

# Kartoitus pientaajuisista sähkökentistä elin- ja työympäristössä



[Leena Korpinen](#), Jari Isokorpi, Tommi Keikko  
[Tampereen teknillinen korkeakoulu](#)

**Tutkimus on tehty Teknologian kehittämiskeskuksen tuella**

Julkaistu 31.12.1998

[Palaute](#)

1. JOHDANTO .....	3
2. SÄHKÖKENTÄT .....	3
2.1 Sähkökenttälähteitä .....	4
2.2 Sähkökenttien mittaaminen .....	6
2.3 Sähkökenttiin liittyvät määräykset ja suositukset .....	8
3. SÄHKÖKENTTÄMITTAUSTEN TOTEUTUS .....	8
3.1 Sähkökenttien mittaukset 400 kV johdoilla .....	8
3.2 Sähkökenttien mittaukset 400 kV ja 110 kV sähköasemilla .....	10
3.3 Mittausvälineet .....	12
3.4 Mittausten toteutus käytännössä .....	12
4. MITTAUSTULOKSET .....	13
4.1 Tulokset 400 kV voimajohdoille .....	13
4.2 Tulokset 400 kV sähköasemalta .....	19
4.3 Tulokset 110 kV sähköasemalta .....	22
5. 400 KV JOHTOJEN MITTAUSTULOSTEN VERTAILU LASKENTAAN .....	25
5.1 Laskentamenetelmä .....	25
5.2 Laskentatulokset ja vertailu mittauksiin .....	27
6. POHDINTA .....	28
7. YHTEENVETO .....	30
Kirjallisuusviitteet .....	31

# 1. JOHDANTO

Pientaajuisten sähkö- ja magneettikenttien mahdollisista terveysvaikutuksista on käyty laajaa keskustelua jo vuosien ajan. Painopiste on viime vuosina ollut magneettikenttien puolella, koska niiden on ajateltu olevan keskeisempi altistuslähde. Tämän seurauksena magneettikenttien mittaamista on tehty Suomessakin varsin paljon, kun taas sähkökenttien mittaaminen on jäänyt pienemmälle huomiolle.

Tampereen teknillisessä korkeakoulussa (TTKK) on jo useiden vuosien ajan tutkittu sähkö- ja magneettikenttiä osana elin- ja työympäristöä. Tutkimukset ovat keskittyneet magneettikenttien mittaamiseen, laskentaan ja tekniseen vähentämiseen. Kehittäminen on suunnattu erityisesti käytännön ongelmien ratkaisemiseen. Sähkökenttien tutkimus on ollut suppeampaa kuin magneettikenttien tutkimus. Siitä huolimatta TTKK:ssa on kehitetty muun muassa sovellus siirto- ja jakelujohtojen sähkökenttien laskentaan.

Parhailtaan valmistellaan uusia altistusrajoja sähkö- ja magneettikentille sekä kansallisella että kansainvälisellä tasolla. Euroopan Unionin puitteissa tehdään komission suositusta, joka pohjautuu ICNIRP:n (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) suosituksiin /1, 5/. Enimmäisarvo työntekijöiden sähkökenttäaltistukselle on 10 kV/m ja magneettikenttäaltistukselle 500  $\mu$ T 50 Hz taajuudella /5/. Koko väestölle enimmäisarvot ovat 5 kV/m ja 100  $\mu$ T /5/. Suomessa Säteilyturvakeskus valmistele yhteistyössä Työterveyslaitoksen kanssa sosiaali- ja terveysministeriölle (STM) uutta STM:n päätöstä ionisoimattoman säteilyn enimmäisarvoista. Tulevassa päätöksessä mukana ovat enimmäisarvot pientaajuisille sähkö- ja magneettikentille perustuen ICNIRP:n suosituksiin /8/. Päätös sisältää myös sähkökentät, vaikka niitä ei ole viime vuosina laajemmin tutkittu.

Koska sähkökentille ollaan valmistele massassa enimmäisarvoja, syntyi tarve selvittää valmistelun taustaksi elin- ja työympäristössä esiintyviä sähkökenttiä. Tältä pohjalta käynnistettiin TEKESin rahoituksella tutkimushanke sähkökenttien kartoittamiseksi. Tutkimus toteutettiin TTKK:n Sähkövoimatekniikan laitoksella 1.3.-31.12.1998. Tutkimuksessa tehtiin yhteistyötä Suomen Kantaverkko Oyj:n, Säteilyturvakeskuksen, Tampereen aluetyöterveyslaitoksen ja Tampereen kaupungin sähkölaitoksen kanssa.

Tutkimuksen tavoitteena oli kartoittaa pientaajuisten sähkökenttien esiintyminen elin- ja työympäristössä. Kartoitus painottui sähkönsiirtojärjestelmissä esiintyviin kenttiin, koska niissä oli odotettavissa suurimmat arvot korkeiden jännitetasojen vuoksi. Tarkoituksena oli saada selville, miten paljon enimmäisarvot mahdollisesti voivat ylittyä ja miten laajasti.

Tähän raporttiin on koottu mittaustulokset 400 kV voimajohdoilta ja sähköasemilta. Saatuja tuloksia on verrattu ICNIRP:n suositteluihin enimmäisarvoihin. Lisäksi mitattuja tuloksia on verrattu esimerkinomaisesti laskettuihin tuloksiin.

## 2. SÄHKÖKENTÄT

Sähkövaraus synnyttää ympärilleen sähkökentän. Sähkökentän voimakkuus  $E$  (V/m) määritellään kentän positiiviseen varaukseen  $Q$  kohdistaman voiman  $F$  ja varauksen  $Q$  suhteena. Sähkökentän suunta on se suunta, johon kentässä oleva positiivinen varaus pyrkii liikkumaan. /10/

Kahden varatun toisiaan lähellä olevan levyn välissä vallitsee homogeeninen sähkökenttä, jonka voimakkuus voidaan laskea jakamalla levyjen välinen jännite-ero niiden välisellä etäisyydellä. Sähkökenttää havainnollistamaan käytetään usein kenttäviivoja. Niiden suunta kuvaa kentän suuntaa ja niiden tiheys suhteellista kentän voimakkuutta. Esimerkiksi toisistaan 1 metrin etäisyydellä olevien tasomaisten levyjen välillä vallitsee homogeeninen sähkökenttä. Jos levyjen jännite-ero on 1000 V, sähkökentän voimakkuus on 1 kV/m. /10/

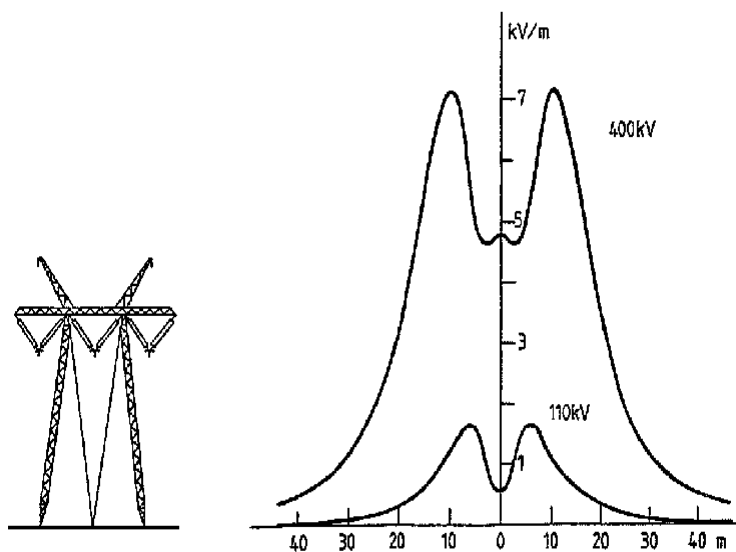
## 2.1 Sähkökenttälähteitä

Ihmisten kehittämän tekniikan aiheuttamien sähkökenttien lisäksi myös luonnossa esiintyy sähkökenttiä. Sähkökenttien voimakkuudet vaihtelevat sääolosuhteiden mukaan ollen esimerkiksi kauniilla ilmalla 100-200 V/m. Nämä ovat kuitenkin staattisia kenttiä /9/. Useimpien teknisten sähköjärjestelmien kentät ovat 50 Hz sähkökenttiä, joihin tässä raportissa keskitytään.

### Sähkönsiirto ja -jakelu

Suomessa sähköenergian siirto toteutetaan 110, 220 ja 400 kV kantaverkolla. Kantaverkon vaihtovirtajohdot ovat eri tyyppisten pylväsrakenteiden varaan asennettuja ilmajohtoja. Tavallisin voimajohdon (110-400 kV) pylvästyyppi on harustettu portaalipylvä /10, 3/.

Kuvassa 1 on laskettu portaalipylväsrakenteisten 400 kV ja 110 kV voimajohtojen sähkökentän voimakkuudet maanpinnalla läheisyydessä.

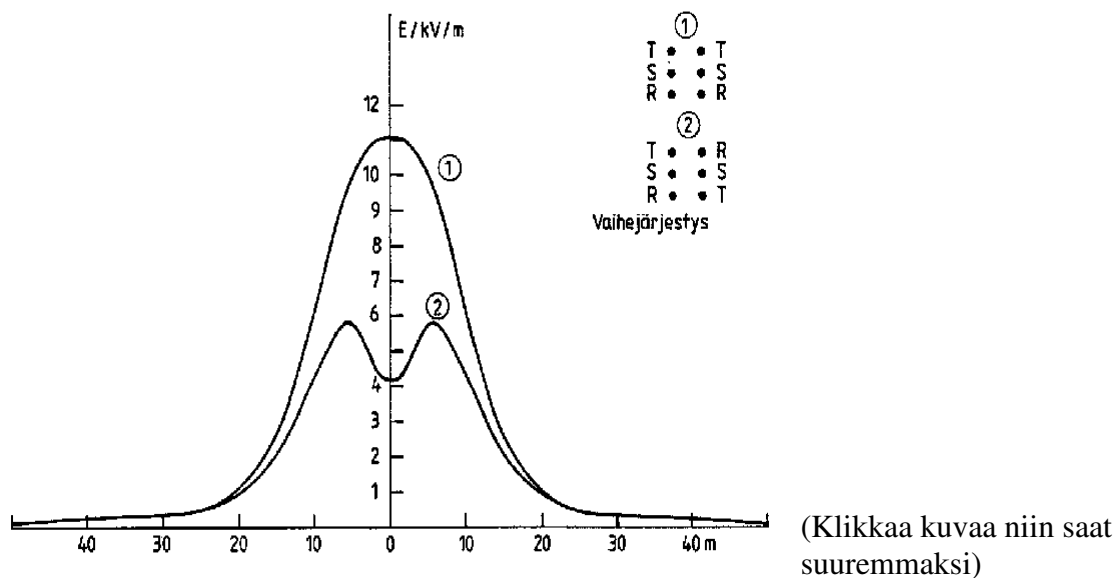


(Klikkaa kuvaa niin saat suuremmaksi)

Kuva 1. Sähkökentän voimakkuus maan pinnalla 400 kV ja 110 kV portaalipylväsrakenteisten voimajohtojen läheisyydessä. 400 kV johdolla vaiheväli on 9 m ja johdinten korkeus maasta 10 m ja 110 kV johdolla on vaiheväli 3,5 m ja korkeus 8 m. /3/

Kuvassa sähkökentän voimakkuus on 400 kV johdolla suurimmillaan alle 8 kV/m ja 110 kV johdolla suurimmillaan alle 2 kV/m.

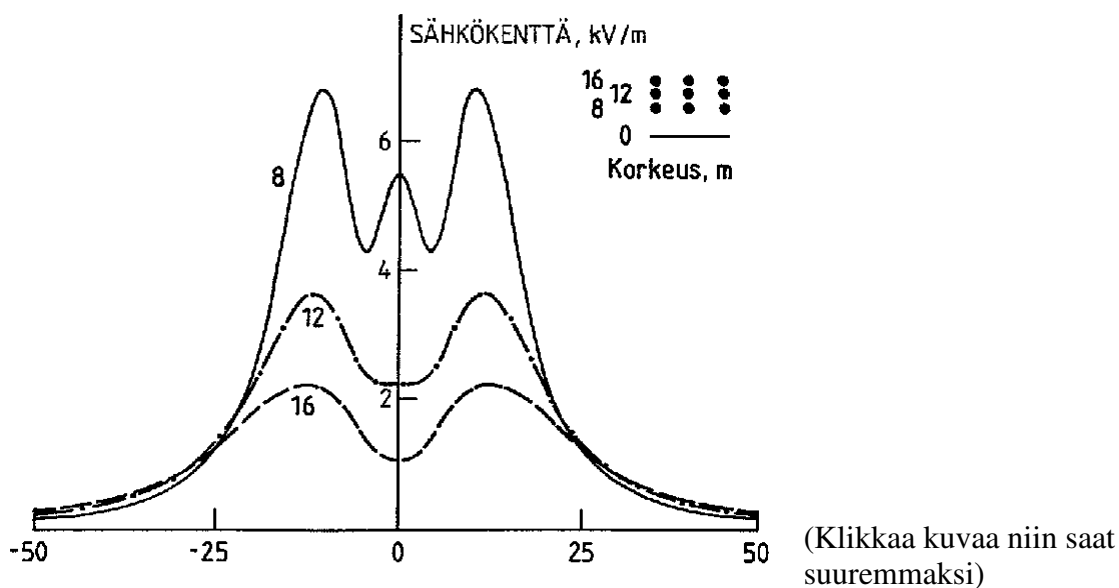
Kaksoisjohdon sähkökentän voimakkuuteen vaikuttaa vaihejohtimien järjestys toisiinsa nähden. Kuvassa 2 on kahden 400 kV kaksoisjohdon aiheuttamia laskettuja sähkökenttiä erilaisilla vaihejärjestyksillä.



Kuva 2. Lasketut sähkökentät tyypillisimpien 400 kV kaksoisjohtorakenteiden läheisyydessä. Johdolla 1 vaihejärjestys on peilisymmetrinen ja johdolla 2 pistesymmetrinen. Johtinten väli vaaka suunnassa on 8,5 m ja pystysuunnassa 9 m. Alimpien johtimien korkeus maasta on 10 m. /13/

Kuvasta nähdään, että pistesymmetrisellä vaihejärjestyksellä sähkökentät ovat lähellä johtoa selvästi pienemmät.

Sähkökentän voimakkuus riippuu myös tarkastelu etäisyydestä. Kentät ovat voimakkaimmillaan johtojen pylsävälin keskellä, missä riippuma on suurin. Sähkökentän voimakkuuteen vaikuttaa myös johdon ripustuskorkeus. Kuvassa 3 on laskettu esimerkki siitä, miten ripustuskorkeus vaikuttaa portaalijohdon aiheuttamaan sähkökenttään /11/.



Kuva 3. Sähkökentän voimakkuus 400 kV johdoilla maanpinnalla eri johdinkorkeuksilla. Johtinten vaiheväli on 10 m. /11/

400 kV sähköasemilla sähkökentät ovat alle 25 kV/m. Sähkökentät ovat voimajohtojen kenttiä korkeampia, koska sähköasemien kytkinkentillä vaihejohtimet ovat lähempänä maanpintaa. /10/

20 kV johdon alla sähkökentän voimakkuus on maanpinnalla tasoa 0,1 kV/m. Edelleen pienempien jännitetasojen eli pienjännitejärjestelmien esimerkiksi kotitalouksien sähköverkon aiheuttamat taustakentät ovat tasoa 0,01 kV/m /9, 10, 12/. Vertailun vuoksi on taulukkoon 1 kerätty mittaustuloksia erilaisten lähteiden tuottamista sähkökentistä /10/.

Lähde	sähkökentän voimakkuus (kV/m)
400 kV kytkinkentällä	1 - 25
400 kV voimajohdon alla	1 - 10
400 kV voimajohdon sivulla (20 - 30 m)	0,5 - 2
400 kV voimajohdon sivulla (60 m)	0,05 - 0,2
110 kV kytkinkentällä	0,1 - 3
110 kV voimajohdon alla	0,2 - 3
110 kV voimajohdon sivulla (20 - 30 m)	0,05 - 0,3
110 kV voimajohdon sivulla (60 m)	0,01 - 0,1
20 kV avojohdon alla	0,02 - 0,1
20 kV avojohdon sivulla 10 m	0,02 - 0,05
muuntamon välittömässä läheisyydessä	alle 0,1
kodin sähkölaitteet, käyttöetäisyydellä	0,01 - 0,1
näyttöpäätteet työskentelyetäisyydellä	0,01 - 0,2
asunnoissa (keskimääräinen taustakenttä)	noin 0,01

## 2.2 Sähkökenttien mittaaminen

Pientaajuisten sähkökenttien mittaamiseen on olemassa joitakin eri menetelmiä ja standardeja lähinnä kentänaiheuttajien mukaan. Eniten on tutkittu voimajohtojen ja sähkölaitteiden aiheuttamien, sekä työ- ja elinympäristöissä esiintyvien kenttien mittaamista.

Pientaajuisten sähkökenttien mittaamiseen on olemassa IEC-standardi, IEC 60833. Tämä standardi sisältää termien määrittelyn, mittarien toimintaperiaatteiden kuvauksen, mittarien kalibroinnin, menetelmän sähkökentän mittauksiin ja mittauksien virhelähteet sekä mittausepävarmuuden rajat. Standardissa on mittausmenetelmän kuvaus erikseen kolmivaiheisten voimajohtojen ja muiden lähteiden mittaamiseen. Muiden lähteiden menetelmää voidaan käyttää esimerkiksi mitattaessa sähköasemalla. /6/

Voimajohtojen kenttien mittaamisesta on annettu myös standardi IEEE Std 644-1994 /7/. Se sisältää sekä sähkö- että magneetikenttien mittaamisen. Standardin sisältö vastaa sähkökenttien mittaamisen perusteiden osalta pitkälti IEC:n standardia /6/. Tässä standardissa annetaan kuitenkin tarkemmat ohjeet siitä, miten voimajohtojen kentät tulee mitata. Tämän standardin mukaan voimajohtomittauksissa kentänvoimakkuudet mitataan johtimiin nähden kohtisuorassa suunnassa yhden metrin korkeudella maasta pylväsvälin keskikohdalla. Keskimmäisen ja toisen uloimman johtimen välillä mittauksia tehdään viidestä pisteestä tasavälein. Lisäksi kentät mitataan uloimmasta

johtimesta pois päin ainakin viidestä eri pisteestä tasavälein aina 30 m asti. Johtimien suunnassa mitataan lähtien pylväsvälin keskikohdalta pisteestä, missä kentänvoimakkuus saa suurimman arvonsa. Mittaukset tehdään ainakin viidessä eri pisteessä samalla etäisyydellä johdosta tasaisin välein keskipisteen kummaltakin puolelta. /7/

IEEE-standardin /7/ mukaan sähkökenttää mitattaessa on mittaajan oltava vähintään 2,5 m etäisyydellä mittauspisteestä mielellään heikoimman kentänvoimakkuuden suunnassa, jottei hän häiritse mitattavan kentän jakautumista. Lisäksi mitta-anturin etäisyys irrallisista esineistä on hyvä olla vähintään kolme kertaa esineen korkeus. Joillakin mittareilla mittausta on mahdollista suorittaa käyttämällä erillistä koaksiaalikaapelilla mittalaitteeseen kytkettävää näyttöyksikköä. /7/

Ennen mittausten lopettamista on suotavaa tehdä useita toistomittauksia alkuperäisten mittauspisteiden väliltä, jotta nähdään viittauksia mahdollisten johdinkorkeuden, kuorman ja virran muutosten aiheuttamista vaikutuksista kentänvoimakkuuksissa. /7/

Standardin /7/ mukaan mittauspöytäkirjaan merkitään taustatietoina lämpötila, ilman kosteus ja maalaji, sekä voimajohdon parametrejä kuten jännite, virta, johdinten halkaisija ja niiden paikat toisiinsa ja maahan nähden. Tämän lisäksi merkitään kentänvoimakkuuksien arvot eri pisteissä sekä pisteiden paikat voimajohtoon nähden, päiväys ja mittaushetkien kellonajat, jotta mittausten vertailu johdon jännitteestä ja kuormasta myöhemmin johdonomistajalta saatavien tietojen kanssa on mahdollista. /7/

Standardit /6, 7/ suosittelevat, että sähkökenttämittausten kokonaisuvarmuuden tulee olla alle  $\pm 10\%$  / 6, 7/. Kokonaisuvarmuus saadaan laskemalla neliöjuuri yksittäisten epävarmuuksien neliöiden summasta. Suurimmat yksittäiset virhelähteet ovat mittarin suuntaus, lämpötilan, ilmankosteuden ja mittaajan vaikutukset (esimerkiksi anturin ja kentänaiheuttajan välinen vuorovaikutus, joskus jopa vuotovirta mittarin kädensijan kautta). Mittausten aikana mittaajan tulee olla selvillä näistä lähteistä, jotta hän voi tietoisesti pyrkiä eliminoimaan niitä kaikin käytettävissä olevin keinoin. Lämpötilan nousu voi aiheuttaa virheen mittaustulokseen. Jos kalibrointilämpötila eroaa merkittävästi mittaustilasta, kannattaa ero merkitä ylös. Mittarin lämpötilariippuvuus voidaan määrittää ja siten suorittaa tarvittavat korjaukset kenttien arvoihin. Koska sähkö- ja magneettikentät esiintyvät usein samanaikaisesti, sähkökenttämittari ei saa reagoida magneettikenttiin ja päinvastoin. /6/

### *Sähkökenttämittarit*

Pientaajuisten sähkökenttien mittauksiin on kaupallisesti saatavilla useita eri mittareita /4/. Sähkökenttämittarit koostuvat periaatteessa kahdesta osasta: anturista ja ilmaisimesta. Ilmaisimissa sisältää signaalinkäsittelypiirin ja analogisen tai digitaalisen näytön. Sähkökenttiä voidaan mitata kolmella eri anturityypillä: maan referenssikentästä riippumattomalla, maan referenssikenttään kytkettyllä tai elektro-optisella /6/. Maan referenssikentästä riippumaton (free-body) mittari on yleisin mittarityyppi. Tällainen mittari seuraa jännitettä, virtaa tai varausta kahden maan referenssikentästä riippumattoman johtavan elektrodin välillä. Varaus levyihin aiheutuu ulkoisesta sähkökentästä. Levyjen varausten poiketessa toisistaan syntyy levyjen välille jännite. Kun levyt ovat yhteydessä toisiinsa, niiden välille syntyy edelleen sähkövirta. Tällaisessa mittarissa ilmaisimissa on yleensä anturiin kiinteästi liitettyä ja anturia kannatetaan sähkökentässä eristyskahvan tai dielektrisen kannattimen avulla. /6/

Sähkökenttämittareissa voidaan käyttää yhtä anturia, joka suunnataan mittaamaan esimerkiksi kentän maksimiarvoa. Toinen vaihtoehto on käyttää kolmeakselista anturia mittaamaan

kentänvoimakkuuden resultanttiarvoa, joka määritellään x-, y- ja z-komponenttien avulla [/7/](#). Kentänvoimakkuuden maksimiarvo on suurin arvo, jonka kentänvoimakkuuden vektori voi saavuttaa tietyssä pisteessä. Tämä arvo voidaan mitata kääntelemällä yksiakselista mitta-anturia. Yleensä kolmeakselisella anturilla mitattu resultanttikentän voimakkuus on suurempi kuin yksiakselisella anturilla saatu kentän maksimiarvo. Maksimissaan resultantti on 1,41-kertainen. [/10/](#)

Toisaalta on myös olemassa etäluettavia laitteita, joissa ilmaisimien koostuu kahdesta osasta. Anturiin liitetty osa muuttaa indusoituneen virtasignaalin vastaavaksi optiseksi signaaliksi. Edelliseen optisen kaapelin välityksellä kytketty toinen osa muuttaa signaalin muotoon, josta sähkökentän voimakkuus on määritettävissä. Tämän tyyppiset laitteet ovat yleensä kannettavia ja paristokäyttöisiä. [/6/](#) Näin ollen ne ovat sopivia kenttäkäyttöön. Tässä tutkimuksessa käytettiinkin juuri tämän tyyppistä sähkökenttämittaria.

## 2.3 Sähkökenttiin liittyvät määräykset ja suositukset

International Commission on Non-Ionizing Radiation Protectionin (ICNIRP) on julkaissut uuden suosituksen 1998 Health Physics -lehdessä [/5/](#). ICNIRP:n suosituksessa enimmäisarvot virrantiheyden tehollisarvolle 50 Hz taajuudella ovat työntekijöille  $10 \text{ mA/m}^2$  ja koko väestölle  $2 \text{ mA/m}^2$ . Virrantiheysrajan perusteella johdetut enimmäisarvot 50 Hz:n sähkökentän voimakkuudelle ovat työntekijöille 10 kV/m ja koko väestölle 5 kV/m. Enimmäisarvot koskevat hetkellistä altistumista. [/5/](#)

Myös Euroopan unionin neuvostossa on käsiteltävänä komission ehdotus väestöön kohdistuvien sähkö- ja magneetikenttien rajoittamisesta. Ehdotus seuraa ICNIRP:n uusia ohjearvoja. [/8/](#)

Suomessa Säteilyturvakeskus valmistele yhteistyössä Työterveyslaitoksen kanssa esitystä ionisoimattoman säteilyn enimmäisarvoja koskevan sosiaali- ja terveysministeriön päätöksen (STMP 1474/91) uudistamiseksi. Sähkökenttiä koskevia kohtia täydennetään kattamaan myös pientaajuiset sähkökentät. Asia on tullut ajankohtaiseksi uusien kansainvälisten suositusten myötä. Uusien kotimaisten sähkökenttiä koskevien ehdotusten perustana on ICNIRP:n suositus. [/8/](#)

# 3. SÄHKÖKENTTÄMITTAUSTEN TOTEUTUS

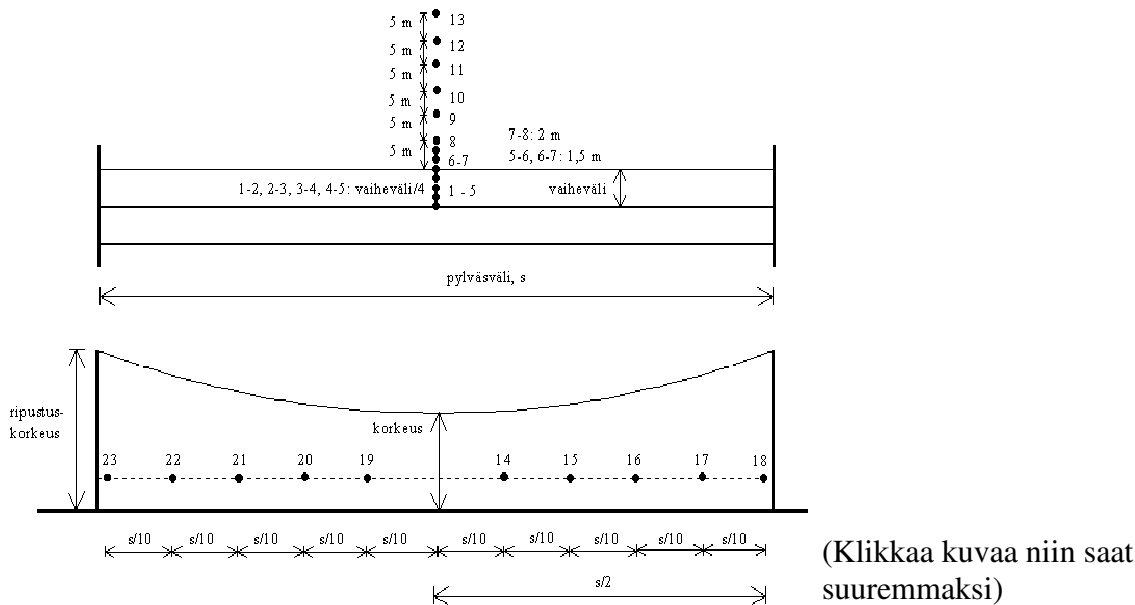
Tässä tutkimuksessa mittauskohteet valittiin yhteistyössä alan yritysten kanssa (Suomen Kantaverkko Oyj ja Tampereen kaupungin sähkölaitos). Mittauskohteiksi Suomen Kantaverkko Oyj:n kanssa käytyjen neuvottelujen perusteella valittiin 400 kV voimajohdoilta 25 pylväsväliä, joista neljä edustivat erikoispaikkoja. Lisäksi sovittiin mitattavaksi 400 kV (Suomen Kantaverkko Oyj:ltä) ja 110 kV (Tampereen kaupungin sähkölaitokselta) sähköasemat. Pylväsvälien valinnassa kriteereinä oli odotettavissa oleva suuri sähkökentän arvo ja sijainti paikoissa, joihin oli hyvät kulkuyhteydet Tampereelta.

## 3.1 Sähkökenttien mittaukset 400 kV johdoilla

### *Perusmittaukset*

Johtojen sähkökenttien mittaamisessa käytettiin sovelletusti IEEE 644-1994 standardia [/7/](#). Standardin edellyttämään mittausprotokollaan lisättiin kaksi mittauspistettä. Pylväsvälillä sähkökentän voimakkuus mitattiin normaalisti 23 pisteessä. Mittauspisteiden sijainti on esitetty kuvassa 4.





Kuva 4. Sähkökentän voimakkuuden mittauspisteet pylväsvälillä. Pylväsvälin pituus on  $s$ .

Mittauspiste 1 oli pylväsvälin keskipisteessä johdon keskilinjalla. Pisteet 2-13 olivat pisteestä 1 johtoa vastaan kohtisuoralla linjalla johdosta poispäin. Pisteet 14-23 olivat johdon suuntaisella linjalla. Johdon suuntaisella linjalla oli 5 pistettä keskipisteestä molempiin suuntiin.

Mittaukset suoritettiin ensin johtoa vastaan kohtisuoralla linjalla. Johdon keskilinjasta ja uloimman vaihejohtimen välillä suoritettiin viisi mittausta tasavälein. Pisteet 6 ja 7 lisättiin IEEE:n standardin mukaiseen mittausprotokollaan, koska voimajohdon sähkökentän oletettiin olevan suurimmillaan hieman kauempana uloimmasta vaihejohtimesta. Muuten mittauspisteiden väli tässä suunnassa (pisteet 8-13 (kuva 4)) oli 5 m. Mittauskorkeus oli 1 m maanpinnasta.

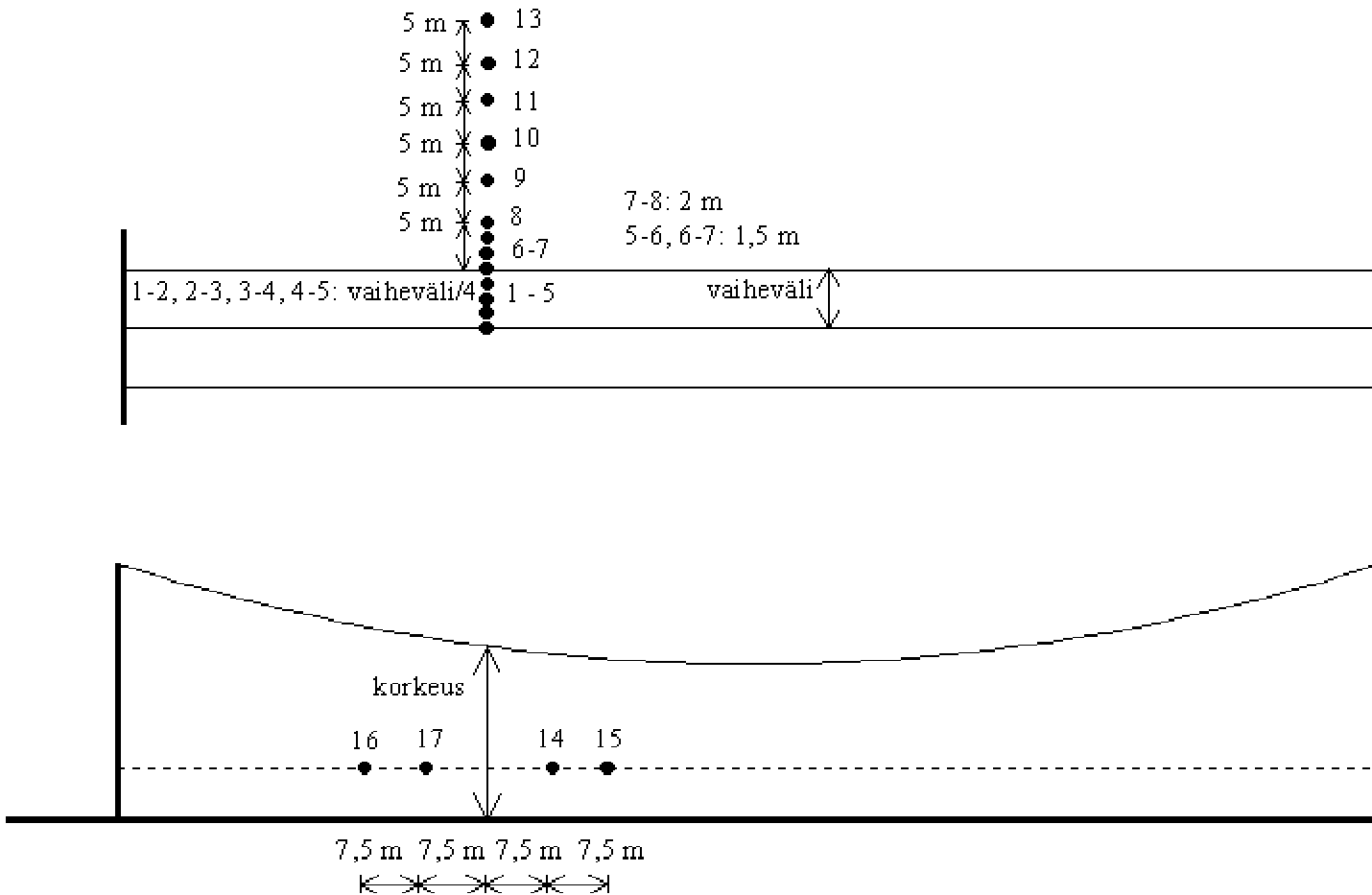
Mikäli johdon rinnalla kulki toinen johto mittaussuunnassa, jatkettiin mittausta normaalia pidemmälle. Mittaukseen tuli näin ollen lisäpisteitä. Mittausta jatkettiin 5 m välein 30 m asti toisen johdon uloimmasta vaihejohtimesta määritettynä.

Johdon suuntaisesti mittaukset tehtiin sillä etäisyydellä (sivusuunnassa) johdon keskilinjasta, jolla sähkökentän voimakkuus oli suurin kohtisuoraan tehtyjen mittausten perusteella. Tämä piste mitattiin vain kerran. Yleensä kenttä on suurin uloimman johtimen läheisyydessä. Johdon suuntaisesti tehtiin viisi mittausta tasavälein pylväsvälin keskeltä pylvälle molempiin suuntiin.

Mittauspöytäkirjaan merkittiin mittausten aloitus- ja lopetusajat, ilman lämpötila ja kosteus, johdon päiden jännitteet ja tehot mittausten alussa ja lopussa ja mitatut sähkökentän voimakkuudet. Mittauspöytäkirjaan piirrettiin myös johdon rakenteen lisäksi huomattavat maan pinnan tasaisuudesta poikkeavat kohteet, kuten puut ja rakennukset, niiden korkeus sekä arvioitu materiaali.

### *Erikoismittaukset*

Joissakin kohteissa ei ollut tarpeellista suorittaa koko pylväsvälin mittausta. Tällaisissa kohteissa tehtiin sovellettu erikoismittaus. Erikoismittauksia suoritettiin pylväsväleillä, joissa esiintyy johdon vaiheiden vuorottelua, jolloin johtimet ovat normaalia lähempänä maanpintaa, tai sillalla, joka alitti johdon. Kuvassa 5 on esimerkki mittauspisteiden sijainnista erikoismittauksessa.



Kuva 5. Esimerkki mittauspisteiden sijainnista pylväsvälillä erikoismittauksessa. Sillan mittauksessa mitattiin ainoastaan johtoa vastaan kohtisuorassa suunnassa ylemmän kuvan mukaisesti.

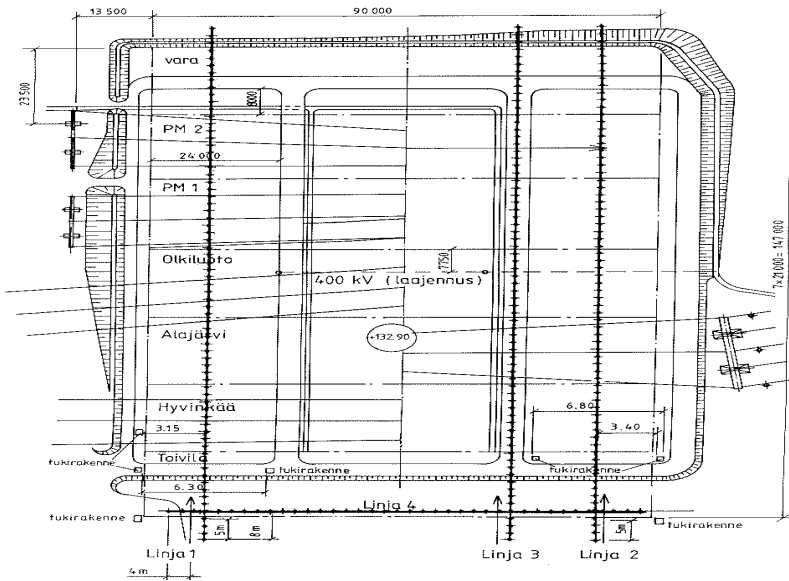
Vuorottelun erikoismittauksessa johtoa vastaan kohtisuorassa suunnassa mittaukset suoritettiin normaalisti valitun aloituskohdaksi vuorottelukohdaksi johdolla. Johdon suuntaisesti mittaukset (pisteet 14-15) suoritettiin vuorottelusta 7,5 m ja 15 m etäisyydellä molempiin suuntiin. Sillan erikoismittauksessa mittaus suoritettiin ainoastaan sillan kannella sillan suuntaisesti.

Joillakin pylväsväleillä oli erikoisten johtorakenteiden vuoksi tarpeellista suorittaa johtoa vastaan kohtisuora mittaus molempiin suuntiin johdosta. Esimerkiksi kun kaksi johtoa kulki rinnakkain suoritettiin tarkasteltavalle johdolle perusmittaus johdon toiselle puolelle ja johdon toiselle puolelle lisämittaus eli erikoismittaus.

### 3.2 Sähkökenttien mittaukset 400 kV ja 110 kV sähköasemilla

Sähköasemien sähkökenttien mittauksissa sovellettiin IEC 60833 standardia /6/. Sähköasemien sähkökenttien mittausten valmistelussa oli käytettävissä sähköasemien piirustukset. Piirustusten perusteella arvioitiin kohdat, joissa voisi esiintyä korkeita sähkökenttien. Piirustusten pohjalta tehtyjen arvioiden perusteella suoritettiin ennen varsinaisia mittauksia sähkökenttien alustava kartoitus. Alustavassa kartoituksessa sähkökentät mitattiin useissa ennalta arvioiduissa paikoissa. Varsinaiset mittaukset sähköasemilla tehtiin paikoista, joissa sähkökentät olivat suurimpia alustavan kartoituksen perusteella tai huoltokäytävillä, joilla huoltohenkilökunnan altistuminen on yleisintä. Mittaukset suoritettiin sähköasemalta valitulla linjalla tai alueella tasavälein. Mitatulla 400 kV

sähköasemalla mittaukset suoritettiin neljällä linjalla. Mittauspisteiden sijainti sähköasemalla on esitetty kuvassa 6.

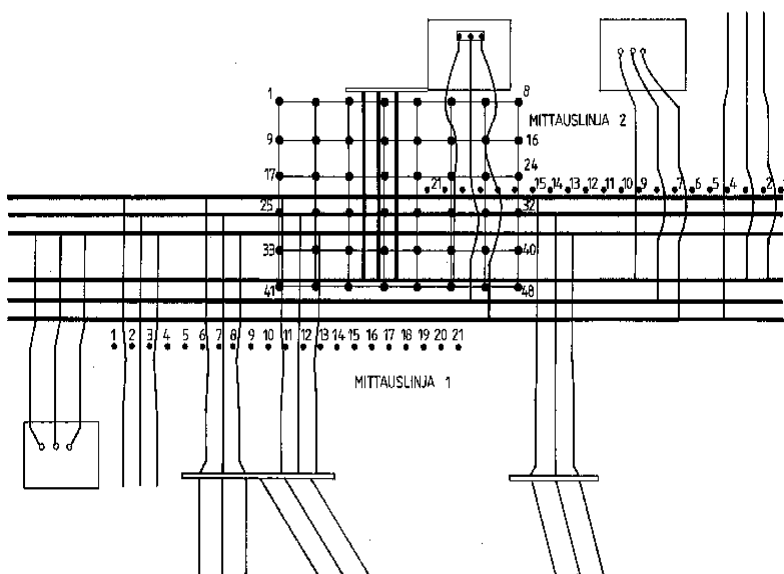


(Klikkaa kuvaa niin saat suuremmaksi)

Kuva 6. Sähkökentän voimakkuuden mittauspisteet 400 kV sähköasemalla. Sähköasemalla mitattiin kentän voimakkuus neljällä linjalla kahden metrin välein.

Sähköaseman 400 kV kytkinkentällä on käytössä kaksikatkaisijajärjestelmä, josta on neljä johtolähtöä ja kaksi muuntajalähtöä. Mittauslinjoista kolme oli pääkiskojen suuntaisia. Nämä linjat sijaitsivat huoltokäytävillä hieman sivulle pääkiskoista. Neljäs mittauslinja kulki kytkinkentän päädyssä.

110 kV sähköasemalla mittauksia suoritettiin yhdellä suorakaiteen muotoisella alueella ja kahdella linjalla. Mittauspisteiden sijainti sähköasemalla on esitetty kuvassa 7.



(Klikkaa kuvaa niin saat suuremmaksi)

Kuva 7. Sähkökentän voimakkuuden mittauspisteet 110 kV sähköasemalla. Kentän voimakkuus mitattiin suorakaiteen muotoisella alueella neljän metrin välein ja kahdella linjalla kahden

metrin välein.

Tämän sähköaseman 110 kV kytkinkentällä on kaksoiskiskojärjestelmä, josta on viisi johtolähtöä ja kaksi muuntajalähtöä. Mitattu alue oli kohdassa, jossa lähtöjen köysijohtimet alittavat pääkiskot ja ovat näin ollen lähimpänä maan pintaa. Mittauslinjat olivat pääkiskojen suuntaisia. Nämä linjat sijaitsivat hieman sivulle pääkiskoista kohdalla, jossa lähtöjen johtimet alittavat pääkiskoja.

### 3.3 Mittausvälineet

Sähkökentän mittaukset suoritettiin Wandel & Goltermann EFA-3 sähkökenttämittarilla. Mittarin mittaustarkkuus on  $\pm 5\% \pm 1$  V/m ja sen lukema-alue on 0,5 V/m - 100 kV/m.

Mittarissa on erillinen kolmiakselinen sähkökentän voimakkuusanturi ja lukulaite. Anturi yhdistetään lukulaitteeseen optisella kaapelilla, jonka pituus on 10 m. Mittarin anturin asettamiseen oikealle mittauskorkeudelle käytettiin kolmijalkaa, jonka kanssa mittari oli kalibroitu. Mittarin muistiin voidaan tallentaa manuaalisesti 4096 mittausta.

Mittauspisteiden määrittämisessä käytettiin 50 m pituista nylon-mittanauhaa, jonka tarkkuus on 0,1%. Mittarin anturin asettamisessa 1 m korkeudella käytettiin metrin pituista mittatikku.

Johdinten korkeus maanpinnasta mitattiin tähän tarkoitettuun Suparule 300D mittarilla. Mittarin johtokorkeuden mittaustarkkuus on 0,1 m ja erottelutarkkuus 2,5 cm (1 tuuma).

### 3.4 Mittausten toteutus käytännössä

Mittaukset toteutettiin 2 - 4 mittajaan ryhmällä. Ennen varsinaisia mittauksia tehtiin koemittaus, jossa testattiin mittausprotokollaa neljän mittajaan ryhmällä. Koemittauksesta saatujen kokemusten perusteella mittausten käytännön toteutus suunniteltiin niin, että mittaukset voitiin suorittaa kahden mittajaan ryhmällä.

Ensimmäiseksi mittauspaikalle tullessa tarkastettiin suhteellinen ilmankosteus, joka ei mittausten tekemiseksi saanut olla yli 80%. Mikäli ilman kosteus ei ollut liian korkea voitiin mittausten valmisteluja jatkaa. Tällöin ensiksi mitattiin tarkasteltavan pylväsvälin pituus, jonka jälkeen voitiin merkitä pylväsvälin keskikohta. Tämän jälkeen mitattiin vaihejohtimien korkeus ja asetettiin merkit niiden paikalle maanpinnassa. Seuraavaksi mitattiin maastoon sähkökentän mittauspisteet johtoa vastaan kohtisuorassa suunnassa ja johdon suuntaisia mittauksia varten pylväsvälille laitettiin merkit johdon keskilinjalle mittauspisteiden etäisyydestä. Mittauspisteiden merkintä kesti yleensä noin tunnin.

Ennen mittausten alkua soitettiin Suomen Kantaverkko Oyj:n voimajärjestelmäkeskukseen, josta kysyttiin mitattavan johdon alku- ja loppupään jännitteet. Sähkökentän arvoja mitattaessa toinen mittajista asetti mittarin anturin mittauspisteeseen oikealle korkeudelle ja sen jälkeen siirtyi riittävän etäälle anturista. Tämän jälkeen toinen mittaja luki mittarin lukulaitteesta sähkökentän arvon ja tallensi arvon myös mittarin muistiin. Toinen mittaja kirjasi näytön arvon mittauspöytäkirjaan. Johtoa vastaan kohtisuorassa suunnassa mittaukset kestivät yleensä noin 20 minuuttia.

Kun johtoa vastaan kohtisuora suunta saatiin mitattua, soitettiin uudelleen voimajärjestelmäkeskukseen ja pyydettiin taas johdon päiden jännitteet. Tämän jälkeen katsottiin

tehtyjen mittausten tuloksista suurimman sähkökentän arvon mittauspisteen etäisyys johdon keskilinjasta. Tämän jälkeen voitiin mitata sähkökenttä johdon suuntaisesti tällä etäisyydellä johdon keskilinjasta. Tämän suunnan mittauksissa mittauspisteiden etäisyys johdon keskilinjasta mitattiin kunkin mittauspisteen kohdalta. Mittausten päätteeksi pyydettiin voimajärjestelmäkeskuksesta neljännen kerran johdon päiden jännitteet. Johdon suuntainen mittaus kesti yleensä noin 30 minuuttia.

Kun sähkökentät saatiin mitattua, piirrettiin mittaustaikasta piirros. Piirroksen merkittiin maaston erityiskohdat mitattuun johtoon nähden, kuten esimerkiksi rakennukset, tiet, muut sähköjohdot ja kasvillisuus. Kasvillisuus ja sen tyyppi mitaajien arvion perusteella sekä korkeus merkittiin erityisesti silloin, kun mittauspisteen läheisyydessä sijaitsi korkea kasvillisuutta.

Mittaukset Tampereen ympäristössä suoritettiin kuvatulla tavalla. Tällä tavalla yhden työpäivän aikana ehdittiin mittaamaan yksi paikka. Koska Helsingin ja Paimion ympäristön mittauksissa matka-aika oli osa mittauksiin käytettävästä ajasta, näihin paikkoihin lähti neljän mitaajan ryhmä. Tällöin mittausten valmistelu ja toteutus oli nopeampaa. Suuremman ryhmän ja ryhmän harjaantumisen myötä mittauksia pystyttiin tekemään useammassa paikoissa yhden päivän aikana. Mittauksia tehtiin matkapäivinä noin työpäivän ajan ja matka-aika tuli tämän lisäksi.

## 4. MITTAUSTULOKSET

### 4.1 Tulokset 400 kV voimajohdoille

Mittauksia suoritettiin 400 kV johdoille kaikkiaan 25 pylväsvälillä. Mittauksia tehtiin kaiken kaikkiaan 39. Ensimmäinen mittaus oli koemittaus, jossa kokeiltiin mittauksen toteutusta käytännössä. Taulukossa 2 on lueteltu tehdyt sähkökenttämittaukset.

Taulukko 2.					
Kartoituksessa suoritettavat sähkökenttämittaukset. Mittaukset suoritettiin Tampereen (T1-T13), Helsingin (H1-H18) ja Paimion (P1-P7) ympäristössä.					
päivä määrä	mittaus numero	mittaajien määrä	mittaustyyppi (perus/erikois)	onnistuminen	Huomioitavia seikkoja
21.4.	koe	4	perus	kyllä	Koemittaus, jossa testattiin mittausprotokollaa käytännössä
27.4.	T1	3	perus	kyllä	
28.4.	T2	2	perus	kyllä	
29.4.	T3	2	perus	kyllä	
11.5.	T4	2	perus	ei	Mittaus oli virheellinen mittarin käyttövirheen vuoksi
11.6.	T5	2	perus	kyllä	Mittauksen T4 uusinta
12.5.	T6	2	perus	kyllä	
13.5.	T7	2	perus	kyllä	
15.5.	T8	2	perus	kyllä	

18.5.	T9	2	perus	kyllä	
26.5.	T10	2	perus	kyllä	
27.5.	T11	2	perus	kyllä	
29.5.	T12	2	perus	ei	Mittaus keskeytyi mittarin toimintahäiriön vuoksi
5.6.	T13	4	perus	kyllä	Mittauksen T11 uusinta, mukana 2 mittaajaa harjoittelemassa
9.6.	H1	4	perus	kyllä	
9.6.	H2	4	perus	kyllä	
16.6.	H3	4	perus	kyllä	
16.6.	H4	4	perus	kyllä	
24.6.	H5	4	perus	kyllä	
24.6.	H6	4	erikois	kyllä	
24.6.	H7	4	perus	kyllä	
24.6.	H8	4	erikois	kyllä	
25.6.	H9	4	perus+4 lisäp.	kyllä	Mittaukseen poikittaissuunnassa lisättiin neljä ylimääräistä pistettä, vierellä kulki toinen johto
25.6.	H10	4	erikois	kyllä	Mittaus toiselle puolelle johtoa paikassa H9
25.6.	H11	4	erikois	kyllä	Vuorottelun mittaus, vain poikittaissuunta, H12 toinen puoli
25.6.	H12	4	erikois	kyllä	Vuorottelun mittaus
25.6.	H13	4	perus+4 lisäp.	kyllä	Mittaukseen poikittaissuunnassa lisättiin neljä ylimääräistä pistettä, vierellä kulki toinen johto
25.6.	H14	4	erikois	kyllä	Mittaus toiselle puolelle johtoa paikassa H13
26.6.	H15	4	erikois	kyllä	
26.6.	H16	4	perus	kyllä	Pienen vaihevälän vuoksi vaiheiden välissä vain 1 piste
26.6.	H17	4	erikois	kyllä	Mittaus toiselle puolelle johtoa paikassa H16

26.6.	H18	4	erikois	kyllä	Mittaus siltaa pitkin
1.7.	P1	4	erikois	kyllä	Mittaus siltaa pitkin molemmille puolille johtoa
1.7.	P2	4	erikois	kyllä	Vuorottelun mittaus, vain poikittaissuunta, P3 toinen puoli
1.7.	P3	4	erikois	kyllä	Vuorottelun mittaus
1.7.	P4	4	perus+10 lisäp.	kyllä	Perusmittauksen lisäksi mitattiin 10 pistettä toiseen suuntaan kuin mittauksessa P7
1.7.	P5	4	erikois	kyllä	Vuorottelun mittaus, vain poikittaissuunta, P6 toinen puoli
1.7.	P6	4	erikois	kyllä	Vuorottelun mittaus
1.7.	P7	4	erikois	kyllä	Mittaus johdon alittavan moottoritien liittymän suuntaisesti

Kahdessa mittauspaikassa, T4 ja T12, tapahtui mittauksen aikana virheitä, jotka korjattiin uusintamittauksilla. Uusitut mittaukset ovat kyseisten mittausten jälkeen, mittaukset T5 ja T13. Taulukossa 3 on lueteltu tehdyissä sähkökenttämittauksissa saadut suurimmat tulokset.

Mittausnumero	$E_{k,max}$ (kV/m)	$E_{s,max}$ (kV/m)	Jännitteen keskiarvo (kV)	Vaihejohtimien korkeudet ja keskiarvo (m)
T1	4,7	4,7	400,5	14,1; 13,8; 13,7; 13,9
T2	5,2	4,6	400,8	14,1; 13,8; 13,3; 13,8
T3	4,4	4,4	399,0	14,9; 15,6; 15,4; 15,3
T4	1,5	1,6	401,0	15,1; 15,1; 14,9; 15,1
T5	2,7	4,1	401,5	15,1; 15,1; 15,0; 15,1
T6	0,22	2,9	399,0	14,5; 13,8; 12,5; 13,6
T7	4,4	2,5	405,6	13,3; 13,0; 13,1; 13,1
T8	4,4	2,8	401,5	12,3; 12,8; 13,3; 12,8
T9	3,8	2,7	402,6	13,6; 13,0; 12,5; 13,0
T10	4,5	5,1	402,3	12,3; 12,3; 12,9; 12,5
T11	6,5	5,5	397,1	11,9; 13,4; 14,4; 13,2
T12	5,9	3,1	398,4	12,3; 12,2; 12,6; 12,4
T13	5,3	5,8	400,0	12,3; 12,3; 12,6; 12,4

H1	3,8	5,0	396,4	11,2; 10,2; 9,1; 10,2
H2	8,0	9,3	397,0	10,2; 10,8; 9,8; 10,3
H3	1,2	1,6	400,5	17,1; 17,3; 16,8; 17,1
H4	5,3	5,0	402,8	13,4; 13,5; 13,6; 13,5
H5	1,9	3,5	396,5	13,6 (alin johdin)
H6	1,2		396,3	13,6 (alin johdin)
H7	3,8	4,3	396,5	11,8 (alin johdin)
H8	2,0		396,8	19,5 (alin johdin)
H9	4,9	3,8	396,1	11,0; 11,1; 11,0; 11,0
H10	4,8		396,0	11,0; 11,1; 11,0; 11,0
H11	1,0		395,8	7,8 (vuorottelun alin kohta)
H12	4,6	1,3	395,5	7,8 (vuorottelun alin kohta)
H13	4,0	4,1	395,1	10,0; 9,9; 9,8; 9,9
H14	4,7		395,0	10,0; 9,9; 9,8; 9,9
H15	2,5		399,8	13,9 (alin johdin)
H16	2,8	3,4	399,6	13,9 (alin johdin)
H17	2,6	2,4	398,0	12,4 (alin johdin)
H18	2,6	2,5	396,8	19,5 (alin johdin)
P1	6,5	5,1	399,3	12,0; 12,8; 13,6; 12,8
P2	3,0		399,8	13,4 (vuorottelun alin kohta)
P3	2,8	3,1	399,5	13,4 (vuorottelun alin kohta)
P4	5,3	5,7	397,9	12,3; 12,4; 13,2; 12,7
P5	3,1		399,0	14,2 (vuorottelun alin kohta)
P6	2,9	2,5	398,0	14,2 (vuorottelun alin kohta)
P7	4,6		399,0	12,3; 12,4; 13,2; 12,7

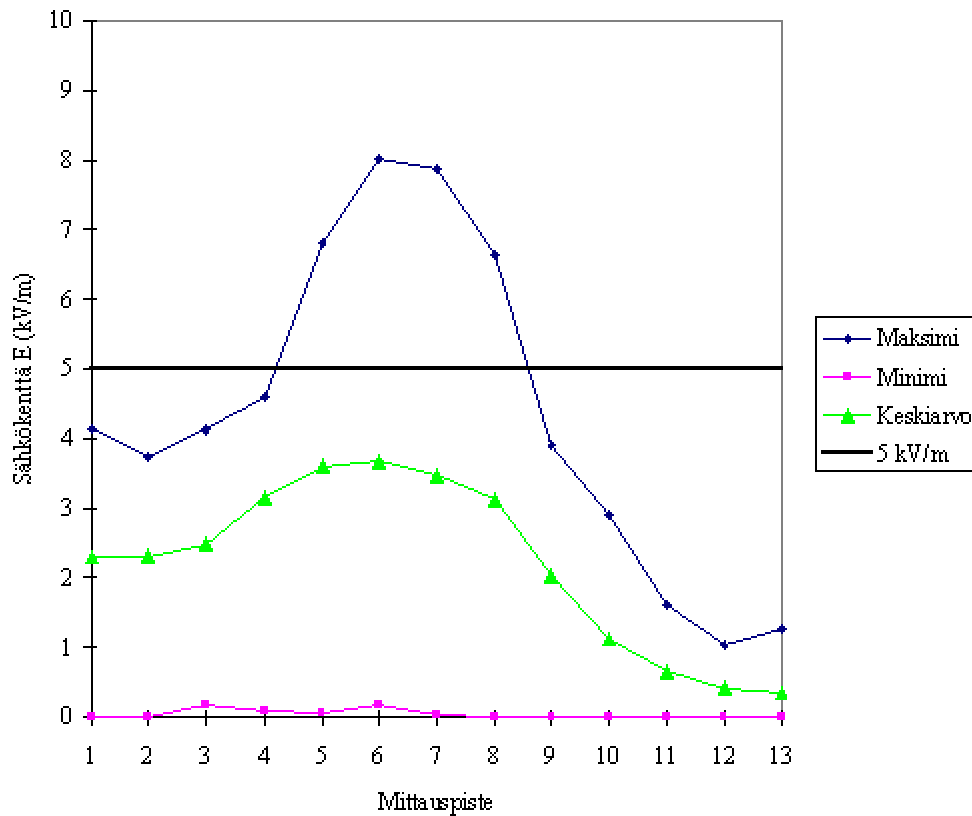
Tampereen lähistöllä tehdyissä perusmittauksissa suurimmat mitatut sähkökentän arvot saatiin kuudella pylväsvälillä johtoa vastaan kohtisuorassa suunnassa ja seitsemällä pylväsvälillä johdon suuntaisesti mitattaessa. Niistä kolmessa tapauksessa, joissa kenttä oli suurempi johdon suuntaisessa mittauksessa kuin kohtisuorissa mittauksissa, myös jännite nousi mittausten aikana.

Helsingin lähistöllä tehdyissä perusmittauksissa suurimmat mitatut sähkökentän arvot saatiin kahdella pylväsvälillä johtoa vastaan kohtisuorassa suunnassa ja seitsemällä pylväsvälillä johdon suuntaisesti. Niistä kahdessa tapauksessa, joissa kenttä oli suurempi johdon suuntaisessa mittauksessa kuin kohtisuorissa mittauksissa, myös jännite nousi mittausten aikana.

Paimion lähistöllä tehdyissä perusmittauksissa suurimmat mitatut sähkökentän arvot saatiin johdon suuntaisessa mittauksessa. Jännite mittauksen aikana oli kuitenkin pienempi kuin johtoa vastaan kohtisuorassa suunnassa.



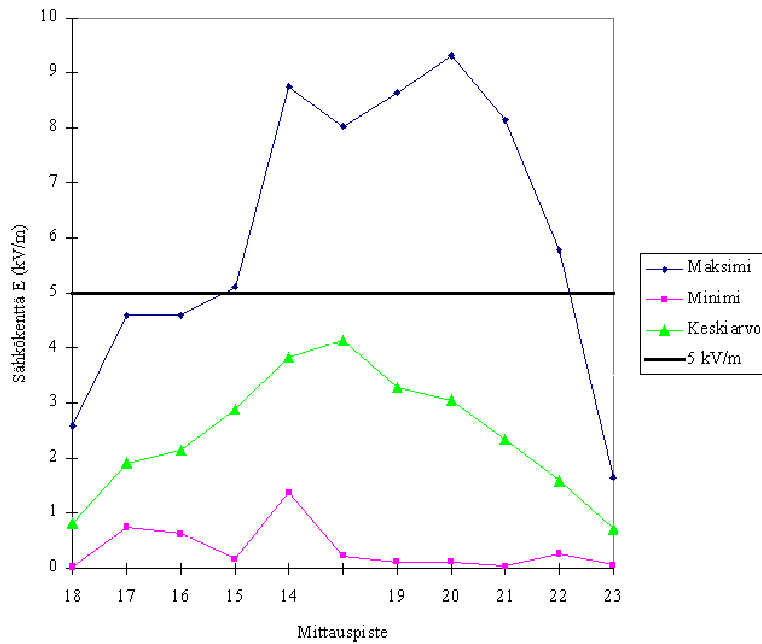
Perusmittausten mittaustulokset on yhdistetty kuvissa 8 ja 9. Saadut maksimi- ja minimiarvot sekä lasketut keskiarvot on yhdistetty näissä kuvissa. Kuvassa 8 ovat arvot johtoa vastaan kohtisuorassa suunnassa ja kuvan 9 arvot ovat johdon suuntaisista mittauksista.



(Klikkaa kuvaa niin saat suuremmaksi)

Kuva 8. Yhdistetyt sähkökentän voimakkuuden maksimi-, keski- ja minimiarvo johtoa vastaan kohtisuorissa mittauksissa ( $n = 21$ ). Mitattujen johtojen päiden jännitteet vaihtelivat mittausten aikana välillä 391,1 - 407,5 kV.

Kuvasta 8 voidaan nähdä, miten siirryttäessä johdosta kauemmas sähkökenttä pienenee.



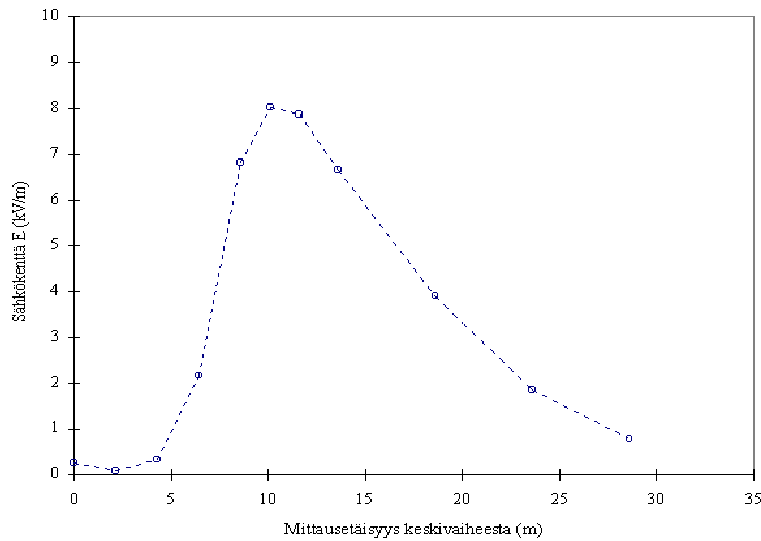
(Klikkaa kuvaa niin saat suuremmaksi)

Kuva 9. Yhdistetyt sähkökentän voimakkuuden maksimi-, keski- ja minimiarvot johdon suuntaisissa mittauksissa (n = 21). Mitattujen johtojen päiden jännitteet vaihtelivat välillä 391,1 - 407,5 kV.

Kuvasta 9 voidaan nähdä, miten johdon riippuma vaikuttaa sähkökenttiin johdon suuntaisesti. Suurin mittaustulos oli 9,3 kV/m. Minimikäyrien arvot ovat molemmissa kuvissa hyvin pieniä, mikä johtuu ilmeisesti joissakin paikoissa olleesta kasvillisuudesta.

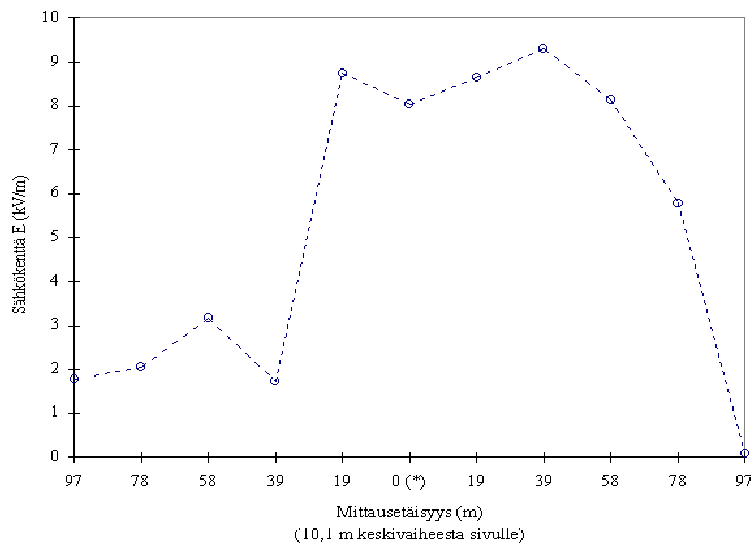
Suurimmat arvot sekä johtoa vastaan kohtisuorassa suunnassa että johdon suuntaisesti mitattiin pylväsvälillä H2. Kuvissa 10 ja 11 on esitetty tämän pylväsväli mittaustulokset.

Kuvia 8 ja 9 analysoitaessa täytyy ottaa huomioon, että mittauspisteet on määritelty uloimmasta vaihejohtimesta, jolloin eri mittauspisteiden etäisyys johdon keskilinjaan vaihtelee. Tällöin mittauspisteistä laskettu keskiarvo ei ota huomioon johdon etäisyyttä.



(Klikkaa kuvaa niin saat suuremmaksi)

Kuva 10. Sähkökentän voimakkuuden mittaustulokset pylväsvälillä H2 johtoa vastaan kohtisuorassa suunnassa. Mittausten aikana johdon jännitteen keskiarvo oli 397,0 kV.



(Klikkaa kuvaa niin saat suuremmaksi)

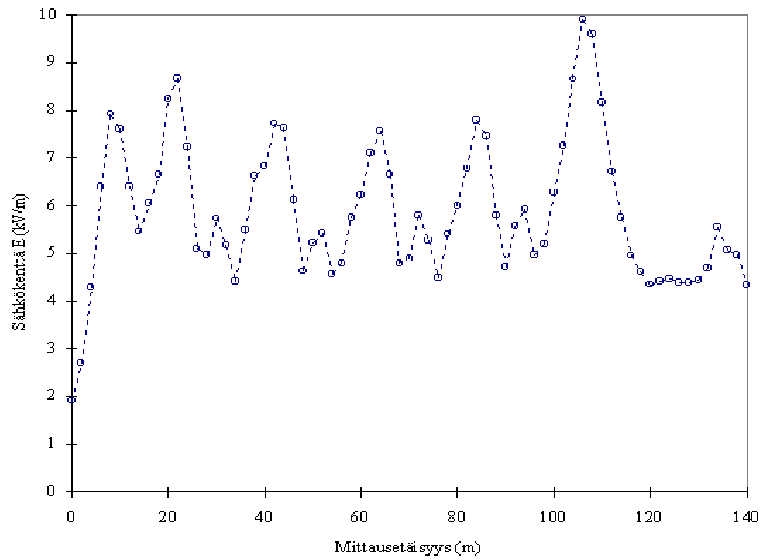
Kuva 11. Sähkökentän voimakkuuden mittaustulokset pylväsvälillä H2 johdon suuntaisesti. Johdon jännitteen keskiarvo oli 397,0 kV.

Neljällä pylväsvälillä, joista kolme oli Helsingin ympäristössä ja yksi Paimion ympäristössä, suoritettiin vain erikoismittauksia. Kaksi kohteista oli johdon vaiheiden vuorotteluja, joissa johtimet ovat normaalia lähempänä maanpintaa ja kahdessa kohteessa silta alitti johdon, jolloin sillalla kuljijat ovat normaalia lähempänä johtoa. Näissä kohteissa vuorotteluille mitattiin suurimmillaan sähkökentän voimakkuus 4,6 kV/m ja sillalla 6,5 kV/m.

ICNIRP:n suositusarvo väestölle, 5 kV/m, ylittyi jossakin mitatuista pisteistä yhdeksällä näistä kaikista 25:stä pylväsvälistä. Nämä suurimmat arvot eivät kuitenkaan ylitä työntekijöille asetettua suositusarvoa, 10 kV/m.

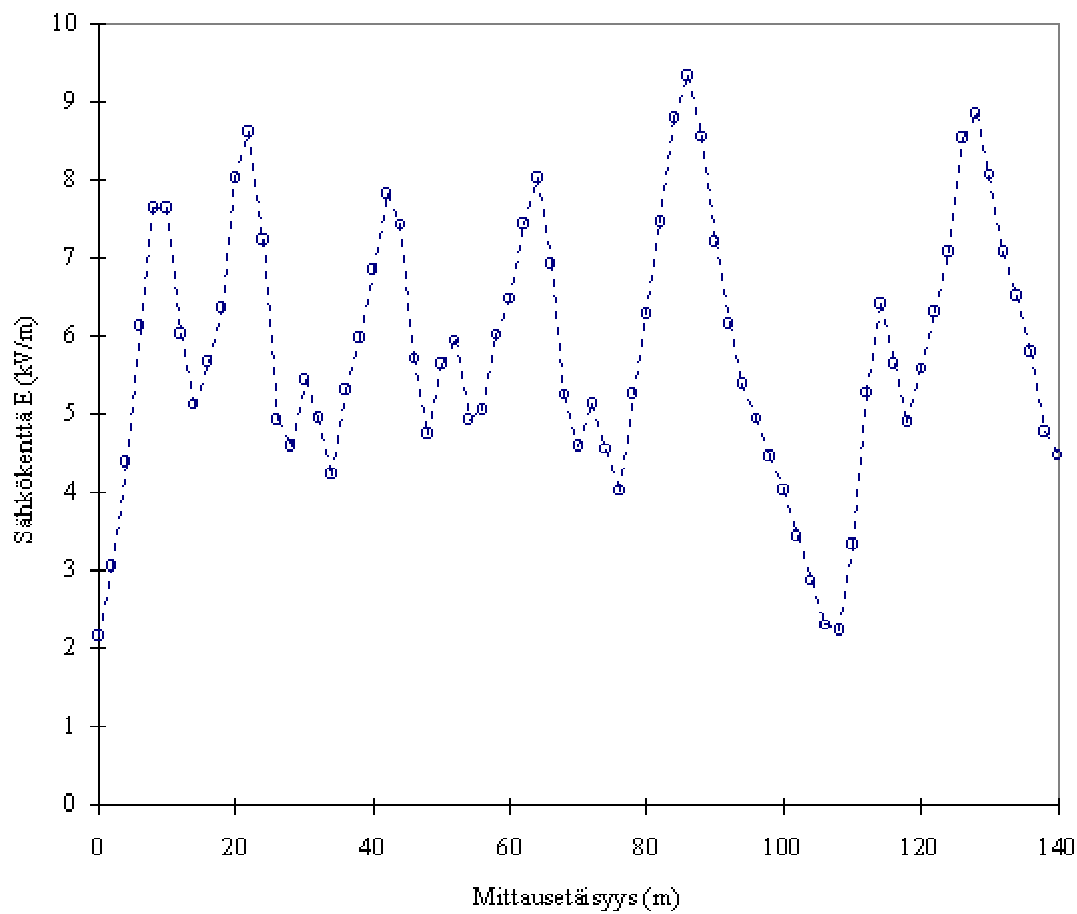
## 4.2 Tulokset 400 kV sähköasemalta

Kartoituksessa suoritettiin 251 mittausta 400 kV sähköasemalla. Suurin mitattu arvo tällä sähköasemalla oli 9,9 kV/m, jolloin sähköaseman kiskoston jännite oli 404,6 kV. Tämä arvo mitattiin linjan 1 pisteessä 54. (Mittauslinjat on esitetty edellä kuvassa 6.) Mittaustulokset linjoilta 1 - 4 on esitetty seuraavissa kuvissa 12 - 15.



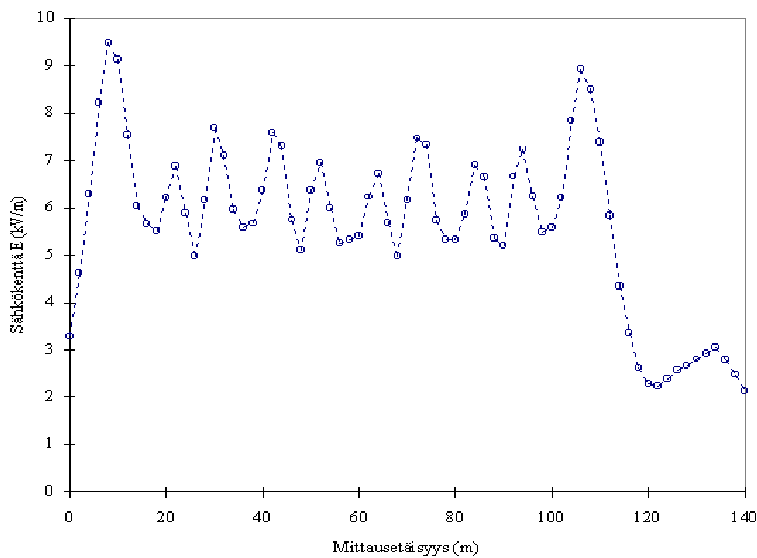
(Klikkaa kuvaa niin saat suuremmaksi)

Kuva 12. Mittaustulokset 400 kV sähköasemalla, linja 1. Mittausten alussa sähköaseman kiskoston jännite oli 404,6 kV.



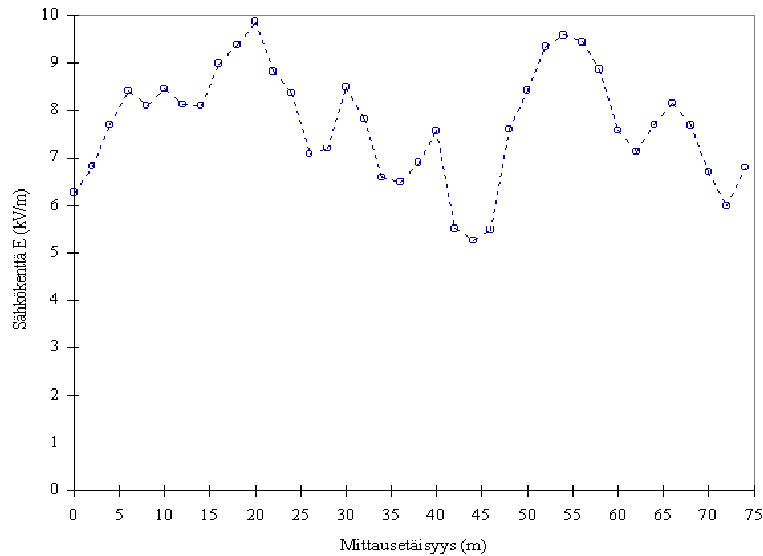
(Klikkaa kuvaa niin saat suuremmaksi)

Kuva 13. Mittaustulokset 400 kV sähköasemalla, linja 2. Mittausten alussa sähköaseman kiskoston jännite oli 402,5 kV.



(Klikkaa kuvaa niin saat suuremmaksi)

Kuva 14. Mittaustulokset 400 kV sähköasemalla, linja 3. Mittausten alussa sähköaseman kiskoston jännite oli 403,9 kV.



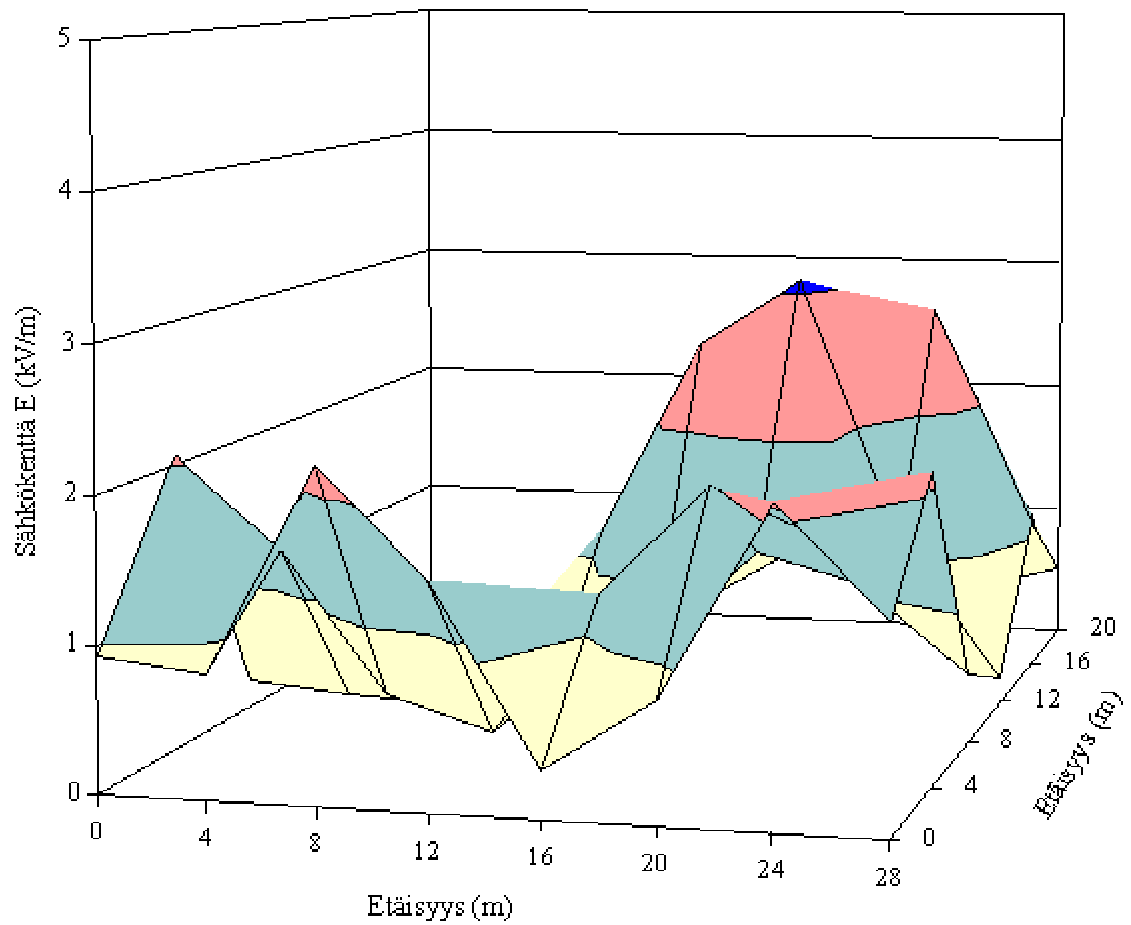
(Klikkaa kuvaa niin saat suuremmaksi)

Kuva 15. Mittaustulokset 400 kV sähköasemalla, linja 4. Mittausten alussa sähköaseman kiskoston jännite oli 405,3 kV.

Tällä sähköasemalla ei ylitetty ICNIRP:n työntekijöiden altistuksen suositusarvoa, 10 kV/m. Suurimmat arvot (maksimi 9,9 kV/m) olivat kuitenkin hyvin lähellä tätä arvoa.

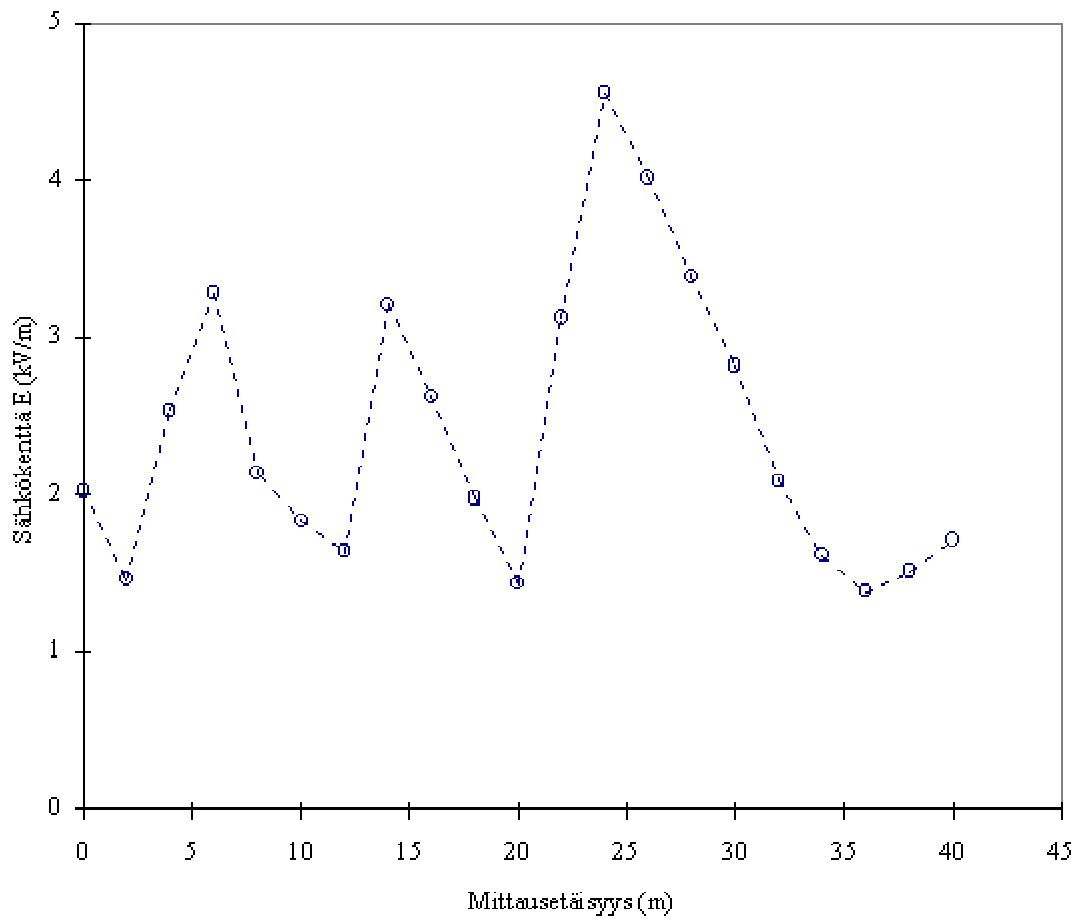
### 4.3 Tulokset 110 kV sähköasemalta

110 kV sähköasemalla suoritettiin 90 mittausta. Mittauspisteet on esitetty edellä kuvassa 7. Sähköasemalla mitattu suurin arvo oli 4,6 kV/m, kun sähköaseman kiskoston jännite oli 116,0 kV. Tämä arvo mitattiin linjan 1 pisteessä 13. Mittaustulokset alueelta on esitetty kuvassa 16.



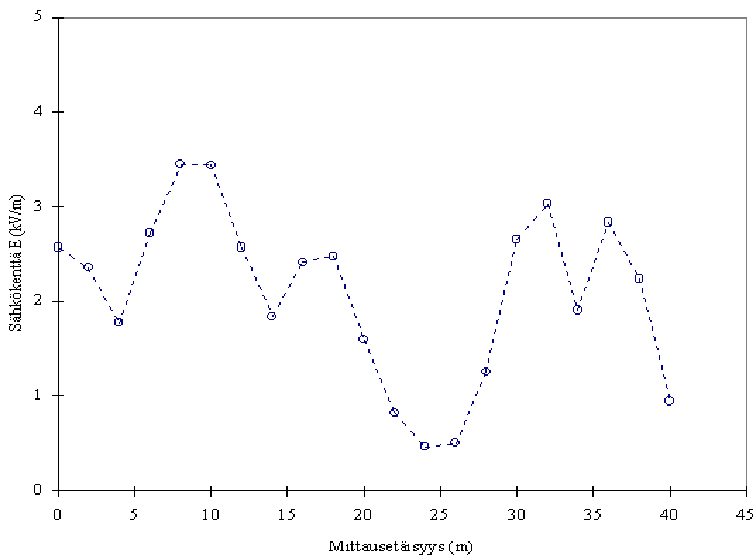
Kuva 16. Mittaustulokset 110 kV sähköasemalla mitatulta alueelta. Mittausten alussa sähköaseman kiskoston jännite oli 116,0 kV.

Mittaustulokset linjoilta 1 ja 2 on esitetty kuvissa 17 ja 18.



(Klikkaa kuvaa niin saat suuremmaksi)

Kuva 17. Mittaustulokset 110 kV sähköasemalla, linja 1. Mittausten alussa sähköaseman kiskoston jännite oli 116,0 kV.



(Klikkaa kuvaa niin saat suuremmaksi)

Kuva 18. Mittaustulokset 110 kV sähköasemalla, linja 2. Mittausten alussa sähköaseman kiskoston jännite oli 116,0 kV.



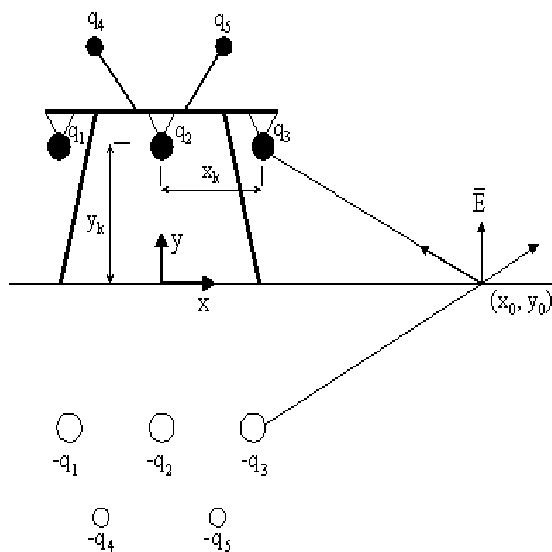
Tällä sähköasemalla ei ylitetty ICNIRP:n työntekijöiden altistuksen suositusarvoa, eikä myöskään koko väestön altistuksen suositusta 5 kV/m.

## 5. 400 KV JOHTOJEN MITTAUSTULOSTEN VERTAILU LASKENTAAN

Mitattuja arvoja vertailtiin myös laskentaan. Sähkökenttämittausten yhteydessä tehtyjen johdon korkeusmittausten ja Suomen Kantaverkko Oyj:ltä saatujen pylväsrakennetietojen perusteella johtojen aiheuttamat sähkökentät voitiin laskea. Laskennassa käytettiin analyttistä laskentamenetelmää [2].

### 5.1 Laskentamenetelmä

Johtojen analyttisellä sähkökenttien laskentamenetelmällä voidaan laskea sähkökentän voimakkuus, kun tiedetään vaihejohtimien jännitteet. Laskennassa oletetaan, että maa on tasainen ja vaihejännitteet ovat symmetrisiä. Sähkökentän suunta on kohtisuoraan maata vastaan, koska maa on johtava. Laskennassa kentän suunta saadaan todelliseksi peilikuvaperiaatteen avulla. Peilikuvaperiaatteen mukaisesti maan alle oletetaan peilikuvavaraukset, joiden suuruus on varsinaisten varausten vastaluku. Kuvassa 19 on esitetty laskentaan liittyvät johdon parametrit ja varaukset.



(Klikkaa kuvaa niin saat suuremmaksi)

Kuva 19. Sähkökentän laskentaan liittyvät johdon parametrit ja varaukset [2]. ( $q_1, q_2, q_3, q_4$  ja  $q_5$  varaukset;  $x_k$  vaakatason etäisyys origosta johtimeen  $k$ ;  $y_k$  pystytason etäisyys origosta johtimeen  $k$ ;  $x_0$  ja  $y_0$  tarkastelupaikan koordinaatit)

Vaihejohtimien varaukset  $q_1, q_2, q_3$  ja ukkosjohtimien varaukset  $q_4$  ja  $q_5$  voidaan laskea potentiaalikerroinmatriisin  $\mathbf{P}$  avulla johtimien jännitteistä  $v_1, v_2, v_3, v_4$  ja  $v_5$ , yhtälön 1 mukaisesti [2].

$$\bar{Q} = \mathbf{P}^{-1} \bar{V}$$

missä  $Q$  on vektori varauksista  $q_1, q_2, q_3, q_4$  ja  $q_5$ ,

$P$  on johtimien tyypin ja johdon rakenteen avulla määräytyvä potentiaalikerroinmatriisi,

$V$  on vektori johtimien jännitteistä  $v_1, v_2, v_3, v_4$  ja  $v_5$ .

Potentiaalikerroinmatriisin diagonaali-alkiot  $P_{kk}$  saadaan yhtälön 2 mukaan.

$$P_{kk} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{4y_k}{d_k}$$

missä  $\epsilon_0$  on tyhjän permittiivisyys,

$y_k$  on johtimen  $k$  etäisyys maan pintaan,

$d_k$  on johtimen  $k$  halkaisija.

Potentiaalikerroinmatriisin muut alkiot  $P_{kl}$  saadaan yhtälön 3 mukaan.

$$P_{kl} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \ln \frac{(x_k - x_l)^2 + (y_k + y_l)^2}{(x_k - x_l)^2 + (y_k - y_l)^2}$$

missä  $x_k, x_l$  ovat johtimen  $k$  ja  $l$  etäisyys origosta,

$y_l$  on johtimen  $l$  etäisyys maan pintaan.

Peilikuvaperiaatteen mukaisesti jokaisesta varausparista, varsinaisesta varauksesta ja peilikuvavarauksesta, lasketun sähkökentän maan pinnan suuntaiset osat kumoavat toisensa. Sen takia laskennassa saatava sähkökentän suunta on maan pinnassa kohtisuorassa maan tasoon nähden.

Sähkökentän laskentaan käytetään yhtälöä 4 /2/.

$$\begin{aligned} \vec{E} = & \sum_{k=1}^5 \frac{q_k}{2\pi\epsilon_0} \left[ \frac{(x_0 - x_k)}{(x_k - x_0)^2 + (y_k - y_0)^2} - \frac{(x_0 - x_k)}{(x_k - x_0)^2 + (y_k + y_0)^2} \right] \vec{a}_x \\ & + \sum_{k=1}^5 \frac{q_k}{2\pi\epsilon_0} \left[ \frac{(y_0 - y_k)}{(x_k - x_0)^2 + (y_k - y_0)^2} - \frac{(y_0 - y_k)}{(x_k - x_0)^2 + (y_k + y_0)^2} \right] \vec{a}_y \end{aligned}$$

missä  $q_k$  on johtimen  $k$  varaus,

$x_0$  ja  $y_0$  ovat tarkastelupaikan koordinaatit,

$\vec{a}_x$  ja  $\vec{a}_y$  ovat yksikkövektoreita.

Sähkökentän mittausten avulla saatava arvo on sähkökentän resultantti. Sähkökentän voimakkuusvektorista (yhtälö 4) lasketaan resultantti yhtälön 5 avulla.

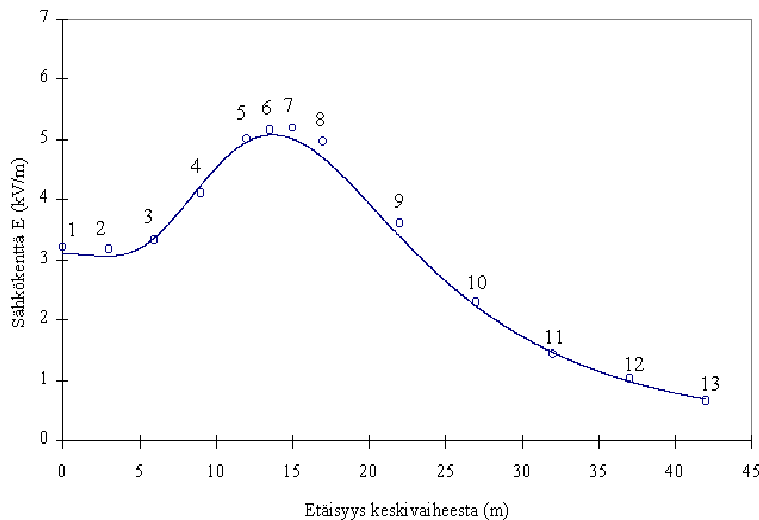
$$E_{res} = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2}$$

missä  $E_x, E_y, E_z$  ovat sähkökentän voimakkuuden komponenttien amplitudeja.

Yhtälöiden mukainen laskentaohjelma on koodattu Matlab 5.0 -ohjelman ohjelmointikielellä.

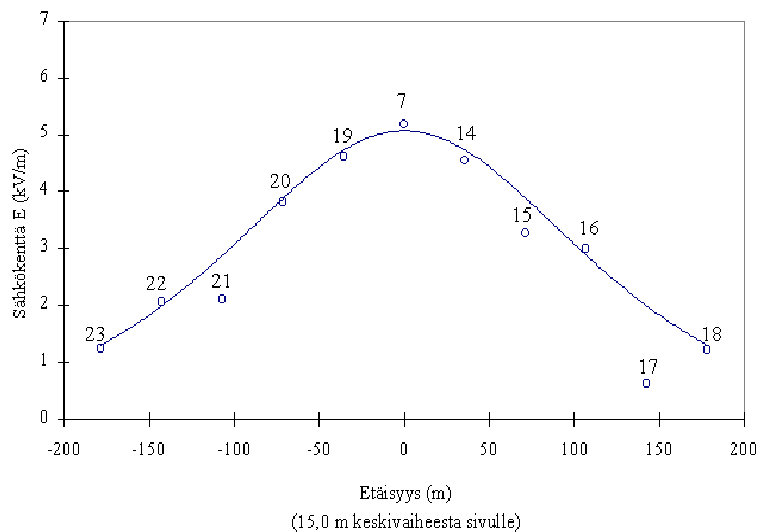
## 5.2 Laskentatulokset ja vertailu mittauksiin

Vertailuesimerkiksi on valittu pylväsväli T2, jossa alkuoletukset (tasainen maasto) toteutuvat hyvin. Seuraavissa kuvissa 20 ja 21 on esitetty mittaustulokset pylväsväliltä T2 ja vastaavat laskentatulokset.



(Klikkaa kuvaa niin saat suuremmaksi)

Kuva 20. Sähkökentän voimakkuuden mittaus- ja laskentatulokset pylväsväliltä T2 johtoa vastaan kohtisuorassa suunnassa. Mittaustulokset on merkitty ympyröillä ja laskentatulokset viivalla. Mittausten aikana johdon jännitteen keskiarvo oli 400,8 kV.



(Klikkaa kuvaa niin saat suuremmaksi)

Kuva 21. Sähkökentän voimakkuuden mittaus- ja laskentatulokset pylväsvälin mittauksessa T2 johdon suuntaisesti. Mittaustulokset on merkitty ympyröillä ja laskentatulokset viivalla. Mittausten aikana johdon jännitteen keskiarvo oli 400,8 kV.

Kuvassa 20. Suurin ero mitatun ja lasketun välillä on 0,3 kV/m. Tämä johtui ilmeisesti maan epätasaisuudesta, joka kirjattiin mittausten yhteydessä. Johdon suuntaisesti suurin ero mitatun ja lasketun välillä on 1,3 kV/m pisteessä 17 (kuva 21), joka oli etäisyydellä 143 m pylväsvälin keskeltä. Eroon vaikutti mittauspaijalla ollut pensaikko ja noin 15 m etäisyydeltä alkanut kuusikko. Myös pisteessä 21 (kuva 21) etäisyydellä -107 m oleva keskimääräistä suurempi ero mittaus- ja laskentatuloksen välillä, 0,7 kV/m, johtuu kasvillisuudesta. Tämän mittauspisteen läheisyydessä oli noin 4 m korkea kataja.

## 6. POHDINTA

### *Kokemuksia mittausten toteutuksesta*

Mittaukset etenivät pitkälti suunnitellulla tavalla. Ainoastaan kaksi mittausta jouduttiin uusimaan mittaauksissa tehtyjen virheiden vuoksi. Toisaalta vuoden 1998 kesä oli melko sateinen. Tämä viivästytti jonkin verran mittausten etenemistä, koska mittauksia ei voinut suorittaa, mikäli suhteellinen ilmankosteus ylitti 80 %.

Joissakin paikoissa kaikkia mittausrakenteiden mukaisia mittauspisteitä ei voitu mitata. Mittauspisteen kohdalla kulkenut vilkkaasti liikennöity tie esti mittausten tekemisen joissakin pisteissä neljässä mittaauksessa. Kahdessa mittaauksessa yksi mittauspisteistä sattui ojan kohdalle, jolloin siinä pisteessä ei voitu suorittaa mittausta. Toisessa näistä mittaauksista oli myös yksi edellä mainituista teistä. Yhdessä mittaauksessa rakennus esti mittaamisen kahdessa viimeisessä mittauspisteessä johdosta pois päin mitattaessa.

Mittauspisteiden merkitseminen maastoon oli työlästä. Pisteiden paikan määrittämisessä tuli myös olla erittäin huolellinen virheiden välttämiseksi. Käytännössä pisteiden paikkaa ei voinutkaan määrittää suurella tarkkuudella, koska maasto oli vaihtelevaa. Johdon suuntaisesti mitattaessa johtoa vastaan kohtisuoran etäisyyden määrittämisessä oli myös epätarkkuutta, koska suoraa kulmaa

johtoon nähden ei määritetty. Etäisyys johdosta ei kuitenkaan ollut kovin suuri, joten virhe ei varmaankaan ole kovin iso. Pisteiden merkitsemisen lisäksi mittarin anturin asettelu oikeaan asentoon oikealle korkeudelle epätasaisessa maastossa oli suhteellisen työlästä.

#### *Vertailu ICNIRP:n enimmäisarvoihin*

Sähkökenttien mittauksissa ICNIRP:n väestön altistuksen suositusarvo, 5 kV/m, ylittyi yhdeksällä pylväsvälillä. Suurin mitattu arvo, 9,3 kV/m (jännitteen keskiarvo 397,0 kV), jäi vain 0,7 kV/m työntekijöiden enimmäisarvosta 10 kV/m. Muissakin mittauksissa tulokset olivat lähellä väestön enimmäisarvoa. Tuloksiin vaikutti luonnollisesti se, että kartoitukseen valittiin sellaisia kohteita, joissa odotettiin saatavan mahdollisesti korkeita mittaustuloksia.

Verrattaessa voimajohtojen kenttiä ICNIRP:n enimmäisarvoihin tulee kuitenkin ottaa huomioon se, mistä kentän voimakkuus määritellään. Jos kenttä määritellään ripustuskorkeuden mukaan, esimerkiksi laskemalla, on ilmeistä että kentänvoimakkuustasot jäävät työntekijöiden enimmäisarvon 10 kV/m alapuolelle.

Tutkimuksessa suurimmat sähkökentän voimakkuudet mitattiin 400 kV sähköasemalla. Suurin arvo, 9,9 kV/m, oli vain vähän ICNIRP:n työntekijöiden altistusrajan, 10 kV/m, alapuolella. Ottaen huomioon mittauksissa käytetyn mittarin tarkkuuden ja mittauksien aikaisen jännitteen, 404,6 kV, on mahdollista, että 10 kV/m enimmäisarvo ylittyy kyseisellä sähköasemalla joissakin olosuhteissa. 110 kV sähköasemalla sähkökentät olivat selvästi pienempiä, alle 5 kV/m.

#### *Mittaustulosten analysoinnissa huomioitavia tekijöitä*

Voimajohtojen kenttien mittauksissa kasvillisuus ilmeisesti pienensi monin paikoin sähkökenttiä maanpinnan läheisyydessä. Mittaukset tehtiin yhden metrin korkeudella. Kasvillisuuden pienentävää vaikutusta ei ole mahdollista kuitenkaan tarkemmin analysoida näiden mittausten perusteella. Kasvillisuuden vaimennusominaisuuksia on jatkossa tarpeellista tutkia, sillä sen avulla saattaa olla mahdollista pienentää ympäristön sähkökenttiä.

Mittaukset toteutettiin niin, että kenttiä ei mitattu yksittäisestä kuopasta, töyssystä tai ojasta, vaan maan taso määritettiin lähiympäristön mukaan, johon mittauspiste sijoitettiin. Joissakin tapauksissa maan pinnan korkeuden vaihtelu kuitenkin häiritsi selkeästi mittauksia.

Mittaushetken lämpötila vaikuttaa mittarin antamiin tuloksiin, jos se poikkeaa kalibrointilämpötilasta. Vaikka tässä projektissa mittausten lämpötila oli tiedossa, ei sitä voitu ottaa tulosten analysoinnissa huomioon. Korjausten tekemistä varten olisi tarvittu lämpötilan vaikutuksen korjaustaulukko, jota kuitenkaan ei ollut käytettävissä. Samoin ilman kosteuden vaikutusta ei voitu ottaa huomioon.

Mittaustulosten tilastollista analyysiä vaikeutti se, että pylväsvälit olivat erilaisia, samoin pylväsrakenteet. Siitä huolimatta tulosten yhdistäminen antaa melko hyvän yleiskuvan tilanteesta.

#### *Tutkimuksen tuloksien hyödyntäminen*

Tutkimuksessa saadut tulokset hyödyntävät kaikkia sähkön siirtoa Suomessa harjoittavia yhtiöitä, joilla on hallussaan 110 kV tai sitä suurempijännitteisiä sähköasemia tai -johtoja. Erityisesti tutkimuksesta hyötyy Suomessa kantaverkosta vastaava yhtiö, Suomen Kantaverkko Oyj (1.1.1999 alkaen Fingrid Oyj). Erityisen tarpeellisia mittaustulokset ovat silloin jos kenttien enimmäisarvot

tulevat voimaan ja Fingrid Oyj:n tulee arvioida kenttien pienentämistoimenpiteitä ja niiden kustannuksia.

Tutkimuksessa saadut tulokset antavat myös arvokasta tietoa enimmäisarvoja valmisteleville viranomaisille, kuten Säteilyturvakeskukselle. Projektin mittaustuloksista he saavat tietoa käytännössä esiintyvistä kentistä ja voivat verrata niitä enimmäisarvoihinsa.

## 7. YHTEENVETO

Parhailaan valmistellaan uusia altistusrajoja sähkö- ja magneettikentille sekä kansallisella että kansainvälisellä tasolla. Euroopan Unionin puitteissa tehdään komission suositusta, joka pohjautuu ICNIRP:n suositukseen.

ICNIRP:n suosituksessa enimmäisarvot virrantiheyden tehollisarvolle 50 Hz taajuudella ovat työntekijöille  $10 \text{ mA/m}^2$  ja koko väestölle  $2 \text{ mA/m}^2$ . Virrantiheysrajan perusteella johdetut enimmäisarvot sähkökentän voimakkuudelle 50 Hz:n taajuudella ovat työntekijöille  $10 \text{ kV/m}$  ja koko väestölle  $5 \text{ kV/m}$ .

Suomessa Säteilyturvakeskus valmistelee yhteistyössä Työterveyslaitoksen kanssa STM:lle uutta STM:n päätöstä ionisoimattoman säteilyn enimmäisarvoista, jotka sisältävät myös enimmäisarvot pientaajuisille sähkö- ja magneettikentille. Tulevissa enimmäisarvoissa ovat mukana myös sähkökentät. Ehdotus seuraa ICNIRP:n uusia ohjeita.

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli tehdä kartoitus, jossa selvitetään pientaajuisien sähkökenttien esiintymistä elin- ja työympäristössä. Kartoitus painottui erityisesti sähkövoimajärjestelmien kenttiin, koska siellä käytettävien korkeiden jännitetasojen vuoksi oli odotettavissa suurimmat kentät. Keskeisenä tavoitteena oli saada selville, miten paljon ICNIRP:n enimmäisarvojen ylityksiä on tapahtuu.

Kartoituskohteiksi valittiin yhteistyössä Suomen Kantaverkko Oyj:n kanssa 400 kV voimajohdoilta 25 pylväsväliä, joista 4 oli erikoiskohteita. Pylväsvälien valinnassa kriteereinä oli odotettavissa oleva suuri sähkökenttä ja sijainti paikoissa, joihin oli hyvät kulkuyhteydet Tampereelta. Lisäksi mitattiin yksi 400 kV ja yksi 110 kV sähköasema.

Johtojen sähkökenttien mittaamisessa käytettiin sovelletusti IEEE 644-1994 standardia [/7/](#). Pylväsvälillä sähkökentän voimakkuus mitattiin normaalisti 23 pisteessä. Pisteistä yksi oli pylväsvälin keskipisteessä johdon keskilinjalla ja 12 pistettä tästä pisteestä johtoa vastaan kohtisuoralla linjalla johdosta poispäin sekä 10 pistettä johdon suuntaisella linjalla. Johdon suuntaisella linjalla oli 5 pistettä keskipisteestä molempiin suuntiin. Joissakin kohteissa ei ollut tarpeellista suorittaa koko pylväsvälin mittausta. Tällöin tehtiin erikoismittaus. Joillakin pylväsväleillä oli erikoisten johtorakenteiden vuoksi tarpeellista suorittaa johtoa vastaan kohtisuora mittausta molempiin suuntiin johdosta. Tällaisia erikoiskohteita olivat pylväsvälit, jossa johdot vuorottelivat ja tällöin johtimet ovat tavallista lähempänä maata. Toinen erikoiskohde olivat paikat, joissa johdon alla oli silta.

ICNIRP:n suosittelema enimmäisarvo väestölle,  $5 \text{ kV/m}$ , ylittyi yhdeksällä näistä kaikista 25:stä pylväsvälillä jossakin mitatuista pisteistä. Nämä suurimmat arvot ( $9,3 \text{ kV/m}$ ) eivät kuitenkaan ylitä työntekijöille asetettua enimmäisarvoa,  $10 \text{ kV/m}$ .

Sähköasemien sähkökenttien mittauksissa sovellettiin IEC 60833 standardia /6/. Sähköasemilla mittaukset tehtiin paikoista, joissa voitiin olettaa sähkökenttien olevan suurimpia tai huoltokäytävillä, joilla huoltohenkilökunnan altistuminen on selvästi mahdollista. Varsinaiset mittaukset suoritettiin sähköasemalta valituilla linjoilla tai alueilla tasavälein.

Mitatulla 400 kV sähköasemalla mittaukset suoritettiin neljällä linjalla. Mittauslinjoista kolme oli pääkiskojen suuntaisia. Nämä linjat sijaitsivat huoltokäytävillä hieman sivulle pääkiskoista. Neljäs mittauslinja kulki kytkinkentän reunassa. 400 kV sähköasemalla ei ylitetty ICNIRP:n työntekijöiden altistuksen suositusarvoa, 10 kV/m. Suurimmat arvot (9,9 kV/m) olivat kuitenkin hyvin lähellä tätä arvoa. Sen vuoksi on olemassa mahdollisuus, että 10 kV/m arvo voi ylittyä sähköasemalla, jos esimerkiksi jännite on korkeampi kuin mitä se oli mittausten aikana.

110 kV sähköasemalla mittauksia suoritettiin yhdellä suorakaiteen muotoisella alueella ja kahdella linjalla. 110 kV sähköasemalla mitattu suurin arvo oli 4,6 kV/m, kun jännite oli 116,0 kV. 110 kV sähköasemalla ei siis ylitetty ICNIRP:n työntekijöiden altistuksen suositusarvoa.

## Kirjallisuusviitteet

1. CENELEC. ENV-50166-1. Human exposure to electromagnetic fields - Low-frequency ( 0Hz to 10 kHz). European Committee for Electrotechnical Standardization, Bryssel, Belgia, 1995. 23 s.
2. Deno, D.W. ja Zaffanella, L.E. Field Effects of Overhead Transmission Lines and Stations. Kirjassa: Transmission Line Reference Book - 345 kV and above. 2. p., Palo Alto, USA, 1982, ss. 329-419.
3. Hänninen, K. & Valjus, J. Voimajohtojen sähkö- ja magneettikentät. Sähkö, vol. 61, no. 3, 1988. ss. 10-14.
4. Hänninen, V. Pientaajuisten sähkö- ja magneettikenttien mittausmenetelmät. Diplomityö, Tampereen teknillinen korkeakoulu, Tampere, 1995. 85 s.
5. ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection). Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). Health Physics 74(1998):4. 494-522.
6. IEC 60833. Measurement of power-frequency electric fields. International Electrotechnical Commission, Geneve, Sveitsi, 1987. 46 s.
7. IEEE Std. 644-1994. IEEE Standard Procedures for Measurement of Power Frequency Electric and Magnetic Fields From AC Power Lines. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York, USA, 1995. 30 s.
8. Jokela, K. Sähkö- ja magneettikenttiin liittyvät suositukset ja niiden tulevaisuuden näkymät. Raportissa: Korpinen, L. (toim.): Ajankohtaispäivä: 50 Hz Sähkö- ja magneettikenttien tekninen vähentäminen työympäristössä. Tampereen teknillinen korkeakoulu, Sähkövoimatekniikka, Raportti 4-98, Tampere, 1998.
9. Korpinen, L.: Voimansiirtojohtojen sähkömagneettisten kenttien terveysvaikutusten arviointi. Licensiaattityö, Tampereen teknillinen korkeakoulu, Sähköenergiajärjestelmät, Tampere 1990, 122 s.
10. Korpinen L., Hietanen M., Jokela K., Juutilainen J., Valjus, J. 1995. Voimajohtojen sähkö- ja magneettikentät ympäristössä. Kauppa- ja teollisuusministeriön tutkimuksia ja raportteja 89/1995. 213 s.

11. Maddock, B.J. Overhead line design in relation to electric and magnetic field limits. Power Engineering Journal, September 1992. ss. 217-224.
12. Paavola, I.: Sähkönjakeluverkkojen aiheuttamat sähkö- ja magneettikentät ja niiden vaikutukset. Diplomityö, TTKK/SEJ, Tampere 1990.
13. Valjus, J. Pientaajusten sähkö- ja magneettikenttien fysiologiset vaikutukset. Tutkimusraportti IVO-A-04/87. Imatran Voima Oy, Helsinki, 1987.