



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

AGO-HENRI SAAR
MAGNEETTIKENTTIEN VAIKUTUKSET JA HALLINTA SAIRAA-
LASSA

Diplomityö

Tarkastaja: professori Seppo Val-
kealahti
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Tieto- ja sähkötekniikan tiedekunta-
neuvoston kokouksessa 1.maalis-
kuuta 2017

TIIVISTELMÄ

AGO-HENRI SAAR: Magneettikenttien vaikutukset ja hallinta sairaalassa

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 62 sivua

Elokuu 2017

Sähkötekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Sähköverkot ja -markkinat

Tarkastaja: professori Seppo Valkealahti

Avainsanat: magneettikentät, hallinta, vaikutus ihmisiin, suojautuminen, raja-arvot

Tämän diplomityön tarkoituksena oli selvittää laskennallisesti magneettivuon tiheyksiä, joita esiintyy Jyväskylään rakennettavassa uudessa Sairaala Novassa. Laskentojen apuna käytettiin numeeriseen laskentaan tarkoitettua tietokoneohjelmistoa MATLAB. Lisäksi kiinnitettiin huomioita suunnitteluvaiheessa laitevalintojen ja tilasuunnittelun tärkeyteen magneettikenttien pienentämiseksi sekä henkilöiden magneettikenttien altistumisaikojen vähentämiseksi.

Magneettivuon tiheyksien selvitys tarvittiin, koska sairaaloissa tarvittavien sähköjärjestelmien määrien ja tehon tarve on jatkuvassa kasvussa. Täten myös sairaaloissa esiintyvät magneettikentät ovat yleisempiä ja myös entistä voimakkaampia. Magneettikentille on määritelty väestön osalta suositusarvot ja työntekijöille velvoittavat raja-arvot, joita ei sairaalan tiloissa saa poikkeustapauksia lukuun ottamatta ylittää.

Sairaala Novassa sijaitsee neljä muuntamoita. Kolme näistä ovat käytännössä identtisiä ja yksi muuntamo hieman kolmea muuta muuntamoita pienempi. Jo Muuntamoiden suunnitteluvaiheessa otettiin magneettikentät huomioon. Muuntamoiden isoimpien magneettikenttien lähteiden keskinäisissä sijoitteluissa pyrittiin siihen, että niistä ympärilleen leviävät magneettikentät jäisivät mahdollisimman suppealle alueelle ja etteivät ne pääsisi vahvistamaan liikaa toistensa magneettikenttiä. Lisäksi muuntamoiden viereisiksi tiloiksi valittiin tiloja, joissa ei oleskeltaisi. Näin henkilöiden altistumiset magneettikentille olisivat vähäisempiä.

Laskennoissa tarkasteltiin muuntamoista aiheutuvia magneettikenttiä nimenomaan muuntamoiden viereisten tilojen osalta. Laskennoissa käytettyjen tarkastelupisteiden magneettivuon tiheydet eivät ylittäneet niille annettuja suositusarvoja. Kohteen ollessa vielä kesken, jouduttiin laskennoissa tekemään tiettyjä oletuksia ja yksinkertaistuksia. Tästä johtuen tuloksia ei voida pitää täysin absoluuttisina, mutta tuloksien suuruusluokat tulevat selville. Laskennat toistettiin muuntamoihin lisättävän 5 mm alumiinisuojan kanssa. Laskennoista nähtiin alumiinisuojuksella olevan todella suuri vaikutus muuntamoiden viereisten tilojen magneettivuon tiheyksiin.

Muuntamoiden lisäksi tarkasteltiin kiskosilloista, jakelukiskoista ja suojaerotusmuuntajista aiheutuvia magneettikenttiä. Mitkään näistä eivät aiheuttaneet ympärilleen suositusarvoja ylittäviä magneettikenttiä. Suojaerotusmuuntajien tapauksessa on kuitenkin kiinnitettävä huomiota niiden etäisyyteen sähkölaitteista, jotka ovat herkkiä magneettikentille. Liian lähellä oleva suojaerotusmuuntaja saattaa aiheuttaa hoidettavan potilaan terveydelle välillistä vaaraa.

ABSTRACT

AGO-HENRI SAAR: Effects and control of magnetic fields in the hospital

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 62 pages

August 2017

Master's Degree Programme in Electrical Engineering

Major: Power Systems and Market

Examiner: Professor Seppo Valkealahti

Keywords: Magnetic fields, exposure, effects on humans, protection, limit values

The purpose of this study was to investigate computationally magnetic flux densities that are present in the new Hospital Nova in Jyväskylä. Numerical computing software MATLAB was used to help calculations. Attention was also paid to the importance of product selections and space planning to reduce magnetic fields and to reduce exposure times of people in magnetic fields.

Determination of magnetic flux densities was needed because the need for the quantities and power of the required electrical systems in hospitals is constantly increasing. Thus, the magnetic fields in hospitals are more common and also more powerful than before. For magnetic fields, there are defined recommended values for population and limit values for employees. Limit values for employees must not be exceeded, except in exceptional cases.

In Hospital Nova, there are four transformer substations. Three of these are practically identical and one of them is a slightly smaller. Magnetic fields of the transformer substations were considered already in the planning phase. The mutual placements of the largest magnetic field sources in the transformer substation was designed in a way that magnetic fields spread around the hospital to the narrowest possible area and that they would not strengthen each other. Rooms next to transformers substation were chosen so that people would not have to spend much time in there. This way exposure of people to magnetic fields will be lower.

In the calculations magnetic fields were also considered in the rooms that are next to transformer substations. Calculations showed that the magnetic flux densities did not exceed the recommended values at the viewpoints. Because hospital is not ready yet some assumptions and simplifications had to be made in calculations. Thus, the result cannot be considered absolute, but the magnitudes of the results will come up. The calculations were repeated with the 5 mm aluminum shield that was added to transformer substation. From the calculations, it was seen that aluminum shield has great reducing effect on the magnetic flux densities at the viewpoints.

In addition to the transformer substation, the magnetic fields from the busbar, distribution rails and isolation transformer were also examined. None of these caused magnetic fields which were over recommended values. However with isolation transformers, one must pay attention to distance between isolation transformer and electrical equipment which are sensitive for magnetic fields. An isolation transformer too close may cause an indirect risk to the health of the patients being treated.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Ramboll Finland Oy:lle vuoden 2017 aikana. Työn ohjaajana Rambollilta toimi suunnittelupäällikkö Jyrki Lahtinen, jota haluan kiittää mahdollisuudesta mielenkiintoisen työn tekemiseen sekä myös neuvoista ja kommentteista työn aikana.

Työn tarkastajana Tampereen teknillisellä yliopistolla toimi professori Seppo Valkealahti, jota haluan kiittää työn tarkastamisesta sekä kommentteista ja näkökulmista, jotka auttoivat työn etenemistä ja paransivat työn kokonaisuutta.

Kiitokset kuuluvat myös perheelleni ja Sarille, jotka ovat tukeneet ja kannustaneet minua koko opintojeni ajan.

Tampereella, 7.8.2017

Ago-Henri Saar

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
2.	MAGNEETTIKENTTIEN TEORIA	3
2.1	Sähkömagneettisten kenttien yhtälöt	3
2.2	Magneettikentän laskeminen	5
2.2.1	Suoran johtimen aiheuttama magneettikenttä	6
2.2.2	Useamman johtimen aiheuttama magneettikenttä	8
3.	MAGNEETTIKENTÄN LÄHTEET	11
3.1	Muuntamot	11
3.1.1	Muuntajan aiheuttamat magneettikentät	12
3.1.2	Yhdistyksien aiheuttamat magneettikentät	12
3.2	Muiden sähköjärjestelmien magneettikentät	13
3.3	Yliaallot	14
3.3.1	Yliaaltokerroin	15
4.	MAGNEETTIKENTTIEN VAIKUTUS IHMISIIN JA LAITTEISIIN	17
4.1	Magneettikenttien terveysvaikutukset	17
4.2	Magneettikenttäaltistuksen arviointi	19
4.2.1	Pitkäaikaismittaus	19
4.2.2	Arviointi hetkellismittausten avulla	20
4.3	Magneettikentistä aiheutuvat laitehäiriöt	20
5.	SÄHKÖMAGNEETTINEN SUOJAUS	23
5.1	Suojauksen teoria	23
5.1.1	Absorptio	23
5.1.2	Heijastus	25
5.1.3	Moninkertainen heijastuminen	27
5.1.4	Kokonaisvaimennus	29
5.1.5	Aukkojen vaikutus suojan vaimennuskykyyn	30
5.2	Suojauksessa käytettävät materiaalit	33
5.2.1	Kupari	33
5.2.2	Alumiini	34
5.2.3	Ferromagneettiset aineet	34
5.3	Sähkölaitteiden suojauksen suunnittelu	36
5.3.1	Faradayn häkki	36
5.3.2	Pyörrevirrat	37
6.	SAIRAALAN LÄHTÖKOHDAT	40
6.1	Lähtötiedot	40
6.2	Standardit	42
6.3	Säädökset	43
7.	SAIRAALAN MAGNEETTIKENTTIEN TARKASTELU	46
7.1	Muuntamot	46
7.1.1	Pohjakerroksen muuntamot	47

7.1.2	Neljännän kerroksen muuntamo	50
7.2	Muuntamon suojauksen vaikutus	52
7.3	Jakelukiskot ja kiskosillat	54
7.4	Suojaerotusmuuntajat.....	56
8.	YHTEENVETO.....	58
	LÄHTEET	60

KUVALUETTELO

Kuva 1.	<i>Biot-Savartin lain geometria. [5]</i>	6
Kuva 2.	<i>Oikean käden sääntö. [6]</i>	6
Kuva 3.	<i>Suoran äärettömän pitkän johtimen aiheuttama magneettikenttä. Muokattu lähteestä [5].</i>	7
Kuva 4.	<i>Suoran äärellisen johtimen aiheuttama magneettikenttä. Muokattu lähteestä [7].</i>	8
Kuva 5.	<i>Kolmivaihevirran käyttäytyminen ajan suhteen. Muokattu lähteestä [8].</i>	9
Kuva 6.	<i>Kolmivaihejärjestelmän vaiheiden L1-L3 virrat ajanhetkellä t_1.</i>	9
Kuva 7.	<i>Muuntamon periaatekuva. Muokattu lähteestä [9].</i>	12
Kuva 8.	<i>Viidennen yliaallon vaikutus perussinimuotoiseen virtaan. Katkoviivalla esitetään perustaaajuinen sinimuotoinen virta (50 Hz), tasaisella mustalla viivalla viidennen yliaallon (250 Hz) aiheuttama virta ja paksunnetulla mustalla viivalla näiden virtojen summa. Muokattu lähteestä [13].</i>	15
Kuva 9.	<i>Ionisoimattoman säteilyn vaikutuksia ihmiseen. Muokattu lähteestä [15].</i>	18
Kuva 10.	<i>Häiriön eteneminen eri kytketymismenetelmillä. Muokattu lähteestä [18].</i>	21
Kuva 11.	<i>G2 lääkintätilojen hoitoalue. [21]</i>	22
Kuva 12.	<i>Fotosähköinen vaimeneminen [24].</i>	24
Kuva 13.	<i>Moninkertaisen heijastumisen periaate. Alaindeksi r kuvaa heijastunutta aaltoa ja alaindeksi t materiaalia läpäisevää aaltoa. Muokattu lähteestä [23].</i>	28
Kuva 14.	<i>Materiaalin paksuuden ja tunkeutumissyvyyden suhteen vaikutus korjauskertoimeen M. Muokattu lähteestä [23].</i>	29
Kuva 15.	<i>Kokonaisvaimennuksen muodostuminen absorptio- ja heijastushäviöistä kaukokentässä, kun suojamateriaalina on 0,5 mm paksu kupari. Muokattu lähteestä [23].</i>	30
Kuva 16.	<i>Materiaalin epäjatkuvuuskohtien eli reikien vaikutus magneettisesti induoituneihin virtoihin suojamateriaalin pinnalla. Muokattu lähteestä [23].</i>	31
Kuva 17.	<i>Aukon muodostaman aaltoputken poikkileikkaus, jonka pituus on t ja halkaisija d. Muokattu lähteestä [23].</i>	32
Kuva 18.	<i>Periaatekuva ferromagneettisen aineen magnetoitumiskäyrästä. B_r on väliaineen vuontiheys ja B_0 on ulkoisen kentän vuontiheys. [10]</i>	35
Kuva 19.	<i>Korkean suhteellisen permeabiliteetin omaavan materiaalin luoma pienireluktanssinen reitti magneettikentälle. Muokattu lähteestä [23].</i>	37
Kuva 20.	<i>Piirilevy magneettikentässä ilman suojalevyä [24].</i>	38

<i>Kuva 21.</i>	<i>Pyörrevirtojen vaikutus magneettikenttään. Muokattu lähteestä [24].</i>	38
<i>Kuva 22.</i>	<i>Pohjakerroksen muuntamon pohjapiirustus.</i>	41
<i>Kuva 23.</i>	<i>Sairaalan pohjakerroksessa sijaitsevan muuntamon viereisten tilojen tarkastelupisteet P1-P5.</i>	48
<i>Kuva 24.</i>	<i>Yhdestä pohjakerroksen muuntajasta aiheutuvat magneettikentät. Muuntaja sijaitsee pisteessä (0,0).</i>	49
<i>Kuva 25.</i>	<i>Sairaalan neljännen kerroksen muuntamon pohjakuva sekä tarkastelupisteet P6-P9.</i>	50
<i>Kuva 26.</i>	<i>Yhdestä neljännen kerroksen muuntajasta aiheutuvat magneettikentät. Muuntaja sijaitsee pisteessä (0,0).</i>	52
<i>Kuva 27.</i>	<i>Periaatekuva alumiinilevyn kiinnityksestä tukirakenteeseen.</i>	53
<i>Kuva 28.</i>	<i>Yhdestä kiskosillasta aiheutuvat magneettivuon tiheydet. Kiskosilta sijaitsee pisteettä (0,0).</i>	55
<i>Kuva 29.</i>	<i>Yhdestä jakelukiskosta aiheutuvat magneettivuon tiheydet. Jakelukisko sijaitsee pisteessä (0,0).</i>	55
<i>Kuva 30.</i>	<i>Suojaerotusmuuntajasta aiheutuvat magneettivuon tiheydet. Suojaerotusmuuntaja sijaitsee pisteessä (0,0).</i>	56

LYHENTEET JA MERKINNÄT

EMC	Sähkömagneettinen yhteensopivuus
IARC	Kansainvälinen syöpäjärjestö
SESKO ry	Suomen sähköteknillinen standardoimisyhdistys
SFS ry	Suomen Standardoimisliitto
TWA	Aikapainotteinen keskiarvo
A_{dB}	absorptiohäviöt
a	pinta-ala
\bar{B}	magneettivuon tiheys
B_{rms}	magneettivuon tiheyden painoton tehollisarvo
B_w	magneettivuon tiheyden painotettu huippuarvo
B_0	magneettivuon tiheyden referenssiarvo
c	valon nopeus
\bar{D}	sähkövuon tiheys
d	vaiheväli
dl'	integroimisalkio
\bar{E}	sähkökentän voimakkuus
f	taajuus
f_0	perustaajuus (50 Hz)
f_c	rajataajuus
\bar{H}	magneettikentän voimakkuus
I	sähkövirta
\bar{J}	sähkövirran tiheys
k	yliaaltokerroin
L	integroimistie pinnan S reunakäyrää pitkin
M_{dB}	moninkertaisten heijastumien korjauskerroin
\bar{n}	yksikkönormaali
P	tarkastelupiste
ρ	varaustiheys
R	resistanssi
R_{dB}	heijastushäviöt
r	tarkastelupisteen etäisyys origosta
r'	integroimisalkion etäisyys origosta
S	tarkastelupinta
S_{dB}	kokonaisvaimennus
t	aika
V	tilavuus
Z_s	saapuvan aallon impedanssi
Z_w	suojamateriaalin impedanssi
λ	aallonpituus
ε	väliaineen permittiivisyys
δ	tunkeutumissyvyys
μ	väliaineen permeabiliteetti
μ_0	tyhjiön permeabiliteetti
σ	väliaineen johtavuus
σ_r	väliaineen suhteellinen johtavuus

1. JOHDANTO

Yhteiskuntamme on nykyisin hyvin riippuvainen erilaisista sähköisistä järjestelmistä, koska melkein kaikki toimintomme tarvitsevat sähköä. Sähkön merkityksen huomaa parhaiten, jos jostain syystä ei olekaan hetkellisesti sähköä saatavilla. Tällainen tilanne saattaa tulla vastaan esimerkiksi sähkökatkosten aikana.

Sähköjohdossa kulkeva virta luo ympärilleen magneettikentän. Magneettikentän voimakkuus ja suunta ovat riippuvaisia virran voimakkuudesta ja suunnasta. Sähkölaitteiden lisääntyneen käytön vuoksi myös magneettikenttien esiintyminen on kasvanut voimakkaasti. Voidaan siis todeta, että siellä missä on sähköä, on myös magneettikenttiä.

Ihminen altistuu käytännössä koko ajan magneettikentille. Ihmisen elinympäristössä esiintyy luonnon omia magneettikenttiä, kuten esimerkiksi maapallon magneettikenttä, sekä ihmisten omista toiminnoista aiheutuvia magneettikenttiä. Magneettikenttiin liittyvät tutkimukset ovat lisääntyneet aikojen saatossa sähkön käytön lisääntyessä, mutta vielä ei ole pystytty yksiselitteisesti toteamaan niiden vaaroja tai vaarattomuutta. Erään tutkimuksen mukaan magneettikentät olisivat yhteydessä voimalinjojen lähetyvillä asuvien lasten lisääntyneeseen leukemiariskiin, mutta monissa muissa tutkimuksissa magneettikenttien ja leukemian välistä yhteyttä ei ole löytynyt. Magneettikentille onkin kuitenkin asetettu Euroopan Unionissa noudatettavat suositusarvot ja jokainen jäsenvaltio voi halutessaan tiukentaa rajoituksia entisestään.

Diplomityön tarkoitus on selvittää Jyväskylään rakennettavan sairaalan tiloissa esiintyvät magneettikentät. Työ on rajattu käsittelemään ainoastaan magneettikenttiä, vaikka sähkökentät ja magneettikentät liittyvät hyvin vahvasti toisiinsa. Magneettikenttien vaikutus laitteisiin ja ihmisten altistuminen kentille pyritään minimoimaan tilojen sijoittelussa ja teknisillä ratkaisuilla jo ennen rakentamisen aloittamista. Kriittisimmissä tiloissa, kuten esimerkiksi muuntamoiden viereisissä tiloissa, magneettikenttien voimakkuuksien pysyminen sallituissa rajoissa varmistetaan laskennoilla ja erilaisten suojausien lisäyksillä. Laskennat suoritetaan numeeriseen laskentaan tarkoitettulla tietokoneohjelmistolla MATLAB.

Työn luvuissa 2 ja 3 käydään läpi magneettikenttien vaikutuksien minimoimisen kannalta olennaista taustatietoa. Luvuissa perehdytään magneettikenttien teoriaan, sekä laskentojen kannalta välttämättömien kaavojen teoriaan. Lisäksi tarkastellaan yleisimpiä magneettikenttien lähteitä ja selvitetään, mitkä lähteet tulevat aiheuttamaan suurimpia ongelmia sairaalassa.

Luvussa 4 tutkitaan magneettikenttien vaikutuksia ihmisiin ja laitteisiin. Luvussa selvitetään, mitä mahdollisia haittoja magneettikentistä voi olla, ja millä tavalla ne ilmenevät. Luvussa 5 tutkitaan, mitä keinoja on olemassa vaikuttaa magneettikenttien voimakkuuksiin. Näiden lukujen tarkoitus on selventää, mihin eri ilmiöihin erilaiset suojaukset perustuvat ja mitkä ovat tehokkaimmat suojauskeinot kyseisessä kohteessa.

Luvussa 6 käydään läpi sairaalan lähtökohdat. Tässä luvussa käydään läpi sairaalan kaikki olennaiset lähtötiedot sekä magneettikentille annetut arvot, jotka tiloissa saavat esiintyä. Lisäksi perehdytään eri standardeihin ja säädöksiin, joita on magneettikenttien tarkasteluissa otettava huomioon. Luvussa 7 esitetään sairaalan magneettikenttien laskennoista saadut tulokset ja käydään läpi, millä muutoksilla magneettivuon tiheydet saadaan pienemmään.

2. MAGNEETTIENTIEN TEORIA

Liikkuva varaus luo ympärilleen magneettikentän. Magneettikentän voimakkuus ja suunta riippuvat sähkövirran voimakkuudesta ja suunnasta. Näin ollen sähkökentän pysyessä samana vaihtelee magneettikentän voimakkuus vaihtelevan sähkövirran mukaan. Magneettikentän olemassa oloa kuvataan suureilla, kuten magneettikentän voimakkuus \vec{H} ja magneettivuon tiheys \vec{B} . Magneettikentän voimakkuuden yksikkö on ampeeria per metri (A/m) ja magneettivuon tiheyden yksikkö on tesla (T). Magneettivuon tiheys on suuruusluokaltaan yleensä niin pieni, että siitä käytetään yksikköä mikrotlesla (μT). [1]

Magneettikentistä puhuttaessa tulee usein myös vastaan käsitteet staattinen magneettikenttä ja dynaaminen magneettikenttä. Dynaamisesta magneettikentästä käytetään myös nimitystä muuttuva magneettikenttä. Staattisella kentällä tarkoitetaan kenttää, joka ei muutu ajan kuluessa. Tästä hyvänä esimerkkinä on paikallaan oleva kestmagneetti. Muuttuva magneettikenttä vuorostaan muuttuu ajan suhteessa. Tällöin magneettikentän voimakkuus kasvaa tai pienenee ja myös mahdollisesti vaihtaa suuntaa eri ajanjaksoina. Tästä aiheeseen sopivimpana esimerkkinä toimii generaattori. [2]

2.1 Sähkömagneettisten kenttien yhtälöt

Magneettikenttien selvittämiseksi on ymmärrettävä magneettikenttiin liittyvät käsitteet ja niissä esiintyvät vuorovaikutukset. Sähkö- ja magneettikenttien välistä käyttäytymistä ja niiden vuorovaikutusta kuvataan Maxwellin yhtälöillä. Maxwellin yhtälöt koostuvat neljästä erilaisesta yhtälöstä, jotka integraalimuodossa esitettynä ovat:

$$\oint_S \vec{D} \cdot \vec{n} dS = \int_V \rho dV \quad (1)$$

$$\oint_L \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot \vec{n} dS \quad (2)$$

$$\oint_S \vec{B} \cdot \vec{n} dS = 0 \quad (3)$$

$$\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int_S \vec{J} \cdot \vec{n} dS + \frac{\partial}{\partial t} \int_S \vec{D} \cdot \vec{n} dS, \quad (4)$$

missä

S on tarkastelupinta

\vec{D} on sähkövuon tiheys

\vec{n} on pinnan S yksikkönormaali

V on tarkastelutilavuus

L on integroimistie pinnan S reunakäyrää pitkin

\bar{E} on sähkökentän voimakkuus
 $d\bar{l}$ on integroimisalkio
 \bar{B} on magneettivuon tiheys
 \bar{H} on magneettikentän voimakkuus
 \bar{J} on sähkövirran tiheys
 t on aika
 ρ on varaustiheys [3].

Ensimmäinen esitellyistä kaavoista (1) on Gaussin laki sähkökentille. Se voidaan sanallisesti ilmaista siten, että sähkövuo minkä tahansa tilavuuden reunapinnan läpi on yhtä suuri kuin tilavuuden sisältämä nettovaraus. Toinen kaavoista (2) on Faradayn laki. Faradayn laki sanallisesti tarkoittaa, että sähkömotorinen voima minkä tahansa suunnistetun pinnan reunakäyrän yli on sama kuin magneettivuon muutosnopeus pinnan läpi. Nämä kaavat (1-2) ovat sähkökentille.[2] Johdannossa tuli mainittua, että vaikka tässä työssä tarkastellaan ainoastaan magneettikenttiä, pitää kuitenkin muistaa, että sähkö- ja magneettikentät ovat hyvin riippuvaisia toisistaan. Näin ollen magneettikenttien käyttäytymisen ymmärtämiseksi on osattava myös sähkökenttiin liittyvät kaavat.

Gaussin laki magneettikentille kaava (3) tarkoittaa, että magneettivuo minkä tahansa suljetun tilavuuden reunapinnan yli on nolla. Kaavan (3) summa on nolla, koska magneetit esiintyvät luonnossa ainoastaan dipoleina, eli ei ole olemassa pistemäisiä magneettikentän lähteitä. Käytännössä tämä tarkoittaa, että mielivaltaisesta pinnasta lähtee ulospäin yhtä monta magneettivuon kenttäviivaa, kuin pintaan tulee sisälle päin. [2]

Viimeinen kaavoista (4) on Ampèren laki. Ampèren laki tarkoittaa, että magnetomotorinen voima minkä tahansa pinnan reunakäyrän ympäri on sama kuin pinnan lävistävä sähkövirta.[2] Nämä kaksi kaavaa (3-4) ovat magneettikentille. Näistä yhtälöistä varsinkin Ampèren laki on tämän työn onnistumisen kannalta merkittävä.

Maxwellin yhtälöitä tarkasteltaessa huomataan, että esimerkiksi Gaussin laki sähkökentälle (1) ja Faradayn laki (2) eivät ole toisiinsa kytköksissä. Tästä johtuen Maxwellin yhtälöiden lisäksi tarvitaan niin kutsutut väliaineiyhtälöt, jotka sitovat kaavat (1-4) toisiinsa. Väliaineiyhtälöt ovat:

$$\bar{J} = \sigma \bar{E} \tag{5}$$

$$\bar{B} = \mu \bar{H} \tag{6}$$

$$\bar{D} = \varepsilon \bar{E} \tag{7}$$

missä

σ on väliaineen johtavuus

μ on väliaineen permeabiliteetti

ε on väliaineen permittiivisyys [2].

Väliaine yhtälöt kuvaavat, miten väliaine vaikuttaa kyseisiin suureisiin. Kaavan (6) permeabiliteetti kuvaa väliaineen magneettista käyttäytymistä ja vastaavasti kaavan (7) permittiivisyys kuvaa väliaineen vaikutusta siihen kohdistuvaan sähkökenttään.

2.2 Magneettikentän laskeminen

Magneettikenttien tarkka määrittäminen laskennallisesti on hyvin hankalaa. Tällöin pitäisi tietää täsmällisesti kaikkien tarkastelualueen lähetyvillä olevien materiaalien ominaisuudet sekä tietää niissä kulkevien virtojen suunnat ja voimakkuudet. Tästä johtuen laskennoissa tehdään usein joitakin yksinkertaistuksia, joilla kuitenkin päästään hyvin lähelle oikeita laskentatuloksia. Esimerkiksi, jos johdin oletetaan hyvin ohueksi, voidaan laskennoissa käyttää virtaa virrantiheyden sijaan. Toinen yleinen yksinkertaistus voidaan usein tehdä magneettikentän voimakkuuden laskennassa ja käyttää kolmiulotteisen laskennan sijasta yksiulotteista kuvausta. [4]

Yhdistämällä Ampèren laki (4) ja väliaine yhtälö (6), on mahdollista päästä käsiksi Biot-Savartin lakiin:

$$\vec{B}(r) = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \cdot \int \frac{d\vec{l}' \times (\vec{r} - \vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3}, \quad (8)$$

missä

$d\vec{l}'$ on integroimisalkio

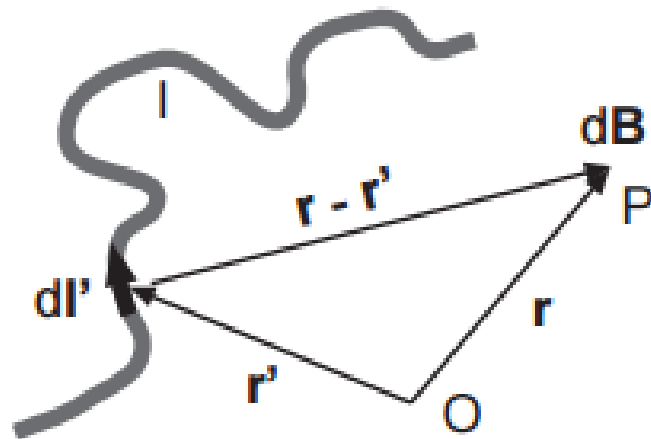
\vec{r} on tarkastelupisteeseen etäisyys origosta

\vec{r}' on integroimisalkion etäisyys origosta

$\vec{r} - \vec{r}'$ on integroimisalkion etäisyys tarkastelupisteeseen. [5]

Biot-Savartin laki (8) on voimassa mielivaltaisen muotoiselle virtajohtimelle. Tarkasteltaessa edellä läpikäytyjä kaavoja voidaan huomata, että magneettikentän voimakkuudella ei ole suoranaista yhteyttä jännitteeseen. Näin ollen pelkän jännitteen perusteella ei voida tehdä oletuksia magneettikentän voimakkuuksista.

Kuvassa 1 on esitetty Biot-Savartin laki geometriaa käyttäen. Kuvasta 1 nähdään, että magneettivuon tiheys on laskettavissa integroimisalkion sijainnista riippumatta. Kuvasta 1 on havaittavissa myös, että virran suunnalla on vaikutusta magneettikentän tiheyteen.

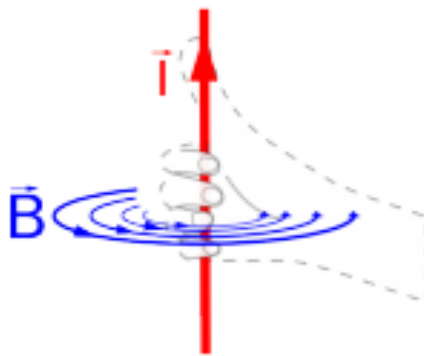


Kuva 1. Biot-Savartin lain geometria. [5]

Saadakseen koko johtimen vaikutus tarkastelupisteeseen on laskettava kaikkien eri etäisyyksien magneettivuon tiheydet yhteen. Tuloksen tarkkuuteen vaikuttaa valittujen integroimisalkioiden määrä sekä niiden sijainnit. [5]

2.2.1 Suoran johtimen aiheuttama magneettikenttä

Magneettikenttien määrittämisessä käytetään hyväksi oikean käden sääntöä. Kuvassa 2 on esitetty oikean käden säännön käyttö. Kuvasta 2 nähdään, että kun johtimesta otetaan kiinni siten, että peukalo osoittaa virran suunnan, niin sormet osoittavat magneettikentän suunnan. [6]



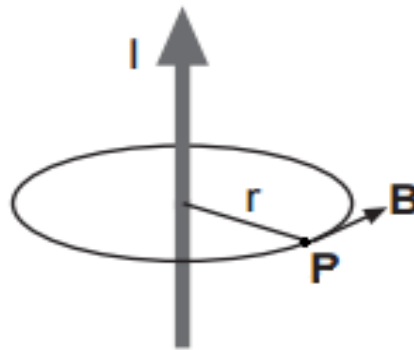
Kuva 2. Oikean käden sääntö. [6]

Yhden suoran johdon aiheuttaman magneettikentän laskemisessa käytetään Biot-Savartin lakia (8). Olettaessa johtimen olevan suora, hyvin ohut ja äärettömän pitkä, suppenee kaava (8) lopulta muotoon [5],

$$B(r) = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}. \quad (9)$$

On huomattava, että kaava sellaisenaan pätee ainoastaan, jos väliaineena on ilma tai tyhjiö. Kaavassa (9) esiintyvä vakio μ_0 on tyhjiön permeabiliteetti, josta käytetään myös nimitystä magneettivakio. Tyhjiön permeabiliteetti on $4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m.

Kuvassa 3 on esitetty tarkastelussa käytettävä geometria. Kuvasta 3 nähdään, että jos on tiedossa virta sekä johtimen ja tarkastelupisteen (P) välinen etäisyys, ratkeaa magneettivuon tiheyden arvo tarkastelupisteessä kaavalla (9).



Kuva 3. Suoran äärettömän pitkän johtimen aiheuttama magneettikenttä. Muokattu lähteestä [5].

Magneettivuon tiheys pisteessä P olisi sama, mutta päinvastainen, virran kulkiessa toiseen suuntaan. Kaavasta (9) huomataan myös, että magneettivuon tiheys on suoraan verrannollinen virtaan ja kääntäen verrannollinen etäisyyteen johtimesta.

Johtimen ollessa äärellisen mittainen, täytyy ottaa huomioon myös johtimen alku- ja loppupää. Tällöin kaavaan (9) tulee lisäksi tarkastelupisteen ja johtimen molempien päiden väliset kulmat,

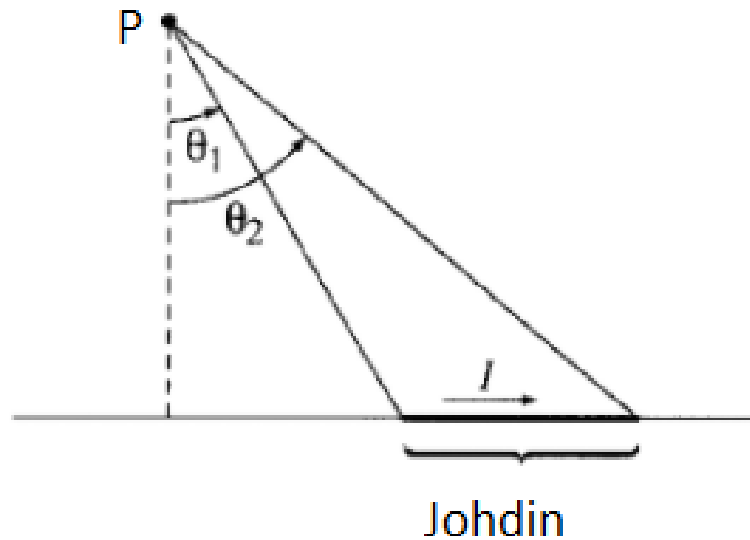
$$B(r) = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} (\sin(\theta_2) - \sin(\theta_1)), \quad (10)$$

missä

θ_2 on tarkastelupisteen ja johtimen loppupään välinen kulma

θ_1 on tarkastelupisteen ja johtimen alkupään välinen kulma.

Kuvassa 4 on esitetty suoran äärellisen johtimen geometria kaavalle (10). Kaavaa (10) pystytään käyttämään, vaikka tarkastelupiste olisi johtimen päiden välissä.



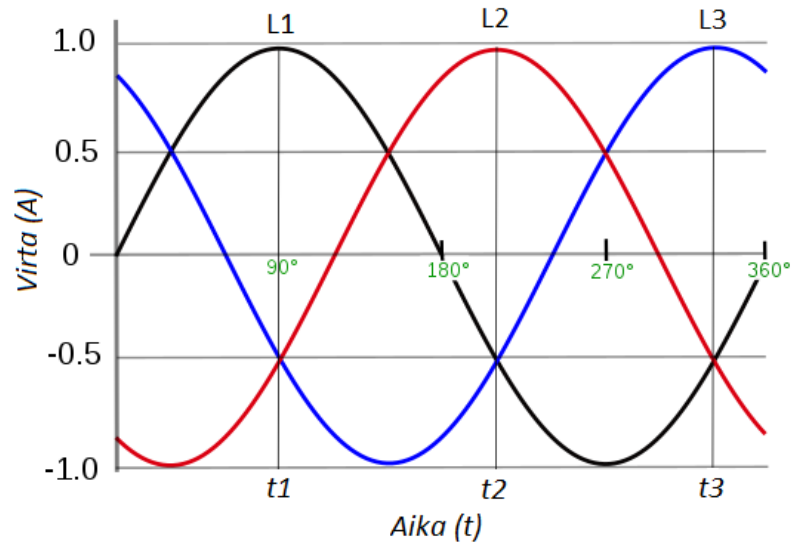
Kuva 4. Suoran äärellisen johtimen aiheuttama magneettikenttä. Muokattu lähteestä [7].

2.2.2 Useamman johtimen aiheuttama magneettikenttä

Suomessa sähkönjakelu toteutetaan pääsääntöisesti aina kolmivaihejärjestelmänä. Tästä johtuen magneettikenttien vaikutusten selvittämiseksi on osattava ottaa huomioon useampi johto samanaikaisesti. Kolmivaiheisen kuormituksen ollessa täysin symmetrinen ei nollajohtimessa esiinny virtaa ollenkaan, ja näin ollen se voidaan jättää huomioimatta. Tällaisia tilanteita ovat usein esimerkiksi moottorilähdöt.

Todellisuudessa myös yksivaiheiset lähdöt sisältävät useamman johtimen. Esimerkiksi valaisinta asennettaessa vedetään valaisimelle nykyään kaapeli, joka sisältää vaihe-, nolla- ja maadoitusjohtimen. Näin ollen tarkasteltaessa magneettikenttiä joudutaan käytännössä aina ottamaan huomioon useampia johtimia kerralla.

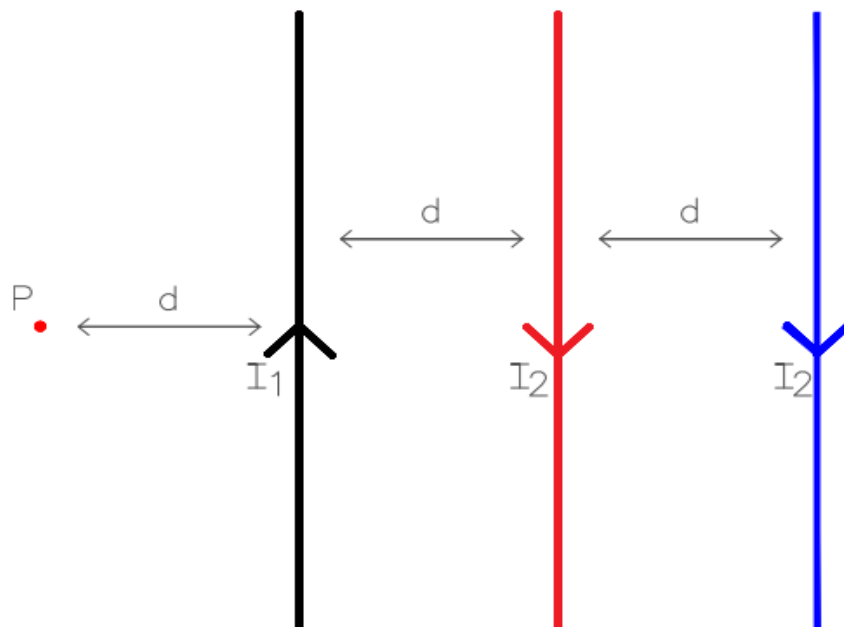
Kuvassa 5 on esitetty tilanne, jossa kolmivaiheinen kuorma on täysin symmetrinen. Kuvasta 5 nähdään kuinka eri vaiheiden virrat käyttäytyvät ajan suhteen yhden jakson aikana kolmivaihejärjestelmässä. Kuvassa 5 olevat merkinnät L1-L3 tarkoittavat kolmivaihejärjestelmän vaiheita.



Kuva 5. Kolmivaihevirran käyttäytyminen ajan suhteen. Muokattu lähteestä [8].

Kuvan 5 perusteella voidaan laskea, minkälaisen magneettikentän kolmivaihejärjestelmän kaapeli aiheuttaa ympärilleen. Kun tarkastellaan esimerkiksi tilannetta ajanhetkellä t_1 , tällöin vaiheen L1 virta on huipussaan ja vaiheiden L2 ja L3 virrat ovat puolet vaiheen L1 virrasta ja vastakkaisuuntaisia, eli eri vaiheiden virtojen summa on symmetrisen kuorman tapauksessa nolla.

Kuvassa 6 on esitetty ajanhetken t_1 tarkastelugeometria. Kuvassa 6 piste P on mielivaltainen piste, jonka magneettivuon tiheys halutaan selvittää. Vaiheväliä on kuvassa 6 merkattu merkinnällä d . Yksinkertaistuksen vuoksi pisteen P etäisyydeksi vaiheeseen L1 on valittu myös d . Johtimissa esiintyvät nuolet kertovat kyseisen ajanhetken virran suunnan.



Kuva 6. Kolmivaihejärjestelmän vaiheiden L1-L3 virrat ajanhetkellä t_1 .

Kun kuvaan 6 käytetään oikean käden sääntöä, huomataan, että vaiheen L1 magneettikentän suunta pisteessä P on kuvasta ulospäin ja vastaavasta vaiheiden L2 ja L3 magneet-

tikentät ovat kuvaan päin. Kokonaisvuo tarkastelupisteessä on jokaisen johtimen aiheuttaman vuon vektoreiden summa. Biot-Savartin lakia (9) käyttämällä päästään kyseisellä ajanhetkellä muotoon,

$$B_1 = \frac{\mu_0}{2\pi d} \left(I_1 - \frac{5}{6} I_2 \right). \quad (11)$$

Kaavasta (11) on huomattavissa, että virran poiketessa nolasta, poikkeaa myös magneettivuon tiheys nolasta. Usein kuitenkin kirjallisuudessa väitetään symmetrisen kolmivaihejärjestelmän magneettivuon tiheyden olevan nolla kaapelin ulkopuolella. Tämä väite pitää likimain paikkaansa, kun tarkastelupiste on johtimista niin kaukana, että johtimien vaiheväli on huomattavasti pienempi kuin tarkastelupisteen etäisyys johtimista. Tästä voidaan myös päätellä, että mitä lähemmäksi kolmivaihejärjestelmän vaiheet toisiansa saadaan, sen vähemmän niistä aiheutuu ympärilleen magneettikenttiä.

Pitää kuitenkin muistaa, että hyvin usein kuormat ovat epäsymmetrisiä. Tällöin myös nolajohtimessa kulkee virta. Epäsymmetrisen kuorman tapauksessa johtimien aiheuttamat magneettikentät eivät kumoa toisiansa pois. Useille päätelaitteille, esimerkiksi omakotitalon valoille, lähtevät lähdöt ovat yksivaiheisia lähtöjä. Myöskään tällöin magneettikenttä ei harhavirroista johtuen välttämättä kumoudu pois.

3. MAGNEETTIKENTÄN LÄHTEET

Magneettikenttiä esiintyy kaikkialla missä kulkee sähkövirtaa. Nykyaikaisessa yhteiskunnassa asuvan ihmisen on hyvin vaikea vältellä ihmisten aiheuttamia magneettikenttiä. Magneettikenttien aiheuttajina voivat olla esimerkiksi sähkövoimalinjat, kodin sähkölaitteet ja muuntamot. Ihmisten synnyttämien magneettikenttien lisäksi ihminen altistuu jatkuvasti myös esimerkiksi maan omalle magneettikentälle.

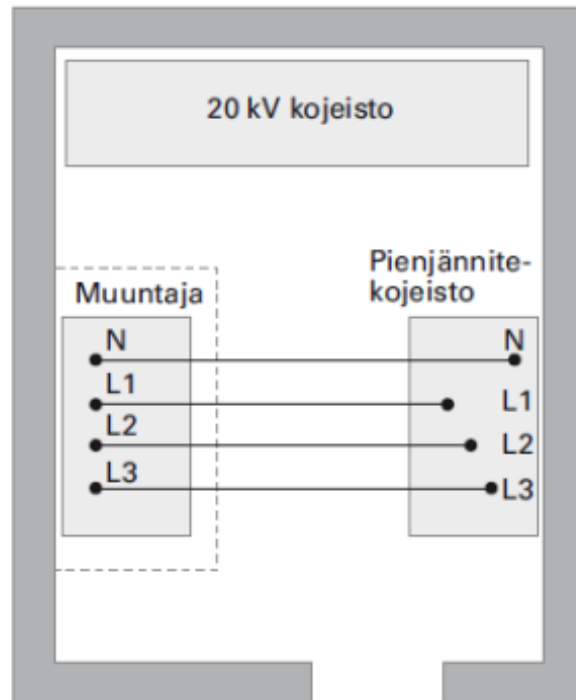
Magneettikenttien lähteistä osa synnyttää hyvin pienen ja nopeasti vaimenevan magneettikentän ympärilleen, kun taas osa lähteistä aiheuttaa hyvin voimakkaan magneettikentän. Tästä johtuen onkin tärkeää magneettikenttiä tutkittaessa tarkastella tilanteeseen liittyen oikeita magneettikentän lähteitä. Seuraavaksi käydään läpi tämän diplomityön kannalta tärkeimmät magneettikentän lähteet.

3.1 Muuntamot

Muuntamot ovat sähkönsiirto- ja jakeluverkon kannalta yksi keskeisimmistä osista. Muuntamoissa pystytään nostamaan tai laskemaan jännitettä halutulle tasolle. Sähkönsiirrossa käytetään paljon esimerkiksi 400 kV ja 110 kV jännitettä, kun taas puolestaan suurin osa kodin sähkölaitteista toimii 400 V jännitteellä. Jännitteen ollessa korkeampi on virta pienempi, ja tällöin johdoissa tapahtuvat häviöt ovat pienemmät. Häviöiden pienentämiseksi kannattaa muuntamo, jossa jännite muutetaan 400 V tasolle, sijoittaa mahdollisimman lähelle lopullista kulutuskohteita. Tästä johtuen usein isoissa rakennuksissa saattaa esimerkiksi kellarikerroksessa olla muuntaja.

Muuntamon tärkeimmät osat ovat muuntaja, keskijännitekojeisto, pienjännitekeskus ja niiden väliset yhdistykset. Muuntamon aiheuttama magneettikenttä onkin näiden muuntamossa esiintyvien kaikkien eri komponenttien yhteisvaikutus. Keskinäisistä sijoitelluista riippuen eri komponenttien magneettikentät saattavat joko voimistaa tai kumota toisiansa.

Kuvassa 7 on esitetty periaatekuva muuntamon pohjapiirustuksesta. Kuvasta 7 puuttuu 20 kV kojeistojen ja muuntajan välinen yhdistys. 20 kV kojeistojen ja muuntajan välinen yhdistys voidaan tehdä kaapelilla tai kiskosillalla. Kuvasta 7 huomataan, että mitä lähemmäksi kojeistot ja muuntaja viedään toisiaan, sitä lyhyemmäksi niiden välinen yhdistys jää. Tällöin myös yhdistyksissä syntyvät magneettikentät vaikuttavat pienemmälle alalle. Kojeistojen ja muuntajan sijoittelussa on kuitenkin otettava huomioon myös tarvittavat tilat huoltoja varten.



Kuva 7. Muuntamon periaatekuva. Muokattu lähteestä [9].

3.1.1 Muuntajan aiheuttamat magneettikentät

Muuntaja on muuntamon keskeisin osa. Muuntajassa olevat käämit tuottavat voimakkaan magneettikentän muuntajan rautasydämeen. Muuntajan sisäiset magneettikentät muodostuvat päävuosta ja hajavuosta. Päävuo on magnetointivirralla luotu rautasydämen kautta sulkeutuva magneettivuo. Käytännössä koko vuo ei kulje pelkästään rautasydämen kautta. Sitä osaa, joka ei lävistä toisiokäämiä, kutsutaan hajavuoksi. Hajavuo on kuitenkin päävuohon verrattuna varsin pieni. [10]

Muuntajakäämien aiheuttamat magneettikentät vaimenevat nopeasti, joten ympäristön kannalta ne eivät aiheuta merkittäviä kenttiä. Erityyppiset muuntajat aiheuttavat erilaisia magneettikenttiä. Kuivamuuntajat aiheuttavat nimellistehoon nähden suuremman magneettikentän kuin öljymuuntajat. Tämä johtuu lähinnä siitä, että kuivamuuntajissa ei käytetä kotelointia, mutta myös sisäisillä kytkennöillä on merkitystä. Lisäksi muuntajan käämeille kulkevat läpiviennit ovat tärkeä tekijä muuntajan ulkopuolelle aiheutuville magneettikentille. [3; 10]

3.1.2 Yhdistyksien aiheuttamat magneettikentät

Muuntamon suurin magneettikenttä löytyy yleensä pienjänniteyhdistyksen lähetyviltä. Kuten aiemmin on jo tullut todettua, magneettikentän suuruuden yksi merkittävimmistä tekijöistä on kuormitusvirta ja pienjänniteyhdistyksessä saattaa kulkea tuhansien ampee-

rien suuruinen virta. Kuormavirran rajoittaminen ei ole toimiva ratkaisu pitkällä aikavälillä, joten siksi yhdistyksen rakenteella, pituudella ja sijainnilla on suuri merkitys magneettikentän suuruuteen. [11]

Muuntamossa pyritään sijoittamaan muuntaja ja pienjännitekeskus mahdollisimman lähelle toisiaan, jolloin yhdistyksen pituus saataisiin minimoitua. Tällöin magneettikenttä vaimenee nopeammin eikä myöskään leviä niin laajasti ympäristöön. Yhdistyksen sijainnilla myös on suuri merkitys, koska yhdistyksen ollessa muuntamotilan katon rajassa vaikuttaa se enemmän yläpuolisiin tiloihin kuin että yhdistys olisi muuntamotilan lattialla. Sijoittelussa on kuitenkin otettava aina huomioon turvallisuus ja näin ollen yhdistys usein joudutaan sijoittamaan lähemmäksi kattoa.

Rakenteellisesti kolmivaiheiset kiskot aiheuttavat pienemmän magneettikentän kuin yksivaiheiset kiskot, koska kolmivaiheisten kiskojen vaiheet kumoavat toisiaan tehokkaasti. Ilmaeristeiset kiskot aiheuttavat suurempia magneettikenttiä kuin eristetyt kiskot, koska ilmaeristetyissä vaihevälit ovat suuremmat, joten myös ympäristössä esiintyvä magneettikenttä on suurempi. Vaihevälin etäisyyden vuoksi kiskot kannattaa asettaa pystyyn mieluummin kuin lappeelleen. [11]

Keskijännitekojeiston ja muuntajan välinen yhdistys aiheuttaa myös magneettikenttiä. Sähkötekniikan perusteiden nojalla tiedetään, että jännitteen kasvaessa on virran pienentävä. Tästä johtuen keskijännitekojeiston ja muuntajan välisessä yhdistyksessä kulkeva virta on huomattavasti pienempi kuin pienjänniteyhdistyksessä, eikä keskijänniteyhdistys aiheuta ympäristöön niin merkittäviä magneettikenttiä. Sijoittelussa on kuitenkin pyrittävä siihen, etteivät keskijännite- ja pienjänniteyhdistyksien kentät pääse voimistamaan toisiaan. [11]

3.2 Muiden sähköjärjestelmien magneettikentät

Magneettikentän lähteinä eivät ainoastaan toimi muuntamot. Yleisesti rakennuksien muiden sähköjärjestelmien aiheuttamat magneettikentät ovat suhteellisen pieniä. Huonosti valittu johdotusreitti ja epäsymmetriset kuormat saattavat kuitenkin aiheuttaa magneettikenttien summautumista, jolloin myös magneettikentät tietyissä tiloissa voivat olla yllättävän suuria. [11]

Pienjännitekeskukset sekä myös muuntamoissa olevat keskijännitekojeistot ovat nykyään koteloituja, joten niistä aiheutuvat magneettikentät vaimenevat nopeasti etäisyyden kasvaessa. Keskuksien kojeet saadaan nykyään asennettua tiiviimmin toisiinsa nähden ja kojeiden väliset yhdistykset ovat myös lyhyemmät. Tästä johtuen magneettikentät vaimenevat nopeammin ja saattavat myös kumota toisiaan paremmin. [3]

Keskuksilta lähtevät sähköjohdot aiheuttavat magneettikenttiä samalla tavalla kuin esimerkiksi pienjänniteyhdistys. Päätelaitteille menevät virrat ovat usein kuitenkin huomattavasti pienempiä, joten myös niiden aiheuttamat magneettikentät ovat selvästi pienempiä. Laitteita on kuitenkin paljon ja sähköjohtojen pituudet ovat moninkertaisia pienjänniteyhdistykseen nähden, joten suunnittelussa on hyvä huomioida kuormavirrat ja symmetrinen sijoittelu. Yksittäisten laitteiden magneettikenttä ei yleensä erotu yli metrin päästä taustakentästä [11].

Magneettikenttiä saattavat aiheuttaa myös harhavirrat. Harhavirroiksi sanotaan virtoja, jotka kulkevat maadoitettujen johtavien rakenteiden kautta. Harhavirrat itsessään ovat hyvin pieniä, mutta meno- ja paluuvirrassa saattaa olla harhavirroista johtuva ero, jolloin näiden johtimien magneettikentät eivät kumoakaan toisiansa. Maadoituksissa kulkeva harhavirta saattaa aiheuttaa hyvinkin laajalle alueelle rakennusta magneettikentän. [11]

Harhavirrat ovat yleisiä vanhoissa rakennuksissa, joissa on käytössä TN-C- eli nelijohdinjärjestelmä. Nelijohdinjärjestelmässä on yhdistetty nolla- ja suojamaadoitusjohdin. Nolla- ja suojamaadoitusjohtimen ollessa yhdistettynä kaikki virta palaa syöttökohteseen nollajohtimen ja niihin liitettyjen maadoituksien kautta. Uusissa rakennuksissa on käytössä TN-S- eli viisijohdinjärjestelmä tai TN-C-S- eli sekajärjestelmä. TN-S-järjestelmässä on erillinen nolla- ja suojamaadoitusjohdin. Sekajärjestelmässä saattaa esimerkiksi pääkeskukseen tulla nelijohdinjärjestelmä, mutta pääkeskuksella erotetaan nolla- ja maadoitusjohdin toisistaan, jolloinko pääkeskukselta eteenpäin kulkee viisijohdinjärjestelmä. TN-S-järjestelmässä paluuvirrat kulkevat nollajohtimessa ja maadoitusvirrat erillisessä maajohdossa. [9]

3.3 Yliaallot

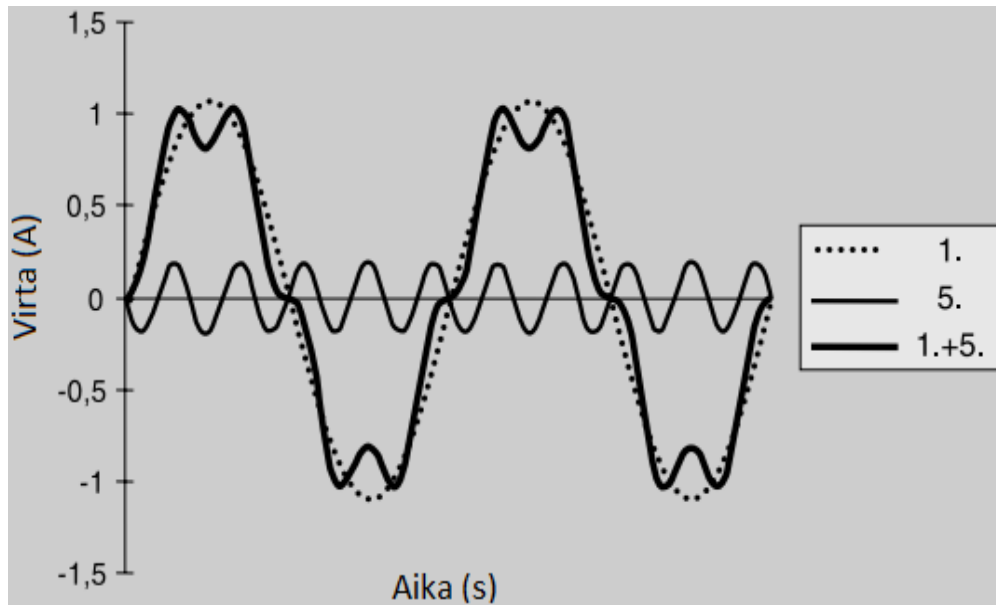
Suomen sähköverkossa käytetään 50 Hz perustaajuista sinimuotoista jännitettä ja sähkölaitteet on pääsääntöisesti suunniteltu toimimaan sinimuotoisella jännitteellä. Sähköjalkeluverkkoon liitetään kuitenkin lisääntyvin määrin epälineaarisia kuormia, jotka ottavat verkosta tai syöttävät verkkoon perustaajuisesta sinikäyrästä poikkeavia virtoja. Nämä epälineaariset kuormat saattavat aiheuttaa perustaajuuden kerrannaisia eli yliaaltoja. [12]

Yliaaltojen lähteinä toimivat esimerkiksi tasa- ja vaihtosuuntaajat, muuntajat, kodin elektroniikka, sähkömoottorit ja loisteputkivalaisimet. UPS-laitteistot, varsinkin huoltamattomat, saattavat myös toimia yliaaltojen lähteinä. [12]

Yliaallot aiheuttavat häviöiden kasvua sekä verkossa, että sähkönkäyttäjien laitteissa. Suuria ongelmia aiheuttavat kolmella jaolliset (150 Hz, 300 Hz...) yliaallot, koska nämä summautuvat vaihejohtimista nollajohtimeen ja varsinkin vanhoissa rakennuksissa saattaa levitä nollausten kautta mahdollisesti myös rakennuksen runkorakenteisiin. Nollajohtimessa esiintyvä virta voi olla tästä syystä merkittävästi suurempi kuin vaihejohtimissa

esiintyvät virrat. Virran kasvu vaikuttaa myös syntyviin magneettikenttiin ja tästä syystä yliaallot onkin huomioitava magneettikenttiä tarkasteltaessa. [12]

Kuvassa 8 on esitetty virtakuvaaja, kun virtaan lisätään viides yliaalto. Kuvasta 8 nähdään, että tietyillä ajanhetkillä virta on yliaallosta johtuen suurempi kuin normaalitilanteessa olisi.



Kuva 8. Viidennen yliaallon vaikutus perussinimuotoiseen virtaan. Katkoviivalla esitetään perustaajuinen sinimuotoinen virta (50 Hz), tasaisella mustalla viivalla viidennen yliaallon (250 Hz) aiheuttama virta ja paksunnetulla mustalla viivalla näiden virtojen summa. Muokattu lähteestä [13].

Viidennellä yliaallolla ei ole merkittävää vaikutusta virran huippuarvoon, mutta esimerkiksi kolmas yliaalto aiheuttaa jo huomattavasti suuremman virran huippuarvon kuin mitä ilman yliaaltoja esiintyisi. Sähköverkossa muita yleisiä yliaaltoja ovat seitsemäs ja yhdeksäs yliaalto.

3.3.1 Yliaaltokerroin

Yliaaltojen huomioiminen magneettikenttien tarkastelussa on hankalaa. Saatuja arvoja voidaan kuitenkin korjata yliaaltokerroimella, joka on usein väliltä 1,5-3. Yliaaltokerroimen ollessa tuntematon käytetään usein kerrointa 3, koska tällöin todennäköisesti todellinen arvo jää saatua tulosta pienemmäksi. Näin ollen saatu tulos voi olla suositusarvojen alle, mutta otettaessa kerroin huomioon, voikin tulos olla suositusarvojen ylitse. [11]

Yliaaltokerroin on mahdollista selvittää, jos on tiedossa magneettivuon tiheyden painotettu huippuarvo ja 50 Hz taajuudella olevan magneettivuon tiheyden painoton tehollisarvo. Yliaaltokerroin lasketaan kaavalla,

$$k = \frac{\left(\frac{f_c}{f_0}\right)B_w}{\sqrt{2}B_{rms}}, \quad (12)$$

missä

k on yliaaltokerroin

f_0 on perustaajuus (50 Hz)

f_c on rajataajuus

B_w on magneettivuon tiheyden painotettu huippuarvo

B_{rms} on magneettivuon tiheyden painoton tehollisarvo 50 Hz taajuudella. [11]

Kaavassa (12) oleva magneettivuon tiheyden painotettu huippuarvo skaalataan taajuuksien suhteen 50 Hz taajuuden tasolle. Painotetun huippuarvon selvittäminen laskennallisesti on kuitenkin hyvin hankalaa ja usein tulos selvitetäänkin mittaamalla. [11]

4. MAGNEETTIKENTTIEN VAIKUTUS IHMISIIN JA LAITTEISIIN

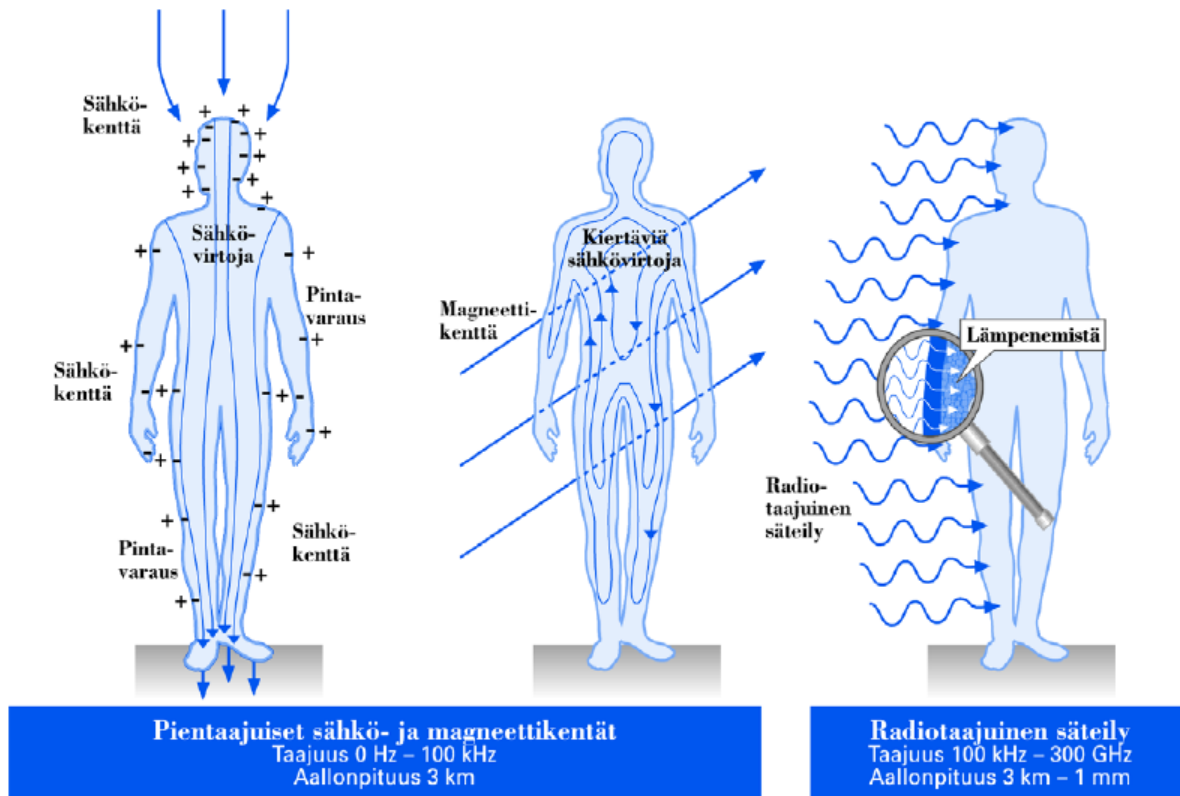
Ihmiset ja ihmisten käyttämät laitteet ovat elin- ja käyttöympäristössään alttiina sekä ihmiskunnan toiminnasta peräisin oleville että luonnon synnyttämille magneettikentille. Ihmiskunnan toiminnasta peräisin olevat magneettikentät voivat olla tarkoituksellisia, kuten esimerkiksi lääketieteessä käytettävän magneettikuvauslaitteen synnyttämät kentät tai tahattomasti aiheutettuja, kuten esimerkiksi muuntajan ympärille vuotavat kentät. Luonnon omat kentät ovat useimmiten varsin pieniä ihmisten luomiin kenttiin nähden. Luonnon omia kenttiä ovat esimerkiksi maapallon oma hitaasti muuttuva magneettikenttä.

4.1 Magneettikenttien terveysvaikutukset

Magneettikenttien terveysvaikutuksia on tutkittu paljon, mutta tutkimukset ovat olleet hajanaisia ja menetelmiltään hyvin vaihtelevia. Eri tutkimuksien tuloksia on siksi ollut vaikea verrata toisiinsa. Useissa tutkimuksissa on huomattu magneettikentillä olevan erilaisia vaikutuksia ihmisiin, mutta täysin vastaavia tutkimuksia ei joko ole uusittu tai eri tutkimusryhmät eivät ole päässeet samoihin tuloksiin. Siten magneettikenttien vaaroja tai vaarattomuutta ei ole yksiselitteisesti pystytty todistamaan. [14] Voimakkaiden magneettikenttien biologiset vaikutukset tunnetaan hyvin, mutta pitkäaikaisten kenttien vaikutukset ovat vielä epäselviä [3].

Pientaajuiset magneettikentät ovat ionisoimatonta sähkömagneettista säteilyä. Ihminen on käytännössä kaikkialla alttiina pientaajuisille kentille, koska pientaajuisia kenttiä syntyy sähköntuotannossa, siirrossa, jakelussa ja käytössä. Pientaajuisiksi kentiksi kutsutaan kenttiä, joiden taajuus on 0-100 kHz välillä. Pientaajuiset magneettikentät pystyvät läpäisemään ihmisen ihon ja saavat aikaan kiertäviä sähkövirtoja elimistöön. [3; 14]

Kuvassa 9 on esitetty ionisoimattoman säteilyn vaikutuksia. Kuvassa 9 näkyy magneettikentän vaikutuksen lisäksi myös sähkökentän vaikutus ihmiseen, kun taajuus on alle 100 kHz, sekä radiotaajuisen säteilyn vaikutus, kun taajuus on 100 kHz - 300 GHz. Kuvasta 9 on huomattavissa, kuinka magneettikenttä saa aikaan sähkövirtoja ihmisen elimistöön.



Kuva 9. Ionisoimattoman säteilyn vaikutuksia ihmiseen. Muokattu lähteestä [15].

Pientaajuisten magneettikenttien tunnettuja vaikutuksia ovat hermo- ja lihasärsytykset eli stimulaatiot. Erittäin voimakkaille magneettikentille altistuessa voi kokea myös valonvälähdyksiä eli magnetofosfeenejä. Magnetofosfeenillä tarkoitetaan ilmiötä, joka syntyy staattisen magneettikentän vaikutuksesta, kun pään tai silmien nopeiden liikkeiden vuoksi indusoituu virtoja silmän verkkokalvoille. [3; 15]

Muita voimakkaita magneettikentistä johtuvia oireita voivat olla pahoinvointi ja huihaus. Radioaaltoinen säteily saattaa aiheuttaa myös kudosten lämpenemistä. Näiden aistitunteuksien esiintyminen vaatii kuitenkin tavallisesti yli 10 mT kokoluokan magneettikenttiä. Ihmisen elinympäristössä esiintyvät kentät ovat pääsääntöisesti suuruusluokaltaan mikrotlesoja (μT) ja yli 10 mT magneettikenttiä esiintyykin vain erityisolosuhteissa, kuten esimerkiksi magneettikuvauksessa. Lievästä ylialtistumisesta ei jää fysiologisesti havaittavia muutoksia elimistöön. [3; 15]

Magneettikuvauksissa on myös mahdollista, että voimakkaasta magneettikentästä johtuen kehossa olevat metalliset esineet aiheuttavat ympärillä olevien kudosten lämpenemisen ja voivat lähteä liikkeelle. Tatuoinneissa käytettävät tatuointivärit sekä kulmakarvojen ja ripsien kesto- ja väri-voirit voivat sisältää metalliyhdisteitä, jotka saattavat lämmetä magneettikuvauksissa. Magneettikuvausten pahimmat vaaratilanteet ja tapaturmat ovat aiheutuneet, kun kuvaushuoneeseen on tuotu metalliesineitä, jotka voimakkaasta magneettikentästä johtuen ovat sinkoutuneet kuvauslaitteeseen aiheuttaen henkilö- tai esinevahinkoja. [16]

Magneettikenttien pitkäaikaisvaikutuksista syöpäriskiin ja lisääntymisterveyteen on keskusteltu ja tutkittu paljon. Hyvin paljon on tehty tutkimuksia pientaajuisten magneettikenttien mahdollisista genotoksisista eli geeneille myrkyllisistä vaikutuksista. Tutkimuksia on tehty sekä ihmisille että eläimille. [14]

Eräässä ruotsalais-suomalaisessa tutkimuksessa analysoitiin veturinkuljettajien verinäytteitä, koska veturinkuljettajat altistuvat voimakkaille magneettikentille, jotka voivat olla välillä jopa yli 100 μT . Tutkimuksessa huomattiin veturinkuljettajien kromosomipoikkeavuuksien olevan noin neljä kertaa yleisempiä kuin verrokkiryhmällä, jotka eivät altistu näin voimakkaille magneettikentille. Kyseisen tutkimuksen sekä myös muiden vastaavien tutkimuksien tulkintaa vaikeuttaa epävarmuus siitä, voiko eri ryhmiä verrata keskenään, sillä magneettikenttäaltistuksen lisäksi ryhmillä on myös erilaiset työolosuhteet ja elämäntavat. [14]

Kansainvälisen syöväntutkimuskeskuksen IARC:n (International Agency for Research on Cancer) mukaan pitkäaikainen asuminen yli 0,4 μT magneettikentässä saattaisi aiheuttaa lapsilla leukemiaa. Leukemiariskin lisääntymistä ei kuitenkaan ole pystytty tarpeeksi pätevästi todistamaan eikä myöskään ole löydetty sellaista biologista vaikutusmekanismia, jolla magneettikenttien syöpää aiheuttava kyky olisi selitettävissä. IARC onkin luokitellut pientaajuiset magneettikentät luokkaan 2B eli mahdollisesti syöpää aiheuttavat. Samaan luokkaan kuuluu esimerkiksi pakokaasu. Aikaisemmin myös kahvi kuului useita vuosia kyseiseen luokkaan. [17]

4.2 Magneettikenttäaltistuksen arviointi

Magneettikenttäaltistuksen arvioinnissa selvitetään, kuinka suurille kentille kohderyhmä altistuu. Magneettikentille altistumista arvioidaan pitkäaikaismittausten tai hetkellismittausten tulosten perusteella riippuen siitä, mitä tutkimuksessa halutaan selvittää. Kohderyhmänä voi olla väestön osa tai ammattiryhmä, kuten esimerkiksi aikaisemmin mainitut veturinkuljettajat. Viime aikoina on suoritettu paljon mittauksia lyhyemmällä magneettikenttäaltistuksella. [3]

4.2.1 Pitkäaikaismittaus

Pitkäaikaismittausten tarkoitus on selvittää kohderyhmän altistusta pidemmällä aikavälillä. Mittauksessa kohderyhmän jäsenillä on mukanaan mittari, jolla mitataan magneettivuon tiheyttä asetetulla näytteenottovälillä. Seuranta voi kestää esimerkiksi vuorokauden tai työviikon. Suuremmalla näytteenottotaajuudella saadaan tarkempia tuloksia sekä havaitaan todennäköisemmin myös yksittäiset lyhyet magneettikenttäaltistukset. Koehenkilön on pidettävä kirjaa liikkumisistaan koko seurannan ajan. Ainoastaan näin voidaan selvittää, missä altistus on tapahtunut. [3]

Mittausten jälkeen data puretaan ja selvitetään mittauksen aikana tapahtunut altistuminen. Mittausdatassa voi olla hyvinkin satunnaisia piirteitä ja siksi tuloksia käsitelläänkin tilastotieteellisin menetelmin. Tällaisia ovat esimerkiksi mediaani, keskihajonta, suurin tai pienin arvo. [3]

4.2.2 Arviointi hetkellismittausten avulla

Magneettikenttäaltistuksen arviointi hetkellismittausten avulla suoritetaan laskemalla koehenkilön kenttäaltistuksesta aikapainotteinen keskiarvo eli TWA (Time Weighted Average). Mittausta varten on selvitettävä magneettivuon tiheyden keskiarvo kaikissa tiloissa, joissa koehenkilö oleskelee. Keskiarvon selvittämiseen on erilaisia tapoja, kuten esimerkiksi viiden pisteen menetelmä tai kartoitusmittaus.

Hetkellismittauksessa koehenkilön on pidettävä kirjaa eri tiloissa oleskeluistaan samalla tavalla kuin pitkäaikaismittauksessakin. Koehenkilön on myös merkittävä, jos hän oleskelee mitattujen tilojen ulkopuolella, koska tämä aiheuttaa epätarkkuutta tuloksiin. Koehenkilön magneettikenttäaltistuminen tarkasteluajana saadaan laskettua kertomalla jokaisessa tilassa vietetty aika ja tilan magneettivuon tiheys keskenään ja summataan eri tiloissa saadut arvot yhteen. Aikapainotettu keskiarvo saadaan vuorostaan jakamalla magneettikenttäaltistuminen tarkasteluajalla. Aikapainotetun keskiarvon kaava on,

$$TWA = \frac{\sum_h t_h B_h}{\sum_h t_h}, \quad (13)$$

missä

h on tarkasteluhuone

t_h on huoneessa vietetty aika

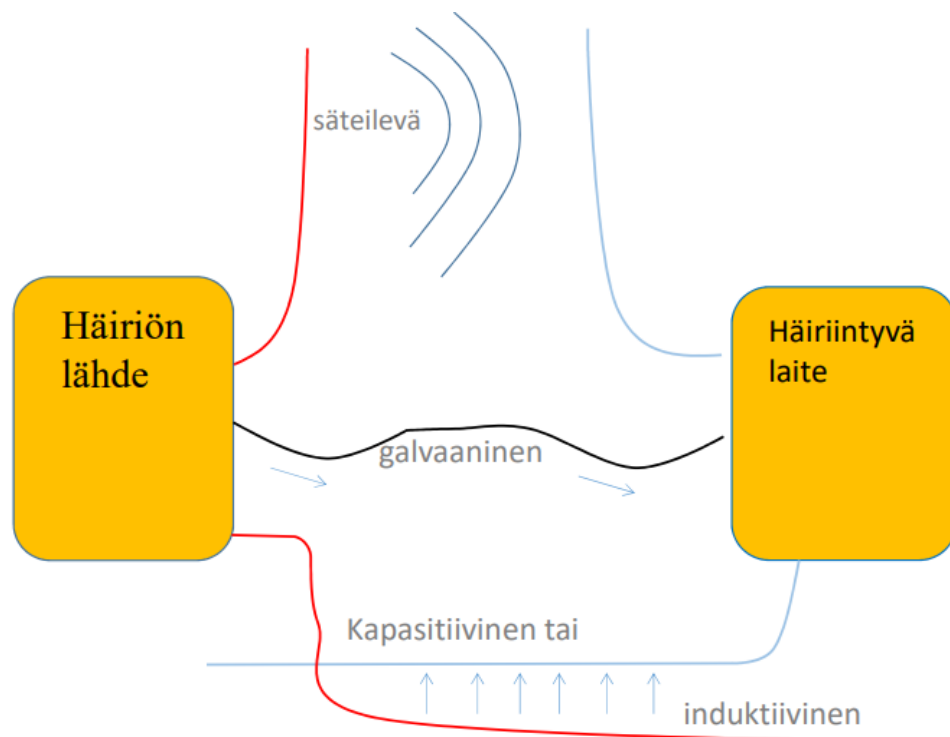
B_h on magneettivuon tiheyden keskiarvo huoneessa h . [3]

Huomattava on myös, että laskennoissa ei oteta huomioon magneettikenttien ajallisia vaihteluita. Tilan magneettikentän keskiarvo vaihtelee kuormituksen mukaan hyvinkin paljon ja esimerkiksi yöaikaan yleensä kuormitus on selvästi pienempi. Tästä syystä mitaukset pyritään tekemään korkeimman kuormituksen aikana, joten tulokset voivat olla korkeampia kuin oikeasti ovat. [3]

4.3 Magneettikentistä aiheutuvat laitehäiriöt

Magneettikentät saattavat aiheuttaa häiriöitä erilaisten laitteiden toiminnassa. Häiriö yleensä aiheuttaa laitteeseen selvän toiminnallisen häiriön, esimerkiksi näytöllisissä laitteissa kuvan värähtelyn. Tietokoneet kuuluvatkin laiteryhmänä helposti häiriintyviin laitteisiin. Varsinkin vanhoissa tietokonenäytöissä magneettikentät aiheuttivat värinäongelmia. Magneettikentille herkät laitteet saattavat häiriintyä hyvinkin pienistä magneettikentistä.

Magneettikentistä johtuvissa laitehäiriössä on aina jokin häiriön lähde, esimerkiksi sairaaloissa usein käytettävät suojaerotusmuuntajat, ja häiriintyvä laite, kuten esimerkiksi monitori. Häiriön siirtymiselle on erilaisia kytkeytymistapoja, joista tärkeimmät magneettikenttien näkökulmasta ovat induktiivinen kytkeytyminen ja galvaaninen eli johtamalla kytkeytyminen. Kuvassa 10 on havainnollistettu erilaisia kytkeytymismenetelmiä. Kuvasta 10 huomataan, että häiriö saattaa siirtyä myös useamman eri menetelmän kautta. Esimerkiksi häiriön lähteenä olevan laitteen syöttökaapelista indusoituu häiriö häiriintyvän laitteen syöttökaapeliin, josta se sitten galvaanisesti etenee laitteeseen. Kuvassa 10 on esitetty myös sähkömagneettisen kentän kytkeytyminen, kuten esimerkiksi radiotaajuuksilla, sekä kapasitiivinen kytkeytyminen eli sähkökentän välittävä häiriö. [18]

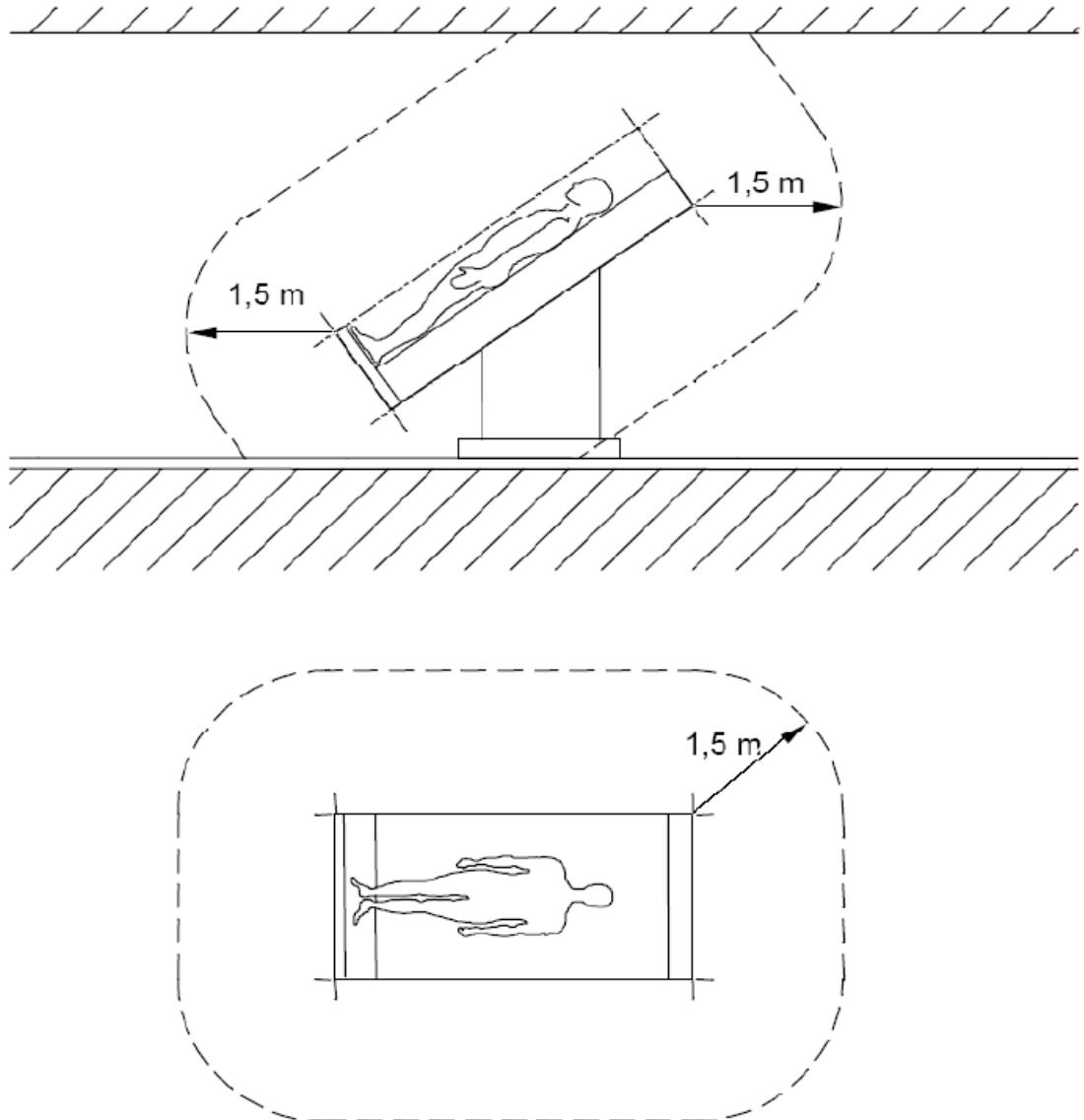


Kuva 10. Häiriön eteneminen eri kytkeytymismenetelmillä. Muokattu lähteestä [18].

Magneettikenttien aiheuttamat laitehäiriöt voivat olla tietyissä tilanteissa vaarallisia myös terveydelle. Tällainen tilanne voi syntyä, jos esimerkiksi sydäntahdistinta käyttävä henkilö altistuu voimakkailla magneettikentille. Valtioneuvoston asetuksessa 388/2016 onkin määritetty aktiivisten implantoitujen laitteiden, kuten esimerkiksi sydämentahdistimien, häiriintymisen toimenpidetasoksi 0,5 mT [19]. Tästä syystä magneettikuvausta ei tehdä henkilöille, joilla on sydäntahdistin, insuliinipumppu tai sisäkorvaproteesi [20].

Sairaaloiden lääkintätilojen sähköasennuksille on määritetty niitä käsittelevä standardi SFS 6000-7-710. Kyseisessä standardissa sairaalassa olevat lääkintätilat jaetaan kolmeen eri ryhmään, G0, G1 ja G2. Ryhmällä G2 tarkoitetaan lääkintätiloja, joissa sähkönkatkeaminen voi aiheuttaa hengenvaaran. Tällaisia alttiita toimintoja voivat olla esimerkiksi sydämeen kohdistuvat toimenpiteet, tehohoidot ja leikkaussalitoiminta. [21]

Standardissa SFS 6000-7-710 määritetään G2 tiloihin potilaspaikkojen ympärille 1,5 m alue, jota kutsutaan hoitoalueeksi. Hoitoalueena tarkoitetaan aluetta, jossa tarkoituksellisesti tai tahattomasti saattaa syntyä yhteys potilaan ja sähkökäyttöisen lääkintälaitteen tai lääkintälaittejärjestelmän välille. Hoitoalueelle saa tuoda ainoastaan lääkintälaitteita ja kaikki muut sähkökäyttöiset laitteet on oltava alueen ulkopuolella. Kuvassa 11 on esitetty hoitoalue. [22]



Kuva 11. G2 lääkintätilojen hoitoalue. [21]

Hoitoalue on määritetty G2 tiloihin, etteivät esimerkiksi leikkauksien apuvälineinä käytettävät monitorit häiriintyisi ja näin aiheuttaisi virheellisiä toimintoja leikkauksen aikana. Hoitoalueelle kuulumattomien sähkölaitteiden ollessa potilaspaikasta alle 1,5 m etäisyydellä täytyy laitteet suojata lääkintälaitestandardin mukaisesti. Laitteiden erilaisiin suojausmenetelmiin palataan kappaleessa 5. Tästä syystä G2 tiloissa käytettävien sähkölaitteiden sijainnit on otettava huomioon jo sairaalan suunnitteluvaiheessa. [22]

5. SÄHKÖMAGNEETTINEN SUOJAUS

Sähkömagneettinen suojaus on sähkölaitteen oikean toimivuuden kannalta merkittävässä roolissa. Sähkömagneettisen suojan tarkoituksena on estää sähkölaitteiden epätarkoituksen mukainen sähkömagneettinen vuorovaikutus toisten laitteiden sekä ympäristön kanssa. Sähkölaitte ei saa aiheuttaa toiminnallaan ympäristöönsä sähkömagneettisia häiriöitä ja sähkölaitteen on myös itsessään kestävä kohtuullisena pidettäviä kenttiä.

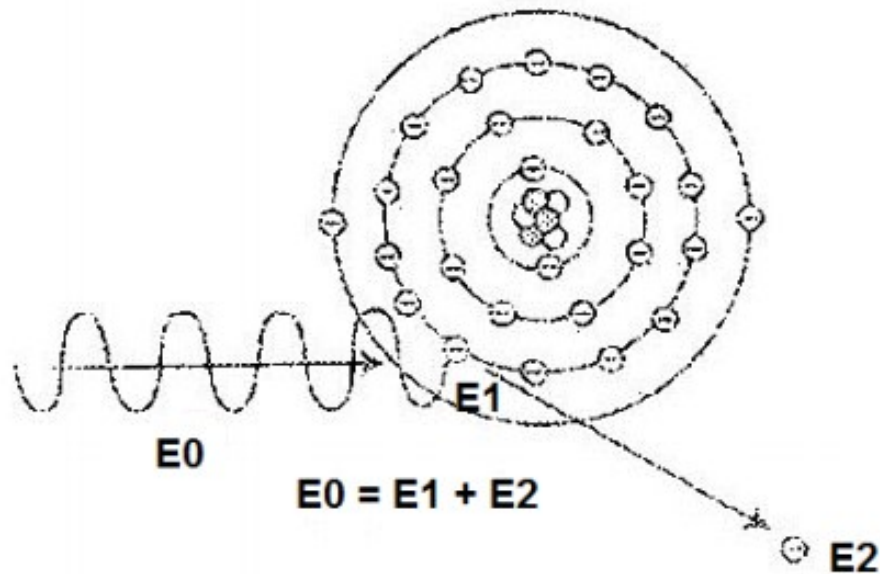
Sähkömagneettisessa suojauksessa on kiinnitettävä huomiota moniin yksityiskohtiin. Suojauksessa on mietittävä, suojataanko jokin laite ulkopuolisista häiriöiltä vai suojataanko häiriön lähde, jolloin saadaan estettyä sähkömagneettisen kentän leviäminen ympäristöön. Suojauksessa käytettävän materiaalin valinnalla on suuri merkitys suojauksen tehokkuuteen. Erilaiset materiaalit käyttäytyvät eri tavoilla esimerkiksi eri taajuuksilla. Huomioitava on myös materiaalin kestävyys esimerkiksi säärasituksille sekä tietysti hinnalla on suuri merkitys. Näihin asioihin perehdytään seuraavissa kappaleissa.

5.1 Suojauksen teoria

Sähkömagneettisen suojauksen tehokkuus on laskettavissa, kun tiedetään suojauksessa käytettävä materiaali, magneettikentän taajuus sekä laitteen ja suojauksen etäisyys toisistaan. Sähkömagneettisella säteilyllä on kahdenlaista vaimenemista, heijastuminen suojauksessa käytettävästä materiaalista, sekä absorptio eli vaimeneminen suojauksessa käytettävässä materiaalissa. Suojauksessa sähkö- ja magneettikenttien käyttäytyminen on hyvin samankaltaista, mutta joitakin eroja löytyy. [23] Tässä työssä käydään läpi ainoastaan magneettikenttien suojaukseen käytettäviä kaavoja.

5.1.1 Absorptio

Absorptiolla tarkoitetaan säteilyn vaimenemista materiaalissa. Vaimenemista tapahtuu, koska materiaalissa esiintyvät virrat tuottavat lämpöhäviöitä. Käytännössä tämä tapahtuu atomitasolla. Sähkömagneettisen aallon sisältämä kokonaisenergia kuluu elektronin irrottamiseen sekä syntyvään liikkeeseen. Kuvassa 12 on esitetty periaate, kuinka sähkömagneettisen aallon sisältämä kokonaisenergia jakautuu kahteen eri osaan. [24]



Kuva 12. Fotosähköinen vaimeneminen [24].

Absorptiohäviötä laskettaessa yksi tärkeimmistä suureista on tunkeutumissyvyys. Tunkeutumissyvyydellä tarkoitetaan matkaa, jonka aikana suojauksessa käytettävään materiaaliin saapunut aalto on vaimentunut kertoimella $1/e$ eli noin 37 %:iin alkuperäisestä. Tämä arvo on tarkalleen ottaen Neperin luvun käänteisluku. [23] Tunkeutumissyvyys on laskettavissa kaavasta

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}}, \quad (14)$$

missä

- δ on tunkeutumissyvyys
- f on taajuus
- μ on permeabiliteetti
- σ on sähkönjohtavuus [23].

Kaavasta (14) on huomattavissa, että korkean taajuuden omaava sähkömagneettinen säteily vaimenee nopeammin johtavassa aineessa. Tästä seuraa, että hyvin johtavat aineet eivät välttämättä olekaan parhaita vaihtoehtoja suojauksessa, jos taajuus on matala, kuten esimerkiksi 50 Hz.

Tunkeutumissyvyuden ja suojamateriaalin paksuuden ollessa selvillä on mahdollista laskea absorptiosta aiheutuvat häviöt. Absorptiohäviöt ilmoitetaan desibeleinä (dB) ja ne saadaan laskettua kaavalla,

$$A_{dB} = 20 \log e^{\left(\frac{t}{\delta}\right)}, \quad (15)$$

missä

- A_{dB} on absorptiohäviö
- t on materiaalin paksuus. [23]

Kaavan (15) likiarvoinen muoto on

$$A_{dB} = 8,69 \left(\frac{t}{\delta} \right). \quad (16)$$

Kaavasta (16) on helposti huomattavissa, että absorptiohäviö on suoraan verrannollinen materiaalin paksuuden ja tunkeutumissyvyyden suhteeseen. Materiaalinen paksuuden ja tunkeutumissyvyyden ollessa samoja absorptiohäviö on noin 8,69 dB.

5.1.2 Heijastus

Heijastuksella tarkoitetaan sähkömagneettisten aaltojen heijastumista suojauksessa käytettävän materiaalin pinnasta. Heijastuminen on absorptioon lisäksi toinen sähkömagneettista säteilyä vaimentava keino. Hyvin sähköä johtavien materiaalien osalta heijastuminen on absorptiota tärkeämmässä roolissa. [23]

Heijastumista voidaan tarkastella Snellin lain mukaan. Snellin laki sitoo yhteen säteilyn saapumiskulman, taittumiskulman sekä eri aineiden taitekertoimet. Snellin laki kaavamuodossa on

$$n_a \sin \alpha = n_b \sin \beta, \quad (17)$$

missä

- n_a on aineen a taitekerroin
- n_b on aineen b taitekerroin
- α on tulokulma
- β on taitekulma. [24]

Aineen ominainen taitekerroin on määriteltävissä kaavasta

$$n = \frac{c}{v}, \quad (18)$$

missä

- n on aineen taitekerroin
- c on valon nopeus
- v on säteilyn nopeus väliaineessa. [24]

Säteilyn osuessa aalto-opillisesti erilaiseen väliaineeseen saattaa osa säteilystä vaihtaa suuntaa ja osa taittua materiaalin sisään. Materiaalista pois päin heijastuvan säteilyn kulma on sama kuin materiaaliin päin tulevan säteilyn kulma. Sähkömagneettinen säteily saattaa myös kokonaan heijastua materiaalin pinnasta. Tällöin puhutaan kokonaisheijastumisesta. Kokonaisheijastuminen on mahdollista vain, jos säteily tulee suojauksessa

käytettävän materiaalin pintaan riittävän vinosti eli kun tulokulma ylittää kokonaisheijastuksen rajakulman. Rajakulmalla tarkoitetaan kulmaa, jota suuremmilla kulmilla tapahtuu kokonaisheijastuminen.

Rajapinnan eli suojamateriaalin pinnan läpäisevän sähkömagneettisen säteilyn voimakkuus on määriteltävissä väliaineiden ominaisimpedanssien (Z) avulla. Ominaisimpedanssien avulla voidaan laskea heijastuksesta aiheutuvat häviöt kaavalla

$$R_{dB} = 20 \log \frac{Z_W}{4Z_S}, \quad (19)$$

missä

R_{dB} on heijastushäviö (dB)

Z_W on saapuvan aallon impedanssi

Z_S on suojamateriaalin impedanssi. [23]

Heijastushäviön yksikkö on desibeli (dB). Vapaan tilan impedanssin likiarvo on 377Ω . Heijastuksista aiheutuvia häviöitä laskettaessa kaavalla (19) on kuitenkin muistettava ottaa huomioon, onko kyseessä niin sanottu lähikenttä vai kaukokenttä. Lähikentällä tarkoitetaan kenttää, jossa sähkömagneettisen säteilyn lähteen ja suojamateriaalin välinen etäisyys on pienempi kuin $\lambda/2\pi$ eli noin kuudesosa säteilyn kokonaisuallonpituudesta. On huomattava, että taajuudella on suuri merkitys aallonpituuteen. [23] Aallonpituus on määriteltävissä kaavasta

$$\lambda = \frac{v}{f}. \quad (20)$$

Kaavan (20) mukaan mitä korkeampi taajuus, sitä pienempi aallonpituus. Tästä seuraa, että matalilla taajuuksilla käytetään todennäköisemmin lähikentän kaavaa heijastushäviöitä laskettaessa. Huomattavaa on myös, että taajuus pysyy samana, vaikka väliaine vaihtuukin.

Lähikenttä on otettava huomioon, koska lähikentässä sähkökentän suhdetta magneettikenttään ei voida enää määrittää pelkästään väliaineen impedanssin avulla vaan sähkökentän suhde magneettikenttään riippuu enemmän säteilylähteen ominaisuuksista. Magneettikentän heijastushäviöt lähikentässä voidaan toki määrittää kaavasta (19), mutta ne saadaan helpommalla laskettua kaavalla

$$R_{dB} = 14,6 + 10 \log \left(\frac{f r^2 \sigma_r}{\mu_r} \right), \quad (21)$$

missä

r on lähteen ja suojan välinen etäisyys

σ_r on suhteellinen johtavuus

μ_r on suhteellinen permeabiliteetti. [23]

Taulukkoon 1 on kerätty eri materiaalien suhteellisia johtavuuksia σ_r ja suhteellisia permeabiliteetteja μ_r . Suhteellista johtavuutta verrataan kuparin johtavuuteen, joka on $5,82 \cdot 10^7$ S/m. Suhteellista permeabiliteettiä verrataan vuorostaan tyhjiön permeabiliteettiin.

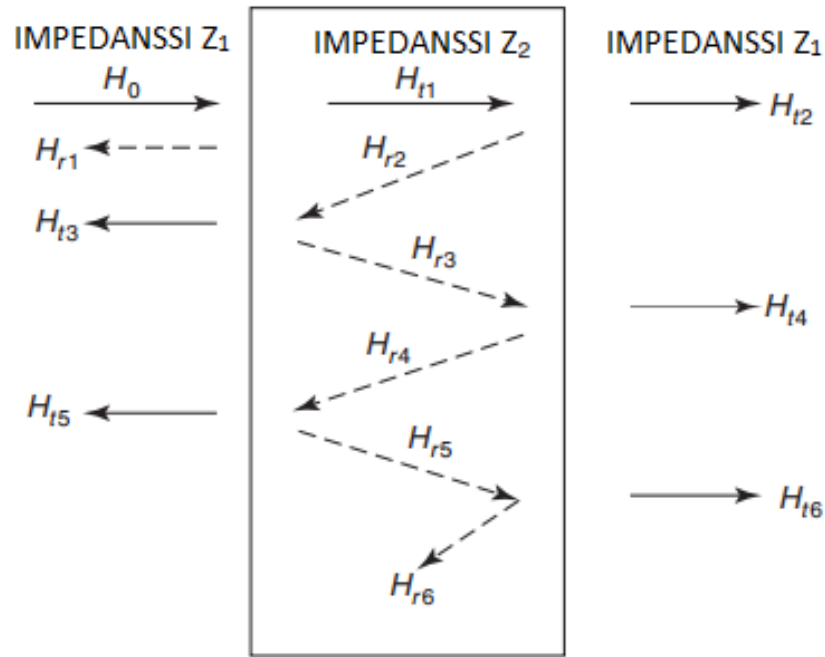
Taulukko 1. Eri materiaalien suhteellinen johtavuus σ_r ja permeabiliteetti μ_r . Muokattu lähteestä [23].

Materiaali	Suhteellinen johtavuus σ_r	Suhteellinen permeabiliteetti μ_r
Hopea	1,05	1
Kupari	1,00	1
Kulta	0,70	1
Alumiini (pehmeä)	0,61	1
Alumiini (karkaistu)	0,40	1
Sinkki	0,32	1
Pronssi	0,18	1
Tina	0,15	1
Teräs	0,10	1000
Ruostumaton teräs	0,02	500
Lyijy	0,08	1
Nikkeli	0,20	100

5.1.3 Moninkertainen heijastuminen

Suojauksessa käytettävän materiaalin ollessa ohut on mahdollista, että materiaalin sisällä tapahtuu useita heijastuksia. Tämä täytyy huomioida laskennoissa, koska se saattaa pienentää heijastuksesta tulevia häviöitä. Moninkertaiset heijastukset materiaalin sisällä ovat mahdollisia, kun tunkeutumissyvyys on isompi kuin materiaalin paksuus eli kun näiden suhde on alle yhden. Myös alle 9 dB absorptiohäviöitä voidaan pitää rajana, koska absorptiohäviö on suoraan verrannollinen materiaalin paksuuden ja tunkeutumissyvyyden suhteeseen. [23]

Kuvassa 13 on havainnollistettu moninkertaisia heijastumisia. Kuvasta 13 nähdään, kuinka materiaalin sisällä tapahtuu useita heijastuksia aallon osuessa materiaalin ensimmäiseen tai toiseen rajapintaan. Aallon sisältämä energia kohdassa H_{t4} on kuitenkin pienentynyt merkittävästi alkuperäisestään, koska aalto on tällöin kulkenut materiaalin rajalta rajalle jo kolmesti. Vastaavasti kohdassa H_{t6} aalto on kulkenut viisi kertaa rajalta rajalle. Matalilla taajuuksilla moninkertaiset heijastumiset ovat usein yleisempiä, koska kaavan (14) mukaisesti tunkeutumissyvyys on tällöin isompi.



Kuva 13. Moninkertaisen heijastumisen periaate. Alaindeksi r kuvaa heijastunutta aaltoa ja alaindeksi t materiaalia läpäisevää aaltoa. Muokattu lähteestä [23].

Moninkertaisista heijastumisista aiheutuva korjauskerroin on laskettavissa kaavasta

$$M_{dB} = 20 \log \left(1 - e^{\left(-\frac{2t}{\delta}\right)} \right), \quad (22)$$

missä

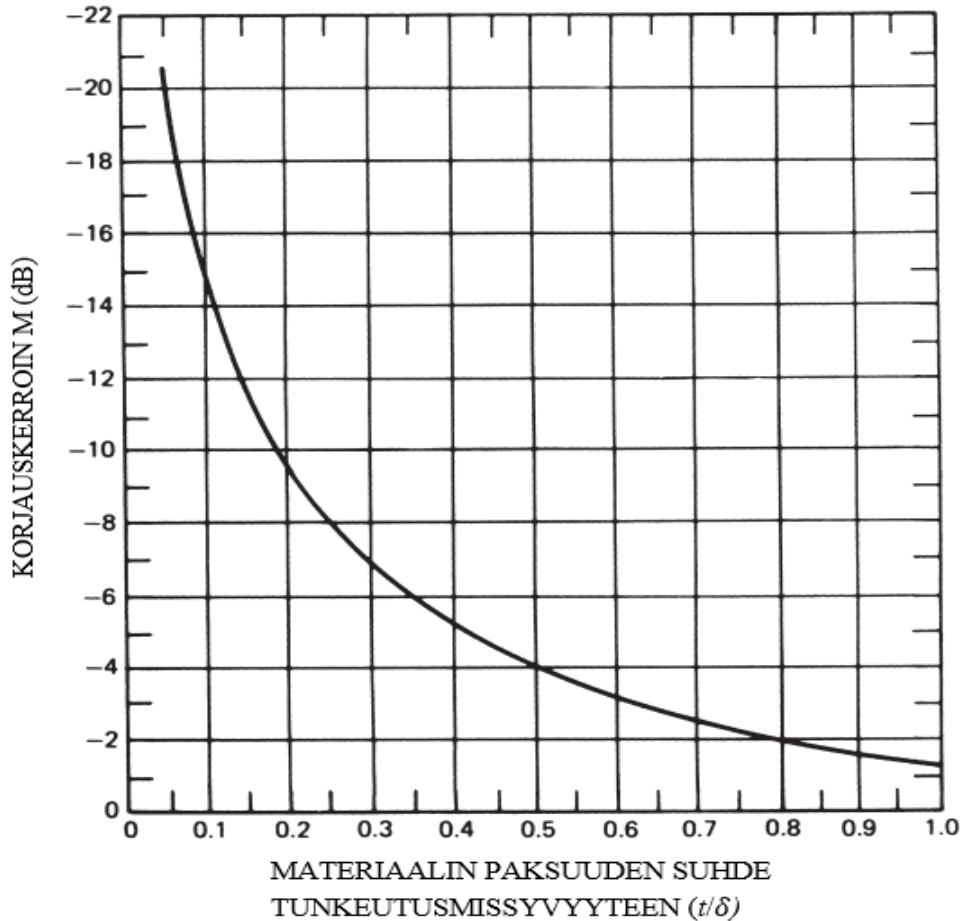
M_{dB} on moninkertaisten heijastumien aiheuttama korjauskerroin

t on materiaalin paksuus

δ on tunkeutumissyvyys. [23]

Moninkertaisten heijastumien aiheuttaman korjauskertoimen yksikkönä on desibeli (dB). Korjauskertoimeksi tulee negatiivinen luku viitaten kokonaisvaimennuksen pienenemiseen. Kaavasta (22) nähdään, että se on riippuvainen ainoastaan materiaalin paksuudesta ja tunkeutumissyvyydestä.

Kuvassa 14 on esitetty materiaalin paksuuden ja tunkeutumissyvyyden suhteen vaikutus korjauskertoimeen M . Korjauskertoimen muutos on eksponentiaalista. Kuvasta 14 huomataan, että materiaalin ja tunkeutumissyvyyden suhteen ollessa yli yhden on moninkertaisista heijastumisista aiheutuvan korjauskertoimen arvo merkityksettömän pieni ja tällöin korjauskertoimen voi jättää huomioimatta.



Kuva 14. Materiaalin paksuuden ja tunkeutumissyvyyden suhteen vaikutus korjauskertoimeen M . Muokattu lähteestä [23].

5.1.4 Kokonaisvaimennus

Suojaukseen käytettävän materiaalin tuottaman kokonaisvaimennuksen määrä on absorptiohäviön ja heijastumishäviön summa. Heijastumishäviössä on muistettava huomioida moninkertaiset heijastumiset. Kaavana kokonaisvaimennus on

$$SE_{dB} = A_{dB} + R_{dB} + M_{dB}. \quad [23] \quad (23)$$

Kaavan (23) yksikkönä on desibeli. Kuten aikaisemmin tuli todettua, absorptiohäviön ollessa yli 9 dB ei tarvitse moninkertaisia heijastumisia eli termiä M_{dB} huomioida. Säteilyn lähteen ja suojan etäisyyden ollessa tuntematon huomioidaan kokonaisvaimennuksen laskemisessa ainoastaan absorptiohäviö. [23]

Suojausvaimennus on myös määriteltävissä, jos on tiedossa magneettikentän tiheys tietyssä pisteessä ennen suojaa ja suojan jälkeen. Käytännössä tämä tarkoittaa magneettikentän tiheyksien mittaamista tarkastelupisteessä ennen suojauksen asentamista ja asennuksen jälkeen. Kaavassa (24) on esitetty toinen tapa suojavaimennuksen määrittämiselle,

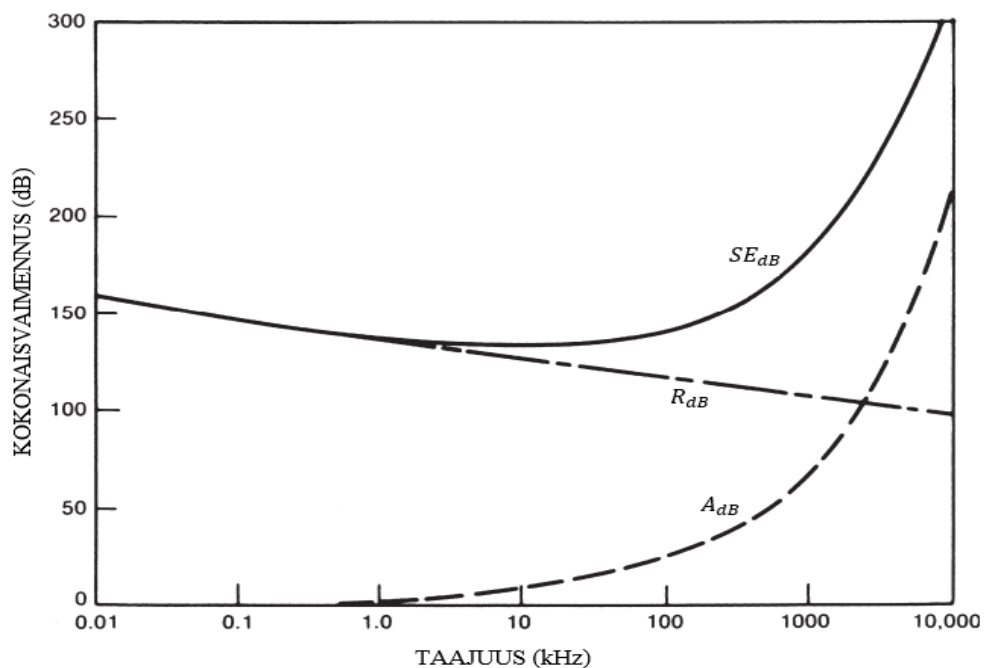
$$SE_{dB} = 20 \log \left(\frac{B_1}{B_2} \right), \quad (24)$$

missä

B_1 on magneettivuon tiheys tarkastelupisteessä ilman suojaa

B_2 on magneettivuon tiheys tarkastelupisteessä suojan kanssa. [24]

Kuvassa 15 on esitetty absorptio- ja heijastushäviön yhteisvaikutus 0,5 mm paksun kuparisuojan tapauksessa. Kuvassa 15 on kyseessä kaukokenttä, joten heijastushäviö on merkittävästi suurempi kuin olisi lähikentän tapauksessa. Kuvasta 15 on kuitenkin selvästi nähtävissä, että absorptiohäviö on matalilla taajuuksilla ja ohuella suojalla hyvin vähäistä.



Kuva 15. Kokonaisvaimennuksen muodostuminen absorptio- ja heijastushäviöistä kaukokentässä, kun suojamateriaalina on 0,5 mm paksu kupari. Muokattu lähteestä [23].

Matalataajuisella magneettisella lähikentällä sekä heijastumishäviöt että absorptiohäviöt ovat pieniä, joten voi olla, että joudutaan käyttämään muita menetelmiä. Muihin menetelmiin palataan myöhemmin kappaleessa 5.3.

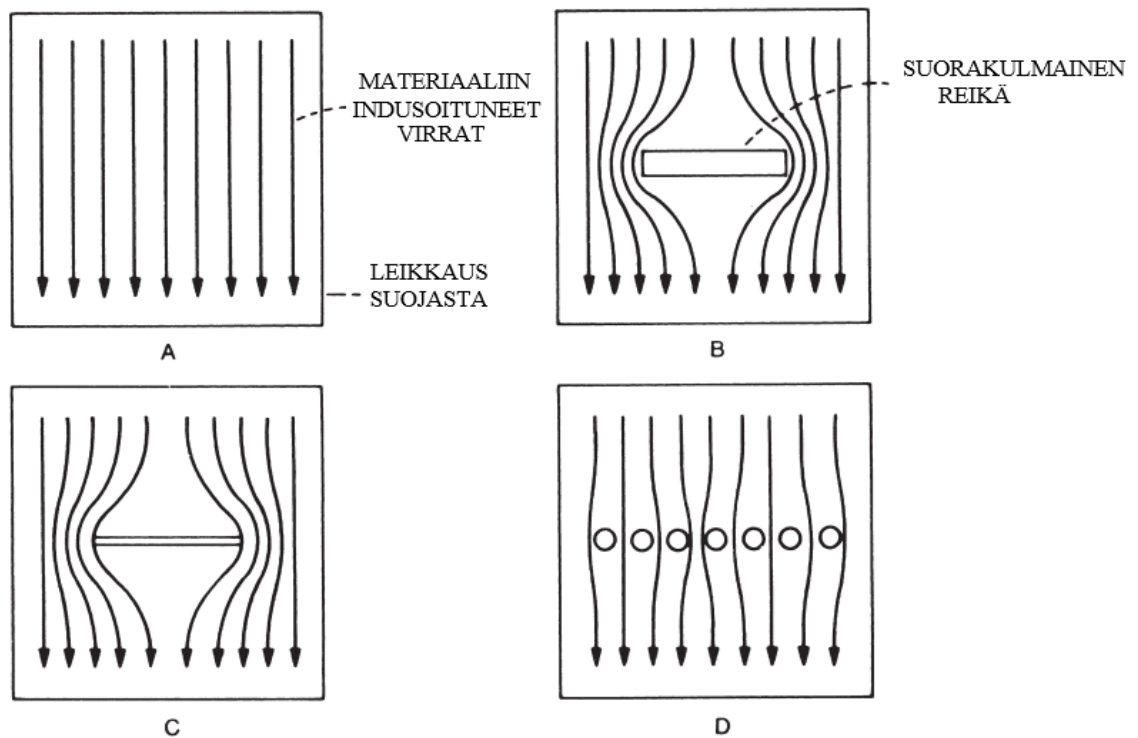
5.1.5 Aukkojen vaikutus suojan vaimennuskykyyn

Edellä oletettiin suojan peittävän suojattavan kohteen täydellisesti, pinnan olevan täysin tasainen eikä suojassa olevan ollenkaan epäjatkuvuuskohtia. Todellisuudessa suojat yleensä joudutaan tekemään useista erilaisista paloista, jolloin saumakohtissa suojama-

teriallin pinta ei ole täydellistä. Suojiin joudutaan usein myös tekemään reikiä esimerkiksi johtojen läpivienneille, tukirakenteille sekä ilmastointia ja kulkua varten. Kaikki nämä epäjatkuvuuskohdat alentavat suojan todellista vaimennuskykyä.

Magneettikentän vuotamisen suuruus epäjatkuvuuskohdissa riippuu käytännössä kolmesta asiasta. Tärkein on reiän suuruus. Reiän pinta-alalla ei varsinaisesti ole vaikutusta, vaan tärkein on reiän kohtisuora pituus materiaalin pinnalle indusoituneita virtoja vastaan. Toinen asia on sähkömagneettisen säteilyn aaltoimpedanssin suuruus ja kolmas on taajuus. [23]

Reiän koon vaikutus on esitetty kuvassa 16. Kuvista 16b ja 16c nähdään, että reiän pituus on käytännössä ainoa vaikuttava asia. Kuvasta 16d vuorostaan nähdään, että useampi pienempi reikä materiaalissa on parempi vaihtoehto kuin esimerkiksi yksi iso reikä.



Kuva 16. Materiaalin epäjatkuvuuskohtien eli reikien vaikutus magneettisesti indusoituneihin virtoihin suojamateriaalin pinnalla. Muokattu lähteestä [23].

Kuvasta 16 voidaan myös päätellä, että jos reikä on kapea ja indusoitujen virtojen suuntainen, on kyseisen reiän vaikutus vaimennuskykyyn suhteellisen vähäistä. Syy, miksi reiät ja saumat vaikuttavat magneettikentän vaimenemiseen on se, että ulkoinen magneettikenttä indusoi suojamateriaalin pinnalle virtoja, jotka luovat omat ulkopuoliseen magneettikenttään nähden vastakkaisuuntaiset magneettikentät. Nämä kentät kumoavat ulkopuolista magneettikenttää. Virtojen kuitenkin kierrettyä reikiä ja kuljettua eri reittiä kuin mitä ideaalisen pinnan tapauksessa kulkisivat, eivät näiden virtojen magneettikentät enää kumoakaan täydellisesti ulkopuolista magneettikenttää pois suojattavan laitteen ympäriltä.

Reiän tai sauman pituuden ollessa yli 10 % säteilyn aallonpituudesta voidaan reiästä aiheutuvaa vuotoa pitää merkittävänä. Useamman reiän aiheuttama vaimennuskyvyn heikkenemisen suuruus voidaan laskea kaavasta

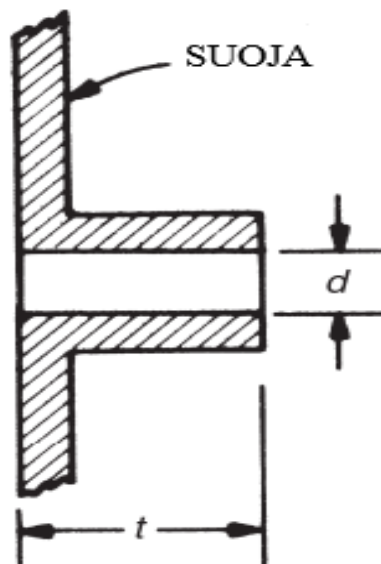
$$S = -20 \log \sqrt{n}, \quad (25)$$

missä

S on suojauksen pieneminen desibeleinä

n on aukkojen määrä. [23]

Reikien määrän ja koon ollessa suurina voi suojauksen vaimennuskyky pienentyä merkittävästi. Ongelma on mahdollista ratkaista kasvattamalla reiän syvyyttä, jolloin reikä muodostaa aaltoputken, joka vaimentaa vuotoa tietyn rajataajuuden alapuolella. Rajataajuus riippuu putken muodosta ja läpimitasta. Kuvassa 17 on esitetty poikkileikkaus aukon muodostamasta aaltoputkesta.



Kuva 17. Aukon muodostaman aaltoputken poikkileikkaus, jonka pituus on t ja halkaisija d . Muokattu lähteestä [23].

Pyöreän aaltoputken tuottama vaimennus desibeleinä saadaan laskettua kaavasta

$$S = 32 \frac{t}{d}, \quad (26)$$

missä

t on aaltoputken pituus

d on aaltoputken halkaisija. [23]

5.2 Suojauksessa käytettävät materiaalit

Sähkömagneettinen suojaus pystytään toteuttamaan useilla erilaisilla materiaaleilla. Myös eri materiaalien yhdistelmiä käytetään, ja parhaat suojat usein sisältävät useita kerroksia erilaisia materiaaleja. Suojat saattavat toki muodostua useista kerroksista samoja-kin materiaaleja.

Suojaukseen käytettävän materiaalin valinnassa on tiedettävä, mitä vastaan suojaudutaan, koska eri materiaaleilla on erilaisia ominaisuuksia. Tärkeimpinä on tietää, tuottavatko ongelmia sähkökentät vai magneettikentät ja, onko kyseessä mahdollisesti staattinen, matalataajuinen vai korkeataajuinen kenttä. Esimerkiksi hyvin sähköä johtavat materiaalit toimivat parhaiten korkeataajuisia kenttiä vastaan, kun taas korkean permeabiliteetin omaavat materiaalit toimivat paremmin matalataajuisia kenttiä vastaan.

Hyvin suuri rooli suojausmateriaalin valinnassa on myös materiaalin hinnalla ja työstettävyydellä. Esimerkiksi muuntamoiden ulkoseiniä suojatessa saattaa suojamateriaalia tarvita hyvinkin paljon eikä suojaa pystytä tekemään yhdestä osasta. Tästä syystä on otettava tarkkaan huomioon materiaalin hinta, saumojen ja aukkojen vaikutus kokonaisvaimennukseen sekä materiaalin kestävyys ulkoisille rasituksille, kuten esimerkiksi sääolosuhteille.

Sähkömagneettisessa suojauksessa metallien käyttö on hyvin yleistä. Metalleja käytetään sekä yksinään että seoksissa. Suojauksessa käytettävät metallit voidaan karkeasti jakaa kahteen ryhmään, ferromagneettiset ja korkean johtavuuden omaavat diamagneettiset aineet. Yksinkertaisimmissa tapauksissa voidaan asentaa metallilevy lähteen ja suojattavan kohteen väliin. Metallilla voidaan myös pinnoittaa erilaisia materiaaleja sekä esimerkiksi kankaisiin voidaan laittaa metallilankoja sähkömagneettisen suojan parantamiseksi. [24]

Metallien lisäksi muita käytettäviä suojamateriaaleja ovat esimerkiksi hiilikuidut ja erilaiset sähköä johtavat polymeerit. Johtavat polymeerit ovat kasvattaneet suosiotaan niiden helpon valmistettavuuden, keveyden ja taipuisuuden vuoksi. [24] Tässä työssä keskitytään kuitenkin ainoastaan eri metalleihin, koska metallit ovat kyseisessä sairaalassa parhaimmat vaihtoehdot suojauksen toteuttamiseen.

5.2.1 Kupari

Kupari ja kuparin eri muodot, kuten esimerkiksi messinki ovat hyvin monipuolisia ja laajasti käytettyjä metalleja sähkömagneettisissa suojauksissa. Kuparin suurimpina etuina ovat sen helppo työstettävyys, saatavuus ja suuri sähkönjohtavuus ($5,82 \cdot 10^7$ S/m). [25]

Materiaalin työstettävyys on tärkeä, koska suojattavat kohteet ovat erimuotoisia ja erikoisia ja näin ollen samaa mallia ei voida kaikkiin käyttää. Myös asennuskustannukset vaikeasti työstettäville materiaaleille ovat korkeampia, koska asennukseen saattaa kulua

huomattavasti enemmän aikaa. Kuparin etuina pidetään myös sen hidasta hapettumista. [25]

Kuparin suurimpana haittana on sen kallis hinta ja alhainen suhteellinen permeabiliteetti. Alhainen suhteellinen permeabiliteetti tarkoittaa, että kuparista aiheutuvat absorptiohäviöt ovat pieniä ja pääsääntöinen vaimennus tapahtuu heijastumisesta. Kaavasta (21) nähdään, että taajuuden ollessa matala jäävät heijastuksesta tapahtuvat häviöt suhteellisen pieniksi. Toisin sanoen, kun otetaan huomioon kuparin hinta, ei kuparin käyttäminen suojamateriaalina ole paras mahdollinen vaihtoehto, kun halutaan suojautua staattisia tai matalataajuisia kenttiä vastaan. Kupari soveltuu parhaiten, kun halutaan suojautua sähkökenttiä ja korkeataajuisia magneettikenttiä vastaan.

5.2.2 Alumiini

Alumiini on hyvin suosittu metalli sähkömagneettisen suojan toteutuksessa. Alumiinin etuina ovat sen keveys, hyvä saatavuus ja edullinen hinta. Alumiini onkin korvannut monissa sähkömagneetiikan sovelluksissa kuparin.

Kupariin verrattuna alumiinia on hieman vaikeampi työstää ja taulukosta 1 nähdään alumiinin sähkönjohtavuuden olevan noin 40-60 % kuparin sähkönjohtavuudesta. Lisäksi alumiini hapettuu huomattavasti kuparia helpommin. Alumiinin pehmeiden vuoksi alumiinia ei usein voida käyttää sellaisenaan, vaan sille on tehtävä tukirakenne. Alumiini ei myöskään sovellu käyttökohteisiin, joissa on mahdollista syntyä valokaari. Alumiinin ominaisuuksiin on mahdollista vaikuttaa kylmämuokkauksella ja tekemällä materiaalista metalliseosta. [24]

Alumiinin suhteellinen permeabiliteetti on sama kuin kuparilla ja kuten aikaisemmin tuli todettua, alumiinin sähkönjohtavuus on kupariin verrattuna huonompi. Tästä voidaankin päätellä, että alumiini sellaisenaan on kuparia huonompi sähkömagneettisessa suojauksessa. Alumiinin absorptiohäviöt ovat kuparin tapaan pieniä ja pääsääntöinen vaimennus tulee heijastushäviöstä. Alumiini vaimentaa parhaiten sähkökenttiä ja korkeataajuisia magneettikenttiä.

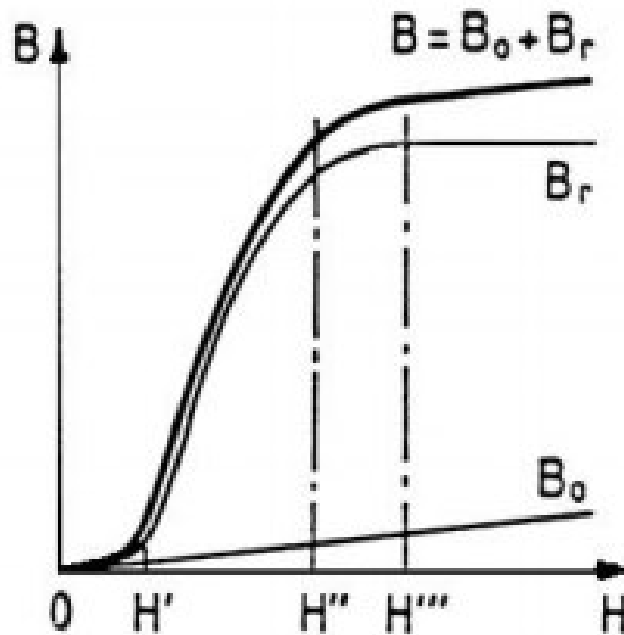
Saadakseen aikaan vastaavan suojauksen kuparin kanssa on alumiinisuojan oltava hieman kupariin nähden paksumpaa. Isojen tilojen tapauksessa tämä on kuitenkin usein parempi vaihtoehto alumiinin edullisemmasta hinnasta johtuen. Toinen ratkaiseva tekijä saattaa olla alumiinin paino. Alumiinin paino on vain noin 30 % kuparin painoon verrattuna, joten säästytään mahdollisesti esimerkiksi seinien vahvistamisilta.

5.2.3 Ferromagneettiset aineet

Ferromagneettisia aineita ovat esimerkiksi rauta, koboltti, nikkeli sekä näiden monet eri yhdistelmät. Ferromagneettisissa aineissa niiden atomien välinen vuorovaikutus pyrkii

suuntaamaan magneettimomentit samansuuntaisiksi, jolloin muodostuu atomin kokoon verrattuna suuria magneettisia alkeisalueita. Ulkoinen magneettikenttä puolestaan kasvattaa alkeisalueita ja pyrkii kääntämään kaikkien eri alueiden magneettimomentit samansuuntaisiksi. Toisin sanoen ferromagneettiset aineet vahvistavat ulkoista magneettikenttää. [26]

Ferromagneettisille aineille väliaine yhtälökaava (6) ei ole kovin käyttökelpoinen, sillä väliaineen permeabiliteetti ei ole vakio, vaan riippuu huomattavasti väliaineeseen vaikuttavan magneettikentän voimakkuudesta [10]. Kuvassa 18 on esitetty periaatekuva ferromagneettisen aineen magnetointikäyrästä.



Kuva 18. Periaatekuva ferromagneettisen aineen magnetoitumiskäyrästä. B_r on väliaineen vuontiheys ja B_0 on ulkoisen kentän vuontiheys. [10]

Kuvasta 18 huomataan, kuinka ferromagneettisen aineen magneettivuontiheys muodostuu sen omasta vuontiheydestä sekä ulkoisen kentän aiheuttamasta vuontiheydestä. Pisteessä H''' ferromagneettinen aine on käytännössä täysin kyllästynyt. Tämä tarkoittaa sitä, että aine on jo täysin magnetoitunut, koska kaikki sen alkeismagneetit ovat jo kääntyneet ulkoisen magneettikentän suuntaiseksi.

Ferromagneettisen aineen suhteellinen permeabiliteetti saattaa usein olla esimerkiksi 1000 ja 3000 väliltä. Tämä tarkoittaa sähkömagneettisessa suojauksessa suuria absorptiohäviöitä. Taulukosta 1 kuitenkin nähdään, että kyseisillä aineilla sähkönjohtavuus on heikkoa verrattuna kupariin ja alumiiniin. Sähkönjohtavuudella on suuri vaikutus heijastushäviöihin, joten ferromagneettisten aineiden heijastushäviöt ovat pieniä. Näin ollen ferromagneettiset aineet ovat sähkömagneettisen suojauksen toiminnan kannalta alumiinin ja kuparin vastakohtia.

Ferromagneettinen aine on suuren suhteellisen permeabiliteetin vuoksi hyvä suoja matalataajuisia ja staattisia magneettikenttiä vastaan. Ferromagneettisten aineiden heikot puolet ovat kuitenkin niiden suhteellisen vaikea työstettävyys, varsinkin epäjatkuvuuskohdissa. Samasta syystä myös asennuskustannukset tulevat melko kalliiksi. Korkeataajuisien kenttien osalta ferromagneettinen aine ei ole paras vaihtoehto. [25]

5.3 Sähkölaitteiden suojauksen suunnittelu

Sähkölaitteiden suojaus magneettikentiltä kannattaa ottaa huomioon jo suunnitteluvaiheessa, koska laitteiden suojaaminen jälkikäteen on käytännössä aina vaikeampaa, kalliimpaa ja usein lopputuloksen kannalta huonompi vaihtoehto. Magneettikenttien ja ylipäättään sähkömagneettisen suojauksen kannalta häiriön lähteet kannattaa yrittää sijoittaa mahdollisimman tiiviisti toisiinsa nähden, sillä tällä tavalla kenttien leviäminen ympäristöön on vähäisempää. Usein halvemmaksi ja helpommaksi tulee, kun suoja rakennetaan häiriön lähteen ympärille eikä yksittäisen suojattavan laitteen. Esimerkiksi pelkän muuntamon suojaamisella varmistetaan, etteivät mitkään muuntamon ulkopuolella toimivat laitteet häiriinny muuntamosta tulevasta häiriöstä.

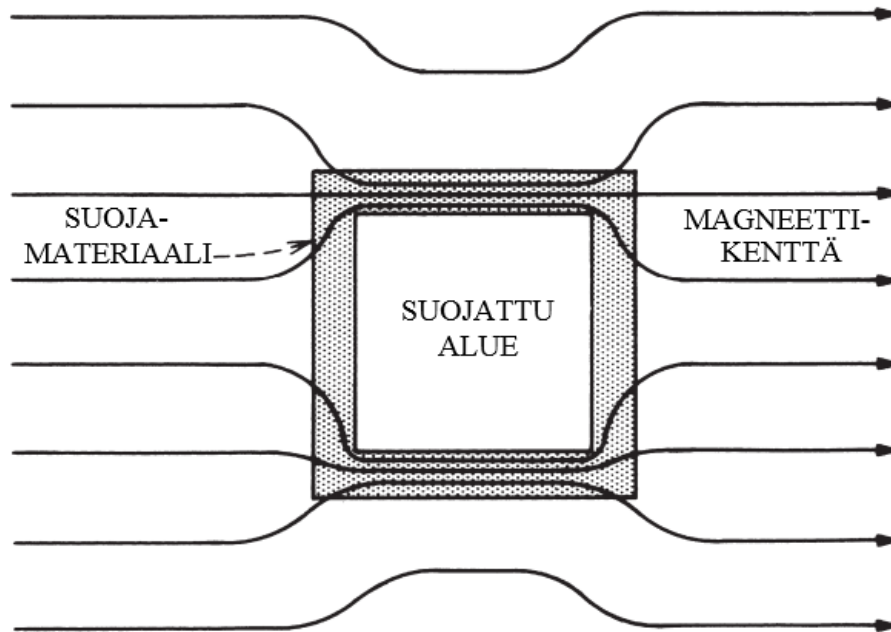
Laitteiden toiminnalliset rajoitukset määräytyvät usein käytetyn taajuuden ja jännitteen mukaan, jotka Suomessa ovat 50 Hz ja 230 V. Tästä johtuen laitteita joudutaan usein suojaamaan nimenomaan matalataajuisia magneettikenttiä vastaan. Aiempien kappaleiden mukaan juuri matalataajuiset magneettikentät ovat suojauksen kannalta hankalimmat. Kyseisissä tapauksissa usein käytetäänkin magneettikenttien ohjaamista sivuun häiriintyvistä laitteista.

5.3.1 Faradayn häkki

Faradayn häkki on yksi tunnetuimmista ja yksinkertaisimmista keinoista suojautua sähkö- ja magneettikenttiä vastaan. Häkki on nimetty sen keksijän Michael Faradayn mukaan. Faradayn häkki on johtavasta materiaalista valmistettu suljettu tila. Usein häkki on verkomainen. [24]

Faradayn häkin toiminta sähkökenttien tapauksessa perustuu varauksien asettumisesta johtavalle pinnalle. Positiiviset ja negatiiviset varaukset asettuvat sähkökentän kulkusuunnan mukaisesti materiaalissa. Näin ollen Faradayn häkin sisällä sähkökentän arvo on nolla. [24]

Matalataajuisien magneettikenttien tapauksessa käytetään periaatteeltaan hyvin samantyylistä suojaa kuin Faradayn häkki, mutta suojamateriaalina on korkean suhteellisen permeabiliteetin omaava materiaali. Kuvassa 19 on esitetty periaate, kuinka suuren suhteellisen permeabiliteetin omaava materiaali luo magneettikentälle pienireluktanssisen reitin suojattavan alueen ympärille.



Kuva 19. Korkean suhteellisen permeabiliteetin omaavan materiaalin luoma pienenireluktanssinen reitti magneettikentälle. Muokattu lähteestä [23].

Kuvan 19 suojaus toimii silloin, kun suojana käytettävän materiaalin reluktanssi on pienempi kuin ilman. Kyseistä suojausmenetelmää käytettäessä on huomioitava, että suojattava aine on ympäröitävä kokonaisuudessaan suojamateriaalilla. Suojamateriaaliksi käy esimerkiksi teräs tai mu-metalli. Mu-metalli on nikkeli-rauta-metalliseos, joka omaa hyvin korkean suhteellisen permeabiliteetin, ja sitä käytetäänkin herkkien sähkölaitteiden suojaukseen staattisia ja matalataajuisia magneettikenttiä vastaan [27].

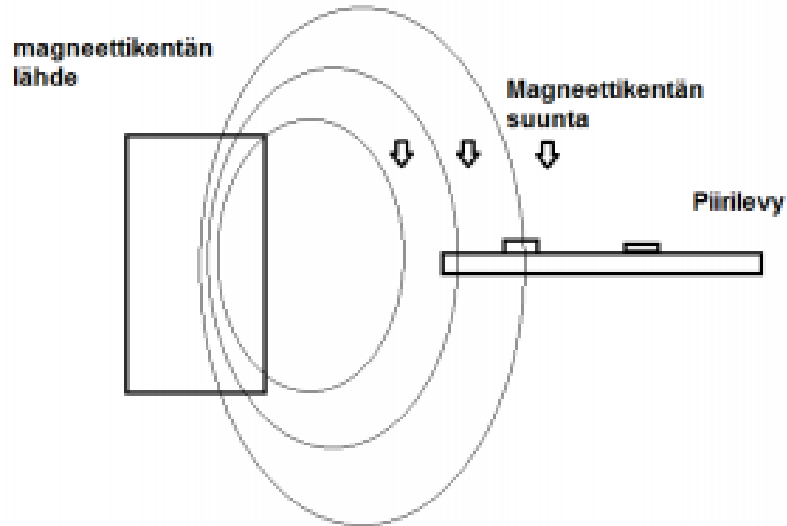
5.3.2 Pyörrevirrat

Pyörrevirroiksi sanotaan virtasilmukoita, jotka syntyvät muuttuvan magneettikentän vaikutuksesta. Nämä virtasilmukat saavat aikaan oman magneettikentän, joka on Faradayn lain mukaan aina vastakkaissuuntainen pyörrevirtoja luoneeseen magneettikenttään nähden. [28]

Pyörrevirtoja käytetään hyväksi monissa sovellutuksissa, mutta niistä on myös haittaa monissa paikoissa. Jos kuvitellaan metallilevy, johon indusoituu muuttuvan magneettikentän vaikutuksesta virtasilmukoita. Metallin ollessa hyvä johdin sen resistiivisyys on pieni ja näin ollen siihen syntyvät virrat ovat suuria. Suurista virroista johtuen metallilevy alkaa lämmetä. Tähän periaatteeseen esimerkiksi induktioliesi perustuu. Samalla tavalla pyörrevirtoja esiintyy esimerkiksi muuntajissa, mutta muuntajissa nämä aiheuttavat ongelmia, koska muuntajan rakenteet saattavat ylikuumentua.

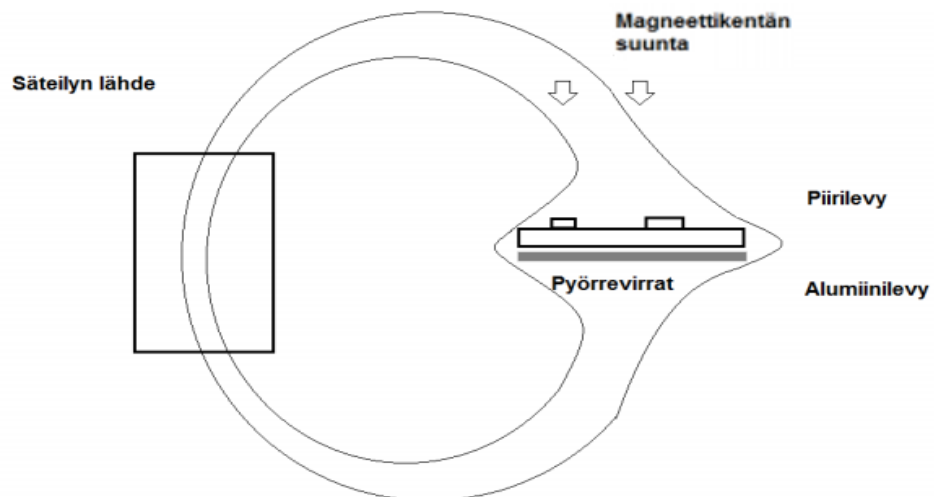
Pyörrevirtoja voidaan hyödyntää laitteiden suojauksessa ainoastaan jos saadaan luotua pysyviä pyörrevirtoja. Näin ollen pyörrevirroilla ei voida suojautua staattisilta magneet-

tikentiltä ja pyörrevirtojen hyöty kasvaa taajuuden kasvaessa. Pyörrevirtojen hyödyntäminen on kuitenkin hyvin käytettyä magneettikentiltä suojautumisessa. Kuvassa 20 on esitetty piirilevy, jota halutaan suojata, ja kuinka suojaamattomana magneettikentät kulkeutuvat piirilevyn läpi sekä luovat piirilevyyän häiriöitä.



Kuva 20. Piirilevy magneettikentässä ilman suojailevyä [24].

Kun piirilevyn alle asennetaan hyvin sähköä johtava materiaali, kuten esimerkiksi alumiini, indusoi muuttuva magneettikenttä alumiinilevyyän pyörrevirtoja. Näiden pyörrevirtojen synnyttämä magneettikenttä on vastakkaisuuntainen kuvassa 20 esitetyn magneettikentän suuntaan nähden. Täydellisen johtimen tapauksessa nämä magneettikentät kumoaisivat toisensa ja tilanne näyttäisi kuvassa 21 esitetyltä tilanteelta.



Kuva 21. Pyörrevirtojen vaikutus magneettikenttään. Muokattu lähteestä [24].

Kuvasta 21 huomataan, kuinka magneettikentän vuot kiertävät pyörrevirroista johtuen piirilevyn. Toisin kuin korkean suhteellisen permeabiliteetin materiaalia käytettäessä,

pyörrevirtojen tapauksessa suojan ei tarvitse kiertää suojattavaa kohdetta kokonaisuudessaan. Suojamateriaalin pinnan on kuitenkin oltava tasainen ja olisi pyrittävä siihen, että pinnalla ei olisi epäjatkuvuuskohtia kuten esimerkiksi aukkoja ja saumoja. [28]

6. SAIRAALAN LÄHTÖKOHDAT

Magneettivuon tiheyksien selvittämiseksi erilaisissa kohteissa ja tiloissa on aina tiedettävä kohteen lähtötiedot sekä kohteessa käytettävien komponenttien tyypit mahdollisimman tarkkaan. Pitää osata myös tunnistaa suurimmat magneettikentän lähteet sekä kohteessa mahdollisesti suojausta tarvitsevat magneettikentille herkät sähkölaitteet. Lähtötietojen perusteella voidaan myös huomata magneettikentän lähteitä, joiden vaikutus kokonaisuutensa on niin pieni, ettei niitä tarvitse ottaa huomioon. Tällaiset havainnot yksinkertaistavat magneettikenttien tarkasteluja huomattavasti ja vähentävät virheiden mahdollisuutta laskuissa.

Kohteen lähtötietojen lisäksi on aina otettava huomioon myös eri standardit ja säädökset. Standardien ideana on lisätä tuotteiden yhteensopivuutta ja turvallisuutta. Säädökset puolestaan pitävät sisällään eri lakeja ja asetuksia, joita on noudatettava. Säädöksillä on esimerkiksi rajoitettu toimistotilojen työntekijöiden altistumista magneetti- ja sähkökentille. Säädöksissä määrätyt toimenpidetasot ovat velvoittavia.

6.1 Lähtötiedot

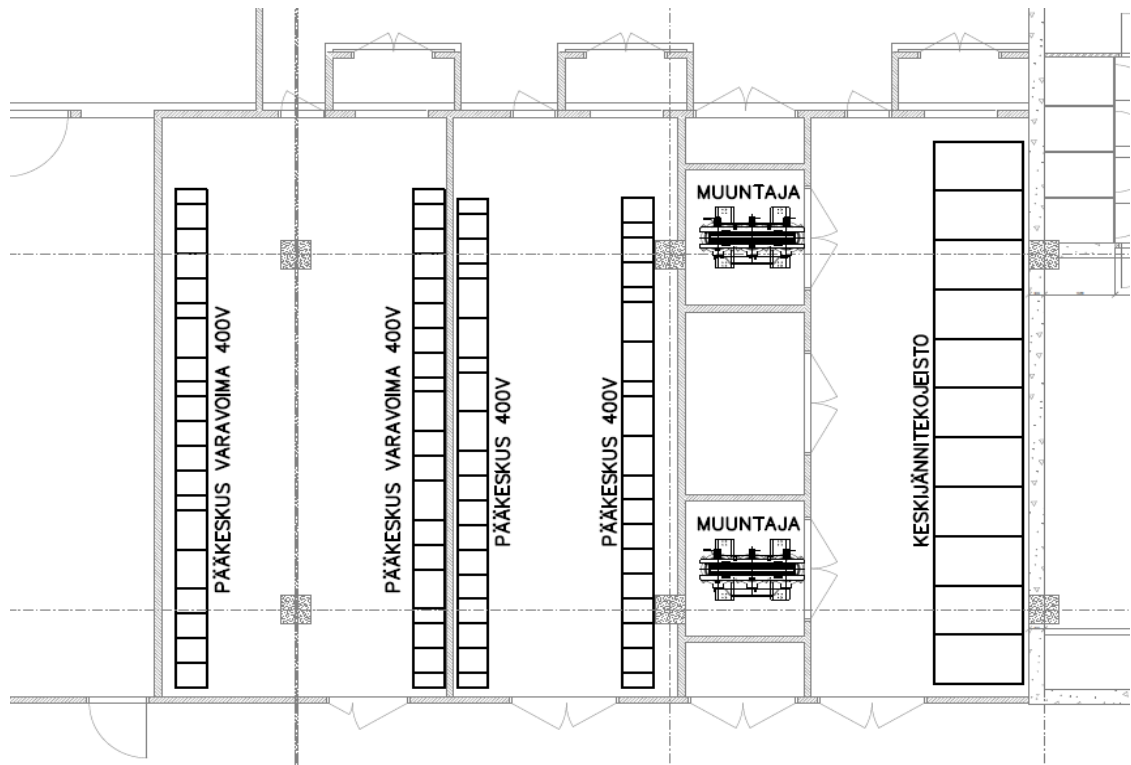
Nykyinen Keski-Suomen keskussairaala on valmistunut 1950-luvulla ja vuosikymmenten kuluessa sairaalaa on laajennettu kasvavien tarpeiden mukaan. Laajennuksien seurauksena on syntynyt toiminnallisesti pirstaleinen kokonaisuus, jossa terveydenhuollon toiminta on vaikeasti järjestettävissä. Näiden seurauksena sairaala on myös kooltaan hyvin suuri, mutta tilankäytöltään tehoton.

Lääketieteen kehittyminen sekä uusien hoitoprosessien ja tekniikoiden käyttöön ottaminen vaatii sairaalan kokonaisuuden muuttumista nykyisestä. Tästä johtuen pitkälle katsovan kokonaisratkaisun kannalta uusi sairaala on välttämätön. Kohteena tässä diplomityössä onkin Jyväskylään rakennettava uusi keskussairaala, Sairaala Nova. Sairaala Nova on noin 100 000 m² käsittävä uudisrakennushanke.

Sairaalaan tulee Jyväskylän Energia Oy:n 20 kV liittymä varaliittymineen. Sähkönjakelun varmistamiseksi uusi sairaala liitetään keskijänniteverkkoon kolmen liittymän periaatteella. Tämä tarkoittaa sitä, että liittymä tulee kolmelta eri alueelta, mutta normaalitilanteessa ainoastaan yksi liittymä on kerrallaan kytkettynä ja muut ovat varalla.

Rakennus liitetään jakeluverkon haltijan keskijänniteverkkoon muuntamoiden kautta. Muuntamot koostuvat kuivamuuntajista, keskijännitekojeistosta, sähköpääkeskuksista ja pienjänniteyhdistyksistä. Sairaalan pohjakerrokseen eli kerrokseen -1 tulee muuntamoita kolme kappaletta ja yksi muuntamo sijaitsee kerroksessa 4. Muuntamot yhdistetään keskenään kiinteistön sisäisellä 20 kV rengassyötöllä. Muuntamon pohjapiirustus on esitetty

kuvassa 22. Pohjakerroksessa sijaitsevat kolme muuntamoita ovat keskenään melkein identtisiä. Neljännen kerroksen muuntamo on hieman pienempi.



Kuva 22. Pohjakerroksen muuntamon pohjapiirustus.

Jokaisessa pohjakerroksen muuntamossa on kaksi muuntajaa, neljä sähköpääkeskusta ja keskijännitekojeisto. Kerroksen neljä muuntamossa on kaksi muuntajaa, kaksi sähköpääkeskusta ja keskijännitekojeisto. Neljännen kerroksen muuntajat ja sähköpääkeskukset ovat nimellistehoiltaan ja -virroiltaan noin 20 % pienempiä kuin pohjakerroksen muuntamoissa.

Magneettikenttien vaikutus on pyritty huomioimaan jo tilojen sijoittelussa. Muuntajilta lähtevät pienjänniteyhdistykset ovat mahdollisimman lyhyet ja esimerkiksi muuntamossa sijaitsevien pääkeskusten väliset yhdistykset kulkevat lattiainfrastruktuurin kautta. Tiloissa on kuitenkin aina jätettävä tilaa huoltoja varten, joten komponentteja ei voi laittaa toisiinsa kiinni. Myös pääkeskusten syöttöjen keskinäistä sijoittelua on ajateltu magneettikenttien minimoimisen kannalta. Tämä on varsinkin tärkeää muuntamoiden välisten keskuksien yhdistyksissä, koska yhdistykset ovat pitkiä.

Sairaalan sähkönjakelu toteutetaan 5-johdinjärjestelmän (TN-S) mukaisena tähtimäisenä jakeluna. Sähkön syöttö muuntajilta pääkeskuksille hoidetaan virtakiskoilla. Myös pääkeskusten välisiin yhdistyksiin käytetään virtakiskoja. Pääkeskuksilta lähtevä sähkönjakelu toteutetaan nousukeskusten tai jakelukiskostojen avulla. Virtakiskojen ja jakelukiskosten on oltava EMC-suojattua rakennetta.

Virtakiskojen ja jakelukiskojen rakenteena käytetään niin sanottua sandwich-tyylistä kiskosta. Kyseisen kiskoston etuna on muihin kiskotyyppeihin verrattuna sen hyvin pieni vaiheväli. Kappaleen 2.2.2 perusteella tiedetään, että mitä pienempi on vaiheväli, sen pienempi on ympäristöön leviävä magneettikenttä. Lisäksi tämä kisko on ympäröity kokonaisuudessaan metallisella kehyksellä.

Sairaalassa sijaitsee useita laitteita, joihin tarvitaan lääkintäsuojaerotusmuuntajia. Suojaerotusmuuntajien tarkoitus on erottaa galvaanisesti toisiopuolelle kytketty laite verkkovirrasta. Galvaanisella erotuksella saadaan käytännössä estettyä sähköisku maan ja vaiheen välillä. Suojaerotusmuuntajien on oltava vahvistetulla eristyksellä valmistettu. Lääkintäsuojaerotusmuuntajat saattavat kuitenkin aiheuttaa ongelmia G2-tilojen läheisyydessä, joten nämä on otettava huomioon magneettikenttien tarkasteluissa.

6.2 Standardit

Kohteiden suunnittelussa on otettava aina huomioon nykyiset standardit. Standardi on yleisesti hyväksytty toimintatapa, jonka tarkoitus on helpottaa viranomaisten, elinkeinoelämän ja kuluttajien elämää. Esimerkiksi suunnittelustandardien tarkoitus on huolehtia, että suunnittelun perusteet ovat yhtenevät sekä tuotteiden turvallisuus on kunnossa. Standardit eivät ole velvoittavia, mutta standardeja noudattamalla voidaan varmistua, että tuotteet ja toimintatavat ovat lainsäädännön ja direktiivien mukaisia. [29]

Lähes jokaisella maalla on oma standardisoimisjärjestö. Järjestöjä on kansallisia, alueellisia ja maailmanlaajuisia. Suomen standardisoimisjärjestö on SFS ry, eurooppalaiset standardit laaditaan CEN:ssä ja maailmanlaajuinen standardisoimisjärjestö on ISO. Sähkötekniikan alan standardijärjestö Suomessa on SESKO, Euroopassa CENELEC ja maailmanlaajuinen IEC. Kansalliset standardit ovat voimassa ainoastaan omassa maassa. [29]

Sairaalakohteissa käytetään tavallisten pienjännitesähköasennustandardien lisäksi myös lääkintätiloille tehtyä standardia. Standardi SFS 6000-7-710 on standardi erikoistilojen ja erikoisasennusten vaatimuksille. Kyseisen standardin tarkoitus on varmistaa potilaiden turvallisuus. Sähkökäyttöisten lääkintälaitteiden käyttö lääkintätiloissa ja tehohoidoissa vaativat sähkölaitteilta korkeampaa turvallisuutta ja luotettavuustasoa kuin yleisissä tiloissa. Standardissa on määritelty häiriöiden esiintyvyyksille raja-arvoja, jotka on otettava huomioon magneettikentiltä suojautumista suunnitellessa. [21]

EMC-standardoinneissa käsitellään suojautumista sähkömagneettisilta häiriöiltä ja eri menetelmiä suojauksen toteuttamiseksi. Standardissa määritetään laitteille ja järjestelmille rajat, joissa niiden on toimittava siten, että ne eivät häiritse muita laitteita tai järjestelmiä eivätkä myöskään itse häiriinny muista laitteista.

6.3 Säädökset

Säädöksillä tarkoitetaan julkisen vallan antamia kirjallisia määräyksiä, jotka ovat velvoittavia. Esimerkiksi Euroopan unioni on julkisen vallan käyttäjä. Säädöksiin kuuluvat esimerkiksi eri lait, asetukset, direktiivit sekä määräykset.

Säädöksiä noudatettava kohteita suunniteltaessa. Tästä johtuen suunnittelussa on otettava huomioon, etteivät magneettivuon tiheyksien arvot ylitä niille annettuja raja-arvoja. Raja-arvojen ylittyessä on kohteeseen lisättävä tarvittavat suojaukset magneettikenttiä vastaan.

Magneettivuon tiheyden suositusarvot väestölle on vahvistettu sosiaali- ja terveystieteiden ministeriön asetuksessa 294/2002. Samassa asetuksessa on myös suositusarvot sähkökentän voimakkuudelle. Taulukkoon 2 on kerätty asetuksessa 294/2002 olevat suositusarvot sähkö- ja magneettikentille eri taajuuksilla.

Taulukko 2. Alle 100 kHz taajuudella olevien sähkö- ja magneettikenttien voimakkuuksien tehollisarvojen suositusarvot [30].

Taajuusalue	Sähkökentän voimakkuus (V/m)	Magneettikentän voimakkuus (A/m)	Magneettivuon tiheys (μT)
– 1 Hz	–	$3,2 \cdot 10^4$	$4,0 \cdot 10^4$
1 – 8 Hz	10 000	$3,2 \cdot 10^4 / f^2$	$4,0 \cdot 10^4 / f^2$
8 – 25 Hz	10 000	$4000 / f$	$5000 / f$
0,025 – 0,8 kHz	$250 \cdot 10^3 / f$	$4000 / f$	$5000 / f$
0,8 – 3 kHz	$250 \cdot 10^3 / f$	5	6,25
3 – 100 kHz	87	5	6,25

Sähkö- ja magneettikenttien voimakkuuksien huippuarvot saadaan taulukosta 2 kertomalla niiden tehollisarvo luvulla $\sqrt{2}$. Taajuus f on sijoitettava laskentakaavaan hertseinä (Hz).

Taulukosta 2 nähdään, että magneettivuon tiheyden suositusarvot pienenevät taajuuden kasvaessa. Taulukosta 2 huomataan myös, että esimerkiksi 50 Hz taajuudella magneettivuon tiheyden suositusarvo on 100 μT. Kyseinen 100 μT suositusarvo on tavoitearvo, jonka alapuolelle sairaalassa pyritään muuntamoiden viereisten tilojen osalta.

Sosiaali- ja terveysministeriön asetuksessa 294/2002 on myös ilmoitettu staattisen magneettikentän suositusarvoksi 40 mT. Tällä tarkoitetaan tilannetta, jossa koko keho on jatkuvasti altistuneena magneettikentille. Ihmisille, joilla on implantteja kehossaan, kuten esimerkiksi sydäntahdistin, on asetettu omat suositusarvonsa, jotka ottavat huomioon implanttien mahdolliset häiriintymiset. [30]

Huomattavaa on myös, että nämä arvot ovat nimenomaan suositusarvoja. Näin ollen väestön sähkö- ja magneettikenttien suositusarvot eivät ole velvoittavia, vaikka ne onkin asetuksessa säädetty.

Työntekijöiden suojelemiseksi sähkömagneettisista kentistä aiheutuvilta vaaroilta on säädetty valtioneuvoston asetus 388/2016. Asetusta sovelletaan työhön, jossa työntekijät saattavat altistua tai altistuvat tunnetuille lyhytaikaisille sähkömagneettisille kentille. Asetusta ei näin ollen sovelleta pitkäaikaisille vaikutuksille. Sähkömagneettisilla kentillä tarkoitetaan staattisia sähkö- ja magneettikenttiä sekä ajallisesti vaihtelevia sähkö- ja magneettikenttiä sekä sähkömagneettisia aaltoja, joiden taajuus on alle 300 GHz. [19]

Valtioneuvoston asetuksessa 388/2016 on asetettu magneettivuon tiheyksille altistumista koskevat toimenpidetasot eri taajuusalueilla. Taulukossa 3 on esitetty toimenpidetasot.

Taulukko 3. *Magneettivuon tiheyksille altistumista koskevat toimenpidetasot taajuusalueella 1 Hz – 10 MHz [19].*

Taajuusalue	Magneettivuon tiheys, Matala toimenpidetaso (μT)	Magneettivuon tiheys, Korkea toimenpidetaso (μT)	Magneettivuon tiheys Toimenpidetaso: raajojen altistuminen paikalliselle magneettikentälle (μT)
1 – 8 Hz	$2,0 \cdot 10^5 / f^2$	$3,0 \cdot 10^5 / f$	$9,0 \cdot 10^5 / f$
8 – 25 Hz	$2,5 \cdot 10^4 / f$	$3,0 \cdot 10^5 / f$	$9,0 \cdot 10^5 / f$
25 – 300 Hz	$1,0 \cdot 10^3$	$3,0 \cdot 10^5 / f$	$9,0 \cdot 10^5 / f$
0,3 – 3 kHz	$3,0 \cdot 10^5 / f$	$3,0 \cdot 10^5 / f$	$9,0 \cdot 10^5 / f$
3 kHz – 10 MHz	$1,0 \cdot 10^2$	$1,0 \cdot 10^2$	$3,0 \cdot 10^2$

Taulukossa 3 olevalla matalalla toimenpidetasolla tarkoitetaan tasoa, joka on yhteydessä aistimusraja-arvoon. Vuorostaan korkealla toimenpidetasolla tarkoitetaan tasoa, joka on yhteydessä terveysvaikutusraja-arvoon. Näin ollen matala toimenpidetaso ei koskaan ole korkeampi kuin korkea toimenpidetaso. Taulukosta 3 voidaan kuitenkin huomata, että 300 Hz ylöspäin matalan ja korkean toimenpidetaso on sama.

Tämän diplomityön kannalta ovat erityisen tärkeitä toimenpidetasot 50 Hz taajuudella. Taulukosta 3 nähdään suoraan matalaksi toimenpidetasoksi 1000 μT . Korkea toimenpidetaso saadaan selville sijoittamalla laskentakaavaan hertseinä (Hz) taajuus, joka on 50 Hz. Korkeaksi toimenpidetasoksi saadaan 6000 μT .

Toisin kuin taulukossa 2 ovat taulukossa 3 esitetyt magneettivuon tiheyksien raja-arvot velvoittavia. Tämä tarkoittaa, että näitä arvoja ei saa ylittää. Jos ei voida saatavilla olevien tietojen perusteella varmistua, että kyseiset rajat eivät ylity, täytyy työntekijöiden altistumista arvioida joko mittauksin tai laskelmin. Laskelmien ja mittausten osoittaessa tai muuten selvissä toimenpidetasojen ylittävissä kohteissa on työnantajan velvollisuus työntekijän turvallisuuden kannalta laatia toimintasuunnitelma, jolla saadaan estettyä raja-arvojen ylittymiset. Toimenpidetasot voidaan tietyissä poikkeustilanteissa ylittää. Tällaisia ovat tilanteet, jossa altistuminen on yhteydessä esimerkiksi magneettikuvauslaitteiden asennukseen, testaukseen tai huoltoon. Muut poikkeustapaukset on listattu valtioneuvoston asetuksessa 388/2016. [19]

Altistumisraja-arvot magneettivuon tiheyksille taajuusalueella 0 – 1 Hz on esitetty taulukossa 4. Taulukossa 4 kannattaa kiinnittää huomiota raja-arvojen yksikköön, joka on tavallisen mikroteslan (μT) sijasta tesla (T) eli merkittävästi suurempi.

Taulukko 4. Altistumisraja-arvot magneettivuon tiheydelle, kun taajuusalue on 0 - 1 Hz [19].

	Aistimusraja-arvot (T)	Terveysvaikutusraja-arvot (T)
Tavanomaiset työolosuhteet	2	–
Paikallinen raajojen altistuminen	8	–
Valvotut työolosuhteet	–	8

7. SAIRAALAN MAGNEETTIKENTTIEN TARKASTELU

Jyväskylän sairaalan magneettikenttien tarkasteluissa ensisijainen tavoite oli saada pysymään magneettivuon tiheys alle väestön suositusarvon eli alle 100 μT kaikissa tiloissa, joissa kulkua ei ole rajoitettu erilaisin varoitusmerkein. Magneettivuon tiheys ylittää väestön suositusarvot tietyissä tiloissa, kuten esimerkiksi muuntamoiden tietyissä kohdissa sekä reilu ylitys tapahtuu myös magneettikuvaustiloissa.

Toinen tavoite oli tarkastella, etteivät magneettikentät aiheuta terveydelle välillistä vaaraa. Välillisellä vaaralla tarkoitetaan vaaraa, joka aiheutuu, kun esimerkiksi magneettikentästä tulevat häiriöt häiritsevät sähkölaitetta, jolla hoidetaan potilasta. Tällöin sähkölaite ei välttämättä toimi sille tarkoitettulla tavalla tai antaa esimerkiksi henkilökunnalle väärää informaatiota hoidosta.

Sairaalan magneettikenttätarkasteluissa jouduttiin tekemään myös joitakin oletuksia. Esimerkiksi ohjauskaapeleiden ja yksittäisten pienitehoisten laitteiden sähköjohdot jätettiin huomioimatta. Näistä aiheutuvat magneettikentät ovat merkityksettömän pieniä suhteessa esimerkiksi pienjänniteyhdistyksiin, joten näiden vaikutus kokonaiskenttään on olematon. Toisena syynä on, että sairaalakohde ei ole vielä valmis ja aikaisempien kappaleiden perusteella tiedetään johtojen keskinäisillä sijainneilla olevat suuri merkitys ympärilleen olevaan magneettikenttään, joten näiden huomioon ottaminen olisi käytännössä mahdotonta.

7.1 Muuntamot

Muuntamoiden suurimmat komponentit eli muuntajat, pääkeskukset ja keskijännitekojeistot olivat sairaalassa suurimmat tarkastelunkohteena olevat yksittäiset magneettikentän lähteet. Muuntajista ympärilleen aiheutuvat kentät vaikuttavat suurelle alueelle viereisiin tiloihin. Kentät ulottuvat myös yläpuolisiin ja alapuolisiin tiloihin. Tarkastelussa kiinnitettiin huomiota nimenomaan muuntamoiden ulkopuolelle aiheutuviin magneettikenttiin.

Muuntamoissa olevia kenttiä tarkasteltiin lähteittäin. Näin ollen tarkastelutapauksia muuntamoa kohden tuli viisi kappaletta:

1. Keskijännitekojeisto
2. Muuntajat
3. Pienjännitekeskukset
4. Yhdistykset
5. Kaikkien lähteiden yhteisvaikutus.

Jokaisen yksittäisen lähteen aiheuttama magneettikenttä laskettiin erikseen ja näiden yksittäisten tulosten avulla laskettiin yhteisvaikutus tarkastelupisteessä. Yhteisvaikutus ei ole suoraan eri lähteiden summa tai erotus, vaan tarkastelupisteen ja lähteen sijainnista riippuen ne saattava osittain vahvistaa tai heikentää tarkastelupisteen kokonaismagneettikenttää.

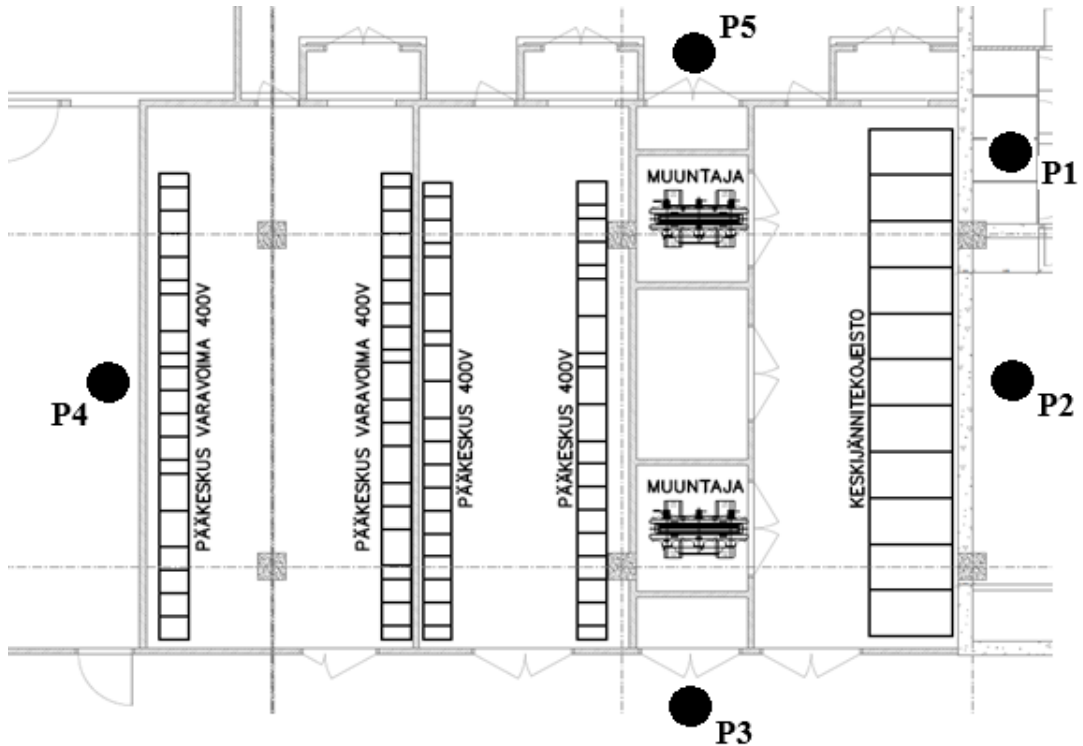
7.1.1 Pohjakerroksen muuntamot

Sairaalan pohjakerroksessa sijaitsee kolme muuntamo. Muuntamot on sijoitettu keskenään etäälle toisistaan. Tällä tavalla vältetään suurien magneettivuon tiheyksien esiintyminen yhdellä alueella, mutta toisaalta taas magneettikentät leviävät suuremmalle alueelle sairaalan pohjakerroksessa. Muuntamoiden sijainteja ei voida kuitenkaan valita pelkästään magneettikenttien perusteella, koska pitkät johdinvedot ovat jännitteenaleneman takia ongelmallisia sähkönjakelussa.

Muuntamoiden viereiset tilat ja niiden käyttötarkoitukset on otettu vahvasti huomioon suunnittelussa. Viereiset tilat ovat pääsääntöisesti varastoja, pukuhuoneita ja käytäviä. Tällä tavoin on varmistettu, ettei tiloissa tulla viettämään pitkiä aikoja ja näin saadaan altistumista magneettikentille pienennettyä.

Muuntamoiden viereisten tilojen magneettikenttiä tarkasteltiin 1,5 m korkeudelta lattia- tasolta ja 1 m etäisyydellä muuntamon seinästä. Nämä etäisyydet on valittu siksi, että useimpien ihmisten ylävartalot ovat tällä korkeudella. Metrinen etäisyys seinästä on looginen, koska seinille tulee tavaroita ja kiinteitä kalusteita, joten täysin seinässä kiinni ei oleskella.

Pohjakerroksien muuntamoiden ollessa käytännössä identtisiä voidaan olettaa likimain samojen arvojen pätevän myös kahteen muuhun muuntamoon. Kyseiset kentät on laskettu maksimivirroilla. Kuvassa 23 on esitetty muuntamoiden viereisten huoneiden pisteet, joissa magneettivuon tiheys on kyseisessä huoneessa suurin.



Kuva 23. Sairaalan pohjakerroksessa sijaitsevan muuntamon viereisten tilojen tarkastelupisteet P1-P5.

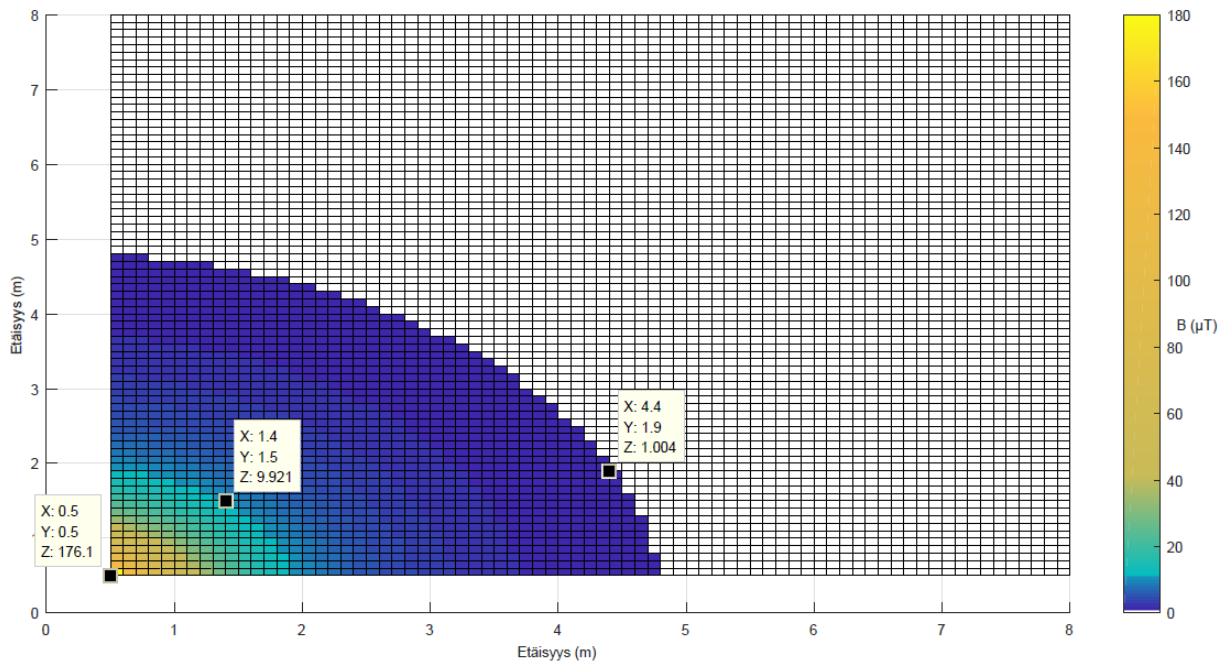
Kuvasta 23 nähdään, että muuntamon vieressä sijaitsee viisi erillistä huonetta. Kuvan 23 mukaisten tarkastelupisteiden magneettivuon tiheydet on esitetty taulukossa 5.

Taulukko 5. Magneettivuon tiheydet pohjakerroksen muuntamon viereisten tilojen tarkastelupisteissä P1-P5 referenssiarvoon B_0 verrattuna.

Tarkastelupiste (P)	Magneettivuon tiheys (pu)
P1	0,082
P2	0,118
P3	0,122
P4	0,342
P5	0,113

Taulukossa 5 esitetyt luvut verrataan referenssiarvoon B_0 . Yksittäisen tarkastelupisteen magneettivuon tiheyden vaikutti eniten lähimpänä oleva yksittäinen magneettikentän lähde. Tämä johtuu siitä, että komponenttien keskinäiset etäisyydet ovat suuria suhteessa lähimmän komponentin etäisyyteen tarkastelupisteestä.

Tarkastelupisteen P4 magneettivuon tiheys koostuu suurimmaksi osaksi heti seinän toisella puolella olevasta sähköpääkeskuksesta. Suurimman magneettivuon tiheyden löytyminen pisteestä P4 on loogista, koska muuntamon toisiopuolella virrat ovat huomattavasti suurempia kuin ensiöpuolella. Tästä syystä teoriassa sähköpääkeskuksesta kulkee sama virta kuin pienjänniteyhdistyksessä. Kuvan 23 kaikissa tarkastelupisteissä alitettiin asetuksessa 294/2002 annetut suositusarvot. Kuvassa 24 on esitetty magneettivuon tiheyksiä, joita aiheutuu pelkästään yhdestä muuntajasta.



Kuva 24. Yhdestä pohjakerroksen muuntajasta aiheutuvat magneettikentät. Muuntaja sijaitsee pisteessä (0,0).

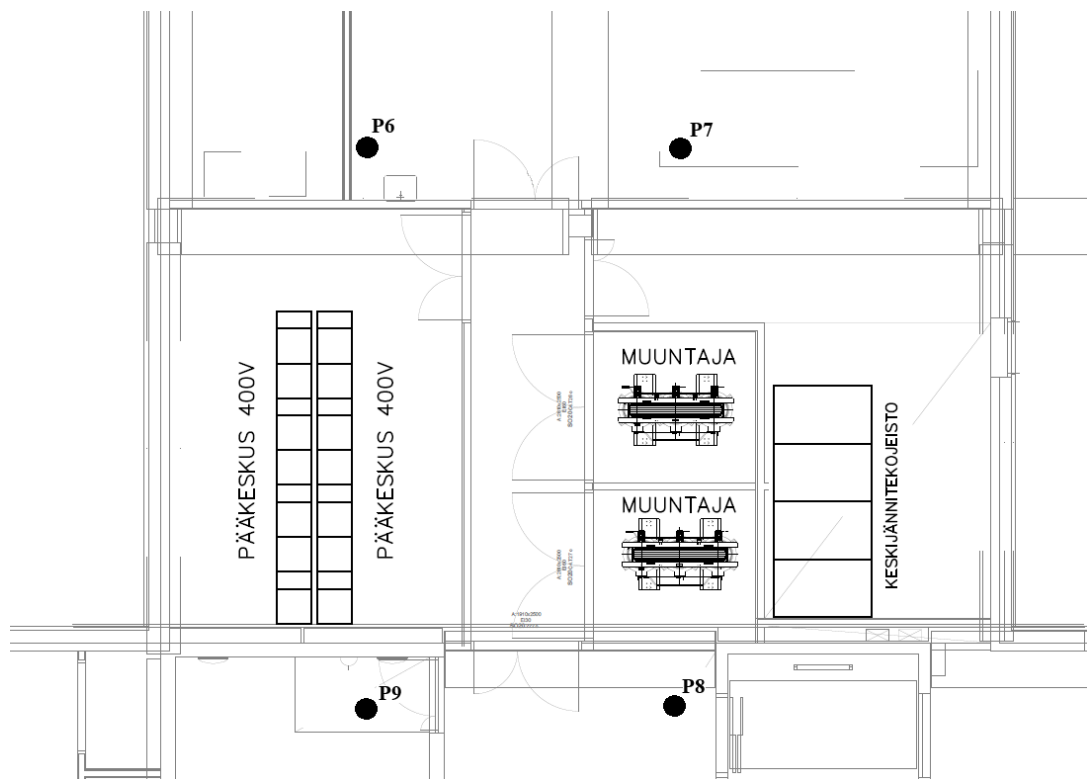
Kuvassa 24 muuntaja on oletettu pistemäiseksi kappaleeksi, joka sijaitsee origossa. Tuloksien esitys ei ala origosta, koska laskennallisesti etäisyyden lähestyessä nollaa lähestyy magneettivuon tiheys ääretöntä. Kuvasta 24 huomataan, että yhdestä muuntajasta aiheutuva magneettivuon tiheys on vaimentunut noin 4,8 m päästä muuntajasta $1 \mu\text{T}$: aan.

Koska pohjakerroksen muuntamot sijaitsevat sairaalan alimmassa kerroksessa, tarvitsee muuntamoista aiheutuvia magneettikenttiä tarkastella vain yläpuolisissa tiloissa. Myös muuntamon yläpuolisiin tiloihin kiinnitettiin huomiota suunnitteluvaiheessa. Näin ollen yläpuoliset tilat ovat myös valittu sellaisiksi, ettei siellä oleskella pitkiä aikoja. Pohjakerroksen huonekorkeus on kuitenkin huomattavasti korkeampi kuin tavallisen asuintalon huonekorkeus, joten muuntamoista aiheutuvien magneettikenttien vaikutus yläpuolisiin tiloihin on vähäistä.

7.1.2 Neljännen kerroksen muuntamo

Sairaalan neljännessä kerroksessa sijaitsee yksi muuntamo. Muuntamon viereisinä tiloina toimivat käytävä, varasto ja hissikuilu. Tällä tavoin saadaan myös tämän kyseisen muuntamon vieressä vietettävät oleskeluajat pienemmiksi. Muuntamosta aiheutuvat kentät näkyvät tässä tapauksessa yläpuolisten tilojen lisäksi myös alapuolisiin tiloihin. Huonekorkeudesta johtuen magneettikenttien vaikutus yläpuolisiin tiloihin on vähäistä. Kolmannen kerroksen huonekorkeus on kuitenkin huomattavasti pienempi kuin neljännen kerroksen eli myös kenttien vaikutus näkyy enemmän kolmannessa kerroksessa. Magneettivuon tiheyden arvo kolmannessa kerroksessa 2 m korkeudella lattiatasolta on suurimmillaan noin 0,071 pu. Tämä ei ylitä terveydelle asetettuja suositusarvoja, mutta herkkien sähkölaitteiden tapauksessa saattaisi mahdollisesti tuottaa ongelmia.

Kuvassa 25 on esitetty neljännen kerroksen muuntamon pohjakuva. Kuvassa 25 näkyy muuntajien, pääkeskuksien ja keskijännitekojeiston keskinäiset sijoittelut ja määrät. Kuvaan 25 on sijoitettu myös tarkastelupisteet P6-P9.



Kuva 25. Sairaalan neljännen kerroksen muuntamon pohjakuva sekä tarkastelupisteet P6-P9.

Kuvassa 25 on ainoastaan neljä tarkastelupistettä, koska muuntamoiden sivuseinät ovat samalla myös rakennuksen ulkoseinät. Taulukossa 6 on esitetty tarkastelupisteiden P6-P9

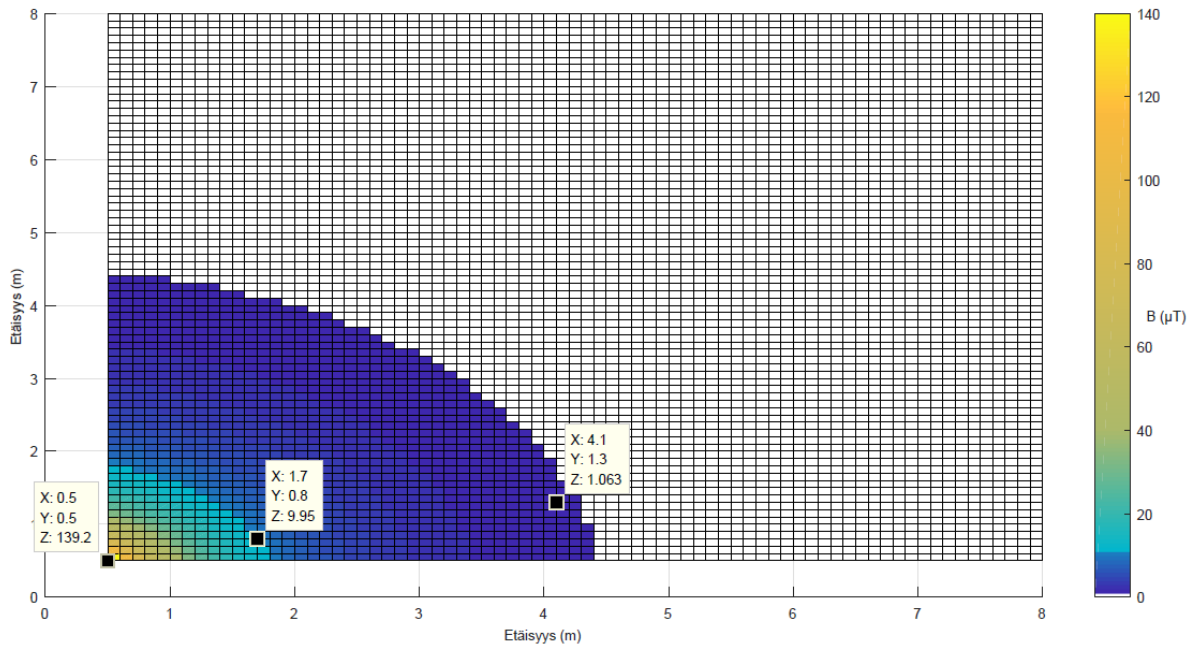
magneettivuon tiheydet pu-arvoina. Taulukon 6 tarkastelupisteet on valittu samoilla perusteilla kuin pohjakerroksen muuntamoiden tapauksessa.

Taulukko 6. *Magneettivuon tiheydet neljännen kerroksen muuntamon viereisten tilojen tarkastelupisteissä P6-P9 referenssiarvoon B_0 verrattuna.*

Tarkastelupiste (P)	Magneettivuon tiheys (pu)
P6	0,023
P7	0,030
P8	0,129
P9	0,055

Taulukosta 6 nähdään, että muuntamon aiheuttamat magneettivuon tiheydet ovat pohjakerroksen muuntamon magneettivuon tiheyksiin nähden pienempiä. Tämä selittyy komponenttien pienemmillä virroilla sekä komponenttien määrällä. Suurin magneettivuon tiheys löytyy pisteestä P8, joka on hyvin lähellä muuntajaa, muuntajalta lähtevää pienjänniteyhdistystä ja keskijännitekojeistoa. Myös nämä arvot alittavat asetuksessa 294/2002 asetetut magneettivuon tiheyksien suositusarvot.

Kuvassa 26 on esitetty pohjakerroksen muuntajan tavoin neljännen kerroksen yhdestä muuntajasta aiheutuvat magneettivuon tiheydet. Kuvasta 26 nähdään, että muuntajasta aiheutuva kenttä on vaimentunut $1 \mu\text{T}$: aan noin 4,4 m päässä muuntajasta. Vaimeneminen $1 \mu\text{T}$: aan tapahtuu hieman nopeammin kuin pohjakerroksen muuntajan tapauksessa, koska tämän muuntajan teho on noin 20 % pienempi. Tuloksista nähdään myös, että muuntajien tapauksessa magneettivuon tiheys ei muutu virran kanssa suoraan samassa suhteessa.



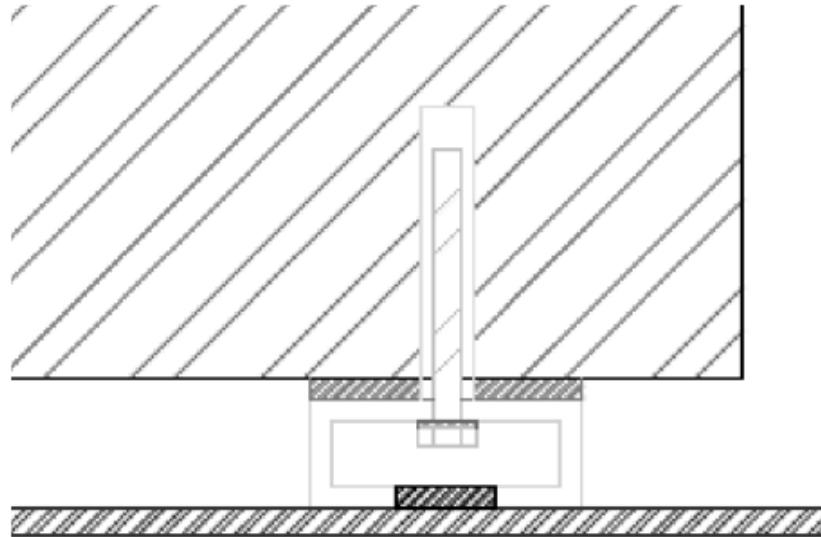
Kuva 26. Yhdestä neljännen kerroksen muuntajasta aiheutuvat magneettikentät. Muuntaja sijaitsee pisteessä (0,0).

7.2 Muuntamon suojausten vaikutus

Muuntamoista aiheutuvien magneettikenttien pienentämiseksi suoritettiin laskennat muuntamoiden seiniin laitettavien suojausten kanssa. Suojamateriaaliksi valittiin 5 mm alumiinilevyt. Alumiini oli tähän kohteeseen paras vaihtoehto sen hyvän sähkönjohtavuuden, edullisen hinnan, kevyen painon, helpon työstettävyyden ja hyvän saatavuuden takia.

Kappaleen 5 perusteella tiedetään, että käytettäessä alumiinia pääsääntöinen vaimeneminen tapahtuu heijastumisen kautta. Tämän takia on kiinnitettävä erityisesti huomiota pinnan tasaisuuteen ja epäjatkuvuuskohtiin, koska tilaa ei pystytä suojaamaan yhdestä levyistä tehdyllä palalla.

Levyn tuenta kiinnityksien kohdalta toteutetaan koolauksien avulla. Tällöin kiinnitykseen käytettävien pulttien kohtiin ei tule painaumuksia vaan levyn pinta pysyy tasaisena koko matkaltaan. Saumakohdat hitsataan täysin umpeen ja saumakohdat ovat aina tuettuja. Näin vältetään levyyn tulevilta painaumilta ja raoilta. Läpivienteihin hyödynnetään kappaleessa 5.1.5 esiteltyä aaltoputkimenetelmää. Näillä keinoilla voidaan varmistaa, että suojaus toimii tehokkaasti myös asennuksien jälkeen. Kuvassa 27 on esitetty periaatekuva alumiinilevyn kiinnityksestä tukirakenteeseen.



Kuva 27. Periaatekuva alumiinilevyn kiinnityksestä tukirakenteeseen.

Heijastushäviöiden tehokkuus riippuu kaavan 21 mukaisesti magneettikentän lähteen ja suojamateriaalin välisestä etäisyydestä. Näin ollen heijastushäviöt ja sitä kautta laskettava kokonaisvaimennus ei ole sairaalan kaikissa tarkastelupisteissä vakio. Sairaalan keskimääräiseksi kokonaisvaimennukseksi 5 mm alumiinisuojausten kanssa tuli likimain 20 dB.

Kaavaa 24 käyttämällä saadaan laskettua tarkastelupisteiden magneettivuon tiheydet suojamateriaalin kanssa. Saadut tulokset pohjakerroksen muuntamon osalta on esitelty taulukossa 7.

Taulukko 7. Suojauksen vaikutus magneettivuon tiheyksiin tarkastelupisteissä P1-P5.

Tarkastelupiste (P)	Magneettivuon tiheys (pu)	Magneettivuon tiheys vaimennettuna (pu)
P1	0,082	0,008
P2	0,118	0,012
P3	0,122	0,012
P4	0,342	0,034
P5	0,113	0,011

Taulukosta 7 nähdään, että magneettivuon tiheys vaimentuu noin 10 %:iin alkuperäisestä magneettivuon tiheydestä. Taulukossa 8 on esitetty suojauksen vaikutus magneettivuon tiheyteen neljännen kerroksen muuntamon tarkastelupisteissä.

Taulukko 8. Suojauksen vaikutus magneettivuon tiheyksiin tarkastelupisteissä P6-P9.

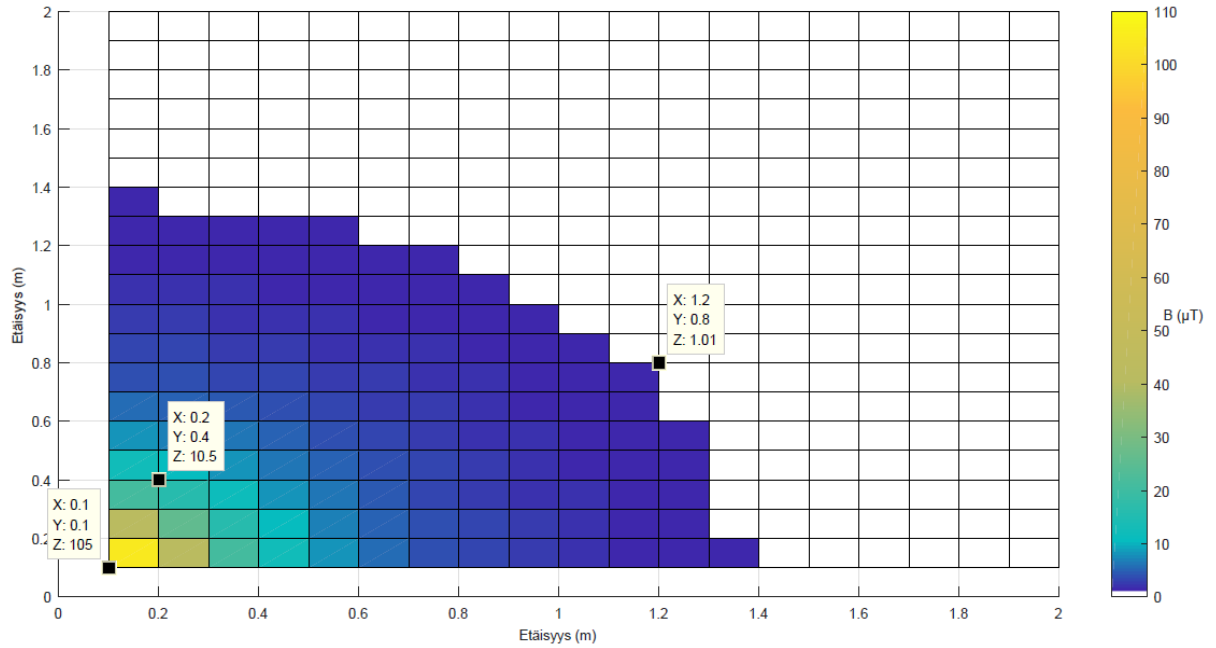
Tarkastelupiste (P)	Magneettivuon tiheys (pu)	Magneettivuon tiheys vaimennettuna (pu)
P6	0,023	0,002
P7	0,030	0,003
P8	0,129	0,013
P9	0,055	0,006

Taulukoista 7 ja 8 nähdään, kuinka suuri vaikutus suojauksella on magneettivuon tiheyksiin. Nämä vaimennustulokset ovat kuitenkin teoreettisia, koska todellisuudessa saumoja ja läpivientejä ei saada toteutettua niin hyvin, ettei niillä olisi heikentävää vaikutusta kokonaisvaimennukseen. Voidaan todeta, että todellisuudessa magneettivuon tiheydet suojauksen kanssa ovat hieman taulukon 7 ja 8 arvoja isompia. Suojausvaimennuksen tehokkuuden tarkkaa määrittystä varten olisi suoritettava mittauksia.

7.3 Jakelukiskot ja kiskosillat

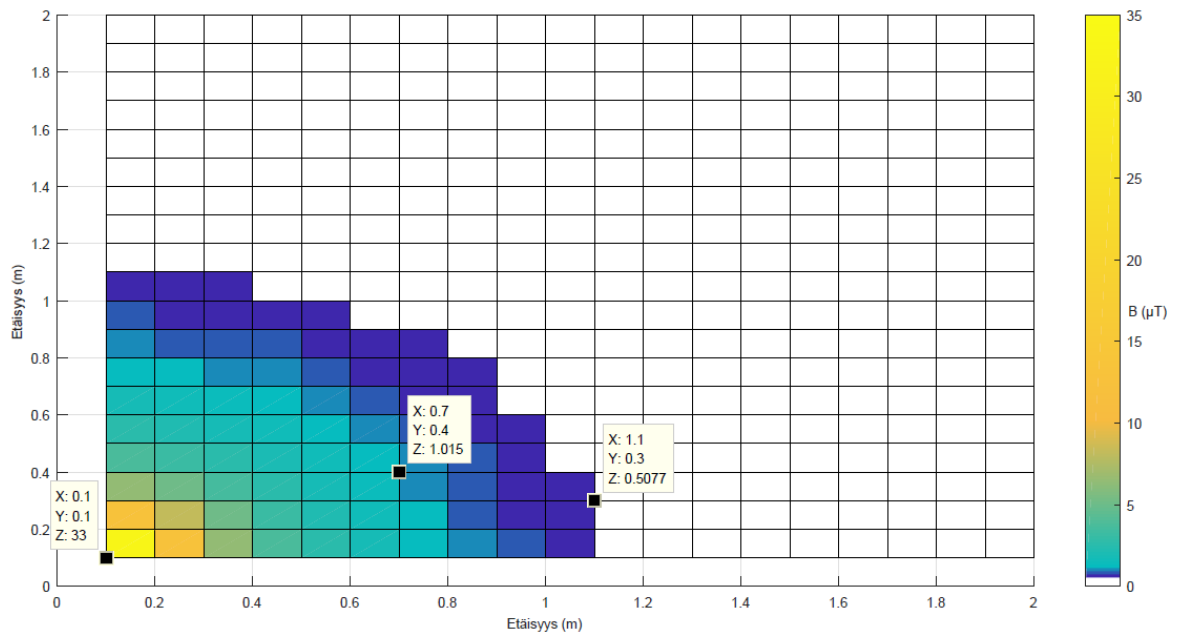
Sairaalan magneettikenttien tarkastelussa tutkittiin myös muuntamoiden välisistä kiskosilloista ja kerroksiin menevien jakelukiskoista aiheutuvia magneettikenttiä. Muuntamoiden väliset kiskosillat eivät normaalitilanteessa ole käytössä ja eivät näin aiheuta magneettikenttiä laisinkaan ympärilleen.

Vikatilanteissa kiskosillat saattavat kuitenkin olla käytössä. Kuvassa 28 on esitetty yhdestä kiskosillasta aiheutuvat magneettivuon tiheydet. Kuvasta 28 huomataan, että kiskosillasta aiheutuvat magneettikentät vaimenevat nopeasti etäisyyden kasvaessa. Kiskosillasta aiheutuva magneettikenttä on vaimentunut noin 1,5 m päässä 1 μ T: aan.



Kuva 28. Yhdestä kiskosillasta aiheutuvat magneettivuon tiheydet. Kiskosilta sijaitsee pisteettä $(0,0)$.

Jakelukiskoissa kulkevat virrat ovat huomattavasti kiskosillan virtoja pienemmät. Jakelukiskojen määrä sairaalassa on kuitenkin moninkertainen kiskosiltoihin nähden. Jakelukiskot ovat myös normaalitilanteessa koko ajan käytössä. Kuvassa 29 on esitetty yhdestä jakelukiskosta aiheutuvat magneettikentät.



Kuva 29. Yhdestä jakelukiskosta aiheutuvat magneettivuon tiheydet. Jakelukisko sijaitsee pisteessä $(0,0)$.

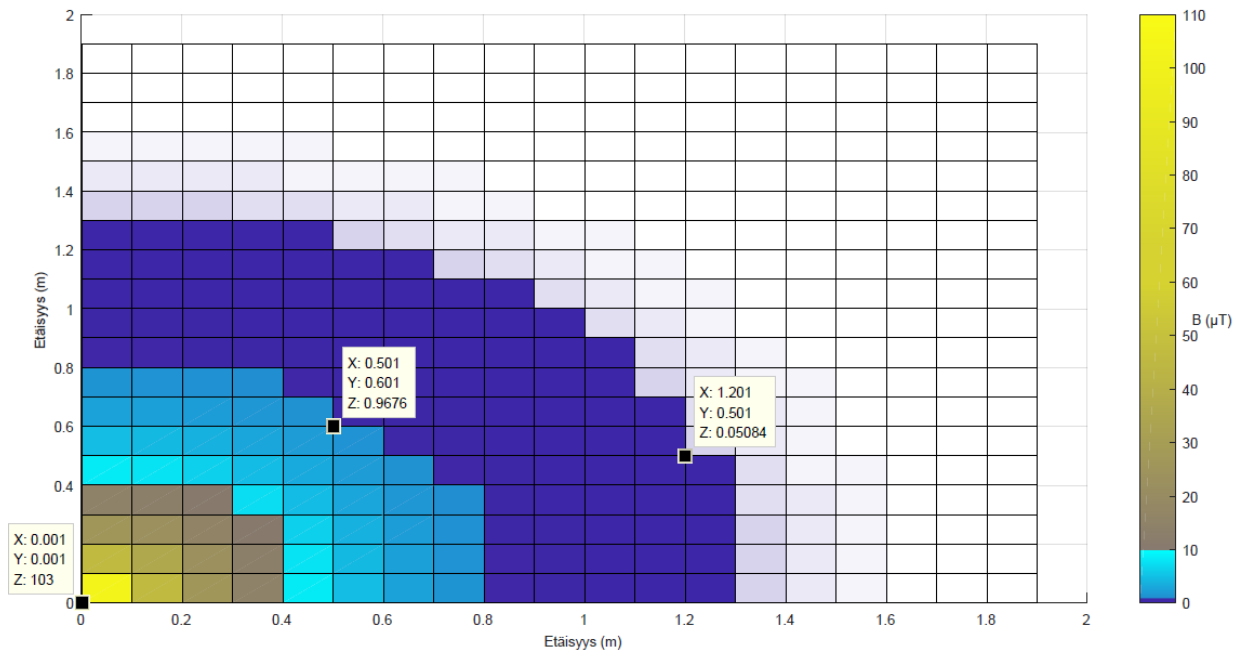
Kuvia 28 ja 29 vertaamalla nähdään, että jakelukiskoista ympärilleen aiheutuvat magneettikentät ovat selvästi kiskosiltojen kenttiä pienemmät. Jakelukiskon magneettivuon tiheys on vaimentunut noin 0,8 m kohdalla $1 \mu\text{T}$:aan.

Jakelukiskojen reitit kerroksiin toteutetaan nousukuilujen avulla. Nousukuilut sijaitsevat eri puolilla sairaalaa. Jakelukiskoja sijaitsee nousukuiluissa useampia. Tarkasteltaessa magneettivuon tiheyttä yhden metrin etäisyydellä nousukuilusta saadaan magneettivuon tiheyden maksimiksi noin 0,035 pu. Näin ollen jakelukiskoista aiheutuvat magneettivuon tiheydet eivät ylitä väestön suositusarvoja tarkastelupisteissä.

7.4 Suojaerotusmuuntajat

Suojaerotusmuuntajien aiheuttamat magneettikentät eivät koteloituna ylitä väestön suositusarvoja. Suojaerotusmuuntajien ympärilleen aiheuttamia magneettikenttiä on kuitenkin tarkasteltava, koska näiden magneettikentät saattavat aiheuttaa häiriöitä herkille lääkintätilojen sähkölaitteille.

Suojaerotusmuuntajan aiheuttama magneettikenttä vaimenee nopeasti etäisyyden kasvaessa. Kuvassa 30 on esitetty suojaerotusmuuntajasta aiheutuva magneettivuon tiheys eri etäisyyksillä.



Kuva 30. Suojaerotusmuuntajasta aiheutuvat magneettivuon tiheydet. Suojaerotusmuuntaja sijaitsee pisteessä (0,0).

Kuvasta 30 nähdään magneettikenttien nopea vaimeneminen. Etäisyyden ollessa noin 0,6 m on magneettivuon tiheys vaimentunut jo 1 μT : aan. 1,4 m etäisyydellä magneettivuon tiheys on alittava 0,05 μT . Tämä on raja-arvo eräille lääkintätiloissa käytettäville sähkölaitteille.

Suojaerotusmuuntajia ollessa useampia vierekkäin tai päällekkäin on otettava huomioon kaikista aiheutuvat kentät. Suojaerotusmuuntajista aiheutuvien magneettikenttien nope-

asta vaimenemista johtuen useampi suojaerotusmuuntaja ei kuitenkaan nosta merkittävästi kokonaiskenttää. Suojaerotusmuuntajien tapauksessa paras ja halvin tapa suojautua magneettisia häiriöitä vastaan on lähteen ja suojattavan kohteen välisen etäisyyden kasvattaminen.

8. YHTEENVETO

Yhteiskuntamme riippuvuus sähköstä on lisääntynyt aikojen saatossa. Riippuvuuden voidaan myös olettaa lisääntyvän tulevaisuudessa entistä enemmän, koska käytännössä kaikki toimintomme tarvitsevat sähköä. Lisääntyneen sähkönkäytön johdosta myös magneettikenttien esiintyminen on yleistynyt elinympäristöissämme. Käytössä oleva sähkölaite tai kuormitettu sähköjohto saa aikaan ympärilleen magneettikentän. Magneettikentän voimakkuus riippuu virran voimakkuudesta.

Magneettikenttien yleistymisen vuoksi ihmisen on nykyään käytännössä mahdotonta vältellä magneettikentille altistumista. Magneettikenttien vaikutus ihmisiin on herättänyt paljon kysymyksiä ja keskusteluita, sekä aihetta on tutkittu aikaisempia vuosia enemmän. Tutkimuksissa ei kuitenkaan ole pystytty suoranaisesti todistamaan magneettikenttien vaaroja tai vaarattomuutta.

Työssä tutkittiin magneettikenttien esiintyvyyksiä ja voimakkuuksia Jyväskylään rakennettavassa Sairaala Novassa. Magneettikenttien tarkastelu tapahtui laskennallisesti ja komponenttien sijoittelu magneettikenttien kannalta otettiin huomioon jo suunnitteluvaiheessa. Tavoitteena oli eri laitevalinnoilla, komponenttien keskinäisillä sijoituksilla sekä mahdollisella suojauksella saada muuntamoiden viereisten tilojen magneettivuon tiheydet alle väestön suositusarvon eli alle $100 \mu\text{T}$.

Sairaalassa yksittäiset suurimmat magneettikentän lähteet olivat muuntamoissa olevat muuntajat, sähköpääkeskukset, pienjänniteyhdistykset sekä keskijännitekojeistot. Muuntamoita sairaalassa sijaitsi yhteensä neljä kappaletta. Magneettikenttien tarkasteluissa tarkastelupisteet valittiin eri muuntamoiden osalta samoilla kriteereillä.

Pohjakerroksien muuntamot olivat keskenään käytännössä identtisiä. Näin ollen laskennat suoritettiin ainoastaan yhden muuntamon osalta ja saatuja lukuaroja käytettiin myös muihin kyseisen kerroksen muuntamoihin. Pohjakerroksen muuntamoiden viereisten tilojen magneettivuon tiheydet pysyivät alle väestön suositusarvojen. Laskennallisesti suurin arvo eri tarkastelupisteille oli $0,342 \mu\text{T}$.

Neljännän kerroksen muuntamosta aiheutuvat magneettivuon tiheydet olivat muihin muuntamoihin nähden hieman pienempiä. Laskennallisesti suurin arvo eri tarkastelupisteille oli $0,129 \mu\text{T}$. Eli myös neljännän kerroksen kaikki tarkastelupisteet alittivat väestön suositusarvon.

Tarkasteluissa selvitettiin myös 5 mm alumiinisuojauksen vaikutus muuntamoista aiheutuviin magneettivuon tiheyksiin. Laskennallisesti suojauksen todettiin vaimentavan magneettikenttiä noin 90 % eli magneettivuon tiheydet laskivat alkuperäisestä noin 10 %:iin.

Kokonaisvaimennuksen laskennoissa kuitenkin oletettiin suojauksen saumakohtien ja läpivientien olevan täydellisiä, mutta todellisuudessa nämä epäjatkuvuuskohdat heikentävät kokonaisvaimennusta. Näin ollen todellinen vaimennus on hieman laskettua vaimennusta pienempi.

Muuntamoista aiheutuvien magneettikenttien vaikutuksia sairaalassa oleviin henkilöihin pyrittiin minimoimaan myös huoneiden käyttötarkoitusten suunnittelulla. Muuntamoiden viereiset tilat sekä myös ylä- ja alapuoliset tilat oli valittu sellaisiksi, että niissä vietetty aika olisi mahdollisimman vähäistä. Tällaisia tiloja ovat esimerkiksi erilaiset varastot, käytävät ja hissikuilut.

Muuntamoiden komponenttien lisäksi muita isoja magneettikentän lähteitä sairaalassa olivat muuntamoiden väliset kiskosillat ja kerroksiin menevät jakelukiskot. Kiskosillat ovat kuitenkin normaalitilanteessa poissa käytössä ja tällöin niistä aiheutuvat magneettikentät ovat $0 \mu\text{T}$. Jakelukiskojen määrä sairaalassa on suuri, mutta niiden sijoittamisella niille tarkoitettuihin nousukuiluihin ei niistä aiheudu sairaalan kulku- ja oleskelutiloihin voimakkaita magneettikenttiä.

Laitehäiriöiden osalta eniten huolta ja mahdollisia ongelmia voivat aiheuttaa suojaerotusmuuntajat. Laskennallisesti suojaerotusmuuntajien magneettivuon tiheys alitti raja-arvon $0,05 \mu\text{T}$ noin $1,4 \text{ m}$ etäisyydellä. Kyseinen raja-arvo oli eräille lääkintätilojen sähkölaitteille asetettu raja. Paras ja halvin keino varmistaa pysyminen raja-arvon alapuolella on kasvattaa suojaerotusmuuntajan etäisyyttä suojattavasta kohteesta.

Sairaalassa esiintyvät magneettikentät alittivat kaikissa tarkastelupisteissä väestön suositusarvon $100 \mu\text{T}$. Huomattavaa on kuitenkin, että laskennoissa jouduttiin tekemään tiettyjä oletuksia ja yksinkertaistuksia. Suurin syy tähän on se, että sairaalakohde ei ole vielä valmis. Tästä johtuen esimerkiksi kaikkien komponenttien tarkkoja sijainteja ei vielä tiedetä eikä myöskään tiedetä todellista sähkönkulutusta. Lisäksi kuormien oletettiin olevan symmetrisiä. Näin ollen laskentatuloksia ei voida pitää täysin absoluuttisina vaan suunta-antavina.

LÄHTEET

- [1] Voimajohtojen sähkö- ja magneettikentät, TTY, Saatavissa (viitattu 26.03.2017): http://www.fingrid.fi/fi/verkkohankkeet/voimajohtoliitteet/Ymp%C3%A4rist%C3%B6-%20ja%20Turvallisuus-osiot/Tamp_yo_magnkentat2011.pdf.
- [2] Sähkömagneettiset kentät ja aallot I, TTY, Saatavissa (viitattu 1.4.2017): https://www.tut.fi/smg/tp/kurssit/SMG-1300/SMG_1300_ennakko.pdf.
- [3] K. Kettunen, Magneettikentät Helsingin Energian kiinteistömuuntamoissa, Diplomi-työ, TTY, 2005.
- [4] T. Keikko, J. Isokorpi, L. Korpinen, Pientaajuisten magneettikenttähäiriöiden pienentämismenetelmä, TTY, Saatavissa (viitattu 4.4.2017): http://www.leenakorpi.fi/archive/pientaajuiset/pientaajuisten_magneettikenttahairioiden.pdf.
- [5] Tasavirrat ja magneettikentät, Saatavissa (viitattu 4.4.2017): http://users.jyu.fi/~pheikkin/fysa220/Chapter_4.pdf.
- [6] H. Mäntysaari, 1.3 Sähkövirta ja magneettikenttä, Saatavissa (viitattu 4.4.2017): <http://users.jyu.fi/~hejajama/opetus/lukio/virtajohdin.pdf>.
- [7] How to use Ampere's Law for semi-infinite wire with current, Physics Stack Exchange, Saatavissa (viitattu 01.07.2017): <https://physics.stackexchange.com/questions/182785/how-to-use-amperes-law-for-a-semi-infinite-wire-with-current>.
- [8] Kolmivaihevirta, Wikipedia, Saatavissa (viitattu 6.4.2017): <https://fi.wikipedia.org/wiki/Kolmivaihevirta>.
- [9] K. Jokela, L. Korpinen, Säteilylähteet ja altistuminen, STUK, Saatavissa (viitattu 22.04.2017): https://www.stuk.fi/documents/12547/494524/6_9.pdf/d583d48c-c914-4593-a7bc-4d0e93415f85.
- [10] K. Nousiainen, Kolmivaihejärjestelmät, Opintomoniste, TTY, Tampere, 2014.
- [11] K. Jokela, Rakennusten magneettikenttien mittaaminen, STUK, Saatavissa (viitattu 15.04.2017): <https://www.julkari.fi/bitstream/handle/10024/125202/stuk-tiedottaa-1-2003-rakennusten-magneettikenttien-mittaaminen.pdf?sequence=1>.
- [12] A. Mäkinen, Yliaallot ja loistehon kompensointi, TTY, Tampere.
- [13] Vaihtovirtakäyttöjen yliaalto-opus, ABB Industry Oy, Saatavissa (viitattu 22.04.2017): https://library.e.abb.com/pub-lic/9aaf3178627952c7c1256d2800411f8d/Tekninen_opas_nro_6.pdf.

- [14] J. Juutilainen, J. Naarala, Hyvin pientaajuisten kenttien vaikutuksia, STUK, Saatavissa (viitattu 02.07.2017): https://www.stuk.fi/documents/12547/494524/6_5.pdf/e151e014-e2eb-4ad8-814d-63632db003f6.
- [15] L. Puranen, Teollisuuden sähkö- ja magneettikentät, STUK, Saatavissa (viitattu 02.07.2017): <https://www.stuk.fi/documents/12547/157816/Puranen-Lauri-TEO2014.pdf/644ba9b7-472b-4001-843e-c4daf14bcf8f>.
- [16] Magneettitutkimus, STUK, Saatavissa (viitattu 11.07.2017): <http://www.stuk.fi/aiheet/sateily-terveydenhuollossa/magneettitutkimus>.
- [17] L. Korpinen, S. Hieta-Wilkman, J. Elovaara, Sähkö - fysiologiset vaikutukset, SESKO, Saatavissa (viitattu 03.07.2017): http://www.sesko.fi/files/760/Sahko_-_fysiologiset_vaikutukset_2017_kentat.pdf.
- [18] M. Tiusanen, Lääkintälaittejärjestelmät ja toimenpidetilat sähkömagneettisten häiriöiden näkökulmasta ja häiriöproblematiikan tarkastelu, SSTY, Saatavissa (viitattu 06.07.2017): <http://ssty.fi/sahkojaos/download/emc-seminaari04102016/Hairioproblematiikka041016.pdf>.
- [19] Valtioneuvoston asetus 388/2016, Oikeusministeriö, Saatavissa (viitattu 06.07.2017): <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2016/20160388>.
- [20] Magneettikuvauksesta, Helsingin magneettikuvaus, Saatavissa (viitattu 06.07.2017): <http://helsinginmagneettikuvaus.fi/magneettikuvauksesta/>.
- [21] Pienjännitesähköasennukset. Osa 7-710. Erikoistilojen ja -asennusten vaatimukset. Lääkintätilat, SFS 6000-7-710, 2013.
- [22] T. Säisä, Sähköturvallisuus lääkintätiloissa, KYS, Saatavissa (viitattu 06.07.2017): http://ssty.fi/download/hki2014/015_Timo_Saisa.pdf.
- [23] H.W. Ott, Electromagnetic compatibility engineering, WILEY, Saatavissa (viitattu 17.07.2017): <http://s1.downloadmienphi.net/file/downloadfile5/192/1388769.pdf>.
- [24] T. Nyberg, Sähkömagneettinen suojaus, TTY, Saatavissa (viitattu 18.07.2017): <https://dspace.cc.tut.fi/dpub/bitstream/handle/123456789/23537/Nyberg.pdf?sequence=3&isAllowed=y>.
- [25] J. Weibler, Properties of Metals Used for RF Shielding, EMC Test & Design, Saatavissa (viitattu 20.07.2017): http://www.ets-lindgren.com/pdf/emctd_1293_weibler.pdf.
- [26] Magneettikenttä väliaineessa, Saatavissa (viitattu 20.07.2017): http://space.fmi.fi/~viljanea/ed2004/ed2004_06.pdf.
- [27] About M μ Metal, The MuShield Company, Saatavissa (viitattu 21.07.2017): http://www.mumetal.com/about_mumetal.php.

[28] Practical EM Shielding, LearnEMC, Saatavissa (viitattu 21.07.2017):
<https://learnemc.com/practical-em-shielding>.

[29] Standardi on yhteinen ratkaisu yleiseen ongelmaan, Suomen Standardisoimisliitto SFS ry, Saatavissa (viitattu 24.07.2017): https://www.sfs.fi/julkaisut_ja_palvelut/standardi_tutuksi.

[30] Sosiaali- ja terveysministeriön asetus 294/2002, Sosiaali- ja terveysministeriö,
<http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2002/20020294>.