



TR

STUK-TR 35 / TAMMIKUU 2023

Lauri Puranen



# Väestön altistus sähkön jakeluverkon sähkö- ja magneettikentille

ISBN 978-952-309- 555-7 (pdf)  
ISSN 1796-7171

*PURANEN Lauri. Väestön altistus sähkön jakeluverkon sähkö- ja magneettikentille. STUK-TR 35. Vantaa 2022. 30 s.*

**AVAINSANAT:** sähkön jakeluverkko, sähkökenttä, magneettikenttä

## Tiivistelmä

Sähkön jakeluverkko koostuu pääasiassa keskijännitteisistä 20 000 voltin (20 kV) ilmajohtoista ja maakaapeleista, 20 kV/400 V:n muuntamoista sekä 400 V:n ilmajohtoista ja maakaapeleista. Jakeluverkosta, toisin kuin suurjännitteisistä (> 100 kV) voimajohtoista, on julkaistu hyvin vähän sähkö- ja magneettikentän laskenta- ja mittaustuloksia. Tämän projektin tarkoituksena oli siten koota viestintää varten laskenta- ja mittaustuloksia jakeluverkon johdoista, kaapeleista ja muuntamoista, koska kansalaiset kysyvät näiden aiheuttamista sähkö- ja magneettikentistä.

Keskijännitteisten 20 kV:n ilmajohtojen sähkö- ja magneettikentät ja suurjännitteisen 110 kV:n maakaapelin magneettikenttä määritettiin laskemalla ja mittaamalla. Lisäksi mitattiin 20 kV:n ja 400 V:n maakaapelien sekä 20 kV/400 V:n muuntamoiden aiheuttamia magneettikenttiä. Laskentamenetelmän luotettavuus varmistettiin vertaamalla laskentatuloksia mittaustuloksiin. Vertailu osoitti, että laskenta ja mittaus antoivat mittauserävarmuuden puitteissa samanlaisia tuloksia.

Laskenta- ja mittaustulosten perusteella jakeluverkon aiheuttamat sähkö- ja magneettikentät ovat pieniä. Siten väestön altistus sähkön jakeluverkon sähkö- ja magneettikentille on vähäistä, eikä siitä ole terveydellistä haittaa. Ainoa merkittävä altistuslähde voi olla asuinhuoneiston alapuolella tai vieressä sijaitseva vanha kiinteistömuuntamo. Tässä projektissa ei mitattu tällaisen muuntamon asuntoon aiheuttamia magneettikenttiä, mutta aiemmin tehtyjen mittausten mukaan magneettikenttä ylitti asunnossa paikallisesti väestön altistuksen suositusarvot. Vanhat muuntamot ovat kuitenkin tulossa elinkaarensa päähän, ja ne korvataan nykyaikaisemmilla muuntamoilla, jotka aiheuttavat läheiseen asuntoon paljon pienemmät magneettikentät kuin vanhat muuntamot.

*PURANEN Lauri. Befolkningens exponering för elektriska och magnetiska fält. STUK-TR 35. Vanda 2022. 30 s.*

**NYCKELORD:** eldistributionsnät, elektriska fält, magnetiska fält

## Sammanfattning

Eldistributionsnätet består huvudsakligen av 20 000 volts (20 kV) luftledningar och jordkablar för mellanspänning, 20 kV/400 V-transformatorer och 400 V-luftledningar och jordkablar. Till skillnad från högspänningsledningar (> 100 kV) har mycket få resultat av beräkningar och mätningar av elektriska och magnetiska fält publicerats för distributionsnätet. Syftet med detta projekt var därför att samla in uppgifter om beräkning och mätning av ledningar, kablar och transformatorer i distributionsnätet för kommunikationsändamål, eftersom allmänheten frågar om de elektriska och magnetiska fält som de genererar.

De elektriska och magnetiska fälten för 20 kV luftledningar med mellanspänning och 110 kV jordkablar med hög spänning bestämdes genom beräkning och mätning. Dessutom mättes magnetfälten från 20 kV- och 400 V-jordkablar och 20 kV/400 V-transformatorer. Beräkningsmetodens tillförlitlighet kontrollerades genom att jämföra beräkningsresultaten med mätresultaten. Jämförelsen visade att beräkningen och mätningen gav liknande resultat inom mätosäkerheten.

Beräknings- och mätresultaten visar att de elektriska och magnetiska fält som genereras av distributionsnätet är låga. Befolkningens exponering för elektriska och magnetiska fält från eldistributionsnätet är därför låg och utgör ingen hälsorisk. Den enda betydande exponeringskällan kan vara en gammal transformatorstation som ligger under eller i anslutning till bostaden. I detta projekt mättes inte de magnetfält som genereras av en sådan transformatorstation i bostaden, men tidigare mätningar har visat att magnetfältet överskrider lokalt i bostaden de rekommenderade exponeringsnivåerna för befolkningen. De gamla transformatorstationerna håller dock på att nå slutet av sin livscykel och kommer att ersättas av modernare transformatorstationer som kommer att ge upphov till mycket lägre magnetfält i de närliggande bostäderna än de gamla.

*PURANEN Lauri. Exposure of general public to electric and magnetic fields from electricity distribution network. STUK-TR 35. Vantaa 2022. 30 p.*

**KEYWORDS:** electricity distribution network, electric field, magnetic field

## Abstract

The electricity distribution network consists mainly of medium voltage 20,000 volt (20 kV) overhead lines and ground cables, 20 kV/400 V transformers and 400 V overhead lines and ground cables. In contrast to high-voltage (> 100 kV) transmission lines, very few electric and magnetic field calculation and measurement results have been published on distribution network. The objective of this project was therefore to gather calculation and measurement data from the lines, cables and transformers of the distribution network for communication, because citizens ask about the electric and magnetic fields caused by these.

The electric and magnetic fields of the medium-voltage 20 kV overhead lines and the magnetic field of the high-voltage 110 kV underground cable were determined by calculation and measurement. In addition, the magnetic fields caused by 20 kV and 400 V ground cables and 20 kV/400 V transformers were measured. The calculation method was validated by comparing the calculation results with the measurement results. The comparison revealed that calculation and measurement gave similar results within the measurement uncertainty.

Based on the calculation and measurement results, the electric and magnetic fields caused by the distribution network are low. Thus, the exposure of general public to the electric and magnetic fields from the electricity distribution network is low, and there is no harm to health. The only significant exposure source may be an old indoor transformer located below or next to the residential apartment. In this project the magnetic fields caused by such a transformer in the apartment were not measured, but according to previous measurements, the magnetic field in the apartment locally exceeded the recommended values for the exposure of general public. However, the old transformers are coming to the end of their life and are being replaced by more modern transformers that cause much lower magnetic fields in the nearby apartment than the old transformers.

# Sisällys

<b>TIIVISTELMÄ</b>	<b>3</b>
<b>SAMMANFATTNING</b>	<b>4</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>5</b>
<b>1 JOHDANTO</b>	<b>8</b>
<b>2 KESKIJÄNNITTEISTEN ILMAJOHTOJEN JA MAAKAPELIEN OMINAISUUDET</b>	<b>9</b>
2.1 ILMAJOHDOT	9
2.2 MAAKAPELIT	9
<b>3 ALTISTUKSEN RAJA-ARVOT JA TOIMENPIDETASOT</b>	<b>10</b>
<b>4 KATSAUS ILMAJOHDOILLE JA MAAKAPELEILLE TEHDYISTÄ MITTAUKSISTA JA LASKENNASTA</b>	<b>12</b>
<b>5 ILMAJOHTOJEN JA MAAKAPELIEN SÄHKÖ- JA MAGNEETTIKENTTIEN MITTAUKSET JA LASKENTA</b>	<b>14</b>
5.1 ILMAJOHTOJEN MITTAUKSET	15
5.1.1 KOLMIO-ORTEEN ASENNETUT PÄÄLLYSTÄMÄTTÖMÄT ILMAJOHDOT	15
5.1.2 TASO-ORTEEN ASENNETUT PÄÄLLYSTÄMÄTTÖMÄT ILMAJOHDOT	17
5.1.3 KAKSOIS-PAS-ILMAJOHTO	17
5.1.4 TASO-ORTEEN ASENNETTU PAS-JOHTO	19
5.2 MAAKAPELIT	21
5.2.1 20 KV:N MAAKAPELIT	21
5.2.2 110 KV:N MAAKAPELIT	23
5.3 MUUNTAMOT	24

5.3.1	PUISTOMUUNTAMOT	24
5.3.2	PYLVÄSMUUNTAMO	28
5.3.3	KIINTEISTÖMUUNTAMOT	28
<b>6</b>	<b>YHTEENVETO</b>	<b>29</b>
	<b>VIITELUETTELO</b>	<b>30</b>

# 1 Johdanto

Sähkö siirretään voimalaitoksilta kuluttajille siirtoverkossa, joka koostuu kantaverkosta, sähköasemista ja jakeluverkosta. Voimalaitoksen sähköasemalla 400 V:n pienjännite muunnetaan 110 kV, 220 kV tai 400 kV:n suurjännitteeksi, jolla sähkö siirretään kantaverkossa pitkiä matkoja pienin energiahäviöin. Jakeluverkossa sähkö siirretään 110/20 kV:n muuntoasemalta keskijännitteellä kuluttajien lähellä sijaitsevaan muuntamoon, joka muuntaa keskijännitteen kuluttajien käyttöön soveltuvaksi 400 V:n pienjännitteeksi. Harvaan asutulla alueella keskijänniteverkossa käytetään ilmajohtoja ja taajamissa maakaapeleita. Tyypillisin keskijännite on 20 kV. Suomen keskijänniteverkon pituus on noin 153 000 km, josta maakaapelin osuus on noin 55 000 km (Sähköverkon tunnusluvut 2019).

Suurjännitteisten voimajohtojen sähkö- ja magneettikentistä on paljon laskenta- ja mittaustuloksia, kun taas keskijännitteisten ilmajohtojen ja maakaapelin kentistä niitä on hyvin niukasti. Siksi Säteilysurvakeskuksessa toteutettiin vuonna 2021 projekti, jossa selvitettiin keskijännitteisten ilmajohtojen ja maakaapelin sähkö- ja magneettikenttiä mittaamalla ja laskemalla. Lisäksi määritettiin 110 kV ja 400 V:n maakaapelin ja 20 kV/400 V:n muuntamoiden magneettikenttiä. Mittaus- ja laskentatulosten perusteella päivitettiin STUKin nettisivuja.

Tässä raportissa kuvataan ensin keskijännitteisten ilmajohtojen ja maakaapelin ominaisuuksia luvussa 2. Seuraavassa luvussa esitetään väestöä koskevat altistuksen toimenpidetasot sähkökentän voimakkuuksina ja magneettivuon tiheyksinä. Luvussa 4 luodaan katsaus keskijännitteisille ilmajohdoille ja maakaapeleille aiemmin tehtyjen mittausten tuloksiin ja esitetään, miten suuria kenttiä keskijännitteisen ilmajohdon alla voi teoriassa olla. Vuonna 2021 suoritettujen mittausten ja laskennan menetelmät ja tulokset esitetään luvussa 5. Projektin yhteenveto on luvussa 6.



## 2 Keskipännitteisten ilmajohtojen ja maakaapelien ominaisuudet

Ilmajohtojen ja maakaapelien nimellisjännite on yleensä 20 kV (kV=1000 voltia). Kaupunkien keskustoissa voi olla myös 10 kV:n maakaapeleita ja maaseudulla 45 kV:n ilmajohtoja. Ilmajohtojen maksimivirta on 250 A ja maakaapelien 500 A. Tyypilliset virrat ovat paljon pienempiä. Esimerkiksi Helsingissä 20 kV:n maakaapelien suurimmat virrat ovat alle 300 A.

### 2.1 Ilmajohdot

Keskipännitteiset ilmajohdot asennetaan puupylväille. Johtojen minimikorkeus maasta on 5,5 m. Johtimien välinen etäisyys on 0,45–1,2 m johdinlajin ja orsirakenteen mukaisesti. Johdinlajeja ovat

- PAS (päällystetty avojohdin suurjännitteelle), muovipäällysteinen alumiiniseosjohdin
- alumiinilangoista valmistettu johdin tai terässydäminen alumiinilangoilla päällystetty johdin
- teräksisen kannatusköyden ympärille kierretyistä yksivaihekaapeleista koostuva riippukierrejohto.

Muovipäällysteiset PAS-johtimet voidaan asentaa lähemmäksi toisiaan, sillä muovieriste estää oikosulun, jos johtimet tulessa heiluessaan osuvat toisiinsa. Taso-orteen samalle korkeudelle asennettujen johtimien välinen etäisyys on tyypillisesti 0,45 m. PAS-johtimet mahdollistavat myös kahden keskipännitejohdon asentamisen samaan pylvääseen. Tällöin johtimet asennetaan pylvään molemmin puolin siten, että johtimien välinen etäisyys on 0,9 m vaakasuunnassa ja 0,65 m pystysuunnassa. Eniten käytetyn PAS120-johtimen johtavan poikkipinnan pinta-ala on 120 mm<sup>2</sup>, eli sen halkaisija on 12,4 mm. Jonkin verran käytetään myös PAS95-johdinta, jonka johtimen johtavan poikkipinnan pinta-ala on 95 mm<sup>2</sup>.

Päällystämättömät johtimet asennetaan taso-orisiin samalle korkeudelle 1,0–1,2 metrin välein tai kolmio-orisiin, joissa johtimet ovat tasakylkisen kolmion kärjissä siten, että keskijohdin on pylvään päässä alempia johtimia metrin korkeammalla. Alemmat johtimet ovat pylvään molemmin puolin 0,6 m:n etäisyydellä keskilinjasta. Yleisesti käytetyn johtimen halkaisija on 12,8 mm.

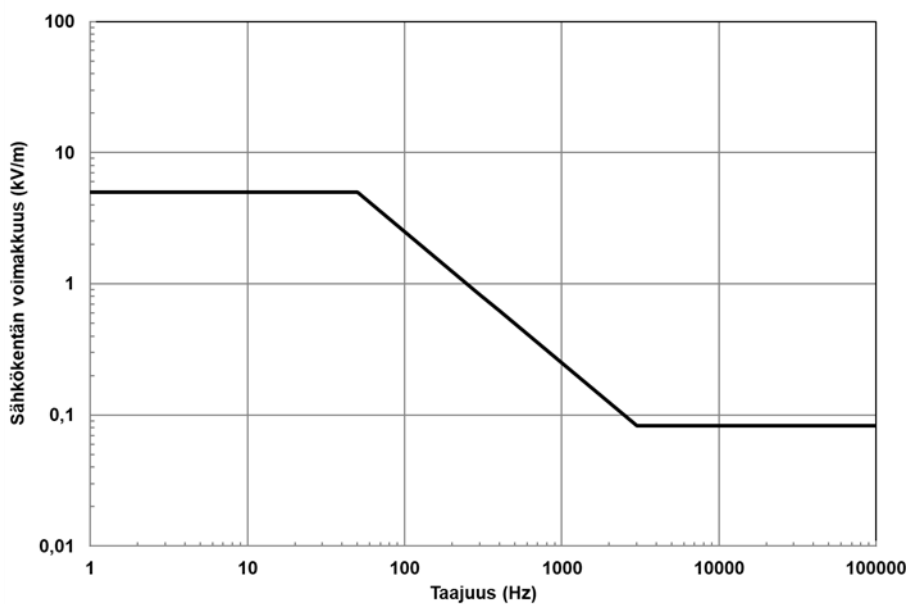
### 2.2 Maakaapelit

Maakaapelit asennetaan yleensä 0,7 metrin syvyyteen. Maakaapeleissa on kolme metallivaippaista eristepäällysteistä vaihejohdinta. Vaihejohtimen johtava osa on alumiinin ja kuparin seosta, ja sen halkaisija on 8–20 mm kuormitettavuuden (150–450 A) mukaisesti. Vaihejohtimet ovat toisissaan kiinni ja kiertyvät toistensa ympärille.

## 3 Altistuksen raja-arvot ja toimenpidetasot

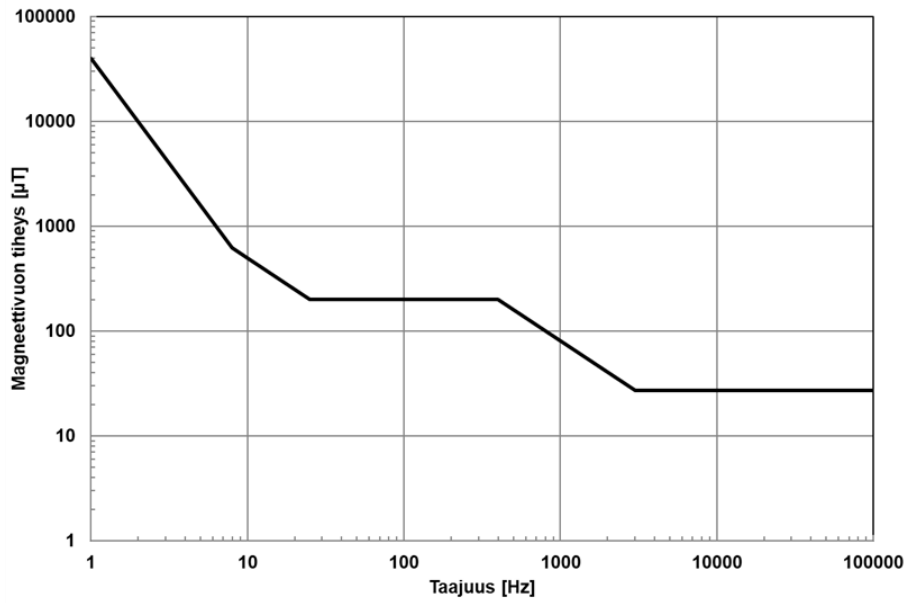
Suomessa noudatettavat altistuksen raja-arvot ja toimenpidetasot on vahvistettu sosiaali- ja terveysministeriön asetuksessa 1045/2018 (STM 2018). Altistuksen raja-arvot on annettu kehoon indusoituvan sähkökentän voimakkuutena taajuuksilla 1 Hz–10 MHz. Tätä kehon sisäistä suuretta ei voi mitata. Raja-arvoista on johdettu toimenpidetasot, jotka ovat vapaassa tilassa vaikuttavia sähkö- ja magneettikentän voimakkuuksia tai magneettivuon tiheyksiä.

Sähkönsiirrossa syntyvien kenttien taajuus on 50 Hz. Pienjänniteverkossa on perustaajuuden lisäksi harmonisia komponentteja. Väestöä koskeva sähkökentän voimakkuuden toimenpidetaso on 5 000 V/m ja magneettivuon tiheyden toimenpidetaso 200  $\mu$ T taajuudella 50 Hz. Asetuksen mukaan sähkökentän toimenpidetasoa ei sovelleta suurjännitteisiin (yli 100 kV) ilmajohtoihin. Sähkökentän toimenpidetaso esitetään sähkökentän voimakkuuden tehollisarvona kuvassa 1 ja magneettikentän toimenpidetaso magneettivuon tiheyden tehollisarvona kuvassa 2 taajuuksilla 1 Hz–100 kHz.



Kuva 1. Väestön altistuksen toimenpidetaso sähkökentän voimakkuutena taajuuksilla 1 Hz–100 kHz.

### 3 ALTISTUKSEN RAJA-ARVOT JA TOIMENPIDETASOT



Kuva 2. Väestön altistuksen toimenpidetaso magneettivuon tiheytenä taajuuksilla 1 Hz–100 kHz.

## 4 Katsaus ilmajohtoille ja maakaapeleille tehdyistä mittauksista ja laskennasta

Keskijännitteisille ilmajohtoille ja maakaapeleille on aiemmin tehty hyvin vähän sähkö- ja magneettikentän mittauksia. Sähkökentän mittaustuloksia esitetään taulukossa 1 ja magneettikentän mittaustuloksia taulukossa 2 (Korpinen 2003). Suurin ilmajohtojen alla mitattu sähkökentän voimakkuus on ollut 0,1 kV/m ja magneettivuon tiheys 0,8  $\mu\text{T}$ .

Taulukko 1. Keskijännitejohtojen sähkökentän mittaustuloksia.

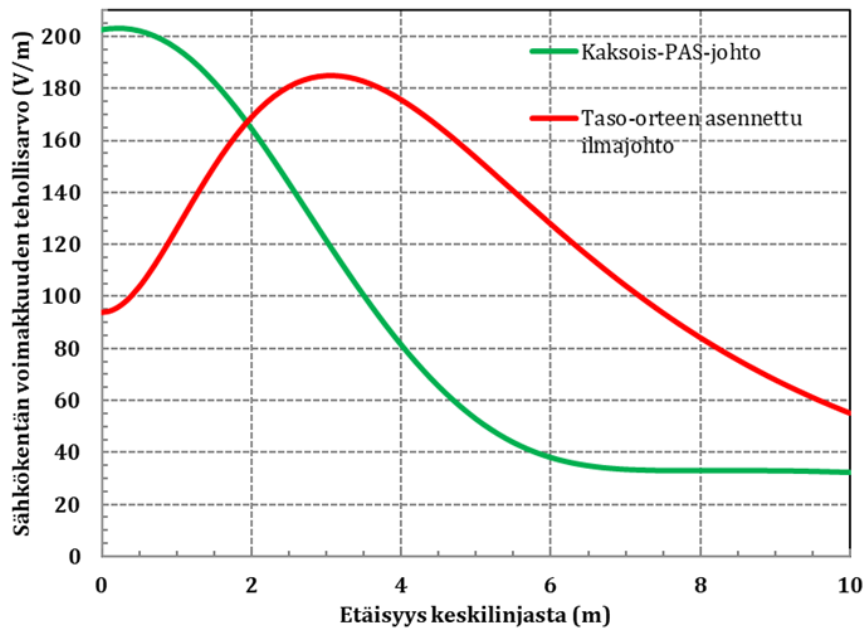
Johtotyyppi	Jännite (kV)	Sähkökentän voimakkuus (kV/m)
Ilmajohto, I-pylväs	20,5	0,1
Päällystetty ilmajohto	20,4	0,1
Riippukierrejohto	20,7	0

Taulukko 2. Keskijännitejohtojen ja maakaapelin magneettikentän mittaustuloksia.

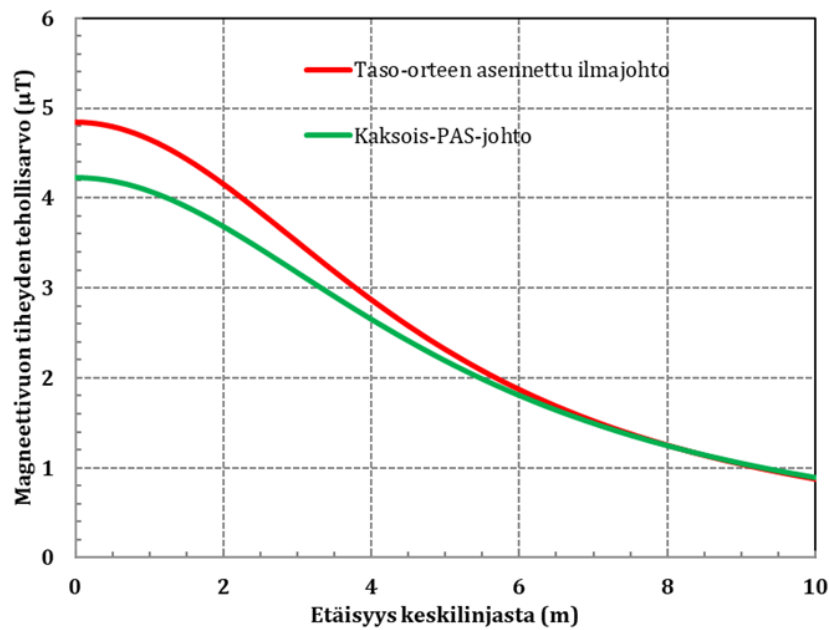
Johtotyyppi	Virta (A)	Magneettivuon tiheys ( $\mu\text{T}$ )
Ilmajohto, I-pylväs	145	0,8
Päällystetty ilmajohto	56	0,1
Riippukierrejohto	36	0,1
Päällystetty kaksoisilmajohto	274	0,6
Maakaapeli	104	0,2

Teoreettisesti ilmajohto aiheuttaisi suurimmat kentät, kun virta olisi maksimi 250 A, johtimien korkeus maasta olisi pienin sallittu 5,5 m ja johtimet olisi asennettu taso-orteen 1,2 m:n välein tai kaksois-PAS-johdolla samalla korkeudella olevat johtimet olisivat samassa vaiheessa. Tällaisille johdoille lasketut sähkökentän voimakkuudet ja magneettivuon tiheydet metrin korkeudella maasta esitetään kuvassa 3 ja 4. Kuvista havaitaan, että kaksois-PAS-johto aiheuttaa suurimman sähkökentän voimakkuuden, hieman yli 200 V/m, ja taso-orteen asennettu johto suurimman magneettivuon tiheyden, noin 4,8  $\mu\text{T}$ . Esitetyt magneettivuon tiheydet ovat vain teoreettisia arvoja, sillä käytännössä keskijännitejohtojen virrat ovat paljon pienempiä kuin 250 A.

#### 4 KATSAUS ILMAJOHDOLLE JA MAAKAAPELILLE TEHDYISTÄ MITTAUKSISTA JA LASKENNASTA



Kuva 3. Keskijännitejohtojen suurimmat teoreettiset sähkökentän voimakkuuden tehollisarvot.



Kuva 4. Keskijännitejohtojen suurimmat teoreettiset magneettivuon tiheyden tehollisarvot.

## 5 Ilmajohdojen ja maakaapelien sähkö- ja magneettikenttien mittaukset ja laskenta

Sähkö- ja magneettikentät mitattiin pientaajuisen sähkö- ja magneettikentän mittarilla Wavecontrol SMP2, johon oli kytketty mittapää WP400. Valmistaja on kalibroinut mittarin ja mittapään vuonna 2015. Mittarin ja mittapään kalibrointi tarkistettiin STUKin Helmholtzin kelalla taajuudella 50 Hz. Kelaan asetettiin magneettivuon tiheys 100  $\mu\text{T}$ , jolloin mittarin lukema vaihteli mittapään asennon mukaisesti välillä 99–101  $\mu\text{T}$ . Siten mittarin todettiin näyttävän oikeaa lukemaa. Mittarin lineaarisuuden tarkistus osoitti, että mittari voi näyttää noin kaksinkertaista lukemaa, kun magneettivuon tiheys on pienempi kuin 0,3  $\mu\text{T}$ .

Sähkökentän voimakkuus ja magneettivuon tiheys mitattiin ilmajohtojen alla ja puistomuuntamoiden läheisyydessä standardin IEC 62110:2009 mukaisesti metrin korkeudella maasta (IEC 2009). Sähkökentän mittauksissa mittari asetettiin puiseen kolmijalkaan kiinnitetyn vaakasuoran muovisauvan päähän kohtisuoraan sähkökenttää vastaan, jolloin kolmijalka ja mittari häiritsivät mittapään kohdistuvaa sähkökenttää mahdollisimman vähän. Mittari luettiin noin neljän metrin etäisyydeltä, jotta mittaaja ei häiritsisi sähkökenttää. Maakaapelien aiheuttamat magneettikentät mitattiin maan pinnalta ja metrin korkeudella maasta.

Sähkökentän voimakkuuden ja magneettivuon tiheyden mittauksen epävarmuudeksi arvioitiin 95 %:n luottamusvälillä 30 %.

Osassa mittauksista kirjattiin ilmajohtojen, maakaapelien tai puistomuuntamon virrat mittaushetkellä. Ilmajohdojen ja maakaapelien johtimien sijaintien sekä virtojen perusteella voitiin laskea ilmajohtojen aiheuttamat sähkö- ja magneettikentät sekä maakaapelien aiheuttamat magneettikentät. Vertailemalla laskentatuloksia vastaaviin mittaustuloksiin pystyttiin arvioimaan laskennan luotettavuutta. Puistomuuntamoiden magneettikenttien mittaustulokset voitiin mittaushetken virtojen avulla skaalata muuntamoiden maksimikuormitusta vastaavaan tilanteeseen.

Ilmajohdojen aiheuttamat sähkökentän voimakkuudet laskettiin viitteessä (Puranen 2016) esitetyllä tavalla. Ilmajohdot oletetaan suoriksi viivalähteiksi. Ensin määritetään sähkökentän laskennassa tarvittava johtimien varausmatriisi, joka saadaan kertomalla ns. P-matriisin kääntämatriisi jännitematriisilla. P-matriisin alkiot määräytyvät johtimien halkaisijoista ja etäisyyksistä laskentapisteeseen.

Ilmajohdojen ja maakaapelien aiheuttamat magneettivuon tiheydet laskettiin Biotin ja Savartin lain mukaisesti. Suoran viivalähteen aiheuttama magneettivuon tiheys  $B$  etäisyydellä  $r$  lasketaan kaavasta

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \quad (1)$$

missä  $I$  on viivalähteen virta ja  $\mu_0$  ilman permeabiliteetti. Sähkökentän voimakkuuden ja magneettivuon tiheyden laskennassa käytettiin Matlab-ohjelmiston versiota R2016a Update 7 (9.0.0.960322).

### 5.1 Ilmajohdojen mittaukset

#### 5.1.1 Kolmio-orteen asennetut päällystämättömät ilmajohdot

Harvaan asutulla maaseudulla Tervossa Pohjois-Savossa mitattiin sähkö- ja magneettikenttä kolmio-orteen asennetun 20 kV:n ilmajohdon alla (kuva 5). Johdon jännite- ja virtatietoja ei ollut saatavissa. Keskimmäisen johtimen korkeudeksi maasta arvioitiin 9,5 m ja alempien johtimien korkeudeksi 8,5 m. Alempien johtimien välinen etäisyys oli 1,2 m. Laskennassa johtimien halkaisijana oli 12,8 mm.



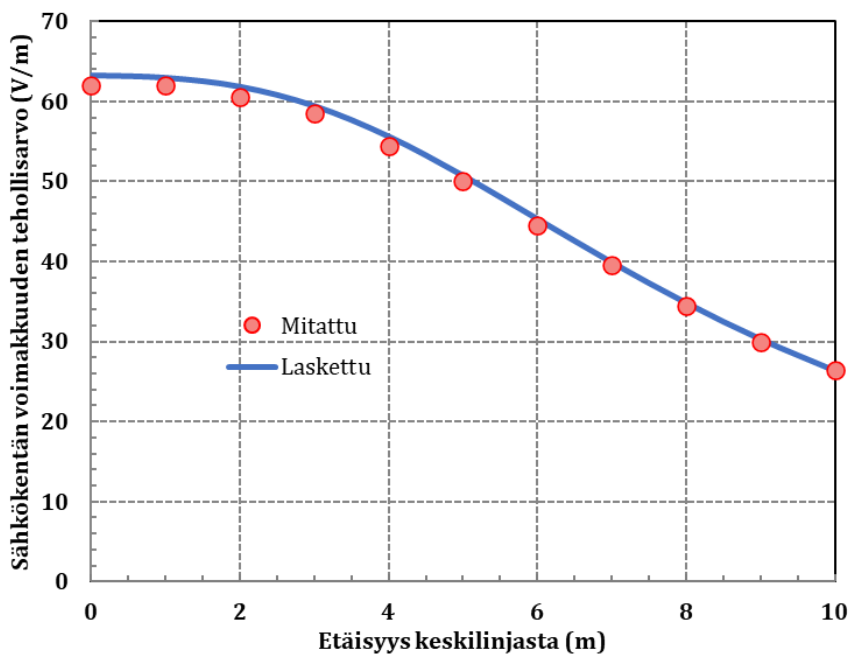
Kuva 5. Sähkökentän voimakkuuden mittaus kolmio-orteen asennetun 20 kV:n ilmajohdon alla.

Sähkökentän voimakkuuden mittausta esittää kuva 5. Mittarin ja mittapään pituusakseli asetettiin kohtisuoraan sähkökenttää vastaan, jolloin sähkökentän kytkeytyminen muuhun kuin mittapähän oli vähäistä. Lasketut ja mitatut sähkökentän voimakkuudet etäisyyksillä 0–10 m esitetään kuvassa 6. Johdon pääjännitteeksi on oletettu 20 kV. Kuvasta nähdään, että sähkökentän voimakkuus on suurimmillaan yli 60 V/m johdon alla ja pienenee monotonisesti arvoon noin 25 V/m etäisyydellä 10 m. Mitatut ja lasketut tulokset ovat lähellä toisiaan, joten laskenta antoi tässä tapauksessa luotettavia tuloksia.

Magneettikentän mittauksissa mittarin pohjalukema  $0,05 \mu\text{T}$  ei muuttunut johdon allakaan, joten suurin magneettivuon tiheys oli vähemmän kuin  $0,05 \mu\text{T}$ .

Mittauspiste sijaitsi vajaan kilometrin päässä keskijännitejohdon päätepisteestä, joten johto oli lähes virraton ja magneettivuon tiheys johdon alla oli siten vähemmän kuin mittarin herkkyys  $0,05 \mu\text{T}$ .

Vantaan Kartanonkoskella mitattiin magneettikenttää I-pylväisiin kolmio-orteen asennettujen päällystämättömien johtimien alla. Sielläkään ei mittarin pohjalukema  $0,05 \mu\text{T}$  muuttunut johdon alla, joten magneettivuon tiheys oli vähemmän kuin  $0,05 \mu\text{T}$ . Mittauspisteen lähellä oli 20 kV/400 V:n puistomuuntamo.



Kuva 6. Lasketut ja mitatut sähkökentän voimakkuudet kolmio-orteen asennetun 20 kV:n ilmajohdon alla.



### 5.1.2 Taso-orteen asennetut päällystämättömät ilmajohtot

Taso-orteen asennetun keskijänniteilmajohdon magneettikenttää mitattiin Kalajärvellä Espoossa. Johtoa esittää kuva 7. Johdon alapuolelle on asennettu kaksi AMKA-pienjänniteriippukierrekaapelia. Tyypillinen metrin korkeudella mitattu magneettivuon tiheys oli  $0,06 \mu\text{T}$ . Suurin mitattu vuontiheys oli  $0,08 \mu\text{T}$ .



Kuva 7. Taso-orteen asennettu päällystämättömän 20 kV:n ilmajohto.



Kuva 8. Kaksois-PAS-johto.

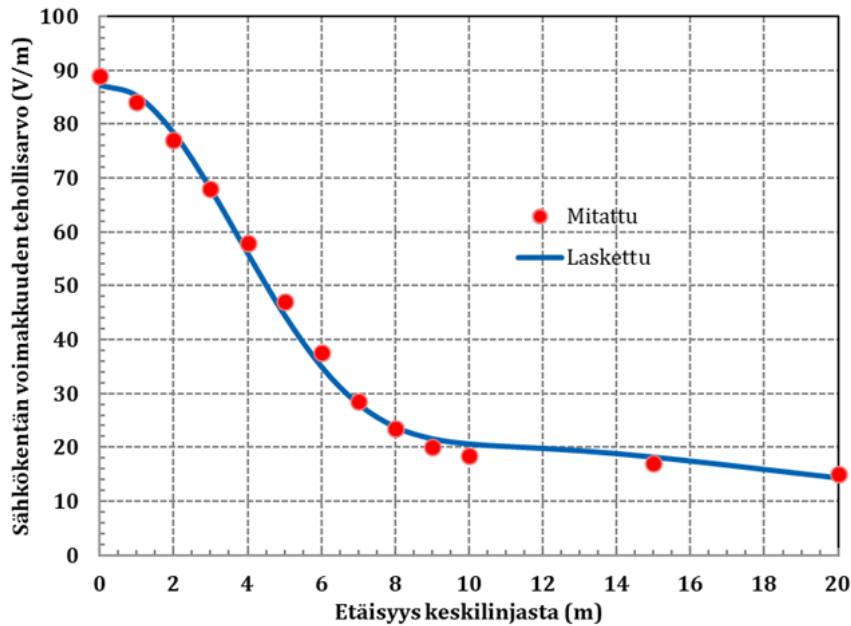
### 5.1.3 Kaksois-PAS-ilmajohto

Kuvassa 8 näkyvän kaksois-PAS-ilmajohdon sähkö- ja magneettikentät mitattiin Vantaan Sotungissa. Pylväässä oli kahden virtapiirin johtimet eri puolilla pylvästä  $0,65 \text{ m:n}$  välein. Vaakasuunnassa johtimien välinen etäisyys oli  $0,9 \text{ m}$ . Alimpien johtimien korkeudeksi arvioitiin  $8,5 \text{ metriä}$ . Pylväässä oli virtajohtimien alapuolella maadoitettu reduktiojohdin, joka oli  $1,72 \text{ m}$  alempana kuin alimmat virtajohtimet. Reduktiojohtimella yhdistetään muuntamoiden yms. maadoitukset laajoiksi maadoitusverkoiksi, jolloin maadoitusresistanssi saadaan pieneksi myös huonosti johtavalla maaperällä. Lisäksi reduktiojohdin nopeuttaa suojausta esimerkiksi tilanteessa, jossa vaihejohdin putoaa maahan. PAS120-johtimien johtavan pinnan halkaisija oli  $12,4 \text{ mm}$ .

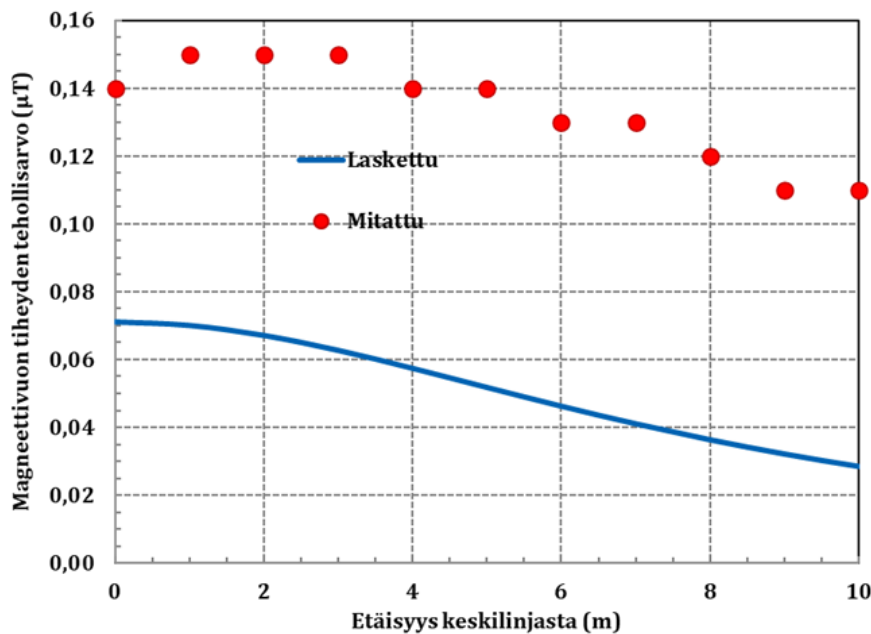
Lasketut ja mitatut sähkökentän voimakkuudet etäisyyksillä  $0\text{--}20 \text{ m}$  esitetään kuvassa 9. Johdon pääjännitteeksi oletettiin  $20 \text{ kV}$ . Kuvasta havaitaan, että tulokset ovat lähellä toisiaan. Laskenta antaa siten luotettavia tuloksia.

Lasketut ja mitatut magneettivuon tiheydet etäisyyksillä  $0\text{--}20 \text{ m}$  esitetään kuvassa 10. Oikeanpuoleisten johtimien virta oli  $10,66 \text{ A}$  sekä vasemmanpuoleisten  $10,37 \text{ A}$  mittausten aikana. Samalla korkeudella sijaitsevien johtimien virrat olivat samassa vaiheessa. Kuvasta havaitaan, että mitattu magneettivuon tiheys on selvästi suurempi kuin laskettu. Ero johtuu osittain mittarin pohjalukemasta  $0,05 \mu\text{T}$  ja suuresta epälineaarisuudesta, joka todettiin

kalibroinnin tarkistuksen yhteydessä näin pienillä magneettivuon tiheyksillä. Laskennassa ei huomioitu maan paluuvirtaa, joka voi suurentaa magneettikenttää. Peltomaa on hyvin johtavaa, ja paluuvirta voi olla merkittävä. Laskennassa ei huomioitu myöskään reduktiojohtimeen indusoituvaa virtaa, mutta sen vaikutus on pieni ja magneettikenttää pienentävä.



Kuva 9. Lasketut ja mitatut sähkökentän voimakkuudet etäisyyden funktiona kaksois-PAS-johdon keskilinjasta metrin korkeudella maasta.



Kuva 10. Lasketut ja mitatut magneettivuon tiheydet etäisyyden funktiona kaksois-PAS-johdon keskilinjasta metrin korkeudella maasta.

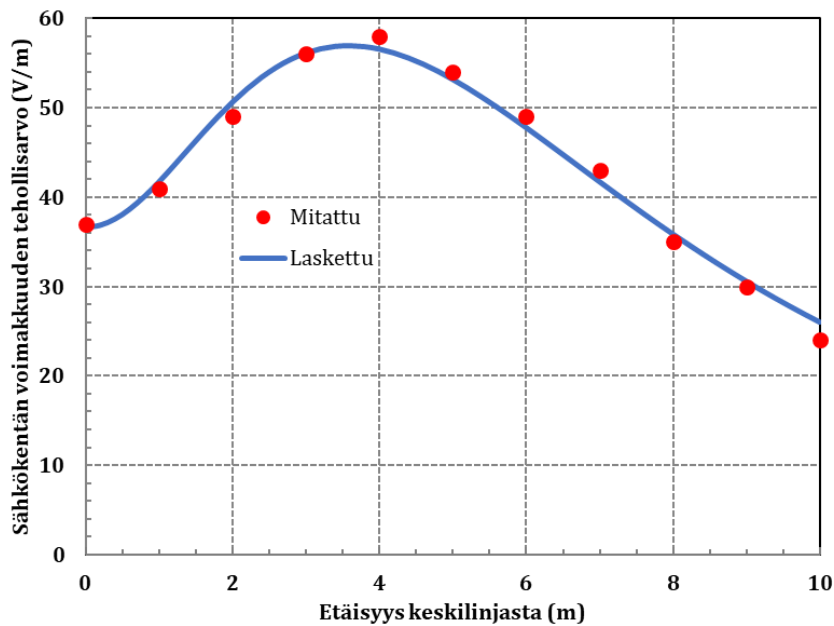
### 5.1.4 Taso-orteen asennettu PAS-johto

Taso-orteen asennetun PAS-johdon sähkö- ja magneettikenttä mitattiin Vantaan Sotungissa. Kuvassa 11 näkyy sähkökentän mittausasetelma PAS-johdon alla. PAS-johdon johtimet olivat rinnakkain noin 7 m:n korkeudella maasta. Johtimien välimatka oli 0,45 m. Pylväässä oli maadoitettu reduktiojohdin 1,72 m virtajohtimia alempana.



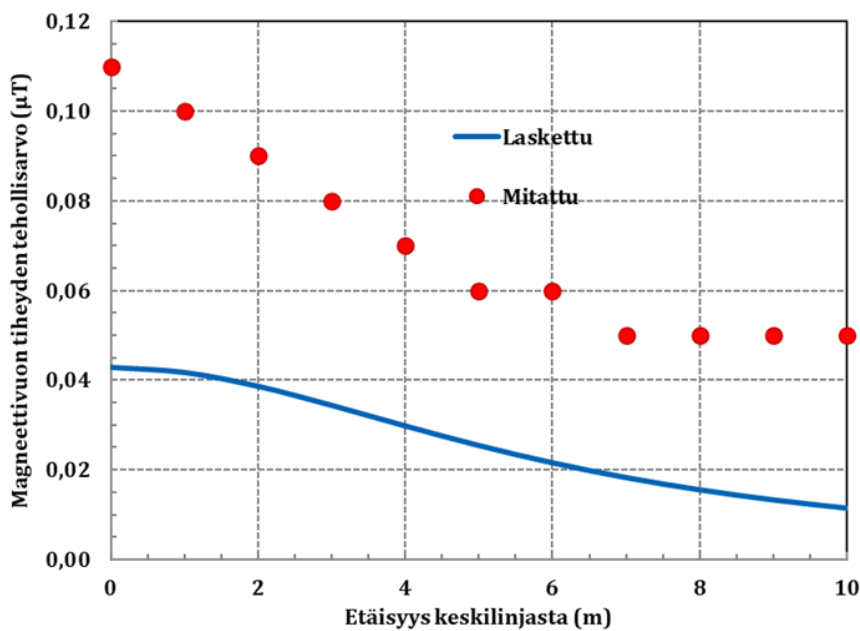
Kuva 11. Sähkökentän voimakkuuden mittaus taso-orteen asennetun PAS-johdon alla.

Lasketut ja mitatut sähkökentän voimakkuudet esitetään kuvassa 12. Johdon pääjännitteeksi oletettiin 20 kV. Tässäkin tapauksessa lasketut ja mitatut tulokset ovat lähellä toisiaan, joten sähkökentän laskentamenetelmään voi luottaa.



Kuva 12. Lasketut ja mitatut sähkökentän voimakkuudet etäisyyden funktiona johdon keskilinjasta metrin korkeudella maasta.

Lasketut ja mitatut magneettivuon tiheydet esitetään kuvassa 13. Mittausten aikana johdon virta oli 9,97 A. Tässäkin tapauksessa mitatut arvot olivat selvästi laskettuja arvoja suuremmat edellä esitetyistä syistä.



Kuva 8. Laskettu ja mitattu magneettivuon tiheys etäisyyden funktiona PAS-johdon keskilinjasta metrin korkeudella maasta.

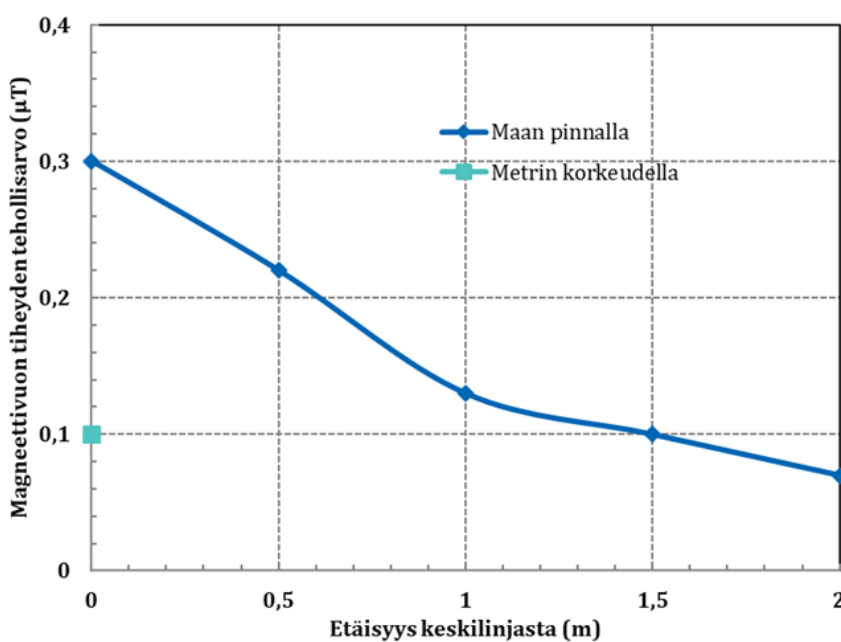
## 5.2 Maakaapelit

### 5.2.1 20 kV:n maakaapelit

20 kV:n maakaapelin magneettikenttä mitattiin Helsingissä jalkakäytävällä Koskelantien ja Kunnalliskodintien risteyksessä. Mittauspaikka esitetään kuvassa 14. Maakaapeli oli asennettu 70 cm:n syvyydelle. Metallivaipaiset vaihejohtimet kiertyvät toistensa ympäri. Mittaushetkellä kaapelin virta oli 20 A. Maan pinnalla mitattu suurin magneettivuon tiheys oli  $0,4 \mu\text{T}$ . Metrinen korkeudella maasta se pieneni  $0,1$  mikroteslaan. Etäisyyden funktiona maksimikohdasta maan pinnalla mitatut magneettivuon tiheydet esitetään kuvassa 15.



Kuva 94. 20 kV maakaapelin magneettikentän mittauspaikka.



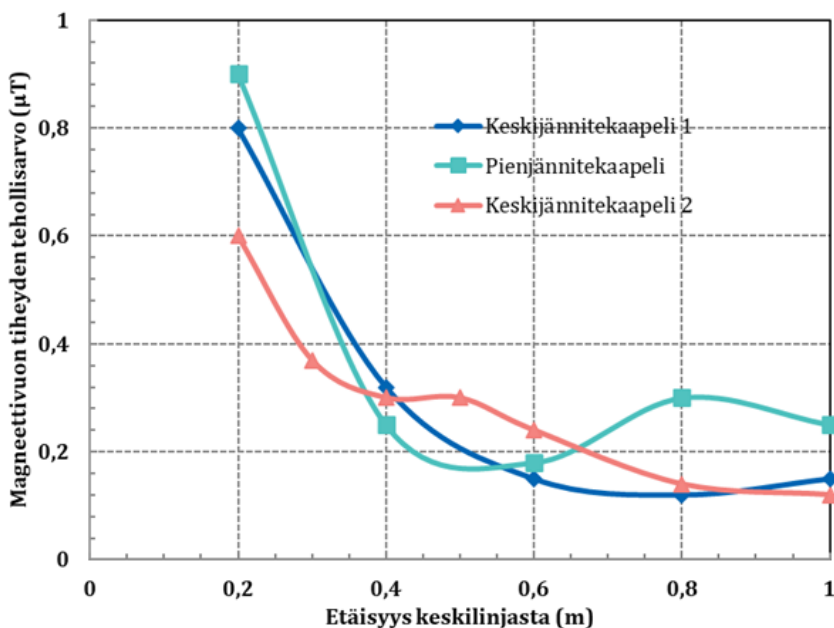
Kuva 15. 20 kV:n maakaapelin yläpuolella mitattu magneettivuon tiheys etäisyyden funktiona magneettikentän maksimikohdasta.



Pylvästä maahan menevän keskijännite- ja pienjännitemaakaapelin magneettikenttiä mitattiin Espoon Kalajärvellä. Keskijännitekaapelia esittää kuva 16. Lisäksi mitattiin Vantaan Kartanonkoskella pylvästä maahan ja läheiseen 20 kV/400 V:n muuntamoon menevän keskijännitekaapelin magneettikenttä. Magneettivuon tiheydet mitattiin pylväiden tyvestä metrin korkeudella maasta 0,2–1 metrin etäisyyksillä kaapeleista. Mittaustulokset esitetään kuvassa 17. Kuvasta nähdään, että keskijännite- ja pienjännitekaapelien aiheuttamat magneettikentät eivät eroa merkittävästi toisistaan. Suurin magneettivuon tiheys 20 cm etäisyydellä on pienempi kuin  $1 \mu\text{T}$ . Vuontiheys pienenee nopeasti noin  $0,3 \mu\text{T}$ :aan 40 cm:n etäisyydellä.



Kuva 16. Pylvästä maahan menevä 20 kV:n maakaapeli.



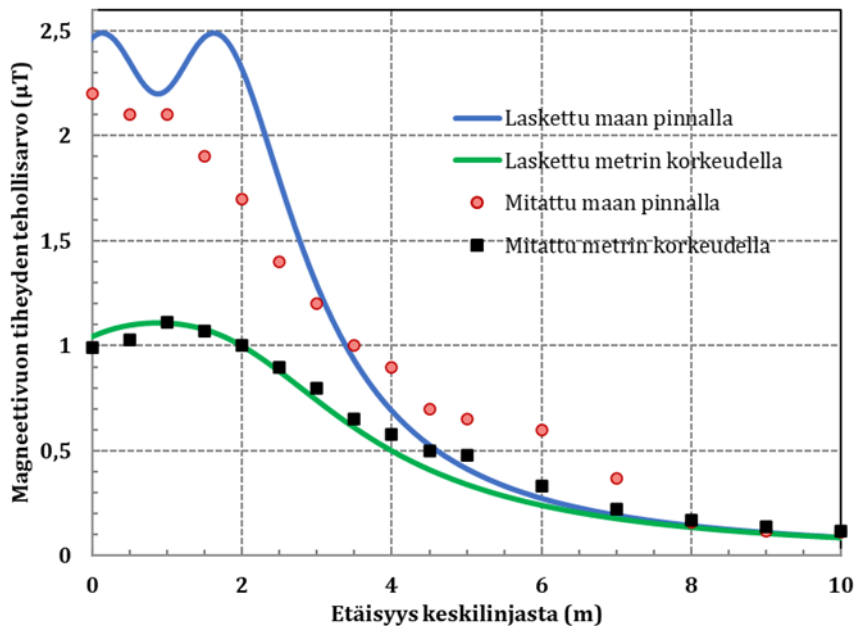
Kuva 107. Mitatut magneettivuon tiheydet etäisyyden funktiona 20 kV:n ja 400 V:n maakaapeleista.

### 5.2.2 110 kV:n maakaapelit

Keskijännitteisten maakaapelien magneettikenttien osoittauduttua pieniksi mitattiin myös 110 kV:n maakaapelien magneettikenttiä. Kuvassa 18 näkyvä mittauspaikka sijaitsi Helsingissä osoitteessa Katariina Saksilaisen katu 13. Kaksi maakaapelia oli asennettu noin 1,3 m:n syvyyteen noin metrin etäisyydelle toisistaan siten, että vaihejohtimet olivat kolmiomaisesti kiinni toisissaan. Mittaushetkellä kummassakin kaapelissa oli 150 A:n virta. Maan pinnalla ja metrin korkeudella maasta mitatut ja lasketut magneettivuon tiheydet esitetään kuvassa 19 etäisyyden funktiona kaapelien puolivälistä. Lasketuissa ja mitatuissa arvoissa on eroja, koska maakaapelien sijaintia ei tarkasti tiedetty. Lisäksi 5–7 metrin etäisyydellä oletetusta keskilinjasta oli pienjännitekaapeleita.



Kuva 1811. 110 kV:n maakaapelien magneettikentän mittauspaikka. Kaapelien arvioitu keskilinja on kuvan alareunassa, ja magneettivuon tiheys mitattiin keskilinjasta takana näkyvään rakennukseen päin.



Kuva 129. 110 kV:n maakaapeliin lasketut ja mitatut magneettivuon tiheydet etäisyyden funktiona kaapeliin keskilinjasta.

## 5.3 Muuntamot

### 5.3.1 Puistomuuntamot

Magneettivuon tiheydet mitattiin puistomuuntamoiden läheisyydestä. Ensin etsittiin magneettikentän maksimi muuntamon seinän läheltä kiertämällä muuntamon ympäri. Magneettivuon tiheys mitattiin etäisyyden funktiona maksimikohtasta metrin korkeudella maasta. Kolmesta puistomuuntamosta saatiin kirjattua myös mittausten aikaiset toisiovirrat eli pienjännitepuolen virrat. Muuntamon pienjännitepuolen virrat aiheuttavat suuremman magneettikentän kuin suurjännitepuolen virrat, sillä ne ovat lähes 50-kertaiset suurjännitepuolen virtoihin verrattuna.

Mitatut muuntamot esitetään kuvissa 20 a), b) ja c). Mitatut magneettivuon tiheydet esitetään kuvassa 21 ja mitatut altistussuhteet kuvassa 22 etäisyyksillä 0,06–3 m muuntamon seinästä. Koska pienjännitepuolen virrat sisälsivät perustajuisen 50 hertsin komponentin lisäksi merkittäviä harmonisia komponentteja, määritettiin myös altistussuhde. Sitä mitattaessa mittari huomioi kaikki taajuuskomponentit vaiheineen ja määrittää kokonaisaltistuksen prosentteina väestön toimenpidetasosta. Muuntamoiden nimellistehot, -virrat ja pienjännitepuolen virran keskiarvot, 20 cm:n etäisyydellä muuntamoiden seinästä mitatut altistussuhteet ja nimellisvirtoihin skaalatut altistussuhteet esitetään taulukossa 3. Siitä havaitaan, että altistussuhde on muuntamon maksimivirrallakin selvästi pienempi kuin väestön toimenpidetaso.



## 5 ILMAJOHTOJEN JA MAAKAPELIEN SÄHKÖ- JA MAGNEETTIENTTIEN MITTAUKSET JA LASKENTA

Taulukko 3, Muuntamoiden nimellistehot, virrat ja pienjännitepuolen virtojen keskiarvot mittausten aikana sekä nimellisvirtaan skaalattu altistussuhde prosentteina väestön toimenpidetasosta 20 cm:n etäisyydellä muuntamon seinästä.

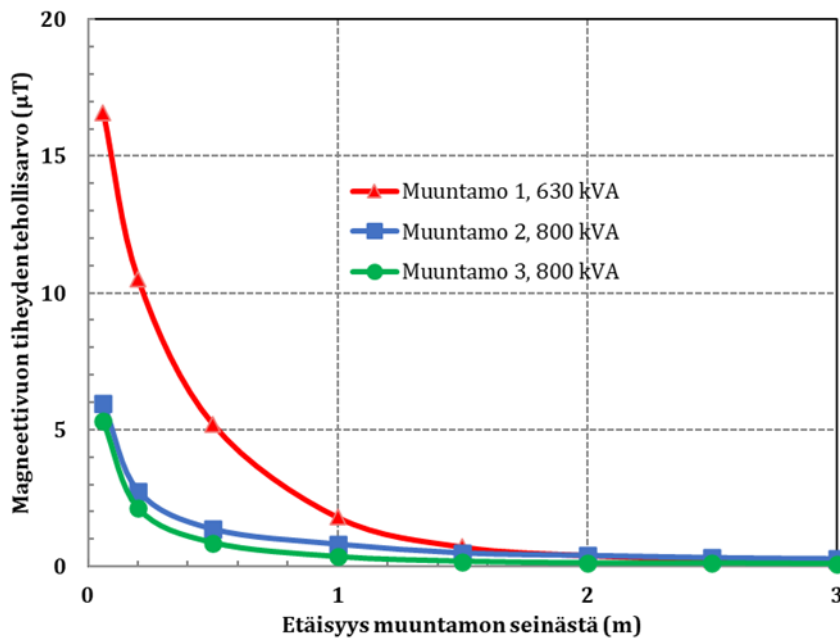
Muuntamo	Nimellisteho kVA	Nimellisvirta A	Virran <sup>a)</sup> keskiarvo A	Mitattu <sup>b)</sup> altistussuhde %	Altistussuhde <sup>b)</sup> nimellisvirralla %
1	630	909	165	4,7	26
2	800	1155	161	1,6	11
3	800	1155	124	1,2	11

a) mittausten aikana

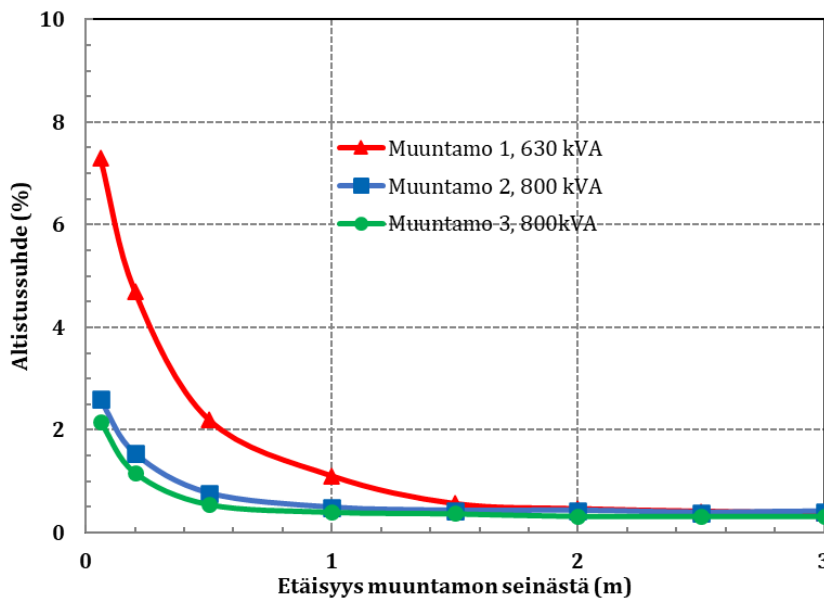
b) 20 cm:n etäisyydellä maksimikohdasta



Kuva 20. Puistomuuntamoita. a) Muuntamo 1, 630 kVA, b) Muuntamo 2, 800 kVA ja c) Muuntamo 3, 800 kVA.

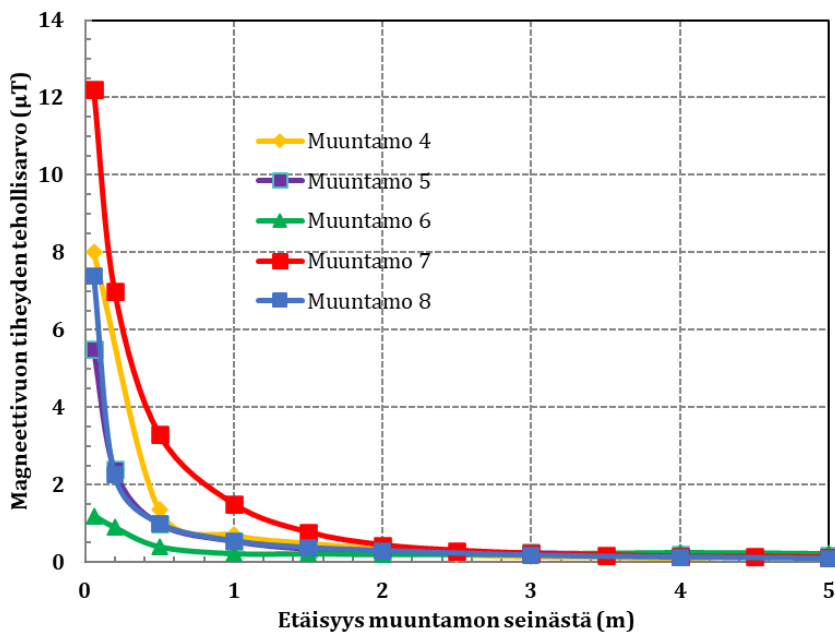


Kuva 131. Metrin korkeudella maasta mitattu magneettivuon tiheys etäisyyden funktiona muuntamoiden 1, 2 ja 3 seinästä.

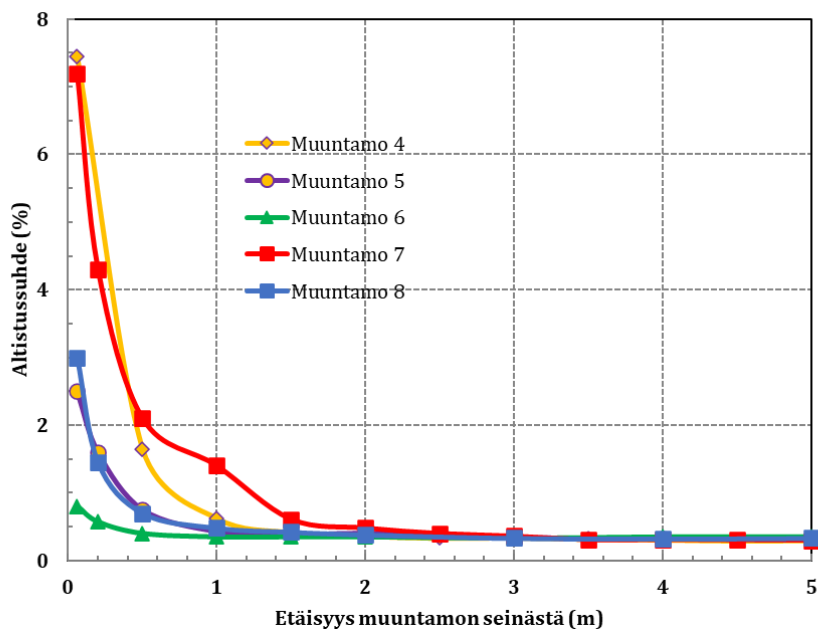


Kuva 142. Metrin korkeudella maasta mitattu altistussuhde prosentteina väestön toimenpidetasosta magneettikentälle etäisyyden funktiona muuntamon seinästä.

Magneettivuon tiheydet ja altistussuhteet mitattiin myös viidestä muusta puistomuuntamosta. Mitatut magneettivuon tiheydet metrin korkeudella maasta etäisyyden funktiona maksimikohdasta esitetään kuvassa 23 ja mitatut altistussuhteet kuvassa 24.



Kuva 23. Metrin korkeudella maasta mitattu magneettivuon tiheys etäisyyden funktiona muuntamon seinästä.



Kuva 24. Metrin korkeudella maasta mitattu altistussuhde prosentteina väestön toimenpidetasosta magneettikentälle etäisyyden funktiona muuntamon seinästä.

### 5.3.2 Pylväsmuuntamo

Magneettivuon tiheys mitattiin kuvassa 25 näkyvän 20 kV/400 V:n pylväsmuuntamon alapuolelta Espoon Kalajärvellä. Metrin korkeudella maasta mitattu magneettivuon tiheys oli suurimmillaan 0,1  $\mu\text{T}$ .



Kuva 25. 20 kV/400 V:n pylväsmuuntamo.

### 5.3.3 Kiinteistömuuntamot

Kiinteistömuuntamot ovat rakennusten sisällä, kellarissa tai ensimmäisessä kerroksessa, sijaitsevia 20 kV/400 V:n muuntamoita. Niitä on kaupunkien ja taajamien keskustoissa, joissa ei ole tilaa muun tyyppisille muuntamoille. Suomessa arvioidaan olevan noin 2 800 asuinhuoneistoa kiinteistömuuntamon yläpuolella tai vieressä. Lähellä sijaitseva kiinteistömuuntamo aiheuttaa väestön suurimman altistuksen sähkön jakeluverkon magneettikentälle.

Tässä projektissa ei ollut mahdollista mitata kiinteistömuuntamoiden aiheuttamia magneettikenttiä. Se olisi vaatinut pääsyn muuntamoiden yläpuolella tai vieressä sijaitseviin asuinhuoneistoihin. STUK on tehnyt runsaat 20 vuotta sitten asukkaiden aloitteesta muutamia magneettikentän mittauksia kiinteistömuuntamon yläpuolella sijaitsevissa asuinhuoneistoissa. Mittaustulokset olivat päiväsaikaan 10-90  $\mu\text{T}$  ja yöaikaan mitattu maksimi oli noin 500  $\mu\text{T}$ . Viimeisin tulos oli mitattu 1970-luvun lopulla asennetun muuntamon yläpuolelta. Muuntamossa oli virtakiskot kaukana toisistaan ja lähellä kellaritilan kattoa. STUKissa 2010-luvulla tehdyn selvityksen mukaan tämän tyyppiset muuntamot ovat vähentyneet. Kiskot on korvattu kaapeleilla, jotka asennetaan lähemmäksi toisiaan ja siten magneettikenttä pienenee. Muuntamoita saneerattaessa virtakaapelit asennetaan lattialle, jolloin magneettikentät ovat pieniä myös yläpuolella sijaitsevassa asuinhuoneistossa.

## 6 Yhteenveto

Keskijännitteisten ilmajohtojen alapuolella tehtyjen sähkö- ja magneettikentän mittausten mukaan sähkökentän voimakkuus oli pienempi kuin 0,1 kV/m ja magneettivuon tiheys pienempi kuin 0,1  $\mu\text{T}$ . Sähkökentän laskenta ja mittaus antoivat hyvin yhtäpitäviä tuloksia. Sitä vastoin magneettivuon tiheydet olivat mitattujen johtojen alla niin pieniä, että käytetyn mittarin suuri epälineaarisuus näin pienillä vuontiheyksillä ei mahdollistanut luotettavaa vertailua. Laskennan perusteella voidaan kuitenkin arvioida, että magneettivuon tiheydet olivat pienempiä kuin 0,1  $\mu\text{T}$ . Alle 0,5  $\mu\text{T}$ :n magneettivuon tiheyksien mittauksiin on parempi käyttää Nardan ELT-400-mittaria, joka on Wavecontrol SMP2 -mittaria lineaarisempi pienillä lukemilla. Jälkimmäistä mittaria käytettiin, koska sillä voitiin mitata sekä sähkö- että magneettikenttä.

Sähkökentän mittaustulokset vastaavat aiempien mittausten tuloksia, mutta magneettikentän mittaustulokset olivat paljon pienempiä. Projektissa ei löydetty ilmajohtoja, joissa olisi ollut riittävän suuret virrat 0,2  $\mu\text{T}$ :n magneettivuon tiheyden yllittäviin lukemiin. Suurempia magneettivuon tiheyksiä olisi mahdollista mitata 110 kV/20 kV:n sähköasemalta lähtevien 20 kV:n ilmajohtojen alapuolella. Pääkaupunkiseudulla näiltä sähköasemilta lähtevät johdot on toteutettu maakaapeleilla. Lisäksi lähtöjä on esimerkiksi Vantaan sähköasemilla noin 20 kpl, joten virta jakautuu useisiin maakaapeleihin.

Keskijännitteisistä maakaapeleista mitatut magneettivuon tiheydet olivat myös pieniä ja verrattavissa pienjännitemaakaapelien vuontiheyksiin. Magneettivuon tiheys oli pienempi kuin 0,4  $\mu\text{T}$ , kun etäisyys kaapelista oli vähintään puoli metriä.

Puistomuuntamoiden läheisyydestä mitattiin tämän projektin suurimmat magneettivuon tiheydet. Magneettikentät pienenevät nopeasti muuntamon seinästä kauemmaksi mentäessä. Mittausten mukaan altistussuhde 20 cm:n etäisyydellä muuntamon seinästä on muuntamon maksimivirrallakin selvästi pienempi kuin väestön toimenpidetaso. Muuntamoiden magneettikentissä oli merkittäviä eroja, mikä johtui pienjännitevirtajohtojen erilaisesta sijainnista muuntamorakennuksen sisällä. Mitattu magneettivuon tiheys ylitti 0,4  $\mu\text{T}$  enimmillään noin 2,5 m:n etäisyydellä muuntamon seinästä.

# Viiteluettelo

IEC 62110:2009, Edition 1.0. Electric and magnetic field levels generated by AC power systems – Measurement procedures with regard to public exposure. International Electrotechnical Commission, 2009.

Korpinen L. Yleisön altistuminen pientaajuisille sähkö- ja magneettikentille Suomessa. Sosiaali- ja terveysministeriön oppaita 2003:12. Sosiaali- ja terveysministeriö. Helsinki: Sosiaali- ja terveysministeriö; 2003.

<https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/70134>

Puranen L. Voimajohtojen sähkökentät. STUK-TR 25. Helsinki: Säteilyturvakeskus; 2017.

<https://www.julkari.fi/handle/10024/134763>

Sosiaali- ja terveysministeriön asetus (1045/2018) ionisoimattoman säteilyn väestölle aiheuttaman altistuksen rajoittamisesta.

<https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2018/20181045>

Sähköverkkotoiminnan tekniset tunnusluvut 2019 (Excel). Energiavirasto.

<https://energiavirasto.fi/verkkotoiminnan-julkaisut> Luettu 12.5.2021