



# SÄHKÖ- JA MAGNEETTIKENTTIEN MITTAAMINEN HÄIRIÖISESSÄ YMPÄRISTÖSSÄ

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala			
Koulutusohjelma Sähkötekniikan koulutusohjelma			
Työn tekijä Vili Kupari			
Työn nimi Sähkö- ja magneettikenttien mittaaminen häiriöisessä ympäristössä			
Päiväys	12.5.15	Sivumäärä/Liitteet	38/2
Ohjaaja Testausinsinööri emc Marko Sorsa, Lehtori Jari Ijäs			
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani Savonia AMK / Testausinsinööri Matti Tiusanen			
<p>Tiivistelmä</p> <p>Opinnäytetyön aiheena oli selvittää sopivat mittalaitteistot , jotka pystyvät mittaamaan 50 Hz sähköjärjestelmien aiheuttamat sähkö- ja magneettikentät. Näiden mittalaitteiden täytyy soveltua mittauskohteessa vallitseviin olosuhteisiin ja mitattaviin kenttiin. Lisäksi tarvoitteena oli tarkoitus mitata teollisuuslaitoksen tiloissa esiintyvät sähkö- ja magneettikenttien voimakkuudet ja verrata saatuja tuloksia direktiivissä 2013/35/EU sekä standardissa EN 50527-2-1 esiteltyihin raja- ja suositusarvoihin.</p> <p>Työssä perehdyttiin Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiiviin 2013/35/EU sekä standardiin EN 50527-2-1, jotka olivat työn mittauksen lähtökohtina. Euroopan neuvoston ja parlamentin direktiivi 2013/35/EU määrittelee raja-arvot ja toimenpidetasot, joilla rajoitetaan työntekijöiden altistumista sähkömagneettisille kentille työpaikoilla. Standardi EN 50527-2-1 määrittelee sähkö- ja magneettikenttien voimakkuuksien arvot, jotka epäsuotuisissa olosuhteissa voivat aiheuttaa sydämentahdistimen toiminnan häiriintymisen ja näin vaarantaa työntekijän terveyden. Työhön soveltuvista mittaustavoista löytyi tietoa standardista IEC 62110, jossa esiteltiin selkeästi tavat sähkö- ja magneettikenttien mittaamiseen.</p> <p>Työn tulokena saatiin tiedot soveltuvista mittalaitteista ja niiden valmistajista toimeksiantajalle; näitä tietoja käytettiin hankiesityksessä. Käytännön mittauksia ei päästy suorittamaan tämän työn aikana, koska hankintaesitystä ei hyväksytty. Tästä syystä työ päätettiin viimeistellä selvitystyönä.</p>			
Avainsanat sähkökenttä, magneettikenttä, sähkömagneettiset kentät, pientaajuiset kentät, 100 kHz, 2013/35/EU, EN 50527-2-1, IEC 62110			

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme in Electrical Engineering			
Author Vili Kupari			
Title of Thesis Electric And Magnetic Field Measurement in Disturbed Environment			
Date	12 May 2015	Pages/Appendices	38/2
Supervisors Mr Marko Sorsa, Engineer, Mr Jari Ijäs, Lecturer			
Client Organisation /Partners Savonia University of Applied Sciences / Mr Matti Tiusanen Engineer			
<p><b>Abstract</b></p> <p>The topic of the thesis was to research appropriate measurement devices and their manufacturers which can measure electric and magnetic fields generated by AC power systems. Those measurement devices had to be suitable for environment conditions in the target and respond to electric and magnetic fields which occur in the measurements location. After acquiring the device, the purpose was to use it for measuring electric and magnetic fields and to compare results with limit values defined in the directive 2013/35/EU and standard EN 50527-2-1.</p> <p>The project was started by studying the European council and parliament directive 2013/35/EU and standard EN 50527-2-1, which were the basis of this project. The European council and parliament directive 2013/35/EU defines limit values and procedure levels which the limit worker's exposure to electromagnetic fields. Standard EN 50527-2-1 defines electromagnetic field levels which in unfavourable circumstances could cause pacemakers to malfunction which can be lethal for the worker's health. Suitable measurement procedures for this project case can be found in Standard IEC 62110.</p> <p>As a result of this thesis, information was gained about suitable measurement devices and manufacturers for the commissioner, which was used for the procurement proposal. Because the procurement proposal was rejected it was not possible to make measurements as part of this thesis.</p>			
<p><b>Keywords</b> electric field, magnetic field, electromagnetic field, extremely low field, 100 kHz, 2013/35/EU, EN 50527-2-1, IEC 62110</p>			

## SISÄLTÖ

1	JOHDANTO .....	6
2	SÄHKÖMAGNEETTINEN TEORIA .....	7
2.1	Sähkökenttä .....	7
2.2	Magneettikenttä.....	8
2.3	Sähkömagneettinen aalto .....	9
2.4	Ominaisabsorptionopeus .....	10
3	SÄHKÖMAGNEETTINEN SPEKTRI .....	12
3.1	Staattinen magneettikenttä .....	14
3.2	Pientaajuiset sähkö- ja magneettikentät .....	14
4	IONISOIMATTOMAN PIENTAAJUISEN SÄHKÖMAGNEETTISEN SÄTEILYN LÄHTEITÄ.....	15
4.1	Staattisten sähkö- ja magneettikenttien lähteitä.....	15
4.2	Pientaajuisen sähkö- ja magneettikenttien lähteitä.....	15
5	PIENTAAJUISTEN SÄHKÖMAGNEETTISTEN KENTTIEN TERVEYSHAITTOJA .....	16
5.1	Hermostolliset.....	16
5.2	Sydämen toimintaa häiritsevät.....	16
5.3	Sähköherkkyys.....	16
5.4	Syöpä.....	17
6	ASETUKSIA JA MÄÄRÄYKSIÄ .....	18
6.1	Väestön altistuminen.....	18
6.2	Työntekijöiden altistuminen .....	19
6.3	Sydämentahdistinta käyttävä henkilö.....	20
7	SÄHKÖ- JA MAGNEETTIKENTTIEN MITTAUSTEKNIikka.....	21
7.1	Yleistä tietoa mittaustekniikasta .....	21
7.2	Yksipistemittaus.....	22
7.3	Kolmipistemittaus .....	22
7.4	Viisipistemittaus.....	23
7.5	Mittausmenetelmät suurimman altistumistason löytämiseksi sähkökentästä .....	23
7.6	Mittausmenetelmät suurimman altistumistason löytämiseksi magneettikentästä .....	24
7.7	Mittausraportin laatiminen .....	25
8	MITTALAITTEISTO .....	26

8.1	Mittalaitteen ominaisuudet.....	26
8.2	Mittalaitteen anturit.....	27
8.3	Sopivan mittalaitteiston valitseminen kohteeseen .....	27
8.3.1	Mittalaite EFA-300 .....	28
8.3.2	Mittalaite SMP2 .....	29
8.3.3	Mittalaite NF-5030.....	30
8.3.4	Mittalaite NHT-310 .....	30
8.3.5	Mittalaite TAOMA .....	31
9	YHTEENVETO.....	32
	LÄHTEET .....	33
	LIITE 1: MITTALAITTEIDEN VERTAILUTAULUKKO.....	35
	LIITE 2: MITTAUSPÖYTÄKIRJAN MALLI.....	36
	LIITE 3: TYÖNTEKIJÖIDEN ALTISTUMISTA RAJOITTAVAT TOIMENPIDETASOT TAAJUUSALUEELLA 0 HZ – 10 MHZ.....	37

## 1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on mitata teollisuuslaitoksen tiloissa esiintyvät sähkö- ja magneettikenttien voimakkuudet ja verrata saatuja tuloksia direktiivissä 2013/35/EU sekä standardissa EN 50527-2-1 esiteltyihin raja- ja suositusarvoihin. Edellä mainittujen direktiivin ja standardin määrittelemillä arvoilla varmistetaan työntekijöille turvallinen työskentely-ympäristö. Jos tuotantolaitoksessa mitatut arvot ylittävät raja- tai suositusarvot, joutuu työnantaja tekemään toimenpiteitä, joilla varmistetaan, ettei arvojen ylitys enää toistu, tai rajoittamaan työntekijöiden oleskelua alueilla, joissa ylitykset on mitattu.

Mittauskohteena olevassa tuotantolaitoksen sähköverkossa on huomattavia määriä harmonisia yliaaltoja, jotka johtuvat vanhoista moottorien ja taajuusmuuttajien asennuksista, joissa ei ole kiinnitetty huomiota häiriöiden poistoon. Tämän seurauksena sähköverkon aiheuttamat sähkö- ja magneettikentät eivät ole puhtaasti 50 Hz sinimuotoisia kenttiä. Kokonaisaltistumista arvioidessa on otettava huomioon yliaaltojen synnyttämät sähkömagneettiset kentät, joten mittauksien taajuusalue laajenee huomattavasti.

Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivissä 2013/35/EU määritellään raja-arvot ja toimenpidetasot, joilla rajoitetaan työntekijöiden altistumista sähkömagneettisille kentille työpaikoilla. Kyseissä direktiivissä määritellään myös toimenpiteet, joita työnantaja joutuu tekemään, jos määritellyt arvot ylittyvät. Standardissa EN 50527-2-1 määritellään sähkö- ja magneettikenttien voimakkuuksien arvot, jotka epäsuotuisissa olosuhteissa voivat häiritä sydämentahdistimen toimintaa ja näin vaarantaa työntekijän terveyden.

Sähköfysiikkaa on käsitelty tässä työssä sähkö- ja magneettikenttien yksinkertaisten tapauksien avulla sekä esitelty suureet, joita raja-arvot, suositukset ja mittalaitteet yleensä käyttävät. Sähkökenttään liittyvät fysikaaliset suureet on havainnollistettu kondensaattorilevyjen välissä olevan kentän avulla, missä kenttäviivat ovat suoria, minkä ansiosta kaavat yksinkertaistuvat ja ovat helpompia ymmärtää. Magneettikenttään liittyvää teoriaa on käsitelty yksittäisessä pitkässä suorassa johtimessa, mikä yksinkertaistaa huomattavasti laskentakaavoja ja helpottaa ymmärtämään magneettikenttään vaikuttavat tekijät.

Sähkömagneettisiin kenttiin liittyy terveysvaikutuksia, minkä takia monet eri tahot tekevät erilaisia tutkimuksia, joilla yritetään saada parempi ymmärrys kenttien aiheuttamista pitkä- ja lyhytaikaisista terveysvaikutuksista. Työssä on käsitelty pientaajuisten sähkö- ja magneettikenttien mahdollisia terveysvaikutuksia.

## 2 SÄHKÖMAGNEETTINEN TEORIA

Tässä luvussa käsitellään sähköfysiikkaa yksinkertaisissa tapauksissa ja esitellään suureet, joita mittalaitteet yleensä osoittavat sähkö- ja magneettikentistä, sekä havainnollistetaan sähkömagneettisen aallon syntymekanismia ja esitellään ominaisabsorptionopeuden laskentakaavat. Pientaajuisten sähkö- ja magneettikenttien altistumisen rajoittamiseen ominaisabsorptionopeuksien laskentakaavoja käytetään vain taajuusalueen yläpäässä (100 kHz). Kyseinen suure tulee tärkeäksi altistumista rajoittavaksi suureksi suuremmilla taajuuksilla, joita ei tässä työssä käsitellä.

### 2.1 Sähkökenttä

Sähkövarauksen ympärille muodostuu tila, jota kutsutaan sähkökentäksi. Sen vaikutuksia ympäristöön on helppo kuvata kahden pistemäisen varauksen avulla. Kaksi erimerkkistä varausta vetävät toisiaan puoleensa, kun taas kaksi samanmerkkistä varausta hylkivät toisiaan. Sähkökenttä voidaan määrittellä helposti potentiaalierojen eli jännitteiden avulla, joiden mittaukset on helppo toteuttaa käytännössä. Potentiaaliero kahden pisteen välillä on

$$U = V_2 - V_1 = - \int_1^2 \vec{E}_l \cdot d\vec{l} \quad (1)$$

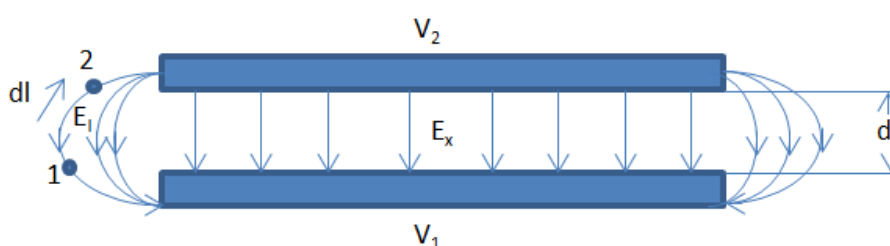
jossa  $U$  on jännite,  $V_1$  ja  $V_2$  ovat potentiaaleja,  $\vec{E}_l$  on on viiva-alkion  $d\vec{l}$  suuntainen sähkökentän komponentti. Integraalilause voidaan yksinkertaistaa esimerkiksi kahden kondensaattorilevyn välissä, jossa kenttäviivat ovat suoria, jolloin jännite  $U$  voidaan lausua

$$U = V_2 - V_1 = -E_x \cdot d \quad (2)$$

josta voidaan edelleen ratkaista sähkökenttä  $E_x$

$$E_x = \frac{U}{d} = \frac{V_1 - V_2}{d} \quad (3)$$

joten sähkökentän yksikkö voidaan ilmaista voltteja metriä kohti (V/m). Kuvassa 1 on havainnollistettu sähkökentän kenttäviivoja kondensaattorilevyjen välissä. (Nyberg & Jokela 2006.)



KUVA 1. Sähkökenttä kondensaattorilevyjen välissä (Nyberg & Jokela 2006 mukaisesti.)

## 2.2 Magneettikenttä

Sähkövarausten liikettä johteessa kutsutaan sähkövirraksi, joka jakautuu tasaisesti johteen poikkipinnalle. Virrantiheydellä  $J$  ilmaistaan sähkövirtaa poikkipintaa kohti ( $A/m^2$ )

$$J = \frac{I}{A} \quad (4)$$

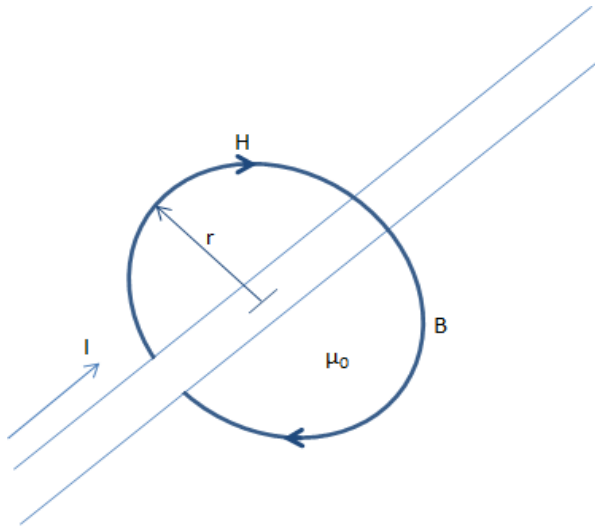
tai se voidaan ilmaista vaihtoehtoisesti sähkökentän voimakkuutta  $E$  käyttäen

$$J = \sigma E \quad (5)$$

jossa  $\sigma$  on johtavuus Siemens metriä kohti ( $S/m$ ). Sähkövirta luo johteen ympärille magneettikentän. Magneettikentän vuoviivat ovat kokonaisia ympyröitä. Magneettikentistä käytetään suureita magneettikentän voimakkuus  $H$  ja magneettivuon tiheys  $B$ . Magneettikentän voimakkuus voidaan laskea Ampèren lain avulla, jos virta  $I$  on tiedossa.

$$I = \oint_c H \cdot dl = \oint_s J \cdot ds \quad (6)$$

jossa  $H$  on magneettikentän voimakkuus reunakäyrällä  $c$  ja  $dl$  käyrän suuntainen pituusalkio,  $s$  on käyrän rajaama avoin pinta ja  $J$  on kohtisuora virrantiheys pinnalla.



KUVA 2. Magneettikentän voimakkuus yksittäisessä virrallisessa johtimessa (Nyberg & Jokela 2006 mukaisesti.)

Kuvan 2 mukaisessa yksittäisessä pitkässä suorassa johtimessa voidaan integraalilauseke sieventää muotoon

$$H = \frac{I}{2\pi r} \quad (7)$$

joten magneettikentän voimakkuuden yksikkö on ampeeri metriä kohti ( $A/m$ ).



Magneettivuon tiheys  $B$  voidaan laskea magneettikentän voimakkuuden  $H$  avulla

$$B = \mu_0 H \quad (8)$$

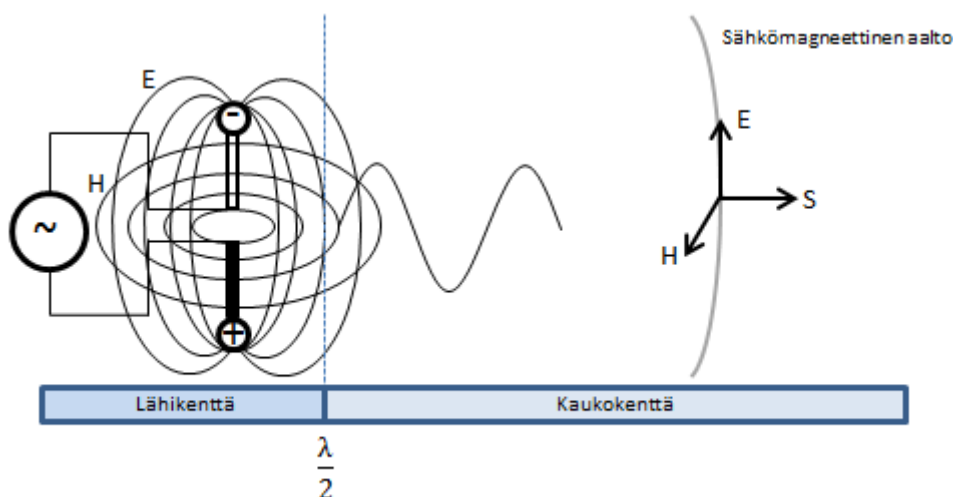
jossa  $\mu_0$  on tyhjiön permeabilisuus  $4\pi \cdot 10^{-7}$  henryä metriä kohti (H/m). Magneettivuon tiheyden yksikkö on tesla (T). (Nyberg & Jokela 2006.)

### 2.3 Sähkömagneettinen aalto

Sähkömagneettisen iduktio mukaan muuttuva magneettikenttä luo muuttuvan sähkökentän. Kyseinen ilmiö toimii myös toiseen suuntaan. Mitä suurempi on sähkökentän muutosnopeus, sitä suuremman magneettikentän se saa aikaan. Sähkö- ja magneettikentät luovat toisensa ja etenevät näin valon nopeudella. Etäisyyden ollessa suuri säteilyn lähteestä kentät muodostavat säännöllisen sähkömagneettisen aallon, jolloin sähkökentän  $E$  suhde magneettikenttään  $H$  on vakio

$$Z_0 = \frac{E}{H} \quad (9)$$

Tätä kutsutaan vapaan tilan aaltoimpedanssiksi ja sen yksikkö on ohmi ( $\Omega$ ). Lähellä säteilyn lähdettä sähkö- ja magneettikentän aalto-ominaisuus ei ole selvästi havaittavissa. Tällöin täytyy käsitellä molempia komponentteja ominaan, kuten kuvasta 3 voidaan havaita.



KUVA 3. Sähkömagneettisen aallon kauko- ja lähikenttä (Nyberg & Jokela 2006 mukaisesti.)

Etäisyyden  $r$  ollessa aallonpituuteen  $\lambda$  nähden säteilyn lähteestä vähemmän kuin

$$r \leq \frac{\lambda}{2} \quad (10)$$

puhutaan lähikentästä. Kaukokenttä katsotaan alkavan, kun etäisyys säteilyn lähteestä on yli puolet aallonpituudesta. Tällöin sähkömagneettinen aalto on muodostunut. Sähkömagneettisen aallon mukana kulkee energiaa, josta käytetään nimitystä tehotiheys  $S$ , mikä riippuu magneettikentän ja sähkökentän voimakkuudesta. Tehotiheys voidaan ilmaista Poyntingin vektorin avulla

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H} \quad (11)$$

Tästä ilmenee aallon kuljettaman energian suunta ja tehontideyden itseisarvo eli teho pinta-alaa kohti ( $W/m^2$ ). Kaukokentässä voidaan yksinkertaisessa sinimuotoisessa kentässä tehotiheys esittää skalaarimuodossa

$$S = EH \quad (12)$$

jossa sähkö- ja magneettikenttien voimakkuudet ovat tehollisarvoina. Sijoittamalla kaava 9 tehotiheyden kaavaan 12 voidaan tehotiheys esittää joko sähkökentän tai magneettikentän avulla

$$S_E = \frac{E^2}{Z_0} \quad (13)$$

ja

$$S_H = H^2 \cdot Z_0 \quad (14)$$

jossa tehotiheyden alaindeksi kertoo, minkä kentän avulla se on määritelty. Kaavoilla 12 ja 13 tai 14 päästään samaan tulokseen kaukokentässä, mutta käsiteltäessä alle 300 MHz taajuisia kenttiä kaukokenttä olettaen ei yleensä päde, joten kaavoilla 13 ja 14 lausutut tehotiheydet ovat paikkaansapitäviä mutta ovat lähikentässä erisuuruisia. (Nyberg & Jokela 2006.)

## 2.4 Ominaisabsorptionopeus

Ominaisabsorptionopeus eli SAR (Specific Absorption Rate) kuvastaa kudoksissa tapahtuvaa radiotaajuisen tehon häviöllistä imeytymistä, joka ilmenee kudoksien lämpenemisellä. Kyseinen suure on olennainen altistumissuure yli 100 kHz taajuuksilla.

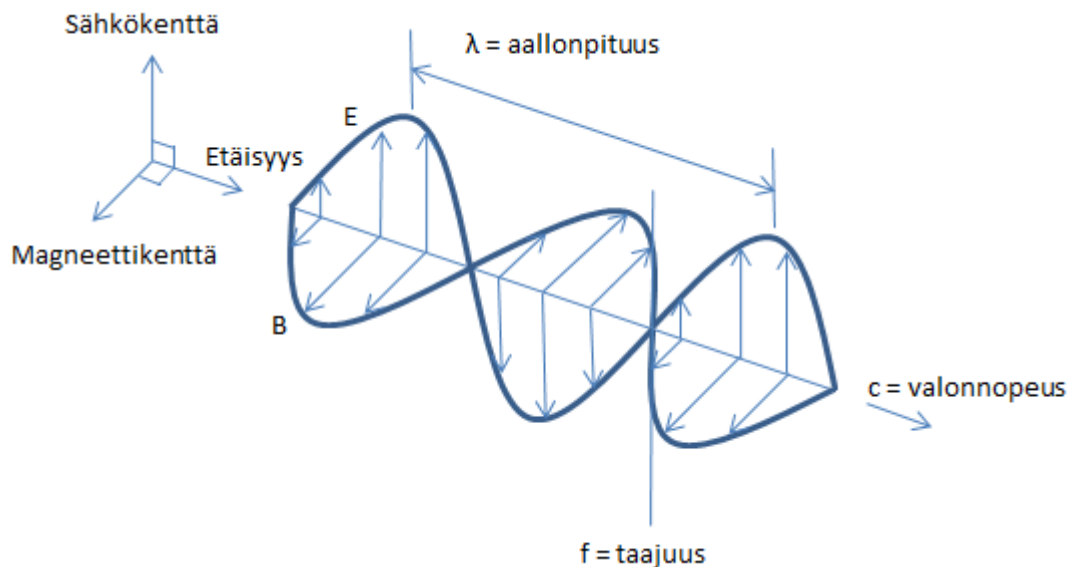
TAULUKKO 1. Ominaisabsorptionopeuden laskentakaavat (Nyberg & Jokela 2006 mukaisesti.)

		Huomioitavaa	Yksikkö
Paikallinen SAR	$SAR = \frac{dP}{dm} = \frac{\sigma E^2}{\rho}$	dP = absorboitunut teho, dm = äärimmäisen pieni kudospala, E = sähkökenttä, $\sigma$ = johtavuus ja $\rho$ = tiheys	W/kg
	$SAR = c_p \frac{dT}{dt}$	$c_p$ = ominaislämpökapasiteetti (J/kgK), dT = lämpötilan muutos (K) ja dt = lämmitysaika (s)	
	$SAR = \frac{J^2}{\rho \sigma}$	Alle 100 MHz taajuuksilla SAR voidaan esittää myös virrantiheyden J avulla.	
Keskimääräinen SAR	$SAR_{wba} = \frac{P}{m}$	Integroimalla paikallinen SAR koko kehon yli saadaan keskimääräinen $SAR_{wba}$ . P = kokonaisteho ja m = massa	
Hetkellinen SAR	$SAR(t) = \frac{E(t) \cdot J(t)}{2\rho}$	E(t) = hetkellisen sähkökentän vektori, J(t) = hetkellisen virrantiheyden vektori ja kerroin $\frac{1}{2}$ saadaan, kun hetkellisarvot jaetaan $\sqrt{2}$	

Taulukossa 1 esitetyillä kaavoilla voidaan laskea ominaisabsorptionopeus. Ominaisabsorptionopeus määritellään käytännössä pienen kudospalan keskiarvona. ICNIRPin (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) ohjeissa pieni kudospala painaa 10 grammaa ja kyseisen kuution sivujen mitat ovat 2,15 cm. Kudoksen tiheys oletettu samaksi kuin veden tiheys  $1\,000\text{ kg/m}^3$ . SAR jakautuu erittäin epätasaisesti kehossa, koska kehon eri osat johtavat hyvin eri tavalla sähköä. Paljon vettä sisältävät kudokset johtavat hyvin sähköä, kun taas nilkat, joissa ei ole paljoa lihaskudosta, johtavat huonosti sähköä, minkä vuoksi virta ahtautuu siellä. Paikallinen SAR nilkoissa saattaa olla huomattavasti suurempi kuin kehossa kesimäärin. (Nyberg & Jokela 2006.)

## 3 SÄHKÖMAGNEETTINEN SPEKTRI

Sähkö- ja magneettikentät luovat ympärilleen ionisoimatonta säteilyä. Kentän voimakkuuden pysyessä muuttumattomana tai kentän muutosnopeuden ollessa pieni kentästä käytetään termiä staattinen tai hitaasti ajan suhteen muuttuva kenttä. Säteilystermiä voidaan käyttää, kun kentän muutosnopeus kasvaa riittävän suureksi, jolloin kenttä alkaa edetä sähkömagneettisena aaltoliikkeenä. Tätä on havainnollistettu kuvassa 4.



KUVA 4. Sähkömagneettinen aalto (Nyberg & Jokela 2006 mukaisesti.)

Ionisoivalla säteilyllä tarkoitetaan säteilyä, joka on huomattavan energiapitoista sähkömagneettista säteilyä. Tällaisen säteilyn lähteitä ovat esimerkiksi radioaktiiviset aineet, fysiikan tutkimuksissa käytettävät hiukkaskiihdyttimet ja lääketieteessä käytettävät röntgenlaitteet. Kyseisistä säteilylähteistä lähtevällä fotonilla on riittävän suuri energia, jotta se voi materiaa kohdatessaan aiheuttaa väliaineen atomien ionisoitumista, mistä seuraa kemiallisia katkoksia molekyyliissä, esimerkiksi DNA:ssa. Fotonin energia pienenee taajuuden pienentyessä, minkä seurauksena fotonilla ei ole riittävää energiaa aiheuttaa kemiallisten sidosten ionisoitumista, minkä vuoksi sitä kutsutaan ionisoimattomaksi säteilyksi. Vaikka fotonin energia on suhteellisen pieni, on sillä silti vaikutuksia elävään kudokseen. (Nyberg & Jokela 2006.)

Ionisoimaton säteily katsotaan alkavan, kun säteilystä lähtevän fotonin energia jää alle 12 elektronivolttia (eV) tai säteilyn aallonpituus on suurempi kuin 100 nm. Säteily muuttuu ionisoimattomasta ionisoivaksi, kun siirrytään ultraviolettisäteilystä röntgensäteilyyn. Kuten taulukosta 2 voidaan nähdä, ionisoimaton spektri voidaan jaotella eri osa-alueisiin. Ultraviolettisäteily, näkyvä valo, infrapunasäteily, radioaallot ja pientaajuiset ja staattiset sähkö- ja magneettikentät kuuluvat ionisoimattoman säteilyn spektriin, vaikka staattisilla, sähkö- ja magneettikentillä on niin suuri aallonpituus, mitä ei voi kutsua aaltoliikkeeksi. (Nyberg & Jokela 2006.)

TAULUKKO 2. Sähkömagneettisen spektrin osa-alueet

Nimitys	Säteilyn laatu	Taajuus $f$	Aallonpituus $\lambda$	Käyttökohteita
Staattiset kentät	Ionisoimaton säteily $hf < 12 \text{ eV}$ tai $\lambda > 100 \text{ nm}$	0 Hz		Tasavirtageneraattori Magneettikuvaus
Pientaajuiset kentät		1 Hz	300000 km	Sähköntuotanto ja jakelu. Sähköjunat ja -hitsaus
		300 Hz	100 km	
		3 kHz	100 km	Induktiokuumentimet
		30 kHz	10 km	Varashälyttimet
		100 kHz	3 km	AM-radio
Radiotaajuuskentät ja mikroaallot		3 MHz	100 m	Induktiokuumentimet Varashälyttimet
		30 MHz	10 m	Suurtaajuuskuumentimet
		300 MHz	1 m	Radio- ja televisiolähetykset
		3 GHz	10 cm	Matkapuhelimet ja tukiasemat Mikroaaltouunit ja -kuivaajat
	30-300 GHz	1-10 mm	Tutkat	
Pitkäaaltoinen infrapuna ja Infrapunasäteily	Ionisoiva säteily $hf > 12 \text{ eV}$ tai $\lambda \leq 100 \text{ nm}$	300 GHz - 30 THz	1000 $\mu\text{m}$ - 10 $\mu\text{m}$	Spektroskopia
		30 - 430 THz	10 $\mu\text{m}$ - 700 nm	Lämpökuvaus
Näkyvä valo		430 - 750 THz	700 nm - 400 nm	Valokuvaus
Ultravioletti-A		750 - 938 THz	400 nm - 320 nm	Solarium
Ultravioletti-B		938 - 1034 THz	290 nm - 320 nm	Ihotautien hoito
Ultravioletti-C		1,034 - 3 PHz	290 nm - 100 nm	Desifiointi
Röntgensäteily		3 PHz - 30 EHz	100 nm - 10 pm	Röntgenkuvaus
Gammasäteily		> 30 EHz	< 10 pm	Atomitutkimus ja sädehoito

Sähkömagneettista säteilyä voidaan kuvata taajuuden, kentänvoimakkuuden ja aaltomuodon avulla. Säteilyn aallonpituus  $\lambda$  (m) ja taajuus  $f$  (Hz) ovat suoraan yhteydessä toisiinsa siten, että niiden tulo  $\lambda f$  on vakio väliaineessa, on sähkömagneettisen aallon etenemisnopeus  $c$  (m/s). Tekemättä suurta virhettä voidaan ilmassa käyttää valonnopeuden arvoa  $c_0 \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ . Taajuus on suoraan verrannollisesti yhteydessä myös fotonin energiaan  $E$  (V/m) tai (N/C).

$$E = hf \quad (15)$$

jossa  $h$  on Planckin vakio. Kaavasta 15 voidaan nähdä, että säteilyn taajuuden pienentyessä samalla pienenee myös fotonin energia. Tämä ei kuitenkaan tarkoita, että pientaajuiset kentät olisivat tehokkuudeltaan pienempiä, koska yksittäisen fotonin energia on vain pienempi. Kentänvoimakkuus kertoo fotonitiheydestä eli siitä, kuinka paljon fotoneita on kentässä. (Nyberg & Jokela 2006.)

### 3.1 Staattinen magneettikenttä

Ajan suhteen muuttumatonta tai hyvin hitaasti muuttuvaa magneettikenttää kutsutaan staattiseksi magneettikentäksi. Kentän muuttuessa tai kappaleen liikkeessa kentässä aiheuttaa, että kappaleeseen indusoituu sisäinen sähkökenttä, joka hyvin johtavissa materiaaleissa aiheuttaa sähkövirtoja. Voimakkaat staattiset kentät saattavat aiheuttaa ihmiseen eräitä oireita, kuten pahoinvointia, päänsärkyä, huimausta ja magnetofosfeeneja. Ne ovat satunnaisia valonvälähdyksiä näkökentän reunoilla. (Nyberg & Jokela 2006.)

### 3.2 Pientaajuiset sähkö- ja magneettikentät

Pientaajuiset sähkö- ja magneettikentät voidaan jakaa hyvin pientaajuisiin (Extremely Low Frequency, ELF) ja välitaajuisiin kenttiin (Intermediate Frequency, IF). Hyvin pientaajuisissa sähkö- ja magneettikentissä (alle 300 Hz) kentän muutosnopeus on riittävän suuri indusoimaan ihmiseen sähkökenttiä ja –virtoja. Kehossa ulkoinen magneettikenttä synnyttää induktiosähkökentän, joka puolestaan synnyttää induktiovirtoja. Sähkömagneettiseen kenttään vaikuttaa kehon koko ja suunta kenttään nähden. Ulkoisen sähkökentän vaikutuksesta kehon pinnalle syntyy kentän tahdissa muuttuva pintavaraus, joka pyrkii kumomaan ulkoisen kentän vaikutuksen. Virtoja aiheuttava pieni jäännöskenttä jää kuitenkin kehoon. (Nyberg & Jokela 2006.)

Voimakkaat induktiosähkökenttä ja –virrat saattavat aiheuttaa sähköärsytystä hermo- ja lihassoluissa. Erittäin voimakas yli yhden teslan T magneettikenttä 50 Hz taajuudella voi aiheuttaa suuria sisäisiä virtoja, jotka voivat olla vaarallisia. Ne voivat mahdollisesti aiheuttaa kammiovärinää tai hengityksen lamaantumisen. Hermosolujen muodostamalla keskushermostoverkostolla on matalampi häiriintymistaso kuin yksittäisellä hermosolulla, koska häiriöjännitteet voivat summutua hermoliitoksissa. Niiden häiriintyminen saattaa esiintyä magnetosfosfeeneina. (Nyberg & Jokela 2006.)

Välitaajuisilla kentillä (300 Hz – 100 kHz) on samanlainen kytkeytyminen kehoon kuin ELF-kentillä. Tiedetyt tavanomaiset haittavaikutukset välitaajuisilla kentillä, ovat sähköärsytys hermo- ja lihassoluissa sekä kudosten lämpäminen on mahdollista taajuusalueen yläpäässä. (Nyberg & Jokela 2006.)

## 4 IONISOIMATTOMAN PIENTAAJUISEN SÄHKÖMAGNEETTISEN SÄTEILYN LÄHTEITÄ

### 4.1 Staattisten sähkö- ja magneettikenttien lähteitä

Suurin osa ionisoimattoman säteilyn lähteistä aurinkoa lukuun ottamatta on ihmisen tekemiä. Magneettikuvauslaitteet synnyttävät voimakkaimmat magneettikentät, joille ihminen altistuu. Nämä kentät ovat hyvin voimakkaita, ja ne voivat aiheuttaa kuvattavassa potilaassa implanttien liikkumista, hermojen sähköärsytystä ja kudosten lämpenemistä. Magneettikuvaus laitteen aiheuttaman kentän lyhytaikaisella altistumisella ei ole havaittu olevan haittaa, lukuun ottamatta muutamia onnettomuustapauksia. Staattisia magneettikenttiä esiintyy myös metalliteollisuuden prosesseissa, mitkä voivat olla jopa 100 mT suuruisia. Maan oma magneettikenttä on noin 0,05 mT suuruinen, mikä vaihtelee paikan mukaan siten, että se on suurimmillaan magneettisilla navoilla. (Nyberg & Jokela 2006.)

Sähkökenttiä on myös luonnossa, koska negatiivisesti varautuneen maan kuoren ja positiivisesti varautuneen ylemmän ilmakehän välillä on 130 V/m staattinen sähkökenttä. Eri puolella maapalloa olevat jatkuvat ukkosmyrskyt ylläpitävät kenttää ja varauksia. Ukkosmyrskyissä pilviin kertyneet varaukset purkautuvat salamoina, jotka aiheuttavat sähkömagneettisia häiriöitä hyvin leveäkaistaisella, 5 – 100 kHz taajuusalueella. (Nyberg & Jokela 2006.)

### 4.2 Pientaajuisten sähkö- ja magneettikenttien lähteitä

Sähköenergian tuotannossa, jakelussa ja käytössä syntyy pientaajuisia 50 Hz sähkökenttiä. Suurjännitteisten avojohtojen läheisyydessä esiintyvät sähkö- ja magneettikentät vaimenevat nopeasti etäisyyden kasvaessa. Voimajohtojen alla magneettikentät ovat yleensä 3 – 10  $\mu\text{T}$  ja sähkökentät 1 – 10 kV/m, mutta vaimenevat 60 m etäisyydellä arvoihin magneettikenttä 1  $\mu\text{T}$  ja sähkökenttä alle 0,1 kV/m. Ei ole ongelmia, että magneettikenttä ylittäisi nykyisen raja-arvon 100  $\mu\text{T}$ , mutta sähkökentän voimakkuus voi 400 kV -voimajohtojen alla ylittää sille asetetun 5 kV/m arvon. Teollisuudessa on käytössä voimakkaita, 50 Hz syöttötaajudella toimivia magneettikenttien lähteitä. Esimerkiksi induktiokuumentimet ja valokaariuunit voivat synnyttää ympäristöön yli 1 000  $\mu\text{T}$  kenttiä, jotka ylittävät työntekijöille asetetun 500  $\mu\text{T}$ :n altistumisrajan. (Nyberg & Jokela 2006.)

Kotitalouksissa käytettävät laitteet eivät aiheuta normaalisti huomattavia vuontiheyksiä ympäristöönsä. Yleensä magneettikentän tiheydet ovat alle 1  $\mu\text{T}$ . Eräissä talouksissa on mitattu lattian tasalla suositusarvon 100  $\mu\text{T}$  ylittäviä arvoja, jotka ovat lähtöisin lattian alla sijaitsevasta kiinteistömuuntamosta. (Nyberg & Jokela 2006.)

Varashälytinporttien ja lentokentillä käytössä olevien metallinpaljastimien toiminta perustuu magneettikenttiin, mitkä toimivat yleensä 100 Hz – 100 kHz taajuusalueella. Näiden porttien läpi kävelevä henkilö altistuu lyhyen ajan voimakkaalle magneettikentälle, joka voi ylittää väestöä koskevan raja-arvon 6,25  $\mu\text{T}$  taajuusalueella 800 Hz – 150 kHz. (Nyberg & Jokela 2006.)

## 5 PIENTAAJUISTEN SÄHKÖMAGNEETTISTEN KENTTIEN TERVEYSHAITTOJA

Monille sähkö- ja magneettikentät ovat tuntemattomia käsitteitä, samoin myös niiden aiheuttamat terveysvaikutukset. Ihmisen kyky havaita kyseisiä kenttiä on rajallinen, mikä osaltaan vaikeuttaa niiden ymmärtämistä.

### 5.1 Hermostolliset

Riittävän voimakas sähkökenttä on ihmisen havaittavissa, sen aiheuttamaa vaikutusta on kuvailtu ihokarvojen värähtelynä ja kutinaksi tai pistelyksi. Kyseiset aistimukset riippuvat kentän voimakkuudesta, kuten suurilla kentän voimakkuuksilla (20 kV/m) aistimukset ovat olleet osalla tutkimuksien vapaaehtoisilla koehenkilöillä kiusallisen voimakkaita. (Nyberg & Jokela 2006.)

Magneettikentät voivat riittävän voimakkaina aiheuttaa näkökentän reunoille näköaistimuksia, joita kutsutaan magnetofosfeeneiksi. Kyseisiä aistimuksia esiintyy tietyllä taajuus alueella ja kynnyсарvo riippuu taajuudesta. Magneettivuon tiheyden ylittäessä noin 0,5 mT arvon on sillä havaittu olevan mahdollisia vaikutuksia oppimiseen, muistiin, kognitioon ja aivojen sähköiseen toimintaan EEG. Kyseinen havainto on saatu taajuusalueella 45-60 Hz ja on oletettavaa, että kynnyсарvo riippuu taajuudesta. (Nyberg & Jokela 2006.)

### 5.2 Sydämen toimintaa häiritsevät

Laboratio-olosuhteissa tehdyissä tutkimuksissa yhdistetyillä sähkö- ja magneettikentällä 60 Hz taajuudella 9 kV/m ja 20  $\mu$ T kenttien voimakkuuksilla havaittiin toistettavasti sydämen rytmin hidastumista. Kyseiset rytmin hidastumisen muutokset olivat kuitenkin pieniä. Käytännön olosuhteissa voimajohdon alla suoritetuissa kokeissa ei havaittu merkittäviä muutoksia sydämen sykkeessä, lisälyönneissä tai verenpaineessa. (Nyberg & Jokela 2006.)

### 5.3 Sähköherkkyys

Joillakin henkilöillä esiintyy oireita sähkö- ja radiolaitteiden läheisyydessä. Henkilöillä on aiheutunut erillaisia iho- ja hermostollisia oireita. Iho-oireina on ollut kuumotusta, punoitusta ja pistelyä. Hermostollisina oireina on ollut päänsärkyä, huimausta, huonoa oloa, väsymystä, voimattomuutta, hengitysvaikeuksia ja sydämentykytystä. Iholla koetut oireet ovat olleet hermostollisia yleisempiä. (Nyberg & Jokela 2006.)

Suurimmalla osalla tutkimuksiin lähetetyistä henkilöistä jotka kärsivät iho-oireista, ne johtuivat aivan muista syistä, kuten ihosairauksista. Vapaaehtoisilla henkilöillä on suoritettu tutkimuksia, missä on yritetty saada aikaan oireita altistamalla koehenkilöitä erillisille sähkömagneettisille kentille koehenkilöiden tästä tietämättä. Näissä tutkimuksissa ei ole havaittu sähkömagneettisista kentistä selvää oireiden aiheuttajaa. (Nyberg & Jokela 2006.)



## 5.4 Syöpä

Nykyisen tietämyksen mukaan hyvin pientaajuisilla sähkökentillä (0 – 300 Hz) ei ole syöpää aiheuttavia vaikutuksia. Monet tutkimukset ovatkin keskittyneet tutkimaan magneettikenttien vaikutuksia. Solu- ja eläinkokeilla saatujen tietojen perusteella voidaan sanoa, ettei pientaajuisilla magneettikentillä yksinään ole genotoksisia vaikutuksia, kun tarkastellaan pieniä ja keskisuuria magneettikentän voimakkuuksia < 50 mT. Eräissä tutkimuksissa on löydetty hyvin suurten magneettikenttien lisäävän mutaatioita, kromosomipoikkeavuuksia, sisarkromatidivaihdoksia ja DNA-katkoksia. Yhteisvaikutuksia muiden DNA:ta vahingoittavien tekijöiden kanssa on myös tutkittu. Näiden tutkimusten perusteella magneettikentät näyttäisivät vahvistavan muiden vahingoittavien tekijöiden vaikutusta. Yhteisvaikutukset näyttäisivät olevan johdonmukaisia hyvin voimakkailla magneettikentillä, mutta niitä on havaittu olevan myös keskisuurilla kentänvoimakkuuksilla. (Nyberg & Jokela 2006.)

Hyvin pientaajuisien magneettikenttien aiheuttamista ei-genotoksista vaikutuksista on olemassa vaihtelevia tutkimustuloksia. Näillä kentillä on havaittu olevan vaikutusta joidenkin geenien ilmestymiseen, solutransformaatioon, solujenväliseen viestintään ja elimistön melatoniini tuotantoon. Tutkimusten tulokset ovat kuitenkin vaihdelleet, ja saatujen tuloksien toistaminen on ollut vaikeaa. On viitteitä, että hyvin pientaajuiset magneettikentät voisivat vahvistaa muiden tekijöiden, kuten UV-säteilyn tai kemikaalien aiheuttamia ei-genotoksisia vaikutuksia. (Nyberg & Jokela 2006.)

Epidemiologisissa tutkimuksissa on havaittu viitteitä, että lapsilla on korkeampi riski sairastua leukemiaan, jos he asuvat voimajohtojen lähellä. Voimajohtojen aiheuttamien hyvin pientaajuisien magneettikenttien vaikutuksesta lasten muihin syöpiin tai aikuisten syöpiin on vähemmän viitteitä. (Nyberg & Jokela 2006.)

Kansainvälinen syövätutkimuslaitos IARC (International Agency for Research on Cancer) on julkaissut vuonna 2002 arvionsa hyvin pientaajuisien sähkö- ja magneettikenttien karsinogeenisyydestä. Kyseisen julkaisun yhteenvedossa on todettu seuraavaa:

- On olemassa rajallinen määrä todisteita hyvin pientaajuisien magneettikenttien yhteydestä lapsien leukemiaan sekä puutteellisia todisteita hyvin pientaajuisien magneettikenttien yhteydestä kaikkiin muihin syöpiin.
- Tällä hetkellä on puutteellisia todisteita staattisten sähkö- tai magneettikenttien ja hyvin pientaajuisien sähkökenttien karsinogeenisyydestä.
- Eläinkokein tehdyissä tutkimuksista on saatu puutteellisia todisteita hyvin pientaajuisien magneettikenttien tai staattisten sähkö- tai magneettikenttien karsinogeenisyydestä.

IARC luokitteli hyvin pientaajuiset magneettikentät luokkaan 2B eli mahdollisesti karsinogeeninen ihmisille; samassa luokassa on myös kahvi. Staattiset sähkö- ja magneettikentät ovat luokittelemattomia karsinogeenisyydestään ihmiselle luokassa 3. (Agents Classified by the IARC Monographs.)

## 6 ASETUKSIA JA MÄÄRÄYKSIÄ

Euroopan unionin direktiivi (2004/40/EY), joka koskee sähkömagneettisia kenttiä, kumottiin kesäkuussa 2013. Uusi korvaava direktiivi (2013/35/EU) sisällytetään vuonna 2016 Suomen lainsäädäntöön. Kyseinen direktiivi antaa raja-arvot ja toimenpidetasot sähkömagneettisen säteilylle taajuusalueella 0 Hz – 300 GHz. Direktiivi määrittää työnantajan velvollisuudet riskien arvioimisessa, riskien estämiseen tai vähentämiseen koskevat säädökset, työntekijöille annettavat tiedot ja koulutukset sekä ohjeistetaan terveydentilan seurantaan. (Työterveyslaitos 2013.)

Altistumista koskevat raja-arvot ja toimenpidetasot on määritelty erikseen lämpövaikutuksia aiheuttaville taajuuksille 100 kHz – 300 GHz ja muille kuin lämpövaikutuksille 0 Hz – 10 MHz. Sen sijaan staattiselle sähkökentälle ei ole määritelty altistumisrajoja. Edellä mainitun jaottelun vuoksi riskinarviointia tehtäessä on tiedettävä, mille taajuuksille työpaikalla altistutaan. Nykyään voimassa olevat sosiaali- ja terveysministeriön päätöksessä (STMp 1474/1991) esitetyt enimmäisarvot perustuvat ICNIRPin suositukseen. (Työterveyslaitos 2013.)

### 6.1 Väestön altistuminen

Sosiaali- ja terveysministeriön asetuksessa (294/2002) ionisoimattoman säteilyn väestölle aiheuttaman altistumisen rajoittamisessa määritellään yleisesti, että sähkö- ja magneettikentät eivät saa aiheuttaa ihmiselle kudosaivourioita eivätkä haitallisia muutoksia ihmisen elintoiminnoissa. Kyseisen asetuksen enimmäisarvoja ja suosituksia ei sovelleta altistumiseen tarkoituksellisesti lääkärin määräämässä tutkimus- tai hoitotoimenpiteessä tai lääkärin valvomassa asianmukaisesti hyväksytyssä tieteellisessä tutkimuksessa. Taulukossa 3 on nähtävissä väestön altistumista koskevat suositusarvot sosiaali- ja terveysministeriön asetuksesta 294/2002.

TAULUKKO 3. Väestöä koskevat suositusarvot enintään 100 kHz kentille (294/2002 mukaisesti.)

Säteilyn laji	Altistuminen	Taajuus f	Suositusarvo	
Staattinen magneettikenttä	Koko keho (jatkuva)	0 Hz	40	Magneettivuon tiheys (B) [mT]
Sähkö- ja magneettikentät enintään 100 kHz (RMS)	Pää ja vartalo	0 - 1 Hz	8	Kehoon indusoidun virran tiheys (J) [mA/m <sup>2</sup> ]
		1 - 4 Hz	8 / f	
		4 Hz - 1 kHz	2	
		1 - 100 kHz	f / 500	
	Taajuusalue	Sähkökentän voimakkuus (E) [V/m]	Magneettikentän voimakkuus (H) [A/m]	Magneettivuon tiheys (B) [μT]
	0 - 1 Hz	-	3,2 × 10 <sup>4</sup>	4,0 × 10 <sup>4</sup>
	1 - 8 Hz	10000	3,2 × 10 <sup>4</sup> / f <sup>2</sup>	4,0 × 10 <sup>4</sup> / f <sup>2</sup>
	8 - 25 Hz	10000	4000 / f	5000 / f
	0,025 - 0,8 kHz	250 × 10 <sup>3</sup> / f	4000 / f	5000 / f
	0,8 - 3 kHz	250 × 10 <sup>3</sup> / f	5	6,25
3 - 100 kHz	87	5	6,25	

## 6.2 Työntekijöiden altistuminen

Direktiivissä 2013/35/EU on säädetty vähimmäisvaatimukset työntekijöiden suojelemiseksi heidän terveyteensä ja turvallisuuteensa kohdistuvilta riskeiltä, jotka aiheutuvat tai saattavat aiheutua sähkömagneettisille kentille altistumisesta työssä. Edellä mainittu direktiivi koskee kaikkia tunnettuja, sähkömagneettisten kenttien aiheuttamia suoria biofysikaalisia vaikutuksia ja epäsuoria vaikutuksia. Direktiivissä säädettyt raja-arvot koskevat vain sellaisia vaikutuksia, jotka ovat tieteellisesti vakiintuneita.

Mikäli työntekijöiden altistuminen ylittää altistumisen raja-arvot, jotka on esitelty taulukossa 4, täytyy työnantaja yksilöidä ja kirjata syyt, joiden takia terveysvaikutusraja-arvot ja aistimusraja-arvot ylittyivät, sekä muutettava suojaavia ja ehkäiseviä toimenpiteitä siten, ettei raja-arvojen ylitys toistu. Tehdyt muutokset on säilytettävä sopivassa jäljitettävyyden mahdollistavassa muodossa, jotta myöhempi käyttö ja tarkastelu on mahdollista. (2013/35/EU.)

TAULUKKO 4. Altistumisen raja-arvot sähkö- ja magneettikentille taajuusalueella 0 Hz – 10 MHz (2013/35/EU mukaisesti.)

MUUT KUIN LÄMPÖVAIKUTUKSET ALTISTUMISEN RAJA-ARVOT TAAJUUSALUEELLA 0 Hz - 10 MHz	
Altistumisen raja-arvot ulkoisen magneettivuon tiheydelle ( $B_0$ ) taajuusalueella 0-1 Hz	
	Aistimusraja-arvot [T]
Tavanomaiset työolosuhteet	2
Paikallinen raajojen altistuminen	8
	Terveysvaikutusraja-arvot [T]
Valvotut työolosuhteet	8
Terveysvaikutusraja-arvot, sisäisen sähkökentän voimakkuus 1 Hz - 10 MHz	
Taajuusalue	Terveysvaikutusraja-arvot [V/m] (Huippuarvo)
$1 \text{ Hz} \leq f < 3 \text{ kHz}$	1,1
$3 \text{ kHz} \leq f < 10 \text{ MHz}$	$3,8 \times 10^{-4} f$
Aistimusraja-arvot, sisäisen sähkökentän voimakkuus 1 - 400 Hz	
Taajuusalue	Aistimusraja-arvot [V/m] (Huippuarvo)
$1 \text{ Hz} \leq f < 10 \text{ Hz}$	0,7 f
$10 \text{ Hz} \leq f < 25 \text{ Hz}$	0,07
$25 \text{ Hz} \leq f \leq 400 \text{ Hz}$	0,0028 f

Liitteessä 3 on esitelty toimenpidetasojen arvot taajuusalueella 0 Hz – 10 MHz. Jos kyseiset toimenpidetasot ylittyvät työpaikalla, on työnantajan tehtävä jatkoselvityksiä, joilla varmistetaan, ylittyvätkö taulukon 4 raja-arvot. Kehon lämpenemistä rajoittavat SAR-arvot eivät ole huomattava tekijä pientaajuisilla kentillä, mutta ne tulevat merkittäväksi rajoittavaksi suureeksi taajuusalueella 100 kHz – 300 GHz.

Työnantajan on varmistettava, että työssään sähkömagneettisista kentistä aiheutuville riskeille todennäköisesti altistuvat työntekijät ja/tai heidän edustajansa saavat kaiken tarvittavan tiedon ja koulutuksen liittyen riskiarvioinnista saaduista tuloksista. Koulutus koskee direktiivin 2013/35/EU mukaan erityisesti:

- direktiiviä sovellettaessa toteutettuja toimenpiteitä
- altistumisen raja-arvojen ja toimenpidetasojen arvoja ja käsitteitä, niihin liittyviä mahdollisia riskejä sekä toteutettuja ehkäiseviä toimenpiteitä
- altistumisen mahdollisia epäsuoria vaikutuksia
- suoritettujen sähkömagneettisille kentille altistumisen tasojen arviointien, mittausten ja/tai laskelmien tuloksia
- altistumisen haitallisten terveysvaikutusten havaitsemis- ja ilmoittamistapoja
- keskus- tai ääreishermostovaikutuksiin liittyvien hetkellisten oireiden ja tuntemusten mahdollisuutta
- olosuhteita, joissa työntekijöillä on oikeus terveydentilan seurantaan
- turvallisia työtapoja altistumisesta aiheutuvien riskien minimoimiseksi
- riskeille eristyisen alttiita työntekijöitä.

### 6.3 Sydämentahdistinta käyttävä henkilö

Sydäntahdistimien toiminta voi häiriintyä ulkoisista sähkömagneettisista kentistä. Tahdistimien häiriintymiseen vaikuttavat tahdistimen omat ominaisuudet ja asetukset, ulkoisen kentän ominaisuudet, henkilön ominaisuudet sekä ympäristötekijät. Tahdistimien yleisin häiriö on toiminnan siirtyminen häiriötilaan, tällöin laiteeseen tallennetut yksilölliset säädöt häviävät ja tahdistin joutuu käyttämään tehdasasetuksia. Lyhytkestoisena häiriötilaan siirtyminen ei ole hengenvaarallinen. (Työterveyslaitos 2012.)

Sähkömagneettisista kentistä johtuva häiriösignaali saattaa jäljitellä sydämen toimintaa. Tästä voi seurata, että tahdistimen mukaan tilanne on normaali, vaikka oikeasti sydämen rytmi olisi heikko ja tarvitsisi tahdistamista. Vaihtoehtoisesti on mahdollista, että tahdistin tulkitsee virheellisesti kentistä aiheutuneen häiriösignaalin ja suorittaa tarpeettomasti hoitotoimenpiteen. (Työterveyslaitos 2012.)

Standardissa EN 50527-2-1 määritellään arvot, jotka voivat mahdollisesti epäsuotuisissa olosuhteissa aiheuttaa häiriöitä sydämentahdistimien toimintaan. Nämä arvot esitellään taulukossa 6.

TAULUKKO 5. Sydämentahdistimen toimintaa mahdollisesti häiritsevät arvot (EN 50527-2-1 mukaisesti.)

Sähkö- ja magneettikenttien arvot 50 Hz taajuudella, jotka voivat aiheuttaa häiriöitä				
Elektrodin tyyppi	Implantin sijainti	Vastustus testijännite [mV <sub>pp</sub> ]	Sähkökenttä [kV/m] (RMS)	Magneettikenttä [μT] (RMS)
Yksinäpäinen	Vasen rintalihas	2,0	6,5	100
	Oikea rintalihas	2,0	6,5	167
Kaksinäpäinen	Vasen tai oikea rintalihas	0,2	11,7	200

## 7 SÄHKÖ- JA MAGNEETTIKENTTIEN MITTAUSTEKNIikka

### 7.1 Yleistä tietoa mittaustekniikasta

Sähkö- ja magneettikenttiä mitattaessa täytyy varmistua, ettei ihmisiä ole lähistöllä, koska ihmisten läsnäolo vääristää mittauservoja. Mitattaessa täytyy tehdä ero pientaajuisten kenttien ja suuritaajuisten kenttien mittausten välillä. Pientaajuisten kenttien taajuusalue on 0 Hz – 100 kHz, suuritaajuisten kenttien taajuusalue kattaa taajuusalueen 100 kHz – 300 GHz. Ennen kuin mittaukset voidaan aloittaa täytyy mitattavasta kohteesta tietää seuraavat asiat:

- säteilyn lähde (esim. virta, jännite ja teho)
- säteilevän kentän luonne (esim. taajuus, operatiivinen käyttäytyminen ja modulaatio)
- mittauslaitteet ja niiden mittauseriaatteet
- määrittelyjen perustat, kuten standardit, suositukset jne.
- mittauksen epävarmuus.

Edellä mainittujen kohtien ollessa tiedossa voidaan valita sopiva mittausmenetelmä.

Ennen kuin sähkökenttiä voidaan mitata, täytyy varmistautua mittausalueella, että se on mahdollisimman kaukana toisista voimajohdoista, torneista, puista, aidoista ja korkeasta heinikosta. Mitattavan kohteen olisi suotavaa olla mahdollisimman tasainen, sillä mäet tai kuopat aiheuttavat mittauksiin virheitä. Kaikki liikutettavat objektit tulisi mahdollisuuksien mukaan siirtää mittauserveestä riittävän kauas. Jos objektien liikuttaminen ei ole mahdollista, täytyy mittalaitteen anturin ja objektin välinen etäisyys olla enemmän kuin kolme kertaa objektin korkeus (ei kiinteästi asennettu objekti) tai enemmän kuin 1,0 m (kiinteästi asennettu objekti). Mittausta suorittavan henkilön ja mittalaitteen välillä pitäisi olla vähintään 1,5 m, mutta yleisesti suositellaan 3,0 m:n etäisyyttä. Sähkökentän mittauksessa voi ilmetä virhettä, jos suhteellinen ilmankosteus ylittää 70 %. (IEC 62110.)

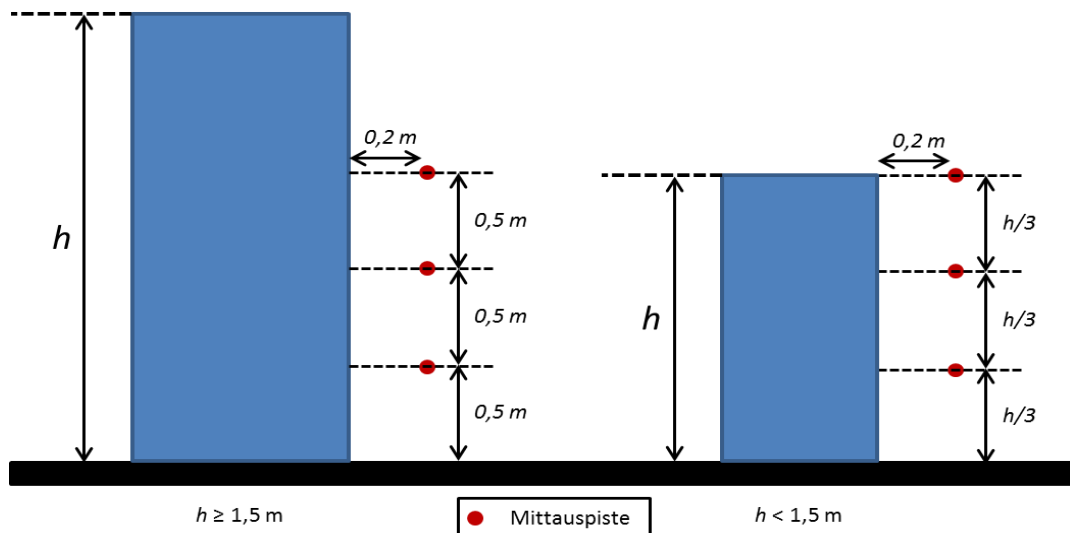
Magneettikenttiä mitattaessa täytyy huomioida, että ei-kiinteästi asennettuun objektiin, joka sisältää magneettisia materiaaleja tai ei magneettisia johteita, on vähintään kolme kertaa objektin suurimman halkaisijan etäisyys mittalaitteen anturin ja objektin välillä. Etäisyys kiinteästi asennetun magneettisen objektin ja mittalaitteen anturin välillä ei pitäisi olla alle 1,0 m. (IEC 62110.)

## 7.2 Yksipistemittaus

Mitattavan kentän ollessa yhdenmukainen mittaus voidaan suorittaa tarkasteltavassa kohteessa 1,0 m:n korkeudella maanpinnasta tai lattiasta. Tätä mittaustulosta käsitellään samoin kuin keskimääräistä altistumisen tasoa. Tarvittaessa voidaan käyttää muitakin mittauksen korkeuksia, mutta silloin ne täytyy kirjata mittausraporttiin. Yleensä kentän voimakkuudet voidaan mitata yksipistemittauksella pään yläpuolella kulkevien voimajohtojen alapuolella, muuten tapauksissa on tapauksittain käytettävä kolmi- tai viisipistemittauksia. (IEC 62110.)

## 7.3 Kolmipistemittaus

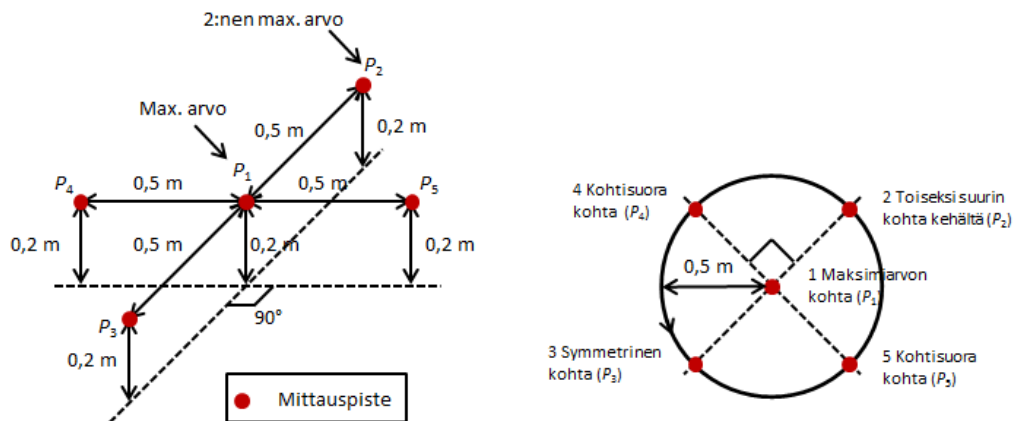
Kolmipistemittauksia käytetään, kun kenttä ei ole yhdenmukainen. Tällöin mittaus suoritetaan kolmella korkeudella, 0,5 m, 1,0 m ja 1,5 m maanpinnan tai lattian yläpuolella. Voimakoneen vieressä tai rakennuksissa mittaus suoritetaan 0,2 m:n etäisyydellä koneesta tai seinästä. Mitattavan koneen korkeuden ollessa vähemmän kuin 1,5 m jaetaan tällöin objektin korkeus kolmeen yhtäkorkeaan osaan ja mittaus aloitetaan objektin yläosasta. Käytettäessä muita korkeuksia, kuin edellä on mainittu täytyy mittauksessa käytetyt korkeudet ilmoittaa mittausraportissa. Kuvassa 5 on havainnollistettu kolmipistemittauksessa käytettävät mittauspisteiden korkeudet ja etäisyydet säteilyn lähteestä. Kolmipistemittauksen mittaustuloksen keskiarvoa käsitellään kuin keskimääräistä altistumisen tasoa. (IEC 62110.)



KUVA 5. Kolmipistemittauksessa käytettävät mittauspisteiden korkeudet (IEC 62110 mukaisesti.)

## 7.4 Viisipistemittaus

Säteilylähteen ollessa lattian tai maan alla ja kun on kohtuullinen mahdollisuus, että henkilö makaa säteilylähteen yläpuolella mittaukset suoritetaan käyttäen viisipistemittausta. Mittaukset suoritetaan 0,2 m korkeudella lattiasta tai maanpinnasta ja etsitään kohta, jossa on suurin kentän voimakkuus. Seuraavaksi suurin kentän voimakkuus etsitään 0,5 m säteen etäisyydellä ympyrän kehältä maksimiarvosta. Tämän jälkeen mitataan kohdasta, joka sijaitsee symmetrisesti toiseksi suurimman arvon vastakkaisella puolella. Viimeiset kaksi mittausta tehdään pisteissä, jotka sijaitsevat kohtisuoraan aikaisemmin tehtyjen mittauksien linjaan nähden ja 0,5 m etäisyydellä molemminpuolin maksimiarvosta. Mittaustuloksista lasketaan kolmen suurimman arvon keskiarvo, tätä arvoa käsitellään kuin keskimääräistä altistumisen tasoa. Tapauksissa joissa henkilö ei todennäköisesti makaa säteilylähteen yläpuolella käytetään kolmipistemittausta. Kuvassa 6 on havainnollistettu viisipistemittauksissa käytettävät mittauspisteiden etäisyydet ja korkeudet. (IEC 62110.)



KUVA 6. Viisipistemittauksen mittauspisteiden etäisyydet ja korkeudet (IEC 62110 mukaisesti.)

## 7.5 Mittausmenetelmät suurimman altistumistason löytämiseksi sähkökentästä

Sähkökentän voimakkuuksien tasoihin, jotka aiheutuvat yläpuolella kulkevista voimalinjoista vaikuttaa monet tekijät, kuten etäisyys johtimiin, johtimien välinen etäisyys ja vaihejärjestys sekä voimalinjan jännite. Suurin sähkökentän voimakkuuden taso löytyy johtimien jännevälin kohdasta, jossa johtimet ovat lähimpänä maanpintaa. Kohdan löytämiseksi missä sähkökentän voimakkuus on suurimmillaan johtimien alapuolella on mittaukset tehtävä 1,0 m korkeudella maanpinnasta samansuuntaisesti johtimien kanssa. Toisen huippuarvon löytämiseksi mittaukset suoritetaan 1,0 m korkeudella maanpinnasta kohtisuoralla linjalla kohtaan nähden mistä maksimiarvo löytyi. Jos alueella jossa mittaukset on tarkoitus suorittaa ei ole yläpuolisia johtimia, muuttuu mittauksien linja kohtisuoraksi kulkusuuntaan nähden. Mittauskohteen pisteessä, missä esiintyy sähkökentän voimakkuuden maksimiarvo suoritetaan yksipistemittaus. Maan alla sijaitsevat kaapelit eivät tuota sähkökenttiä maanpinnan päälle, joten sähkökentän voimakkuuksien mittauksiin niiden yläpuolella ei ole tarvetta. Sähköasemilla sähkökentän voimakkuuden maksimiarvo löytyy todennäköisesti kohdasta, missä voimalinjat menevät aseman rakennuksen seinästä läpi. Sähkökentän voimakkuudet

tulisi mitata 1,0 m korkeudella maanpinnasta ja 0,2 m etäisyydellä sähköaseman seinästä kiertäen aseman ympäri. Kohdassa missä maksiarvo sijaitsee suoritetaan kolmipistemittaus. (IEC 62110.)

## 7.6 Mittausmenetelmät suurimman altistumistason löytämiseksi magneettikentästä

Voimalinjojen alapuolella vaikuttaviin magneettikenttiin vaikuttaa monet tekijät, kuten etäisyys johtimiin, johtimien välinen etäisyys ja vaihejärjestys sekä johtimissa kulkevat virrat. Suurin magneettikentän voimakkuuden taso löytyy johtimien jännevälän kohdasta, jossa johtimet ovat lähimpänä maanpintaa. Magneettikentän suurimman arvon löytämiseksi täytyy mittaukset suorittaa ensin yhdensuuntaisesti johtimiin nähden niiden alapuolella 1,0 m korkeudella maanpinnasta. Seuraavaksi tarkistetaan löytyykö toista huippua, nämä mittaukset suoritetaan 1,0 m korkeudella maanpinnasta kohtisuoralla linjalla kohtaan nähden mistä maksimiarvo löytyi. Kun mittauskohteesta on tiedossa piste, missä esiintyy magneettikentän voimakkuuden maksimiarvo, suoritetaan kyseisessä pisteessä kolmipistemittaus. Jos alueella jossa mittaukset on tarkoitus suorittaa ei ole yläpuolisia johtimia mittauksien linja muuttuu kohtisuoraksi kulkusuuntaan nähden. (IEC 62110.)

Maan alle upotettujen kaapeleiden yläpuolelta mitattaessa magneettikenttiä korkeus maanpinnasta pitäisi olla 1,0 m ja mittaukset suoritetaan kohtisuoraan kaapeleihin nähden sopivilla välimatkoilla sivusuunnassa. Kohdassa mistä maksimiarvo löytyi suoritetaan kolmipistemittaus. Magneettikentän suuruus on yleensä likimain sama mittauspisteissä maan alle asennetun kaapelin pituudella. Muutoksia magneettikentän suuruuteen voi tulla liitoskoteloista, johtoliitoksista tai asennussyvyyden muutoksista. (IEC 62110.)

Sähköasemilla mittaukset tulisi suorittaa 1,0 m korkeudella maanpinnasta ja 0,2 m etäisyydellä laitteesta tai aseman rakennuksen seinästä sopivilla väleillä kiertäen kohde ympäri. Kohteen korkeuden ollessa vähemmän kuin 1,5 m mittaus tulee suorittaa kohteen huipulta eikä 1,0 m korkeudelta. Paikassa missä mitattiin kentän maksimiarvo tulee suorittaa kolmipistemittaus. Yleensä magneettikentän maksimiarvo löytyy kohdasta mistä voimalinjat tai maan alle asennetut kaapelit menevät aseman rakennuksen sisään. Paikallisia korkeampia kentän arvoja voi löytyä lähempänä maanpintaa laitteen läheltä tai aseman rajoilta. Jos sähköaseman tiloissa tai sen yläpuolisissa tiloissa on todennäköistä että ihminen makaa lattialla täytyy siellä suorittaa viisipistemittaus, muuten mittaukset suoritetaan kolmipistemittauksin. (IEC 62110.)



## 7.7 Mittausraportin laatiminen

Suoritetuista mittauksista tulee tehdä mittausraportti, jonka liitteeksi mittauspöytäkirja tulisi liittää. Esimerkki mittauspöytäkirjasta on nähtävissä Liitteessä 2. Kyseinen mittauspöytäkirja on koottu standardin IEC 62110 mukaisesti. Raportissa tulisi käydä ilmi seuraavat asiat edellä mainitun standardin mukaan:

- päivämäärä, aika ja sääolosuhteet
- lämpötila ja ilmankosteus (sähkökentän mittausta varten)
- sähköjärjestelmän tyyppi (ylikulkevat johtimet, kaapeli, sähköasema, jne.) ja nimellinen jännite, ylikulkevien johtimien asettelu ja vaihejärjestys ja/tai maanalla kulkevista kaapeleista, jotka aiheuttavat mitattavan kentän
- arvio mittausvirheestä
- mittauksen suorittaneen henkilön tai yrityksen yhteystiedot
- mittauspisteiden korkeudet maasta tai lattiasta
- mittauskohteen sijainti suhteessa sähköjärjestelmään
- mittauskohteen sijainti huoneessa, kun mittaukset suoritetaan rakennuksessa
- mitattujen sähkö- ja magneettikenttien tasot
- selvä osoitus mitä kentän tasoja on raportoitu, esimerkiksi kenttien resultantti, r.m.s arvot, jne.
- mittauspisteen läheisyydessä olevien muiden säteilylähteiden tyyppi, sijainti mitattavaan kohteeseen nähden ja käyttötilanne
- luonnos ja/tai valokuva mittauskohteesta, mistä ilmenee mittauspiste ja muut säteilylähteet
- kiinteiden ja liikuteltavien objektien tyyppi, materiaali, ulkoiset mitat ja sijainti mitattavaan kohteeseen nähden sähkökenttien mittausta varten
- magneettisia materiaaleja tai johteita sisältävien kiinteästi ja liikuteltavien objektien tyyppi, materiaalin tiedot, ulkoiset mitat ja sijainti mitattavaan kohteeseen nähden magneettikenttien mittausta varten
- sähköjärjestelmän osassa kulkeva virta magneettikentän mittauksen aikana, jos on mahdollista ja paikkaansa pitävää
- harmoninen sisältö, jos merkittävää.

Yllä olevat tiedot ovat tärkeitä, kun mitattuja arvoja verrataan laskettuihin tasoihin ja/tai toisiin mittaustuloksiin.

## 8 MITTALAITTEISTO

Sähkömagneettikenttien mittalaitteet koostuvat kahdesta osasta, anturista tai kentät aistivasta elementistä ja mittarista, joka prosessoi anturista tulevan signaalin ja osoittaa sähkömagneettisen kentän arvon valitulla suurella analogisella tai digitaalisella näytöllä. Yleisesti mittalaitteistot voidaan jakaa laajakaistaisiin ja kapeakaistaisiin (selektiivinen taajuudelle) laitteistoihin. Taajuusvalikoiva mittalaitteisto voi tuottaa tietoa kentän suuruudesta sekä mitattavan kentän spektristä. Yleensä spektrianalysaattoria, viritettyä vastaanotinta tai kaistanpäästösuodatinta käytetään tähän tarkoitukseen. Kapeakaistaista mittalaitteistoa voidaan käyttää, jos tarvitaan taajuuden resoluutiota ja korkeaa herkkyyttä tai mitattava kenttä on epäjatkuva. Laajakaistainen mittalaitteisto normaalisti osoittaa kentän suuruudet riippumatta signaalin taajuudesta.

Mittalaitteiston tulisi olla riittävän herkkä muutoksille ja omata riittävä taajuusalue mitattavaan kohteeseen. Yleisemmin mittalaitteiston tulisi pystyä havaitsemaan ja osoittamaan kentän tehollisarvot, mutta joihinkin tarkoituksiin pitäisi käyttää laitteistoa, joka havaitsee huippuarvot. Tämä voi tulla kyseeseen, jos huippuarvot on selvästi määriteltyjä, mutta tehollisarvot muuttuvat huomattavasti ajan suhteen.

### 8.1 Mittalaitteen ominaisuudet

Valittaessa tarpeeseen sopivaa mittalaitteistoa on tärkeää huomioida seuraavia asioita.

Mittauslaitteiston tulee olla häiriintymättä sen omasta teholähteestä tulevista kentistä tai ulkoisten kenttien vuorovaikutuksista mittalaitteiston teholähteeseen tai syöttöliitäntään. Yleisesti on suositeltavaa käyttää akkuja tai paristoja laitteiston teholähteenä.

Mittauslaitteiston mitta-alueet täytyy olla yhteensopivia mitta-alueissa esiintyvien kenttien suureiden tasojen ja taajuusisällön kanssa. Laitteiston tulee pystyä mittaamaan luotettavasti mitta-alueissa vallitsevissa olosuhteissa, kuten lämpötila sekä ilmankosteus.

Mittarin anturissa olisi hyvä olla mahdollisuus kiinnittää se johtamattomasta materiaalista valmistettuun kolmijalkaan, jonka korkeutta voi säätää. Mittarin ja anturin välillä tulisi olla usean metrin pituinen välikaapeli. Näin vähennettäisiin häiriöitä mitattaessa sähkökenttiä, joita syntyy henkilöiden ollessa liian lähellä mittalaitteen anturia.

Mittalaitteen painon ja ulkoisten mittojen on oltava kohtuulliset, jotta laitetta voidaan käyttää ja kantaa käsin. Mittalaitteiston käsittelyä helpottaa, jos laitteessa on suuri ja selkeä näyttö, joka osoittaa selkeästi mitattavan kentän suureen ja tason.

## 8.2 Mittalaitteen anturit

Sähkö- ja magneettikenttien mittauksiin tarkoitettujen antureiden tulisi olla sellaisia, etteivät ne merkittävästi vaikuta mitattavaan kenttään. Antureita on olemassa erityyppisiä moniin erilaisiin mittaustarpeisiin. Anturin tyyppiä ovat yksittäis- ja moniaksaalinen (isotrooppinen), laajakaistainen sekä kapeakaistainen.

Yksittäis- ja moniaksaaliset anturit on yleensä suunniteltu joko osoittamaan mitattavan kentän yhden komponentin (x-akseli) tai kentän kaikki komponentit (xyz-akselit). Anturi, jossa on yksittäisaksaalinen sensori, havaitsee vain yhden mitattavan kentän komponenteista. Sen tulisi siis osoittaa kentän maksimiarvoa tai vaihtoehtoisesti anturia täytyisi kohdistaa vastavuoroisesti kolmeen kohtisuoraan suuntaan, jotta kentän kolme erillistä komponenttia voidaan mitata. Monien sensoreiden asettelua voidaan käyttää sopivana rakenteena yhdistämään kentän komponentit ja mahdollistamaan isotrooppisen mittauksen välittämättä kentän jakautumisesta tai suunnasta. Isometriseen anturiin tarvitaan kolme kohtisuorasti aseteltua sensorelementtiä, joita voidaan käyttää mittaamaan kentän komponentteja kaikista suunnista suhteessa mitattavaan kenttään. Isotrooppiset anturit yleensä mittaavat kentän voimakkuuden resultantin käyttäen juurellista neliöiden summaa (Root Sum Square RSS). (EN 50413.)

Laaja- ja kapeakaistaiset anturit voivat antaa tietoa kentän voimakkuuksista ja lisäksi mitattavan kentän spektrin luonteesta. Laajakaistainen laitteisto normaalisti osoittaa kentän voimakkuuden riippumatta kentän taajuudesta. Arvioitaessa ihmisen altistumista sähkömagneettisille kentille (EMF) täytyy ottaa huomioon taajuudesta riippuvaiset raja-arvot. (EN 50413.)

Mittaukset voidaan toteuttaa käyttämällä suodatinta, joka reagoi mitattavan kentän taajuuden luonteeseen tai suorittamalla nopean Fourier-muunnoksen (Fast Fourier Transform FFT), minkä jälkeen laskettuja arvoja verrataan taajuudesta riippuviin raja-arvoihin. (EN 50413.)

On mahdollista tehdä yksinkertainen laajakaistainen kentänvoimakkuuden mittaus ja mitata erikseen spektrin koostumus kentästä käyttäen spektrianalysointia. Analysointitietoja voidaan käyttää painottamaan laajakaistaista mittausta. Tämä mittaustapa on käytännöllinen tehtäessä useita toistuvia mittauksia säteilylähteen ympärillä kentän spektrin pysyessä vakiona. (EN 50413.)

## 8.3 Sopivan mittalaitteiston valitseminen kohteeseen

Liitteessä 1 olevaan taulukkoon on koottu kohteessa vallitseviin olosuhteisiin sopivien laitevalmistajien mittalaitteista tärkeimmät tiedot. Valittaessa sopivia mittalaitteita tärkeimpiä tekijöitä ovat taajuusalue sekä mittalaitteen sähkö- ja magneettikenttien mittausalueen laajuudet. Mittausalueet tulee kattaa enintään 100 kHz:n taajuudelle työntekijöille asetetut altistumisen raja-arvot sekä toimenpidetasot, jotka on esitetty taulukoissa 4 ja 5.

Mittalaitteen taajuusalueen tulee olla huomattavasti suurempi kuin sähköverkon perustaajuus 50 Hz, koska mittauskohteessa on paljon vanhoja taajuusmuuttajakäyttöjä sekä muuta sekakuormaa, jotka aiheuttavat sähköverkkoon huomattavan määrän yliaalloja. Sähköverkon yliaallot synnyttävät ympäristöön sähkö- ja magneettikenttiä, joiden taajuus on sähköverkon 50 Hz perustaajuuden monikertoja. Tämän takia työntekijöiden altistuminen sähkö- ja magneettikentille lisääntyy kenttien sisältämän taajuussisällön takia.

Soveltuvista mittalaitteista saa tietoa valmistajien kotisivuilta. Näistä tiedoista on nähtävissä mittalaitteiden esittelyt sekä liitteessä 1 oleva vertailutaulukko. Kun mittauskohteeseen sopivat mittalaitteistot on löydetty, eri laitevalmistajilta voidaan lähettää maahantuojille kyselyt kyseisistä laitteistoista ja neuvotella hinnoista sekä muista ehdoista.

### 8.3.1 Mittalaite EFA-300

EFA-300-mittalaitteen valmistaja on Narda Safety Test Solutions. Kyseinen mittalaite on suunniteltu ammattilaisille, jotka työskentelevät sähkönjakelun parissa. Laitteen taajuusalue on 5 Hz – 35 kHz. Mittari soveltuu hyvin kenttämittausten tekemiseen kokonsa puolesta, sillä laite painaa 1 kg ja sen ulkoiset mitat ovat 110 x 200 x 60 mm. Mittaukset ovat luotettavia laitevalmistajan mukaan, kun ympäristön lämpötilan on kohteessa 0 °C ja +50 °C välillä sekä ilmankosteus alle 95 %.

Mittalaitteessa on sisään rakennettu magneettikentän mittaamiseen tarkoitettu anturi. Laitteeseen on saatavilla myös ulkoisia antureita magneettikenttien sekä sähkökenttien mittaamiseen. Ulkoisissa magneettikenttien mittaamiseen tarkoitetuissa antureissa on kaksi eri vaihtoehtoa: 100 cm<sup>2</sup> kokoinen anturi sekä pieni haistelija anturi, jolla on mahdollista mitata helposti magneettikentät ahtaissa paikoissa. Sähkökentän mittaamiseen tarvitaan ulkoinen kuution muotoinen anturi, joka voidaan pystyttää johtamattomasta materiaalista valmistettuun kolmijalkaan, jonka korkeutta on mahdollista säätää. Mittalaitteen ja sähkökentän mittaamiseen tarkoitettujen anturien välille on saatavissa eripituisia välikaapeleita, joiden ansiosta mittauksiin ei synny virheitä mittaavasta henkilöstä. Mittausten akseli on valittavissa kolmiakseliseksi (isotrooppinen) tai yksiakseliseksi.

Sähkö- ja magneettikentistä on mahdollista mitata tehollis- ja huippuarvot käyttäen kentän voimakkuustilaa. Kentän voimakkuustilassa voidaan käyttää laajakaistaista menetelmää tai kaistan esto/päästö suodattimia, joiden valintaan vaikuttaa, onko mitattavassa kentässä yhden taajuuden komponentteja vai monen eri taajuuden komponentteja. Yksittäisistä arvoista voidaan mittalaitteeseen tallentaa tuhansia mittaustuloksia myöhempää analysointia ja käsittelyä varten.

Spektrianalyysijä laitteeseen voi tallentaa 22 kappaletta. Niistä näkee helposti graafisessa esitysmuodossa monitaajuiset signaalit aina 32 kHz:iin asti. Lisäksi hetkellisiä tapahtumia on mahdollista havaita aina 2 kHz:iin asti. Edellä mainitussa ominaisuudessa on kursoritoiminto, joka osoittaa taajuudet ja niiden tasot. Spektrianalyysi antaa ykdeksästä merkittävimmistä taajuuden komponentista tehollis- ja huippuarvot.

Mittalaitteessa on myös kentille altistumisen määrittämiseen tarkoitettu tila, joka vertaa mittausrvoja haluttuun standardin ohjearvoihin. STD-tila eli Shaped Time Domain mittaa sähkö- ja magneettikentät koko taajuusalueelta 32 kHz:iin asti ja näyttää tuloksen prosenttilukuna standardin arvosta. Laitteella on lisäksi mahdollista tehdä analyysi kentän harmonisista, missä näkyä perustaajuus ja kahdeksan harmonista.

Mittaustulokset voidaan lukea ja käsitellä tietokoneohjelman EFA-Ts avulla. Ohjelma voi tallentaa tulokset tietokoneella ja muokata arvoista graafisen esityksen mittausraportteja varten. Tehdyistä mittauksista on saatavilla erilaisia graafisia esitysmuotoja, kuten viiva- ja palkkidiagrammeja ja spektrinäkymä. Vaihtoehtoisia analyysejä voi suorittaa ohjelmalla, mistä selviää keski- ja huippuarvot, histogrammi ja mittausrvojen määrä, mitkä ylittävät määritellyn raja-arvon.

### 8.3.2 Mittalaite SMP2

Mittalaitteen valmistaja on Wavecontrol. Kyseinen laite on uudistettu versio edeltäjästään SMP-mittarista, jota laitevalmistaja ei enää tue. Laitteen monipuolisuuden ansiosta se on tehokas mittalaite useimmissa tapauksissa eri toimialoilla, joissa sähkö- ja magneettikentät voivat aiheuttaa ongelmia. Laitteen taajuusalue laajakaistaisessa mittauksessa on 1 Hz – 18 GHz mittalaitteeseen kytketyn anturin mukaan. Spektrianalyysi on mahdollista suorittaa mittalaitteella taajuusalueella 1 Hz – 400 kHz. Mittarin paino ilman anturia on 570 g ja sen ulkoiset mitat ovat 100 x 215 x 40 mm, minkä ansiosta laite soveltuu kenttämittauksiin. Mittaukset ovat luotettavia laitevalmistajan mukaan, kun kohteen ympäristön lämpötila on -10 °C ja +50 °C välillä. Mittari on mahdollista pystyttää johtamattomasta materiaalista valmistettuun kolmijalkaan.

SMP2-laitteeseen on mahdollista kytkeä eri taajuusalueen kattavia antureita 1 Hz 18 GHz alueella, mutta tapauksessamme, joka koskee pientaajuisia kenttiä anturi WP400 on sopiva. Anturi kattaa taajuusalueen 1 Hz – 400 kHz. Edellä mainittu anturi mittaa sähkö- ja magneettikentät isotrooppisesti sekä todellisen tehollisarvon (True RMS). Anturin ulkoiset mitat ovat 270 x 115 mm, kentän havaitsevan sensorin pinta-ala on 100 cm<sup>2</sup> ja painoa sillä on 210 g.

SMP2:lla voidaan mitata laajakaistaisella mittauksella yhtäaikaaisesti sähkö- ja magneettikentät, ja laite näyttää tuloksista huippuarvon, minimin, keskiarvon, xyz-arvot, kokonaiskentän voimakkuuden ja reaaliaikaisen grafiikan. Laitteessa on näytönkaappaustoiminto, jolla voi tallentaa kuvan näytössä näkyvistä arvoista. Painotetulla huippumenetelmällä (Weighted Peak Method WPM) on mahdollista verrata mittausrvoja standardien ohjearvoihin reaaliaikaisesti.

SMP2 mittalaitteessa on sisäinen 4 GB muisti, joka mahdollistaa yli miljoonan mittaustuloksen tallentamisen. Mittalaitteesta voidaan siirtää tallennetut mittaustulokset tietokoneelle käyttäen Mini-Usb-kaapelia.

### 8.3.3 Mittalaite NF-5030

Valmistaja mittalaitteelle on Aaronia. Kyseinen valmistaja tarjoaa sähkö- ja magneettikenttien analysointilaitteita edullisesti. Kyseisiä mittalaitteita käyttävät useat eri julkiset ja yksityiset tahot monessa eri maassa. Valmistajan sivuilta laitteen tiedoista ei löytynyt tietoa toimintalämpötiloista tai ilmankosteuden rajoista. Laitteen koko on 250 x 86 x 27 mm ja paino on 420 g. Mittariin on saatavilla suuri valikoima erilaisia lisävarusteita, kuten kolmijalkoja ja kumisuojia ulkonamittaamista varten.

NF-5030 sisältää sisään rakennetun magneettikenttien mittaamiseen tarkoitetun anturin, joka mittaa käyttäjän valinnan mukaan 1-, 2- tai 3- akselista. Mittalaitteen mukana tulee levymainen anturi, jonka avulla voidaan mitata sähkökentät. Molemmat anturit tukevat taajuusalueen 1 Hz – 1 MHz ja laite ilmoittaa jatkuvasti taajuuden ja kentän voimakkuuden. Näyttö on mahdollista pysäyttää HOLD-näppäimellä arvojen lukemisen ajaksi.

Mittalaitteen suorittama spektrianalyysi antaa tiedot kolmesta merkittävimmästä signaalista ja ilmoittaa niiden taajuudet sekä voimakkuudet. Analyysin taajuusalue ja suodattimien kaistan leveydet ovat käyttäjän säädettävissä. Suorittaessa mittauksia laite laskee taustalla valmiiksi altistumisarvot mitatuista arvoista, mitkä on mahdollista asettaa näkyviin reaaliaikaisesti näyttöön asetuksia muuttamalla. Mittalaitteen sisäinen 64 KB muisti mahdollistaa mittaustuloksien tallentamisen. Muistia voidaan laajentaa 1 MB asti lisävarusteista valitsemalla.

Mittaustuloksia on mahdollista tarkastella ja muokata ne haluttuun esitysmuotoon laitteen mukana tulevan ohjelman MCS avulla. Ohjelma mahdollistaa mittalaitteen käyttämisen myös etänä ja sillä voi tarkastella mittausten tuloksia reaaliaikaisesti.

### 8.3.4 Mittalaite NHT-310

Laitteen valmistaja on Microrad. Mittalaitteessa on laaja taajuusalue DC – 40 GHz, joka saavutetaan vaihdettavilla antureilla. Ulkoiset mitat laitteella on 160 x 98 x 30 mm ja paino on 500 g. Mittaukset ovat luotettavia laitevalmistajan mukaan, kun ympäristön lämpötila on -10 °C ja +50 °C välillä. Ilmankosteuden rajoiksi on määritelty 5 % - 95 % kondensoitumatonta. Laite sisältää sisäisen muistin, mikä mahdollistaa tuhansien näytteiden tai satojen näytteiden tallentamisen. Mukana tulevalla ohjelmalla voi tarkastella tallennettuja tuloksia. Ohjelma mahdollistaa myös mittalaitteen käyttämisen etänä, minkä ansiosta tuloksia voi tarkastella reaaliaikaisesti ja tallentaa tietokoneelle. Laitteeseen on saatavilla puinen kolmijalka.

NHT-310 mittalaitteeseen on saatavilla monenlaisia antureita mitattavien kenttien taajuusalueiden mukaan. Magneettikentän mittaamiseen tarvitaan 10B anturi ja sähkökenttien mittauksia varten anturi 11E. Molemmat anturit mittaavat kentät isotrooppisesti ja kattavat taajuusalueen 5 Hz – 400 kHz. Mittalaite mittaa todellisen, maksimin, keskiarvon ja mediaanin (isotrooppinen, RSS). Käyttäjällä on mahdollista valita x-y-z tila, joka mittaa todelliset xyz-arvot.

### 8.3.5 Mittalaite TAOMA

Laitteen valmistaja on Tecnoservizi. Mittalaitteen taaajuusalueet antureiden kanssa pientaajuisten sähkö- ja magneettikenttien osalta ovat 5 Hz – 100 kHz. Mittarin ulkoiset mitat ovat 280 x 185 x 50 mm ja laite painaa 1,045 kg. Mittaukset ovat luotettavia laitevalmistajan mukaan, kun ympäristön lämpötila on -10 °C ja +50 °C välillä.

Mittalaitteeseen on saatavilla monenlaisia antureita mitattavien kenttien taajuusalueiden mukaan. Magneettikentän miittaamiseen tarvitaan BLF anturi ja sähkökenttien mittauksia varten anturi ELF. Molemmat anturit mittaavat kentät isotrooppisesti tai yksiakselisesti ja kattavat taajuusalueen 5 Hz – 100 kHz. Mittalaitteessa on integroidut lämpötilan ja ilmankosteuden mittarit, sekä GPS.

Pääasiallisesti TAOMA mittaa sähkömagneettiset kentät laajakaistaisesti. Näyttö antaa graafisen esityksen mitattavien arvojen muuttumisesta ja numeeriset arvot tämän hetkisestä arvosta sekä maksimiarvosta. Mittauksen lopullisesta tuloksesta on nähtävissä graafisesti mediaani sekä maksimiarvo. Vaihtoehtoisesti mitattava arvo voidaan asettaa näkymään numeriseksi graafisen esityksen sijaan. Graafinen esitys on mahdollista muuttaa päivittyväksi kuuden minuutin mediaaniksi ja sen viereen näkymään tämän hetkinen arvo sekä maksimiarvo. Laitteella on myös mahdollista suorittaa pientaajuinen spektrianalyysi.

Mittalaitteesta on saatavilla valmiita raportteja tehdyistä mittauksista, mikä on mahdollista siirtää tietokoneelle käyttäen erilaisia liittimiä, sillä tässä laitteessa on useita USB-liittimiä, LAN-liitin, SD-korttipaikka, optiset liittimet ja RS232-liitin.

## 9 YHTEENVETO

Sähkö- ja magneettikentät lisääntyvät tulevaisuudessa elin- ja työympäristössä entisestään käytettävien sähkölaitteistojen määrän kasvun myötä, joten on tärkeää selvittää kenttien suuruudet alueilla, joissa vietetään suurin osa ajasta. Näin on mahdollista puuttua ja korjata tilanne, ennen kuin kentät aiheuttavat terveydelle haitallisia vaikutuksia. Pientaajuisilla magneettikentällä on suurempi vaikutus ihmisen terveyteen kuin sähkökentällä. Koska magneettikentät ja sähkökentät ovat toisistaan riippuvaisia, on selvittävää molempien kenttien suuruudet, jotta saadaan selville säteilylähteen aiheuttaman kentän tehotiheys. Pientaajuisien kenttien aiheuttamista terveysvaikutuksista on vaikuttavin tekijä tällä hetkellä raajojen ja elimien lämpeminen raja-arvojen määrittelyissä. Koska ei ole voitu poissulkea tai osoittaa selvää yhteyttä nykyisten tutkimustuloksien nojalla pientaajuisten kenttien yhteyttä syöpään, joka on otettava huomioon mahdollisena terveyshaittana, joka on terveydelle selkeästi haitallisin, mutta epätodennäköisin.

Magneettikentän voimakkuus on riippuvainen sähköjärjestelmän osassa kulkevasta virrasta, joten asuinympäristössä suurimmat magneettikenttien säteilylähteet ovat todennäköisimmin jakelumuuntamot ja lattian alla kulkevat virtakiskot. Tästä syystä taloissa olisi syytä selvittää kiinteistömuuntajien aiheuttamat magneettikenttien voimakkuudet niiden yläpuolella sijaitsevilla huoneistoissa, erityisesti huoneissa, joissa on todennäköistä henkilön makaavan selällään. Työympäristön suurimmat säteilylähteet ovat teollisuudessa. Teollisuuslaitoksissa on käytössä todella suuritehoisia laitteita. Työskenneltäessä pitkiä aikoja kyseisten laitteiden läheisyydessä olisi syytä selvittää laitteiden aiheuttamien kenttien voimakkuudet.

Pientaajuiset sähkökentät eivät aiheuta yleensä erillisenä tekijänä terveydelle haitallisia vaikutuksia. Sähkökentille asetetut raja-arvot ylittyvät todennäköisimmin vain 400 kV voimalinjojen alla. Näiden linjojen alla ei yleensä ole oleskella pitkiä aikoja, joten ole ei niistä perusterveen henkilön terveydelle oleellista haittaa. Sydämentahdistinta käyttävän on otettava huomioon laitteen häiriintymisen mahdollisuus, joka voi olla terveydelle vaarallista. Sähköasemilla sähkökentän raja-arvot voivat ylittyä 400 kV:a pienemmälläkin voimalinjoilla kuin. Tämä on todennäköisintä kohdassa, jossa voimalinjat menevät sähköaseman seinästä sisään.

Liitteen 1 mittarivertailutaulukon sopivimmat ja käytännöllisimmät mittalaitteet ovat EFA-300 sekä SMP2. Mittalaitteen EFA-300 taajuusalue ei yllä 100 kHz, mutta 32 kHz on laajuudeltaan riittävä useisiin kohteisiin. Varmistukseksi EFA-300 taajuusalueen riittävydestä pitäisi mittauskohteen sähköverkosta selvittää harmonisien yliaaltojen taajuussisältö. Aaronian NF-5030 soveltuu nopeisiin mittauksiin, sillä kyseinen mittalaite on yleismittarin tyylinen.

Tämän työn aikana ei päästy suorittamaan käytännön mittauksia laitehankintaesityksen kaaduttua. Tästä syystä työ viimeistellään selvitystyönä, jonka avulla on mahdollista jatkaa työtä ja suorittaa käytännön mittaukset.



## LÄHTEET

AARONIA. NF-5030 Datasheet [verkkojulkaisu]. [Viitattu 2014-09-06.] Saatavissa:

[http://www.aaronia.com/Datasheets/Spectrum\\_Analyzer/Spectran-NF-Series.pdf](http://www.aaronia.com/Datasheets/Spectrum_Analyzer/Spectran-NF-Series.pdf)

VOLUMES 1-110. Agents Classified by the IARC Monographs [verkkojulkaisu]. [Viitattu 2014-08-03.]

Saatavissa: <http://monographs.iarc.fr/ENG/Classification/ClassificationsGroupOrder.pdf>

EN 50413. European standard. Basic standard on measurement and calculation procedures for human exposure to electric, magnetic and electromagnetic fields (0 Hz – 300 GHz). Vahvistettu 2008.

EN 50527-2-1. European standard. Procedure for the assessment of the exposure to electromagnetic fields of workers bearing active implantable medical devices – Part 2-1: Specific assessment for workers with cardiac pacemakers. Vahvistettu 2011.

2013/35/EU. Euroopan parlamentti ja neuvosto. Direktiivi terveyttä ja turvallisuutta koskevista vähimmäisvaatimuksista työntekijöiden suojelemiseksi altistumiselta fyysisistä tekijöistä (sähkömagneettiset kentät) aiheutuville riskeille ja direktiivin 2004/40/EY kumoamisesta. L 179/19.

Eurlex. Direktiivi. [Viitattu 2014-08-06.] Saatavissa: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:32013L0035&qid=1407222200160&from=FI>

IARC. 2002. Volume 80 Non-ionizing radiation, part 1: Static and extremely low-frequency (ELF) electric and magnetic fields [verkkojulkaisu]. Ranska: IARC Press. [Viitattu 3.8.2014.] Saatavissa:

<http://monographs.iarc.fr/ENG/Monographs/vol80/mono80.pdf>

IEC 62110. International standard. Electric and magnetic levels generated by AC power systems- Measurement procedures with regard to public exposure. Vahvistettu 2009. The International Electrotechnical Commission.

MICRORAD. NHT-310 [verkkojulkaisu]. [Viitattu 2014-09-06.] Saatavissa:

[http://www.microrad.it/wp-content/uploads/2014/03/NHT-310\\_eng.pdf](http://www.microrad.it/wp-content/uploads/2014/03/NHT-310_eng.pdf)

NARDA SAFETY TEST SOLUTIONS. EFA300 Datasheet [verkkojulkaisu]. [Viitattu 2014-09-06.]

Saatavissa: [http://www.narda-sts.us/pdf\\_files/DataSheets/EFA300\\_DataSheet.pdf](http://www.narda-sts.us/pdf_files/DataSheets/EFA300_DataSheet.pdf)

NYBERG, Heidi ja JOKELA, Kari. 2006. Sähkömagneettiset kentät. Hämeenlinna: Karisto Oy.

294/2002. Sosiaali- ja terveysministeriön asetus ionisoimattoman säteilyn väestölle aiheuttaman altistumisen rajoittamisesta [verkkajulkaisu]. 2002. [Viitattu 2014-08-06.] Saatavissa: <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2002/20020294>

738/2002. Sosiaali- ja terveysministeriö. Työturvallisuuslaki [verkkajulkaisu]. 2003. [Viitattu 2014-08-06.] Saatavissa: <http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2002/20020738>

TECNOSERVIZI. TAOMA. [verkkajulkaisu]. [Viitattu 2014-09-06.] Saatavissa: [http://www.tecnoservizi-sas.it/en/soluzioni/pdf/bro\\_taoma\\_ing\\_lores.pdf](http://www.tecnoservizi-sas.it/en/soluzioni/pdf/bro_taoma_ing_lores.pdf)

TYÖTERVEYSLAITOS 2012. Sydäntahdistimen häiriötön toiminta työympäristön sähkömagneettisissa kentissä [verkkajulkaisu]. 2012. Tampere. [Viitattu 2014-08-06.] Saatavissa: [https://www.tsr.fi/c/document\\_library/get\\_file?folderId=13109&name=DLFE-7710.pdf](https://www.tsr.fi/c/document_library/get_file?folderId=13109&name=DLFE-7710.pdf)

TYÖTERVEYSLAITOS 2013. Lainsäädäntö ja ohjeavot [verkkajulkaisu]. Päivitetty 30.12.2013. [Viitattu 2014-08-06.] Saatavissa: <http://www.ttl.fi/fi/tyoymparisto/sateily/lainsaadanto/sivut/default.aspx>

WAVECONTROL. SMP2 Datasheet [verkkajulkaisu]. [Viitattu 2014-09-06.] Saatavissa: <http://wavecontrol-rfsafety.com/ftp/Documents/English/SMP2-technical-data-sheet.pdf>

## LIITE 1: MITTALAITTEIDEN VERTAILUTAULUKKO

	EFA-300	SMP2	NF-5030	NHT-310	TAOMA
Mitat (mm)	110/200/60	100/215/40	250/86/27	160/98/30	280/185/50
Paino (g)	1000	570	420	500	1045
Toimintalämpötila	0 /+50 °C	-10 /+50 °C	?	-10 /+50 °C	-10 /+50 °C
Ilmankosteus	< 95 %	?	?	5 % / 95 %	?
Jatkuva mittaus	10 tuntia	> 14 tuntia	~/1300 mAh patteri	> 70 tuntia	7 tuntia
Jaksottainen mittaus	24 tuntia				
Taajuusalue	5 Hz - 32 kHz	1 Hz - 400 kHz	1 Hz - 1 MHz	5 Hz - 400 kHz	5 Hz - 100 kHz
Mittauksen akseli	3/1	3	3/2/1	3	3/1
Laajakaistainen	+	+	-	+	+
Suodattimia	+	-	-	-	+
Tehollisarvot	+	+	+	+	+
Huippuarvot	+	+	+	+	+
Altistumisen määrittäminen	+	+	+	-	-
Spektrianalyysi/taajuus alue	FFT/5 Hz - 32 kHz	FFT/1 Hz - 400 kHz	FFT & DFT	-	FFT
Harmooniset/taajuusalue	+ /10 Hz - 400 Hz	-	-	-	-
Magneettikenttien laajuus	100 nT - 32 mT	250 nT - 2 mT	1 pT - 2 mT	100 nT - 1 mT	10 nT - 10 mT
Sähkökenttien laajuus	10 V/m - 100 kV/m	2,5 V/m - 20kV/m	0,1 V/m - 20 kV/m	20 V/m - 20 kV/m	1 V/m - 100 kV/m
Tallennus mahdollisuus	+	+	+	+	+
Liitännät	Optinen/RS232	Optinen/Mini- USB	USB	Optinen/USB	Optinen/RS232/US B/RJ-45/SD-kortti

## LIITE 2: MITTAUSPÖYTÄKIRJAN MALLI

MITTAUSPÖYTÄKIRJA			
<b>1. Mittauksen suorittaja</b>			
Yritys:		Mittaajan nimi:	
Osoite:		Puhelinnumero:	
Yhteystiedot:			
<b>2. Mittalaitteiston tiedot</b>			
Valmistaja:		Malli:	
Anturin tyyppi:			
Mitattavat suureet ja suuruus:			
Taajuusalue:			
Viimeisen kalibroinnin päivämäärä:			
<b>3. Mittauskohteen tiedot</b>			
Tilaaaja:			
Osoite:			
Aika ja päivämäärä:			
Sääolosuhteet:			
Lämpötila ja ilmankosteus:			
Sähköjärjestelmän tiedot (Nimellinen jännite, kuormituksen tilanne mittaushetkellä):			
<b>4. Mittaustulokset</b>			
Nro.	Mittauskorkeus	Kentän suuruus	Kentän suure
Litteet:			

LIITE 3: TYÖNTEKIJÖIDEN ALTISTUMISTA RAJOITAVAT TOIMENPIDETASOT TAAJUUSALUEELLA  
0 HZ – 10 MHZ

MUUT KUIN LÄMPÖVAIKUTUKSET TOIMENPIDETASOT TAAJUUSALUEELLA 0 Hz - 10 MHz			
Sähkökentille altistumista koskevat toimenpidetasot taajuusalueella 1 Hz - 10 MHz			
Taajuusalue	Sähkökentän voimakkuus Matala toimenpidetaso (E) [V/m] (RMS)		Sähkökentän voimakkuus Korkea toimenpidetaso (E) [V/m] (RMS)
$1 \text{ Hz} \leq f < 25 \text{ Hz}$	$2,0 \times 10^4$		$2,0 \times 10^4$
$25 \text{ Hz} \leq f < 50 \text{ Hz}$	$5,0 \times 10^5 / f$		$2,0 \times 10^4$
$50 \text{ Hz} \leq f < 1,64 \text{ kHz}$	$5,0 \times 10^5 / f$		$1,0 \times 10^6 / f$
$1,64 \text{ Hz} \leq f < 3 \text{ kHz}$	$5,0 \times 10^5 / f$		$6,1 \times 10^2$
$3 \text{ kHz} \leq f < 10 \text{ MHz}$	$1,7 \times 10^2$		$6,1 \times 10^2$
Magneettikentille altistumista koskevat toimenpidetasot taajuusalueella 1 Hz - 10 MHz			
Taajuusalue	Magneettivuon tiheys Matala toimenpidetaso (B) [ $\mu\text{T}$ ] (RMS)	Magneettivuon tiheys Korkea toimenpidetaso (B) [ $\mu\text{T}$ ] (RMS)	Magneettivuon tiheys Toimenpidetaso: raajojen altistuminen paikalliselle magneettikentälle [ $\mu\text{T}$ ] (RMS)
$1 \text{ Hz} \leq f < 8 \text{ Hz}$	$2,0 \times 10^5 / f^2$	$3,0 \times 10^5 / f$	$9,0 \times 10^5 / f$
$8 \text{ Hz} \leq f < 25 \text{ Hz}$	$2,5 \times 10^4 / f$	$3,0 \times 10^5 / f$	$9,0 \times 10^5 / f$
$25 \text{ Hz} \leq f < 300 \text{ Hz}$	$1,0 \times 10^3$	$3,0 \times 10^5 / f$	$9,0 \times 10^5 / f$
$300 \text{ Hz} \leq f < 3 \text{ kHz}$	$3,0 \times 10^5 / f$	$3,0 \times 10^5 / f$	$9,0 \times 10^5 / f$
$3 \text{ kHz} \leq f \leq 10 \text{ MHz}$	$1,0 \times 10^2$	$1,0 \times 10^2$	$3,0 \times 10^2$
Kosketusvirralle $I_c$ altistumista koskevat toimenpidetasot			
Taajuusalue	Toimenpidetaso ( $I_c$ ) (jatkuva kosketusvirta) [mA] (RMS)		
Enintään 2,5 kHz	1,0		
$2,5 \text{ kHz} \leq f < 100 \text{ kHz}$	0,4 f		
$100 \text{ kHz} \leq f \leq 10 \text{ MHz}$	40		
Staattisten magneettikenttien magneettivuon tiheyttä koskevat toimenpidetasot			
Vaarat	Toimenpidetaso ( $B_0$ ) [mT]		
Aktiivisten implantoitujen laitteiden, esim. sydämentahdistimien häiriintyminen	0,5		
Vetovoima- ja sinkoutumisriski voimakkaiden kenttien reuna-alueilla (> 100 mT)	3		