetomotorinen voima ja magneettipiirin pituus määrää solenoidin magneettikentän voimakkuuden. Pitkän suoran johtimen magneettikentän voimakkuuden määrää sähkövirta ja johtimen poikkipinta-ala. (Ahoranta 2012, 235.)

$$H = \frac{F_m}{l} \quad 3$$

H =magneettikentän voimakkuus

F_m =magnetomotorinen voima

l =magneettiirin pituus

$$H = \frac{I}{2\pi r} \quad 4$$

H =magneettikentän voimakkuus

I =sähkövirta

r =etäisyys johtimesta

2.3 Magneettivuo

Magneettivuon tunnus on Φ ja yksikkö Wb tai Vs eli weber tai voltisekunti. Solenoidin magneettivuo kuvaa magneettisuuden kokonaismäärää. (Ahoranta 2012, 237.)

$$\Phi = \frac{F_m}{R_m} \quad 5$$

Φ =magneettivuo

F_m =magnetomotorinen voima

R_m =reluktanssi

2.4 Magneettivuon tiheys

Magneettivuon tiheyden tunnus on B ja yksikkö T eli tesla. Magneettikentän tiheys kuvaa magneettikentän voimakkuutta ja se ilmoittaa magneettivuon pinta-alayksikköä kohden. (Ahoranta 2012, 238.)

$$B = \frac{\Phi}{A} \quad 6$$

B =magneettivuon tiheys

Φ =magneettivuo

A =pinta-ala

$$B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H \quad 7$$

B =magneettivuon tiheys

μ_0 =tyhjiön permeabiliteetti

μ_r =suhteellinen permeabiliteetti

2.5 Voimavaikutukset

Magneetikentässä olevaan virralliseen johtimeen vaikuttaa voima, joka liikuttaa johdinta voimakkaammasta kentästä heikomman kentän suuntaan. Kahden virrallisen johtimen ollessa vierekkäin vaikuttavat johtimien omat magneetikentät toisiinsa. Kun virrat kulkevat samaan suuntaan, johtimet vetävät toisiaan puoleensa ja virtojen kulkiessa vastakkaisiin suuntiin ne työntävät toisiaan.

Johtimien välinen voima riippuu johtimissa kulkevan sähkövirran suuruudesta, etäisyydestä johtimien välissä sekä vierekkäin olevasta pituudesta. Virtojen tai pituuksien kasvaessa tai johtimien välisen etäisyyden pienentyessä voima kasvaa. (Ahoranta 2012, 253–257.)

$$F = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot l}{2\pi d}$$

F =johtimiin vaikuttava voima

μ_0 =tyhjiön permeabiliteetti

μ_r =suhteellinen permeabiliteetti

I =sähkövirta

l =johtimien pituus

d =johtimien etäisyys toisistaan

3 Magneettikenttien terveysvaikutukset

Sähkömagneettiset kentät voidaan jakaa taajuuden perusteella kolmeen ryhmään, staattisiin, pienitaajuisiin sekä radiotaajuisiin sähkö- ja magneettikenttiin. Nämä kolme ryhmää voivat aiheuttaa erilaisia tuntoaistimuksia ja terveysvaikutuksia. Taajuudesta riippumatta sähkömagneettiset kentät voivat aiheuttaa häiriöitä aktiivisten lääkinnällisten laitteiden, kuten sydäntahdistimien toimintaa. (Työterveyslaitos n.d.)

3.1 Staattinen magneettikenttä

Staattinen magneettikenttä pysyy muuttumattomana tai muuttuu vain hyvin hitaasti ajan suhteen (0–1 Hz). Sähkömagneettisen teorian mukaan kentän muutos tai kappaleen liikkuminen kentässä indusoi kappaleeseen eli kehoon sisäisen sähkökentän, mikä puolestaan synnyttää sähkövirtoja hyvin johtavissa kudoksissa. Voimakkaat staattiset magneettikentät voivat aiheuttaa epämukavuutta, kuten pahoinvointia, päänsärkyä, huimausta ja magnetofosfeeneja. (Jokela 2006, 18.) Magnetofosfeenit voivat olla valovälähdyksiä näkökentässä tai ihokarvojen värähtelyä. (Fingrid n.d., 15.)

3.2 Pienitaajuiset sähkömagneettiset kentät

Pienitaajuiset sähkömagneettiset kentät vaikuttavat 1 Hz ja 100 kHz välisellä taajuudella. Nämä kentät voidaan jakaa vielä kahteen eri luokkaan, hyvin pienitaajuisiin alle 300 Hz (ELF) ja välitaajuisiin kenttiin yli 300 Hz (IF). (Jokela 2006, 18.)

3.2.1 Hyvin pienitaajuiset sähkömagneettiset kentät

Hyvin pienitaajuisien sähkömagneettisten kenttien kentän muutosnopeudet ovat jo tarpeeksi suuria indusoimaan paikoillaan pysyvään ihmiseen sähkökenttiä ja -virtoja. Kehon altistuessa ulkoiselle magneettikentälle synnyttää magneettikenttä siihen induktiosähkökentän ja se puolestaan aiheuttaa kiertäviä sähkövirtoja kehossa. Sähkömagneettinen induktio riippuu siitä, miten keho sijoittuu suhteessa sähkö- ja magneettikenttien suuntaan, sekä kehon koosta. Ulkoisen sähkökentän

vaikutuksesta kehon pinnalle syntyy kentän tahdissa muuttuva pintavaraus. Tämä pintavaraus pyrkii vastustamaan ulkoisen kentän vaikutusta. Vaikka suurin osa kentästä kumoutuu, kehon sisälle jää kuitenkin pieni virtoja synnyttävä jäännöskenttä. (Jokela 2006, 18.)

Riittävän voimakkaat induktiosähkökentät ja -virrat voivat aiheuttaa hermo- ja lihaslaskutissa sähköärsytystä. Suurten sisäisten virtojen riskinä on sydämen kamiovärinä sekä hengityksen lamaantuminen. Tämä riski on mahdollinen voimakkaissa yli yhden teslan magneettikentissä 50 hertsin taajuudella. Hermosolut muodostavat monimutkaisia verkostoja keskushermostossa ja niiden sähköisen toiminnan häiriintymisriski on suurempi mitä yksittäisten hermosolujen kohdalla on. Tämä johtuu siitä, että pienet häiriöjännitteet voivat summautua synapseissa eli hermosolujen liitoskohdissa. Tämä häiriö voi ilmentyä magnetofosfeeneina. (Jokela 2006, 18.)

Kun magneettivuon tiheys ylittää noin 0,5 milliteslaa, on mahdollista havaita muutoksia myös kognitiossa, muistissa, oppimisessa ja EEG:ssä. Alle 0,5 milliteslaa kentillä on raportoitu hajanaisesti positiivisia havaintoja, mutta selvää osoitusta vaikutuksista ei ole pystytty toteamaan. (Juutilainen, J, Naarala, J, Verkasalo, P, Kumlin, T, Huuskonen & Kuustonen J. 2006, 228.)

Hyvin pienitaajuisilla sähkökentillä ei vaikuttaisi olevan syöpää aiheuttavia vaikutuksia, nykyisin käytettävissä olevan tutkimustiedon perusteella. Eläinkokeiden perusteella näyttää siltä, että hyvin pientaajuiset magneettikentät eivät yksinään todennäköisesti aiheuta syöpää. Suurimmassa osassa kokeita magneettikenttään altistus ei ole edistänyt kasvainten kehitystä, jotka ovat aiheutettu muilla karsinogeeneilla. Kuitenkin osassa kokeita on havaittu viitteitä siitä, että magneettikentälle altistuminen voisi vahvistaa karsinogeenisten kemikaalien ja säteilyjen vaikutusta. Kuitenkin kansainvälinen syöväntutkimuslaitos (IARC) on vuonna 2002 luokitellut staattiset ja hyvin pienitaajuiset sähkö- ja magneettikentät luokkaan 2B, eli voi mahdollisesti aiheuttaa syöpää. IARC ottaa arvioissaan kantaa eri altisteiden syöpää aiheuttavaan ominaisuuteen sijoittamalla ne viiteen eri luokkaan, jotka voi nähdä taulukosta 1. (Juutilainen ym. 2006, 222–223.)

TAULUKKO 1. IARC:n taulukko karsinogeenien luokittelusta. (Juutilainen ym. 2006, 223.)

1	Karsinogeeninen ihmisille
2A	Todennäköisesti karsinogeeninen ihmisille
2B	Mahdollisesti karsinogeeninen ihmisille
3	Ei luokiteltavissa
4	Todennäköisesti ei karsinogeeninen ihmisille

Tutkimukset magneettikenttien mahdollisista vaikutuksista lisääntymisterveyteen lisääntyivät ensimmäisten 1980-luvulla tehtyjen havaintojen jälkeen. Tuolloin havaittiin magneettikenttien häiritsevän kanan alkion kehitystä. Lisääntymisterveyteen vaikuttavia tutkimuksia on jatkettu eläinkokeilla muun muassa hiirillä ja rotilla. Koe-eläin tutkimuksissa ei ole pystytty todistamaan, että hyvin pienitaajuiset magneettikentät aiheuttaisivat epämuodostumia tai lisääntymishäiriöitä. (Juutilainen ym. 2006, 229–230.)

3.2.2 Välitaajuiset sähkömagneettiset kentät

Välitaajuiset kentät kytkeytyvä kehoon saman tapaisesti kuin hyvin pienitaajuisissa kentissä. IF kenttien tunnettuja haittavaikutuksia on hermo- ja lihassoluissa esiintyvä sähköärsytys. Kudosten lämpeneminen on myös mahdollista taajuusalueen yläpäässä. Staattisissa ja ELF kentissä esiintyviä magnetofosfeeni ilmiöitä ei ole havaittu IF kentissä. (Jokela 2006, 18.)

Syöpää aiheuttavia vaikutuksia välitaajuisilla magneettikentillä on tutkittu varsin vähän. Eräässä eläinkokeessa hiiriä altistettiin 20 kilohertsin magneettikentälle yksinään, että yhdessä ionisoivan säteilyn kanssa. Magneettikenttä ei yksinään aiheuttanut syöpää, eikä sen havaittu myöskään edistävän lymfoomien kehittymistä, joita ionisoiva säteily aiheuttaa. (Juutilainen & Huskonen 2006, 251.)

Nisäkkäillä tehdyt lisääntymisterveyden kokeet on pääasiassa tehty hiirillä ja rotilla. Tutkimuksia on tehty muun muassa 15–20 kilohertsin taajuisilla sekä 15–66 mikrotesslaa voimakkailla magneettikentillä. Näissä tutkimuksissa ei ole huomattu viitteitä vakavista vaikutuksista, kuten epämuodostumista tai sikiön kehityksen keskeytymistä välitaajuisilla magneettikentillä. On kuitenkin havaittu, että hiirillä ja rotilla lievät luuston muutokset ovat lisääntyneet useassa tutkimuksessa. Luustumuutokset lisääntyivät vain toisella hiirikannalla kahdessa Kuopion yliopistossa tehdyssä samanlaisessa kokeessa, joissa on käytetty eri hiirikantoja. Eli on mahdollista, että tämä vaikutus on ominainen vain tietyillä eläinkannoilla. Kaiken kaikkiaan välitaajuisilla magneettikentillä ei vaikuta olevan voimakkaita vaikutuksia nisäkkäiden lisääntymiseen tai sikiönkehitykseen. (Juutilainen & Huskonen 2006, 252, 254.)

3.3 Radiotaajuiset kentät

Radiotaajuiset kentät (RF) vaikuttavat 100 kilohertsin ja 300 gigahertsin välisellä taajuudella. Radiotaajuuksilla vallitseva vaikutusmekanismi kudoksessa on energian absorboituminen lämmöksi. Mikroaalloilla taajuuden kasvaessa lämpeneminen muuttuu pinnallisemmaksi. Mikroaallot vaikuttavat 300 megahertsin ja 300 gigahertsin taajuusalueella. Lyhyt ja voimakas mikroaaltopulssi voi aiheuttaa termoelastista värähtelyä, jonka voi kuulla. Termoelastinen värähtely on epämiellyttävän kuuloista surinaa. (Jokela 2006, 19.)

4 MAGNEETTIKENTTÄ MITTAUKSET

Sähkömagneettisille kentille altistumisen määrittäminen voi perustua laskuihin laitteen teknisten tietojen perusteella, mittauksiin tai jopa simuloimalla. Tässä työssä se on tehty mittausten perusteella. Kansainvälisissä standardointielimissä on tehty mittausohjeita eri säteilyturvallisuusmittauksista. (Nyberg & Jokela 2006, 456.)

4.1 Mittausympäristö

Työn mittaukset on tehty ABB:n suurtehosähkölaboratoriossa Pitäjänmäellä Helsingissä. Suurtehosähkölaboratorion käyttötarkoituksena on testata suuritehoisia taajuusmuuttajia. Taajuusmuuttajille suoritetaan laboratoriossa kansainvälisien standardien mukaisia tyyppitestejä sekä tuotekehityksen prototestejä. Testattavien taajuusmuuttajien nimellistehot voivat olla jopa 4 megawattia.

Taajuusmuuttajien käyttö tapahtuu siten, että taajuusmuuttajalla pyöritetään sähkökonetta (moottoria). Moottorin pyörivä akseli on kiinni toisessa sähkökoneessa (generaattori). Kun moottorin akseli pyörittää generaattorin akselia, moottorille syötetty sähköenergia siirtyy generaattorin kautta takaisin sähköverkkoon sähkökoneiden häviöitä lukuun ottamatta.

Sähkölaboratoriossa kaapelit kulkevat sähköhylyllä, lattian alla kourussa sekä jopa lattialla. Laboratorion henkilökunta voi siis liikkua hyvinkin lähellä virrallisia kaapeleita ja näin ollen altistua magneettikentille lähietäisyydeltä. Kaapeleiden lisäksi henkilökunta voi altistua magneettikentille ollessaan taajuusmuuttajien vieressä, vaikka käytäntönä onkin, että taajuusmuuttajien ollessa käynnissä ei niiden vieressä oleskella.

Magneettikenttiä on mitattu kaapeleista, jotka kulkevat sekä lattialla, että kaapelihylyssä. Lattialla kulkevien kaapeleiden päälle on rakennettu kävelysilta, jotta kaapeleiden päältä ei käveltäisi. Kenttiä on mitattu myös taajuusmuuttajasta. Taajuusmuuttajasta mitattava kenttä valikoitui selvittämällä mistä kaappi vuotaa

eniten. Kaappi on kierretty mitta-anturin kanssa etu- sekä takaosasta. Eniten vuotaneessa kentässä on kuristin, jonka käämitys vahvistaa magneettikenttää, kuten kaavoista (2), (5) ja (6) voi päätellä.

Sähkölähteenä käytettyä taajuusmuuttajaa ei voitu ajaa nimellisvirrallaan, koska kyseisen testauskytkennän moottorin kaapelointi ei kestäisi niin suurta virtaa. Taajuusmuuttajan kilpiarvotiedot löytyvät taulukosta 2. Taajuusmuuttajaa ajettiin nimellisvirran sijasta 3200 ampeerilla. Taajuusmuuttaja ei todellisuudessa ole sähkölähde, mutta tässä työssä sitä viitataan sillä nimellä, koska sen moottorille lähtevä virta (3200 A) on suurempi kuin verkosta tuleva virta (2750 A). Kuvassa 1. Sähkölähteenä käytetty taajuusmuuttaja.



KUVA 1. Sähkölähteenä käytetty taajuusmuuttaja.

Taajuusmuuttajan lähtöpuoli eli INU on kaapeloitu ensin katkaisijalle ja siitä vasta moottorille. Katkaisijan ja moottorin välinen kaapelointi on laboratorion kiinteitä asennuksia. INU:n ja katkaisijan välistä kaapelointia voidaan muuttaa tarvittaessa kytkettävän taajuusmuuttajan koon perusteella. Tässä työssä on käytetty Sienopyrin $1 \times 240 \text{ mm}^2$ kumikaapelia. Suuren virran vuoksi INU on kaapeloitu kuusi kaapelia per vaihe.

TAULUKKO 2. Taajuusmuuttajan kilpiarvotiedot.

U	690 V
I	3440 A
P	2,75 MW
f	50 Hz

4.2 Mittalaitteet

Mittaukset suoritettiin kolmella eri mittalaitteella. Käytetyillä mittalaitteella voidaan mitata staattisia, pientaajuisia- ja jopa radiotaajuisia magneettikenttiä. Kaikki mittalaitteet ovat kalibroidut ja kalibrointi päivämäärät löytyvät taulukosta 3. Magneettikenttämittaukset tulisi suorittaa kolmiakselisilla laitteilla ja niiden tulisi olla kokonaiskentän mittauksia, ellei ole erityistä syytä käyttää yksiakselisia laitteita (IEC 62110 2009, 11).

TAULUKKO 3. Magneettikenttämittareiden kalibrointi päivämäärät.

Narda HP-01	24.7.2023
Narda EHP-50F	24.7.2023
Narda EHP-200AC	26.7.2023

4.2.1 Magneettikenttämittari Narda HP-01

Narda HP-01 on magneettikenttämittari staattisille ja aikamuuttuville magneettikentille 0 hertsistä 1 kilohertsiin asti välisillä taajuuksilla. Mittari sisältää erittäin tehokkaan FFT-analysaattorin, joka mahdollistaa signaalianalyysin sekä aika-että taajuustasolla. Nopea signaalinkäsittely mahdollistaa yksityiskohtaisen, erittäin tarkan aukottoman analyysin taajuusspektristä. Kuvassa 2 Narda HP-01 mitta-anturi.

Tulokset voidaan esittää reaaliaikaisena spektrinä, spektrogrammina ajan suhteen tai kolmiulotteisena vesiputousdiagrammina. Sisäänrakennettu kapeakaistainen suodatin 0 ja 1 hertsin alueella sopii erityisesti standardienmukaisiin mittauksiin ihmisten turvallisuusstandardien mukaisesti. (Narda n.d.)

HP-01 toimii HP01-TS-ohjelmiston avulla. Mittalaitteen ja tietokoneen välillä on 10 metrin pituinen optinen kaapeli USB-sovittimen kanssa. Tämä kaapeli voidaan jatkaa 50 metrisellä kaapelilla, joka ovat saatavilla lisävarusteena. Vaihtoehtoisesti toiminta voidaan suorittaa myös NBM-550 mittalaitteen kautta. (Narda n.d.)

Toimintaan kentissä, jotka ovat 30 milliteslaa voidaan HP-01 vaihtoehtoisesti kiinnittää suoraan NBM-550:een. Liitäntä tapahtuu siihen tarkoitettuun kierteiseen liitinsovittimen avulla. Pitkällä kuituoptysella kaapelilla mitattaessa HP-01 voidaan kiinnittää kolmijalkatukeen. (Narda n.d.)



KUVA 2. Narda HP-01 on magneettikenttämittari staattisille ja aikamuuttuville magneettikentille.

4.2.2 Sähkö- ja magneettikenttämittari Narda EHP-50F

Narda EHP-50F suorittaa isotrooppisen mittauksen sähköisistä ja magneettisista ELF-kentistä. Kuvassa 3 Narda EHP-50F kiinnitettynä kolmijalkatukeen. (Narda n.d.)

Taajuusselektiivinen FFT-mittausjärjestelmä suurella dynaamisella alueella. Sopii sähköisille ja magneettisille kentille 1 hertsin ja 400 kilohertsin välisillä taajuuksilla. Mittarissa on anturit kaikissa kolmessa avaruussuunnassa, jotka tuottavat suunnasta riippumattomia tuloksia selektiivisiin ja laajakaistamittauksiin. (Narda n.d.)

Narda EHP-50F käyttää painotettua huippumenetelmää kompleksisten signaalien standardienmukaiseen mittaukseen. Tätä Nardan patentoimaa menetelmää käytetään signaalin arvioimiseen matemaattisen konvoluution avulla aikadomeeneissa. Tuloksena on altistuksen suoranäyttö prosentteina raja-arvosta. Tämä tekee sovelluksesta erityisen nopean ja helppokäyttöisen. Painotettu huippu on tärkeimpien standardien raja-arvokäyrien perusta. (Narda n.d.)



KUVA 3. Narda EHP-50F kiinnitettynä kolmijalkatukeen.

4.2.3 Sähkö- ja magneettikenttämittari Narda EHP-200AC

Narda EHP-200AC on RF-alueen magneettisten ja sähköisten lähikenttien sekä kaukokenttien valikoiva ja laajakaistainen mittari. Kuvassa 4 Narda EHP-200AC magneettikenttä mittari. (Narda n.d.)

Taajuusselektiivinen mittausjärjestelmä sähköisille ja magneettisille kentille. EHP-200A/AC on ihanteellinen teollisuuden työturvallisuussovelluksiin sekä myös lähetysasemien lähikenttien ja kaukokenttien määrittämiseen. (Narda n.d.)

EHP-200A/AC voidaan käyttää osoittamaan turvallisuutta suurten antenniryhmien ympärillä, tarkistamaan todellinen lähetetty teho säteilyn todellisessa suunnassa, testaamaan lähettävien antennien toimintaa ja määrittämään lähikenttien ja kaukokenttien välinen raja-alue. (Narda n.d.)



KUVA 4. Narda EHP-200AC magneettikenttämittari. Mittari yhdistetään optisella kaapelilla tietokoneeseen, josta nähdään mittaustulokset siihen tarkoitetun soveluksen avulla.

4.3 Mittausmenetelmät

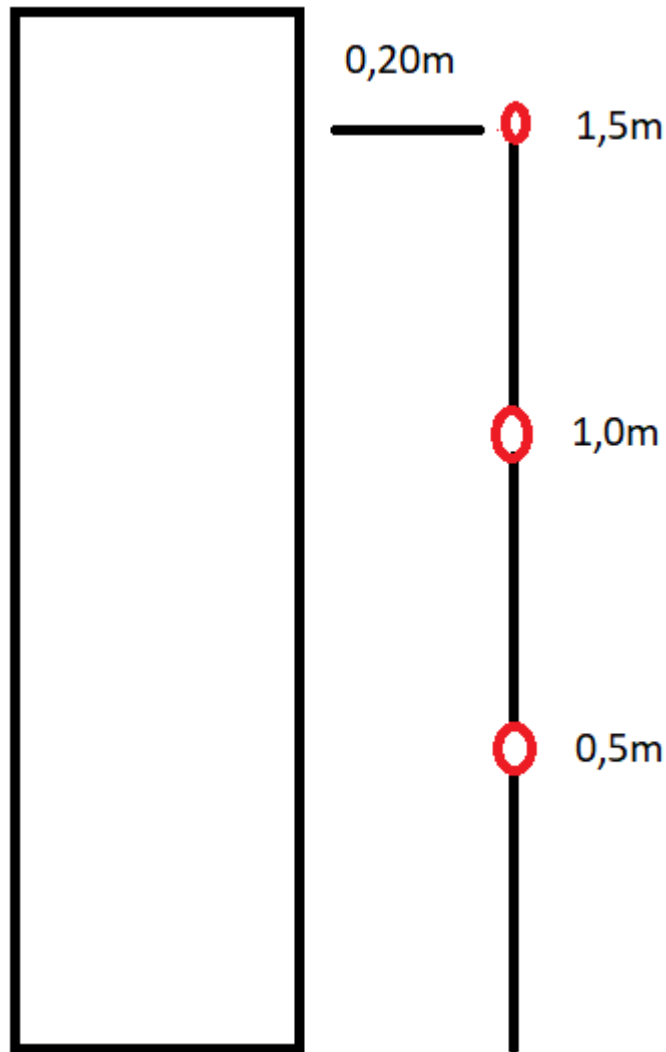
Sähkö- ja magneettikenttien mittaamiseen on kolme perusmenettely tapaa. Yksipistemittaus, kolmepistemittaus ja viisipistemittaus. (IEC 62110 2009, 12.) Tässä työssä käytettiin yksi- ja kolmepistemittaus menetelmää. Rajoitetuilla käyttöalueilla, kuten ABB:n sähkölaboratoriot ovat, on ICNIRP:n määrittelemät rajoitukset sähkömagneettisille kentille altistumiseen (taulukko 12) voimassa 25 senttimetriä kappaleen pinnasta. (IEC 61800-5-1 2022, 262.) Kolmepistemittauksissa käytetään siis 25 senttimetrin vaakasuoraa etäisyyttä, eikä niille tyypillistä 20 senttimetrin etäisyyttä.

4.3.1 Yksipistemittaus

Missä kenttää pidetään tasaisena, sähkökentän tai magneettikentän taso kiinnostavan pisteen kohdalla tulisi mitata 1,0 metrin korkeudelta maasta tai rakennuksen lattiasta. Tämä mitattu taso tunnetaan keskimääräisenä altistustasona. Tarvittaessa muita korkeuksia voidaan käyttää, ja tällöin todellinen mittauskorkeus tulisi selkeästi merkitä mittausraporttiin. (IEC 62110 2009, 13.)

4.3.2 Kolmepistemittaus

Missä kenttää pidetään epätasaisena, sähkö- ja magneettikentän tasoa kiinnostavan paikan kohdalla tulisi mitata kolmessa korkeudessa: 0,5 m, 1,0 m ja 1,5 m maanpinnasta tai rakennuksen lattiasta. Voimalaitteiden vieressä tai rakennuksessa mittaus tulisi suorittaa vaakasuorassa etäisyydessä 0,2 m sen pinnasta, rajasta tai seinästä. Tilanteissa, joissa laitteisto on alle 1,5 m korkea, kolmen pisteen mittaukset on suoritettava tasavälein, ja korkein mittauskorkeus tulee olla samalla tasolla kuin laitteen yläosa. Tarvittaessa muita korkeuksia voidaan käyttää, ja tällöin todelliset mittauskorkeudet tulisi selkeästi kirjata mittausraporttiin. (IEC 62110 2009, 13.) Kuvassa 5 malli kolmepistemittausten mittapisteistä.



KUVIO 5. Malli kolmepistemittausten mittapisteistä.

4.3.3 Viisipistemittaus

Missä maan alla tai lattian alla on kenttälähteitä ja on kohtuullinen mahdollisuus siihen, että henkilö voi maata sen päällä, tulee suorittaa viisipistemittaus. Viisipistemittauksissa magneettikentän taso tulisi skannata 0,2 metrin korkeudelta maasta tai lattiasta maksimikentän arvon ja sijainnin löytämiseksi. Toiseksi suurimman kentän arvo ja sijainti tulisi skannata ympyrällä, jonka säde on 0,5 metriä ja jonka keskipiste on maksimisijainnissa. Toinen mittaus tulisi tehdä pisteessä, joka on symmetrinen toiseksi suurimman suhteen. Kaksi lisämittausta tulisi tehdä linjan varrella, joka on kohtisuorassa aiemmin kolmen mittauspisteen kautta kulkevalle linjalle, etäisyydellä 0,5 metriä kummallakin puolella maksimipisteen sijaintia. Viidestä lukemasta kolmen suurimman keskiarvo tulisi laskea. Tämä keskiarvo tunnetaan keskimääräisenä altistustasona. (IEC 62110 2009, 14.)

Huomioi, että käytännössä saattaa joutua soveltamaan menettelytapaa, jotta saadaan huomioitua huonekalut, joita ei voida poistaa, ja huoneen seinät jne. (IEC 62110 2009, 14). Tapauksissa, joissa henkilön ei odoteta makaavan maassa tai lattialla, tulisi käyttää normaalia kolmen pisteen mittausmenetelmää (IEC 62110 2009, 14).

4.4 Mittaustulokset

Mittauspisteitä työssä on neljä kappaletta ja mittaussarjoja seitsemän kappaletta. Mittaussarjoissa taajuusalue, joilta magneettikenttiä mitataan, vaihtelee. Mittauspisteissä 1 ja 2 on käytetty kolmipistemittausmenetelmää. Kuvissa 6, 7, 8 ja 9 nähdään mitatut pisteet. Mittauksien tulokset ovat nähtävissä taulukoissa 4–10.



KUVA 6. Mittauspiste 1. ja sen kolmipistemittauspisteet merkitty keltaisella teipillä punaisten rinkeloiden sisällä.



KUVA 7. Mittauspiste 2. ja sen kolmepistemittauspisteet merkitty keltaisella teipillä punaisten rinkluiden sisällä.



KUVA 8. Mittauspiste 3. ja sen mitattu piste on merkitty keltaisella teipillä punaisen rinkulan sisällä.



KUVA 9. Mittauspiste 4. ja sen mitattu piste on merkitty keltaisella teipillä punaisen rinkulan sisällä.

TAULUKKO 4. Narda HP-01, mitattu taajuus alue 0–1000 Hz.

Mittauspiste	Virta (A)	Mittauskor- keus (m)	Magneettivuon tiheys RMS (mT)
1	3200	0,5	0,099
		1	0,107
		1,5	0,102
	KESKIARVO		0,103
2	2750	0,5	0,071
		1	0,082
		1,5	0,079
	KESKIARVO		0,077
3	3200	0,25	0,0164
4	3200	0	3,3

TAULUKKO 5. Narda EHP-50F, mitattu taajuusalue 1–100 Hz.

Mittaus- piste	Virta (A)	Mittaus- korkeus (m)	Magneettivuon tiheys huippuarvo (μ T)	Taajuus (Hz)
1	3200	0,5	58,378	55,18
		1	51,037	55,18
		1,5	47,808	55,18
	KESKIARVO		52,408	-
2	2750	0,5	43,841	50,05
		1	52,983	50,05
		1,5	53,401	50,05
	KESKIARVO		50,075	-
3	3200	0,25	72,577	55,18
4	3200	0	612,8	55,18

TAULUKKO 6. Narda EHP-50F, mitattu taajuusalue 100–500 Hz.

Mittaus- piste	Virta (A)	Mittaus- korkeus (m)	Magneettivuon tiheys huippuarvo (μ T)	Taajuus (Hz)
1	3200	0,5	0,4403	163,57
		1	0,6333	163,57
		1,5	0,6825	163,57
	KESKIARVO		0,5854	-
2	2750	0,5	1,2097	148,93
		1	2,6624	148,93
		1,5	2,8344	148,93
	KESKIARVO		2,2355	-
3	3200	0,25	0,6426	108,64
4	3200	0	4,8048	164,79

TAULUKKO 7. Narda EHP-50F, mitattu taajuusalue 500 Hz-10 kHz.

Mittaus- piste	Virta (A)	Mittaus- korkeus (m)	Magneettivuon tiheys huippuarvo (μ T)	Taajuus (kHz)
1	3200	0,5	1,5281	3,369
		1	2,0696	3,271
		1,5	2,1009	3,174
	KESKIARVO		1,8995	-
2	2750	0,5	0,2903	0,537
		1	0,1442	0,464
		1,5	0,1572	3,711
	KESKIARVO		0,1972	-
3	3200	0,25	2,1018	3,296
4	3200	0	15,977	3,174

TAULUKKO 8. Narda EHP-50F, mitattu taajuusalue 10–400 kHz.

Mittaus- piste	Virta (A)	Mittaus- korkeus (m)	Magneettivuon tiheys huippuarvo (μ T)	Taajuus (kHz)
1	3200	0,5	2,5460	41,016
		1	4,5121	46,875
		1,5	2,3996	49,805
	KESKIARVO		3,1526	-
2	2750	0,5	0,8223	398,437
		1	0,9988	384,765
		1,5	1,0246	385,741
	KESKIARVO		0,9486	-
3	3200	0,25	5,2455	48,828
4	3200	0	31,263	48,828

TAULUKKO 9. Narda EHP-200AC, mitattu taajuusalue 400 kHz-5 MHz.

Mittaus- piste	Virta (A)	Mittaus- korkeus (m)	Magneettivuon tiheys huippuarvo (μ T)	Taajuus (MHz)
1	3200	0,5	0,1226	0,4
		1	0,0925	0,4250
		1,5	0,0772	0,4250
	KESKIARVO		0,0974	-
2	2750	0,5	0,0252	0,400
		1	0,0226	0,525
		1,5	0,0247	0,4
	KESKIARVO		0,0242	-
3	3200	0,25	0,0818	0,425
4	3200	0	0,7029	0,400

TAULUKKO 10. Narda EHP-200AC, mitattu taajuusalue 5-10MHz.

Mittaus- piste	Virta (A)	Mittaus- korkeus (m)	Magneettivuon tiheys huippuarvo (μ T)	Taajuus (MHz)
1	3200	0,5	0,0304	5,975
		1	0,0288	5,975
		1,5	0,0297	6
	KESKIARVO		0,0296	-
2	2750	0,5	0,0274	6
		1	0,0275	5,975
		1,5	0,028	5,975
	KESKIARVO		0,276	-
3	3200	0,25	0,0297	6
4	3200	0	0,0387	7,625

5 TULOSTEN KÄSITTELY

Kansainvälisen ei -ionisoivan säteilyn suojelukomissio (ICNIRP) on julkaissut suositukset ihmisten altistumisesta sähkömagneettisille kentille. Vuonna 2010 julkaistuissa ohjeissa ICNIRP antaa sähkömagneettisille kentille altistumisen rajoitukset 1 hertsin ja 10 megahertsin välille. Taulukoissa 11 ja 12 on ICNIRP:n antamat rajoitukset julkiselle- ja työperäiselle altistumiselle. Rajoitukset ovat voimassa jatkuvassa altistumisessa. (IEC 61800-5-1 2022, 259–260.)

TAULUKKO 11. Raja-arvot julkisilla paikoilla altistumiseen. (IEC 61800-5-1 2022, 260.)

Taajuus alue	Sähkökentän voimakkuus (kV/m)	Magneetti kentän voimakkuus (A/m)	Magneettikentän tiheyden voimakkuus (T)
0–1 Hz	-	$3,2 \times 10^4$	4×10^{-2}
1–8 Hz	5	$3,2 \times 10^4/f^2$	$4 \times 10^{-2}/f^2$
8–25 Hz	5	$4 \times 10^3/f$	$5 \times 10^{-3}/f$
25–50 Hz	5	$1,6 \times 10^2$	2×10^{-4}
50–400 Hz	$2,5 \times 10^2/f$	$1,6 \times 10^2$	2×10^{-4}
400 Hz – 3 kHz	$2,5 \times 10^2/f$	$6,4 \times 10^4/f$	$8 \times 10^{-2}/f$
3 kHz-10 MHz	$8,3 \times 10^{-2}$	21	$2,7 \times 10^{-5}$

TAULUKKO 12. Raja-arvot työperäiseen altistumiseen. (IEC 61800-5-1 2022, 260.)

Taajuus alue	Sähkökentän voimakkuus (kV/m)	Magneetti kentän voimakkuus (A/m)	Magneettikentän tiheyden voimakkuus (T)
0–1 Hz	-	$1,63 \times 10^5$	0,2
1–8 Hz	20	$1,63 \times 10^5/f^2$	$0,2/f^2$
8–25 Hz	20	$2 \times 10^4/f$	$2,5 \times 10^{-2}/f$
25–300 Hz	$5 \times 10^2/f$	8×10^2	1×10^{-3}
300–3 kHz	$2,5 \times 10^2/f$	$2,4 \times 10^5/f$	$0,3/f$
3 kHz-10 MHz	$1,7 \times 10^{-1}$	80	1×10^{-4}

Verrataan ylittääkö taulukoiden 4–10 mitatut tulokset taulukon 12 työperäiset raja-arvot. Taulukoissa 13–15 verrataan eri taajuusalueiden suurinta mitattua magneettivuontiheyden voimakkuutta ICNIRP:n julkaisemiin työperäisiin rajoituksiin. Vertailusta voi huomata, että ABB:n suurtehosähkölaboratorion magneettikentät ovat reilusti raja-arvojen sisäpuolella.

Voimakkaimmat kentät on mitattu suorassa kosketuksessa virrallisten kaapeleiden kanssa. Vertailun vuoksi taulukossa 13 on, kaksi muutakin magneettivuontiheyttä ilmaisevaa tulosta. Toinen arvoista on teoreettinen (Laskuesimerkki 1) ja se on laskettu taulukko 5:n mittauspiste 5:n arvojen perusteella. Toinen on mitattu arvo, joka on saatu 25 senttimetrin etäisyydeltä kaapeleista.

Laskuesimerkki 1:

Suoran johtimen magneettikentän voimakkuus saadaan kaavalla (4) ja magneettivuontiheyden voimakkuus kaavalla (7).

$$H = \frac{533 \text{ A}}{2 \cdot \pi \cdot 0,0018 \text{ m}} = 47128 \frac{\text{A}}{\text{m}}$$

$$B = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}} \cdot 47128 \frac{\text{A}}{\text{m}} = 59 \text{ mT}$$

TAULUKKO 13. Vertailu 25 ja 300 Hz välisillä taajuuksilla. Mitatut arvot taulukosta 5 ja laskettu arvo laskuesimerkistä 1.

Taajuus	Etäisyys kaapeleista (cm)	Mitattu arvo (μT)	Raja-arvo (μT)
55 Hz	0	613	1000
	25	73	
LASKETTU ARVO		59 mT	

Taulukosta 13 nähdään, että laskettu tulos ei täysin vastaa mitattua tulosta. Laskettu tulos on vain karkea laskuesimerkki maksimikentänvoimakkuudesta. Siinä ei oteta huomioon, kuinka toisiaan lähellä olevat kolmivaihejohtimet osittain kumoavat magneettikenttää. Laskussa ei myöskään oteta huomioon johtimien eristeenä olevaa kumivaippaa, joka myös vaimentaa kentänvoimakkuutta. Lisäksi taulukosta nähdään, että kentän vuontiheys laskee 25 senttimetrin matkalla 88 prosenttia, mitatusta huippuarvostaan.

TAULUKKO 14. Vertailu 300 Hz ja 3 kHz välisillä taajuuksilla. Mitattu arvo taulukosta 7.

Taajuus	Mitattu arvo (μT)	Raja-arvo (μT)
464 Hz	0,29	647

TAULUKKO 15. Vertailu 3 kHz ja 10 MHz välisillä taajuuksilla. Mitattu arvo taulukosta 8.

Taajuus	Mitattu arvo (μT)	Raja-arvo (μT)
48,8 kHz	31	100

Euroopan parlamentin direktiivissä 2013/35/EU on annettu raja-arvot myös staattisten magneettivuontiheysien voimakkuuksille (IEC 61800-5-1 2022, 26). Taulukossa 16. raja-arvot staattisille magneettikentille.

Taulukko 16. Staattisten magneettikenttien magneettivuon tiheyttä koskevat raja-arvot. (IEC 61800-5-1 2022, 261.)

Mahdolliset vaarat	Magneettikentän vuontiheyden voimakkuus (mT)
Aktiivisten implantoitujen laitteiden, kuten sydämentahdistimien, häiriintyminen	0,5
Vetovoima- ja sinkoutumisriski kestmagneeteilla	3

6 TOIMENPITEET

Kun sydämentahdistimet voivat häiriintyä staattisissa 0,5 mikro teslan kentissä (katso taulukko 16), voivat ne häiriintyä myös yhtä voimakkaissa aikamuuttuvissa kentissä. Tällöin turvalliset rajat voivat ylittyä henkilöillä, joilla on sydämentahdistin ja näin ollen tällaisille henkilöille tulee asettaa rajoituksia laboratorion sisälle pääsyyn.

Suurtehosähkölaboratorion nykyiselle henkilökunnalle on ilmoitettava mahdollisista voimakkaista magneettikentistä ja se tulee myös lisätä laboratorion perehdytys materiaaleihin. Sähkömagneettisia kenttiä kuvaavia varoituskylttejä ei vaadita, koska laboratorioon pääsy on rajoitettu ja siellä toimivaa henkilökuntaa tiedotettu. (Asetus 388/2016.) Varoituskyltit tullaan silti turvallisuussyistä lisäämään. Kuvassa 10. esimerkki Ruotsin Västeråsissa sijaitsevan ABB:n sähkölaboratorion varoituskyltistä.



KUVA 10. Magneettikentistä varoittava kyltti. Suomeksi: Varoitus magneettikentistä. Henkilöiden, joilla on sydämentahdistin ei tulisi oleskella tiloissa.

Koska työperäisen altistumisen raja-arvot eivät ylittyneet, tästä ei seuraa sen suurempia toimenpiteitä. Vaikka suurtehosähkölaboratoriossa työskennellessä ei normaalisti esiinny terveydelle haitallisen suuria magneettikenttiä, on siellä työskennellessä hyvä pitää pientä etäisyyttä käynnissä olevista taajuusmuuttajista ja kaapeliteistä.

LÄHTEET

Ahoranta, J. 1995. Sähkötekniikka. 1.–11. painos, 2012. Sanoma Pro Oy. Helsinki. Viitattu 13.11.2023.

Fingrid. Voimajohtojen sähkö- ja magneettikentät. Terveysvaikutukset tutkimusten valossa, 15. Viitattu 14.11.2023. https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/julkaisut/fingrid-voimajohtojen_sahko_ja_magneettikentat_web.pdf

IEC 61800-5-1:2022. 2022. Adjustable speed electrical power drive systems. Part 5-1: Safety requirements – electrical, thermal and energy. Geneva: International Electrotechnical Commission. Viitattu 16.11.2023.

IEC 62110:2009. 2009. Electric and magnetic field levels generated by AC power systems. Measurement procedures with regard to public exposure. Geneva: International Electrotechnical Commission. Viitattu 16.11.2023.

Narda. Magnetometer HP-01. Verkkosivu. Viitattu 15.11.2023. <https://www.narda-sts.com/en/wideband-emf/magnetometer-hp-01/>

Narda. Narda EHP-50F. Verkkosivu. Viitattu 15.11.2023. <https://www.narda-sts.com/en/selective-emf/ehp-50f-field-strength-analyzer/ehp-50f-2404104/>

Narda. Narda EHP-200AC. Verkkosivu. Viitattu 15.11.2023. <https://www.narda-sts.com/en/selective-emf/ehp-200aac/>

Juutilainen, J, Naarala, J, Verkasalo, P, Kumlin, T, Huuskonen & Kuustonen J. 2006. Sähkömagneettiset kentät. Hyvin pientaajuisten kenttien vaikutuksia. Karisto Oy:n kirjapaino. Hämeenlinna. Viitattu 14.11.2023. <https://stuk.fi/documents/150192312/162661266/kirja6-5-sahkomagneettiset-kentat-pientaajuiset-kentat.pdf/dbff579f-5fb6-48b8-46f8-4e55a0202805/kirja6-5-sahkomagneettiset-kentat-pientaajuiset-kentat.pdf?t=1684851465270>

Jokela, K. 2006. Sähkömagneettiset kentät. Ionisoimaton säteily ja sähkömagneettiset kentät. Karisto Oy:n kirjapaino. Hämeenlinna. Viitattu 14.11.2023. <https://stuk.fi/documents/150192312/162661266/kirja6-1-sahkomagneettiset-kentat.pdf/ac9b8a10-5c46-9436-828a-2310c42acc40/kirja6-1-sahkomagneettiset-kentat.pdf?t=1684851461993>

Työsuojeluhallinnon verkkopalvelu. Sähkömagneettiset kentät. Verkkosivu. Viitattu 13.11.2023. <https://tyosuojelu.fi/tyoolot/fysikaaliset-tekijat/magneettiset-kentat>

Juutilainen, J & Huuskonen, H. 2006. Sähkömagneettiset kentät. Välitaajuisten kenttien vaikutuksia <https://stuk.fi/documents/150192312/162661266/kirja6-6-sahkomagneettiset-kentat-valitaajuisten-kenttien-vaikutuksia.pdf/57381f4a-10a8-5240-55b5-b4926e5b2486/kirja6-6-sahkomagneettiset-kentat-valitaajuis-ten-kenttien-vaikutuksia.pdf?t=1684851466198>

Työterveyslaitos. Sähkömagneettiset kentät. Verkkosivu. Viitattu 13.11.2023. <https://www.ttl.fi/teemat/tyoturvallisuus/altistuminen-tyoympariston-haittatekijöille/fysikaaliset-altisteet-tyopaikalla/sahkomagneettiset-kentat>

Valtioneuvoston asetus työntekijöiden suojelemiseksi sähkömagneettisista kentistä aiheutuvilta vaaroilta. 19.5.2016/388. Verkkosivu. Viitattu 17.11.2023. <https://finlex.fi/fi/laki/alkup/2016/20160388#Pidm46434450039744>