

1 JOHDANTO

2 SÄHKÖKENTÄT

2.1 Sähkökentälähteitä

2.2 Sähkökenttien mittaaminen

2.3 Voimajohtojen sähkökenttien laskenta

3 TTKK:N AIKAISEMMAT SÄHKÖKENTTÄMITTAUKSET 400 kV JOHDOILLA

3.1 Mittausvälineet

3.2 Mittaustulokset

4 KASVILLISUUDEN VAIKUTUS 400 kV VOIMAJOHTOJEN SÄHKÖKENTTIIN

4.1 Kasvillisuuden vaikutus aikaisemmissa mittauksissa

4.2 Perusmittaukset esimerkki pylväsväleillä

4.3 Pylväsvälin V2 kasvillisuusmittaukset

4.4 Pylväsvälin V4 kasvillisuusmittaukset

4.5 Pylväsvälin V5 kasvillisuusmittaukset

4.6 Pylväsvälin V8 kasvillisuusmittaukset

4.7 Pylväsvälin V9 kasvillisuusmittaukset

4.8 Pylväsvälin V10 kasvillisuusmittaukset

4.9 Pylväsvälin V11 kasvillisuusmittaukset

5 POHDINTA

6 YHTEENVETO

LÄHTEET

Liite 1

Liite 2

Liite 3

Liite 4

Liite 5

Liite 6

Liite 7

Liite 8

Liite 9

Liite 10

Liite 11

Liite 12

Liite 13

Sähkökenttien vaimentaminen kasvillisuuden avulla 400 kV:n voimansiirtojohtojen alla



Marko Suojanen, Jyri Vehmaskoski, [Leena Korpinen](#)
[Tampereen teknillinen korkeakoulu](#)

Tutkimus on tehty kauppaja teollisuusministeriön tuella.

Julkaistu 28.2.2000

[Palaute](#)

1 JOHDANTO

Pientaajuisten sähkö- ja magneettikenttien mahdollisista terveysvaikutuksista on käyty laajaa keskustelua jo vuosien ajan. Euroopan unionin neuvosto on julkaissut suosituksen väestön sähkömagneettisille kentille (0 Hz - 300 GHz) altistumisen rajoittamisesta/[3/](#). Suositus perustuu ICNIRP:n (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) suositukseen väestön altistuksen enimmäisarvoista, jonka mukaan 50 Hz kentille altistumisen enimmäisarvot ovat 5 kV/m ja 100 mT [/4/](#).

Suomessa Säteilyturvakeskus valmistelee Sosiaali- ja terveystieteiden ministeriölle (STM) uutta STM:n päätöstä ionisoimattoman säteilyn enimmäisarvoista, jotka sisältävät myös enimmäisarvot pientaajuisille sähkö- ja magneettikentille. Tulevissa enimmäisarvoissa ovat mukana myös sähkökentät, joille altistumista ei ole viime vuosina laajemmin tutkittu [/7/](#).

Vuonna 1998 Tampereen teknillisessä korkeakoulussa (TTKK) tehtiin TEKESin rahoituksella tutkimus "Kartoitus pientaajuisista sähkökentistä elin- ja työympäristössä", jonka tarkoituksena oli arvioida sähkökenttäaltistusta. Tutkimuksessa keskityttiin erityisesti 400 kV voimajohtojen ja sähköasemien sähkökenttiin. Kaiken kaikkiaan sähkökenttiä mitattiin 25 pylväsvälillä (Tampereen, Helsingin ja Paimion lähistöllä) sekä 400 kV ja 110 kV sähköasemilla.

Voimajohtomittauksissa ICNIRP:n suosittama 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 suositusarvosta 10 kV/m. Muillakin pylväsväleillä suurimmat tulokset olivat lähellä väestön suositusarvoa. Tuloksiin vaikutti luonnollisesti se, että mittauksiin valittiin sellaisia kohteita, joissa odotettiin saatavan mahdollisesti korkeita mittaustuloksia.

Mittausten aikana todettiin, että kasvillisuus pienensi voimajohtojen kenttiä monin paikoin (yhden metrin mittauskorkeudella). Kasvillisuuden pienentävää vaikutusta ei kuitenkaan näiden mittausten yhteydessä tarkemmin analysoitu. Kenttien vähentämisen kannalta asia on kuitenkin keskeinen, koska kasvillisuuden avulla on mahdollista löytää halpoja altistuksen vähentämiskeinoja.

Tältä pohjalta käynnistettiin uusi tutkimushanke aiheesta "Sähkökenttien vaimentaminen kasvillisuuden avulla 400 kV voimansiirtojohtojen alla". Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää kasvillisuuden vaikutusta pientaajuisiin sähkökenttiin 400 kV voimajohtojen alla. Tarkoituksena oli saada selville, miten paljon kasvillisuus vaikuttaa sähkökenttiin voimajohtojen läheisyydessä. Lisäksi pylväsväleille tehtiin analyttinen laskenta, joka ei huomioi kasvillisuuden vaikutusta.

Tähän raporttiin on koottu yhteenveto tästä hankkeesta. Raportissa on esitelty mittaus- ja laskentatuloksia 400 kV voimajohtoilta. Esimerkinomaisesti on esitetty erilaisten kasvien kykyä vaimentaa sähkökenttiä ja arvioitu eri tekijöiden vaikutusta kentän voimakkuuksiin.

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. [/9/](#)

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. /9/

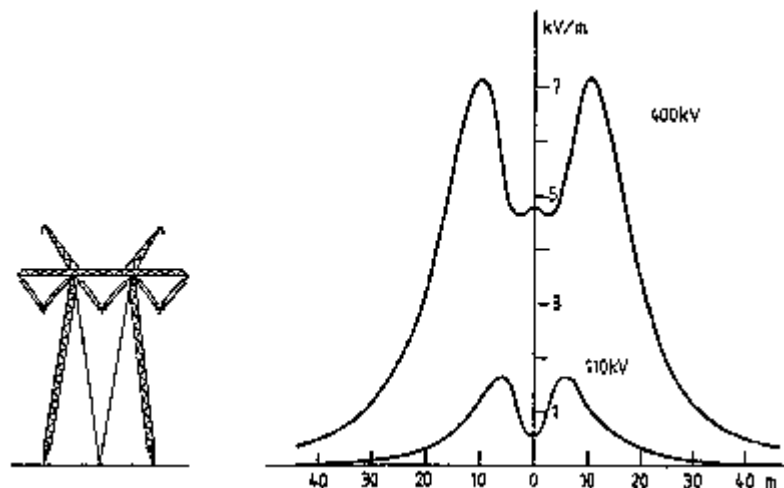
2.1 Sähkökenttälähteitä

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 /8/. 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 portaalipylväs /2,8,9/.

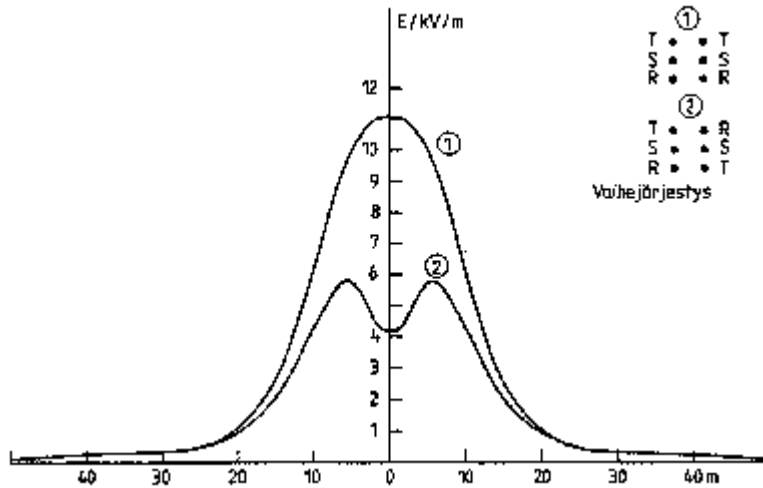
Kuvassa 2.1 on laskettu portaalipylväsrakenteisten 400 kV ja 110 kV voimajohtojen sähkökentän voimakkuudet maanpinnan läheisyydessä.



Kuva 2.1. 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. /2/

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

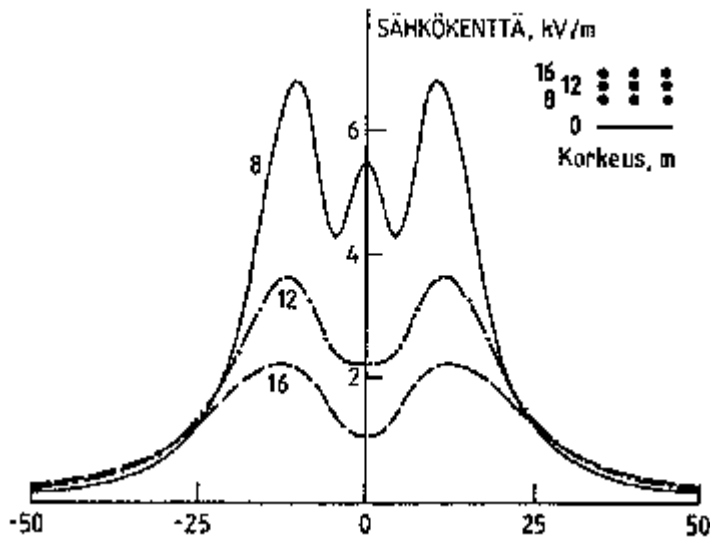
Kaksoisjohdon sähkökentän voimakkuuteen vaikuttaa vaihejohtimien järjestys toisiinsa nähden. Kuvassa 2.2 on kahden 400 kV kaksoisjohdon aiheuttamia laskettuja sähkökenttiä erilaisilla vaihejärjestyksillä.



Kuva 2.2. Lasketut sähkökentät tyypillisimpien 400 kV kaksoisjohtorakenteiden läheisyydessä. Johdolla 1 vaihejärjestys on peilisyymetrinen ja johdolla 2 pistesyymetrinen. Johdinten väli vaaka suunnassa on 8,5 m ja pystysuunnassa 9 m. Alimpien johtimien korkeus maasta on 10 m. /12/

Kuvasta nähdään, että pistesyymetrisellä vaihejärjestyksellä sähkökentät ovat lähellä johtoa selvästi pienemmät kuin peilisyymetrisellä vaihejärjestyksellä.

Sähkökentän voimakkuus riippuu myös tarkasteluetaäisyydestä. Kentät ovat voimakkaimmillaan johtojen pylväsvälin keskellä, missä riippuma on suurin. Sähkökentän voimakkuuteen vaikuttaa myös johdon ripustuskorkeus. Kuvassa 2.3 on laskettu esimerkki siitä, miten ripustuskorkeus vaikuttaa portaalijohdon aiheuttamaan sähkökenttään /11/.



Kuva 2.3. Sähkökentän voimakkuus 400 kV johdoilla maanpinnalla eri johdinkorkeuksilla. Johdinten 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. /9/

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 /10,11, 12/. Vertailun vuoksi on taulukkoon 2.1 kerätty mittaustuloksia erilaisten lähteiden tuottamista sähkökentistä /9/.

Taulukko 2.1. Sähkökenttien mittaustuloksia. /9/

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. /5/

Voimajohtojen kenttien mittaamisesta on annettu myös standardi IEEE Std 644-1994 /6/. Se sisältää sekä sähkö- että magneetikenttien mittaamisen. Standardin sisältö vastaa sähkökenttien mittaamisen perusteiden osalta pitkälti IEC:n standardia /5/. 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. /6/

IEEE-standardin /6/ mukaan sähkökenttää mitattaessa on mittajaan 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 mittaus on mahdollista suorittaa käyttämällä erillistä koaksiaalikaapelilla mittalaitteeseen kytkettävää näyttöyksikköä. /6/

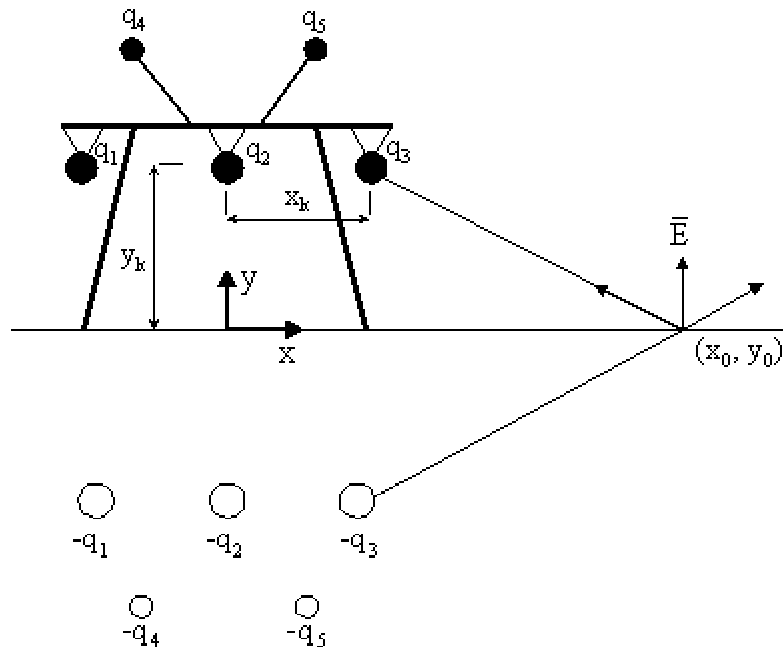
Ennen mittausten lopettamista on suotavaa tehdä useita toistomittauksia alkuperäisten mittauspisteiden väliltä, jotta nähdään viittauksia mahdollisten johdinkorkeuden, kuorman ja virran muutosten aiheuttamista vaikutuksista kentänvoimakkuuksissa. /6/

Standardin /6/ mukaan mittauspöytäkirjaan merkitään taustatietoina lämpötila, ilman kosteus ja maalaji, sekä voimajohtoon 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. /6/

Standardit /5, 6/ suosittelevat, että sähkökenttämittausten kokonaisepävarmuuden tulee olla alle $\pm 10\%$ / 5, 6/. Kokonaisepävarmuus saadaan laskemalla neliöjuuri yksittäisten epävarmuuksien neliöiden summasta. Suurimmat yksittäiset virhelähteet ovat mittarin suuntaus, lämpötilan, ilmankosteuden ja mittajaan vaikutukset (esimerkiksi anturin ja kentänaiheuttajan välinen vuorovaikutus, joskus jopa vuotovirta mittarin kädensijan kautta). Mittausten aikana mittajaan 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. /5/

2.3 Voimajohtojen sähkökenttien laskenta

Mittaamisen lisäksi sähkökenttä voidaan määrittää myös laskemalla. Tässä raportissa on keskitytty vain voimajohtojen sähkökenttien laskentaan. Voimajohtojen sähkökenttien laskentaan käytetään yleensä analyttistä laskentamenetelmää /1/. Kuvassa 2.4 on esitetty sähkökentän laskentaan liittyvät johdon parametrit, varaukset ja kentän muodostuminen pisteeseen (x_0, y_0) .



Kuva 2.4. Sähkökentän laskentaan liittyvät johdon parametrit ja varaukset. (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).

Laskennassa oletetaan, että maa on tasainen ja vaihejännitteet ovat symmetrisiä. Sähkökentän suunta on maan pinnalla kohtisuoraan maata vastaan, koska maa on johtava tasopotentiaalipinta. Peilikuvaperiaatteen avulla saadaan laskennassa maan pinta määriteltyä tasopotentiaalipinnaksi ja samalla kentän suunta todelliseksi. Peilikuvaperiaatteen mukaisesti maan alle oletetaan peilikuvavaraukset, joiden suuruus on varsinaisten varausten vastaluku.

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 , seuraavan yhtälön mukaisesti

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

missä \bar{Q} on vektori varauksista q_1, q_2, q_3, q_4 ja q_5 ,

\mathbf{P} on johtimien tyypin ja johdon rakenteen avulla määräytyvä potentiaalikerroinmatriisi,

\bar{V} on vektori johtimien jännitteistä v_1, v_2, v_3, v_4 ja v_5 .

Potentiaalikerroinmatriisin diagonaalialkiot P_{kk} saadaan seuraavan yhtälön mukaan.

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

missä ϵ_0 on tyhjän permittiivisyys,

y_k on johtimen k etäisyys maan pintaan,

x_k on johtimen k halkaisija.

Potentiaalikerroinmatriisin muut alkiot P_{kl} saadaan seuraavan yhtälön mukaan.

$$P_{kl} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \ln \frac{(x_k - x_l)^2 + (y_k + y_l)^2}{(x_k - x_l)^2 + (y_k - y_l)^2} \quad (3)$$

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 peilikuvavarausesta lasketun sähkökentän maan pinnan suuntaiset osat kumoavat toisensa. Sen takia laskennassa saatava sähkökentän suunta on maan pinnassa kohtisuorassa maan tasoon nähden, eikä laskentatuloksessa pysty ottamaan huomioon maanpinnan epätasaisuuksia.

Sähkökentän laskentaan käytetään seuraavaa yhtälöä

$$\vec{E} = \sum_{k=1}^5 \frac{q_k}{2\pi\epsilon_0} \left[\left(\frac{(x_0 - x_k)}{R_1^2} - \frac{(x_0 - x_k)}{R_2^2} \right) \vec{a}_x + \left(\frac{(y_0 - y_k)}{R_1^2} - \frac{(y_0 - y_k)}{R_2^2} \right) \vec{a}_y \right] \quad (4)$$

missä q_k on johtimen k varaus,
 x_k, y_k, x_0 ja y_0 ovat tarkastelupaikan koordinaatit,
 \vec{a}_x ja \vec{a}_y ovat yksikkövektoreita, ja

$$R_1^2 = (x_k - x_0)^2 + (y_k - y_0)^2 \quad (5)$$

$$R_2^2 = (x_k - x_0)^2 + (y_k + y_0)^2 \quad (6)$$

Sähkökentän mittauksien avulla saatava arvo on esimerkiksi sähkökentän resultantti, joten myös laskennassa on selvitettävä kentän resultantti. Sähkökentän voimakkuusvektorista (yhtälö 4) lasketaan resultantti seuraavan yhtälön avulla.

$$E_{res} = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2} \quad (7)$$

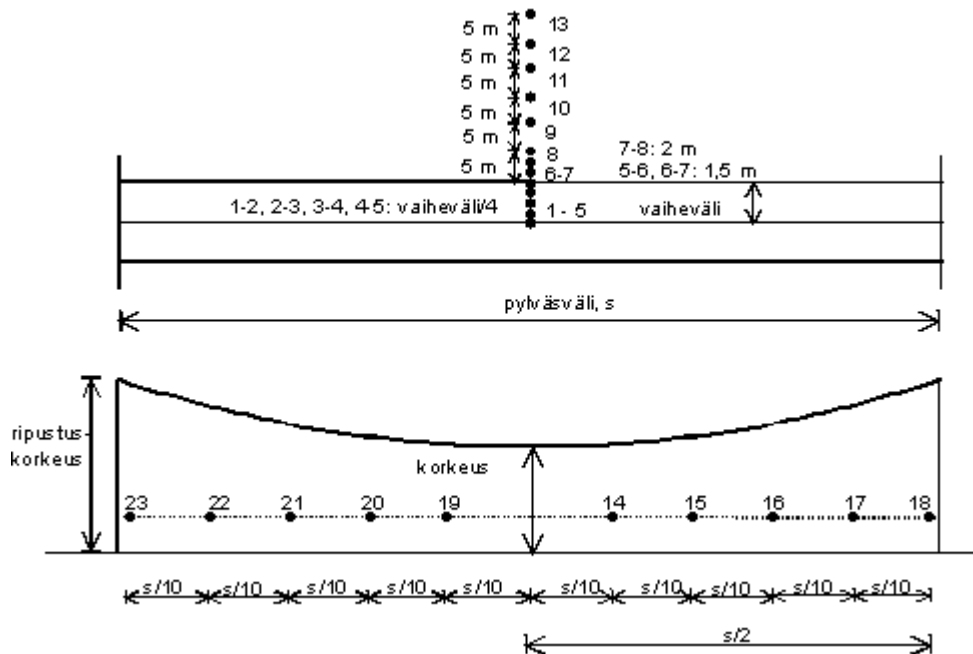
missä E_x, E_y, E_z ovat sähkökentän voimakkuuden komponenttien amplitudit.

Käytännön laskentaa varten edellä esitetyistä yhtälöistä on TTKK:ssa tehty Matlab -ohjelmassa toimiva koodi.

3 TTKK:N AIKAISEMMAT SÄHKÖKENTTÄMITTAUKSET 400 kV JOHDOILLA

Sähkökenttien kartoituksessa mittauskohteet valittiin yhteistyössä Fingrid Oyj:n kanssa. Mittauskohteiksi valittiin 400 kV voimajohdoilta 25 pylväsväliä, joista neljä edustivat erikoispaikkoja. Pylväsvälien valintaan vaikuttivat odotettavissa olevat suuret sähkökentän arvot sekä kulkuyhteydet Tampereelta. /10/

Johtojen sähkökenttien mittaamisessa käytettiin sovelletusti IEEE 644-1994 standardia /6/. Standardin mukaiseen mittausmenetelmään lisättiin kaksi mittauspistettä (pisteet 6 ja 7, kuva 3.1), koska johdon sähkökentän oletettiin olevan suurimmillaan hieman kauempana uloimmasta vaihejohtimesta. Muuten mittauspisteiden väli tässä suunnassa (pisteet 8-13, kuva 3.1) oli 5 m. Pylväsvälillä sähkökentän voimakkuus mitattiin normaalisti 23 pisteessä. Mittauskorkeus oli 1 m maanpinnasta. Mittauspisteiden sijainti on esitetty kuvassa 3.1.



Kuva 3.1. Sähkökentän voimakkuuden mittauspisteet pylväsvälillä. Pylväsvälin pituus on s .

Kuvassa 3.1 mittauspiste 1 oli pylväsvälin keskimmäisen vaihejohtimen keskipisteessä. Pisteet 2-13 olivat pisteestä 1 johtoa vastaan kohtisuorasti johdosta poispäin. Pisteet 14-23 olivat johdon suuntaisesti. Johdon suuntaisesti oli 5 pistettä keskipisteestä molempiin suuntiin.

Mittaukset suoritettiin ensin johtoa vastaan kohtisuoraan. Keskimmäisen ja uloimman vaihejohtimen välillä suoritettiin viisi mittauspistettä tasavälein. Mikäli johdon rinnalla kulki toinen johto mittaus suunnassa, jatkettiin mittauspistettä tavallista pidemmälle. Mittaukseen tuli näin ollen lisäpisteitä. Mittauspistettä jatkettiin 5 m välein 30 m asti toisen johdon uloimmasta vaihejohtimesta määritettynä.

Johdon suuntaisesti mittaukset tehtiin sillä etäisyydellä (sivusuunnassa) keskimmäisestä vaihejohtimesta, jolla sähkökentän voimakkuus oli suurin kohtisuoraan tehtyjen mittauspisteiden perusteella. Tämä piste mitattiin vain kerran. Yleensä kenttä on suurin uloimman johtimen läheisyydessä. Johdon suuntaisesti tehtiin viisi mittauspistettä tasavälein pylväsvälin keskeltä pylväälle molempiin suuntiin.

Mittauspöytäkirjaan merkittiin mittauspisteiden aloitus- ja lopetusajat, ilman lämpötila ja kosteus, johdon päiden jännitteet ja tehot mittauspisteiden alussa ja lopussa ja mitatut sähkökentän voimakkuudet. Lisäksi mittauspöytäkirjaan piirrettiin johdon rakenne ja mittauspaikasta piirros. Piirroksen merkittiin maaston erityiskohteet esimerkiksi huomattavat maan pinnan tasaisuudesta poikkeavat kohteet, kuten puut ja rakennukset, niiden korkeus sekä arvioitu materiaali sekä tiet ja muut sähköjohdot. Myös johdon korkeus mitattiin matalimmalta paikalta.

Joissakin kohteissa ei ollut tarpeellista suorittaa koko pylväsvälin mittausta. Tällaisissa kohteissa tehtiin sovellettuja erikoismittauksia, jotka on kuvattu lähteessä /10/

(WWW -osoite:<http://www.tut.fi/~korpinen/tekes98/raportti.htm>).

3.1 Mittausvälineet

Sähkökentän mittaukset suoritettiin Wandel & Goltermann EFA-3 sähkökenttämittarilla. Mittarin mittaustarkkuus on $\pm 5\% \pm 1 \text{ V/m}$ 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 mittatikkua.

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

3.2 Mittaustulokset

Kaiken kaikkiaan tehtiin 39 mittausta, jotka sisälsivät perus- ja erikoismittauksia, 25 pylväsväliltä. Ensimmäinen mittaus oli koemittaus, jossa kokeiltiin mittauksen toteutusta käytännössä. Mittaukset suoritettiin Tampereen, Helsingin ja Paimion ympäristössä. Taulukossa 3.1 on lueteltu tehdyt sähkökenttämittaukset.

Taulukko 3.1. Sähkökenttämittaustulokset vuonna 1998.

Päivä-määrä	Mittaus/Pylväsväli	Mittaajien määrä	Mittaustyyppi (perus/erikois)	Onnistuminen	Huomioitavia seikkoja
21.4.	Koe	4	Perus	kyllä	Koemittaus, jossa testattiin mittaustuloksia käytännössä
27.4.	T1/V1	3	Perus	kyllä	
28.4.	T2/V2	2	Perus	kyllä	
29.4.	T3/V3	2	Perus	kyllä	
11.5.	T4/V4	2	Perus	ei	Mittaus oli virheellinen mittarin käyttövirheen vuoksi
11.6.	T5/V4	2	Perus	kyllä	Pylväsvälin V4 mittauksen uusinta
12.5.	T6/V5	2	Perus	kyllä	
13.5.	T7/V6	2	Perus	kyllä	
15.5.	T8/V7	2	Perus	kyllä	
18.5.	T9/V8	2	Perus	kyllä	
26.5.	T10/V9	2	Perus	kyllä	
27.5.	T11/V10	2	Perus	kyllä	

29.5.	T12/V11	2	Perus	ei	Mittaus keskeytyi mittarin toimintahäiriön vuoksi
5.6.	T13/V11	4	Perus	kyllä	Pylväsvälin V11 mittauksen uusinta, mukana 2 mittaajaa harjoittelemassa
9.6.	H1/V12	4	Perus	kyllä	
9.6.	H2/V13	4	Perus	kyllä	
16.6.	H3/V14	4	Perus	kyllä	
16.6.	H4/V15	4	Perus	kyllä	
24.6.	H5/V16	4	Perus	kyllä	
24.6.	H6/V16	4	Erikois	kyllä	
24.6.	H7/V17	4	Perus	kyllä	
24.6.	H8/V17	4	Erikois	kyllä	
25.6.	H9/V18	4	perus+4 lisäp.	kyllä	Mittaukseen poikittaissuunnassa lisättiin neljä ylimääräistä pistettä, vierellä kulki toinen johto
25.6.	H10/V18	4	Erikois	kyllä	Mittaus toiselle puolelle johtoa
25.6.	H11/V19	4	Erikois	kyllä	Vuorottelun mittaus, vain poikittaissuunta
25.6.	H12/V19	4	Erikois	kyllä	Vuorottelun mittaus, mittaus toisella puolella johtoa
25.6.	H13/V20	4	perus+4 lisäp.	kyllä	Mittaukseen poikittaissuunnassa lisättiin neljä ylimääräistä pistettä, vierellä kulki toinen johto
25.6.	H14/V20	4	Erikois	kyllä	Mittaus toiselle puolelle johtoa
26.6.	H15/V21	4	Erikois	kyllä	Pienen vaihevälin vuoksi vaiheiden välissä vain 1 piste
26.6.	H16/V21	4	Perus	kyllä	Pienen vaihevälin vuoksi vaiheiden välissä vain 1 piste Mittaus toiselle puolelle johtoa
26.6.	H17/V22	4	Erikois	kyllä	
26.6.	H18/V23	4	Erikois	kyllä	Mittaus siltaa pitkin
1.7.	P1/V24	4	Erikois	kyllä	Mittaus siltaa pitkin molemmille puolille johtoa
1.7.	P2/V25	4	Erikois	kyllä	Vuorottelun mittaus, vain poikittaissuunta
1.7.	P3/V25	4	Erikois	kyllä	Vuorottelun mittaus, mittaus toisella puolella johtoa
1.7.	P4/V25	4	perus+10 lisäp.	kyllä	Perusmittauksen lisäksi mitattiin 10 pistettä toiseen suuntaan kuin mittauksessa P7
1.7.	P5/V25	4	Erikois	kyllä	Vuorottelun mittaus, vain poikittaissuunta

1.7.	P6/V25	4	Erikois	kyllä	Vuorottelun mittausta, mittausta toisella puolella johtoa
1.7.	P7/V25	4	Erikois	kyllä	Mittaus johdon alittavan moottoritien liittymän suuntaisesti

Kahdella pylväsvälillä, V4 ja V11, tapahtui mittauksen aikana virheitä, jotka korjattiin uusintamittauksilla. Uusitut mittaukset on esitetty taulukossa 3.1 kyseisten mittausten jälkeen seuraavalla rivillä. Taulukossa 3.2 on lueteltu tehdyissä sähkökenttämittauksissa saadut suurimmat tulokset. Taulukossa esitetyissä johdon suuntaisissa tuloksissa ei ole otettu huomioon kohtisuorassa suunnassa saatua suurinta arvoa, joka sijaitsee aina myös johdon suuntaisten mittausten kanssa samalla linjalla.

Taulukko 3.2. Suurimmat mittaustulokset ($E_{k,max}$ kohtisuorassa suunnassa; $E_{s,max}$ johdon suuntaisesti). Lisäksi taulukossa on johdon jännitteen keskiarvo ja vaihejohtimien korkeudet.

Mittaus/ Pylväsväli	$E_{k,max}$ (kV/m)	$E_{s,max}$ (kV/m)	Jännitteen keskiarvo (kV)	Vaihejohtimien korkeudet ja keskiarvo (m)
T1/V1	4,7	4,7	400,5	14,1; 13,8; 13,7; 13,9
T2/V2	5,2	4,6	400,8	14,1; 13,8; 13,3; 13,8
T3/V3	4,4	4,4	399,0	14,9; 15,6; 15,4; 15,3
T4/V4	1,5	1,6	401,0	15,1; 15,1; 14,9; 15,1
T5/V4	2,7	4,1	401,5	15,1; 15,1; 15,0; 15,1
T6/V5	0,22	2,9	399,0	14,5; 13,8; 12,5; 13,6
T7/V6	4,4	2,5	405,6	13,3; 13,0; 13,1; 13,1
T8/V7	4,4	2,8	401,5	12,3; 12,8; 13,3; 12,8
T9/V8	3,8	2,7	402,6	13,6; 13,0; 12,5; 13,0
T10/V9	4,5	5,1	402,3	12,3; 12,3; 12,9; 12,5
T11/V10	6,5	5,5	397,1	11,9; 13,4; 14,4; 13,2
T12/V11	5,9	3,1	398,4	12,3; 12,2; 12,6; 12,4
T13/V11	5,3	5,8	400,0	12,3; 12,3; 12,6; 12,4
H1/V12	3,8	5,0	396,4	11,2; 10,2; 9,1; 10,2
H2/V13	8,0	9,3	397,0	10,2; 10,8; 9,8; 10,3
H3/V14	1,2	1,6	400,5	17,1; 17,3; 16,8; 17,1
H4/V15	5,3	5,0	402,8	13,4; 13,5; 13,6; 13,5
H5/V16	1,9	3,5	396,5	13,6 (alin johdin)
H6/V16	1,2		396,3	13,6 (alin johdin)
H7/V17	3,8	4,3	396,5	11,8 (alin johdin)
H8/V17	2,0		396,8	19,5 (alin johdin)
H9/V18	4,9	3,8	396,1	11,0; 11,1; 11,0; 11,0
H10/V18	4,8		396,0	11,0; 11,1; 11,0; 11,0
H11/V19	1,0		395,8	7,8 (vuorottelun alin kohta)

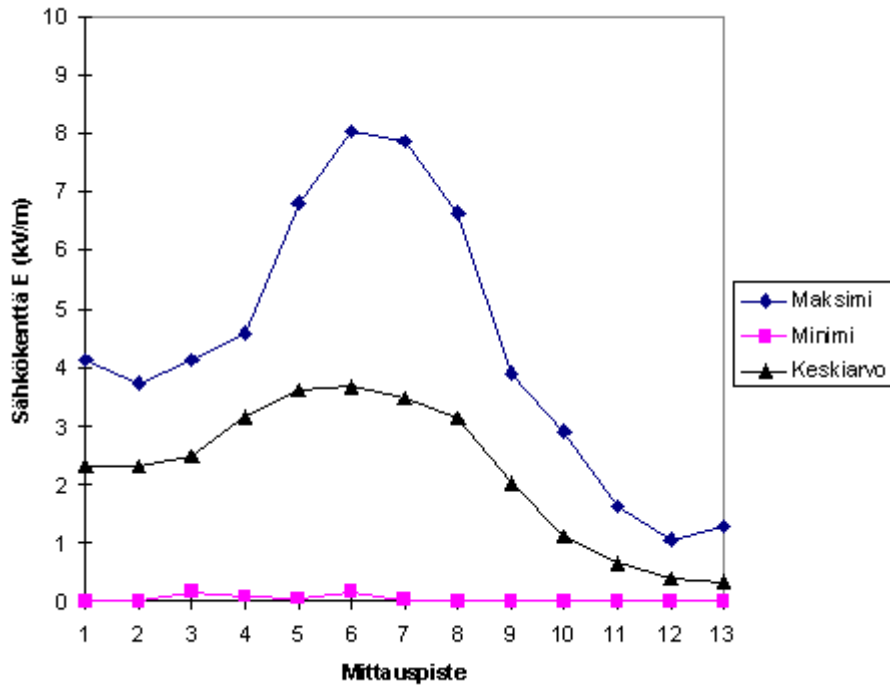
H12/V19	4,6	1,3	395,5	7,8 (vuorottelun alin kohta)
H13/V20	4,0	4,1	395,1	10,0; 9,9; 9,8; 9,9
H14/V20	4,7		395,0	10,0; 9,9; 9,8; 9,9
H15/V21	2,5		399,8	13,9 (alin johdin)
H16/V21	2,8	3,4	399,6	13,9 (alin johdin)
H17/V22	2,6	2,4	398,0	12,4 (alin johdin)
H18/V23	2,6	2,5	396,8	19,5 (alin johdin)
P1/V24	6,5	5,1	399,3	12,0; 12,8; 13,6; 12,8
P2/V25	3,0		399,8	13,4 (vuorottelun alin kohta)
P3/V25	2,8	3,1	399,5	13,4 (vuorottelun alin kohta)
P4/V25	5,3	5,7	397,9	12,3; 12,4; 13,2; 12,7
P5/V25	3,1		399,0	14,2 (vuorottelun alin kohta)
P6/V25	2,9	2,5	398,0	14,2 (vuorottelun alin kohta)
P7/V25	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 viidellä 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.

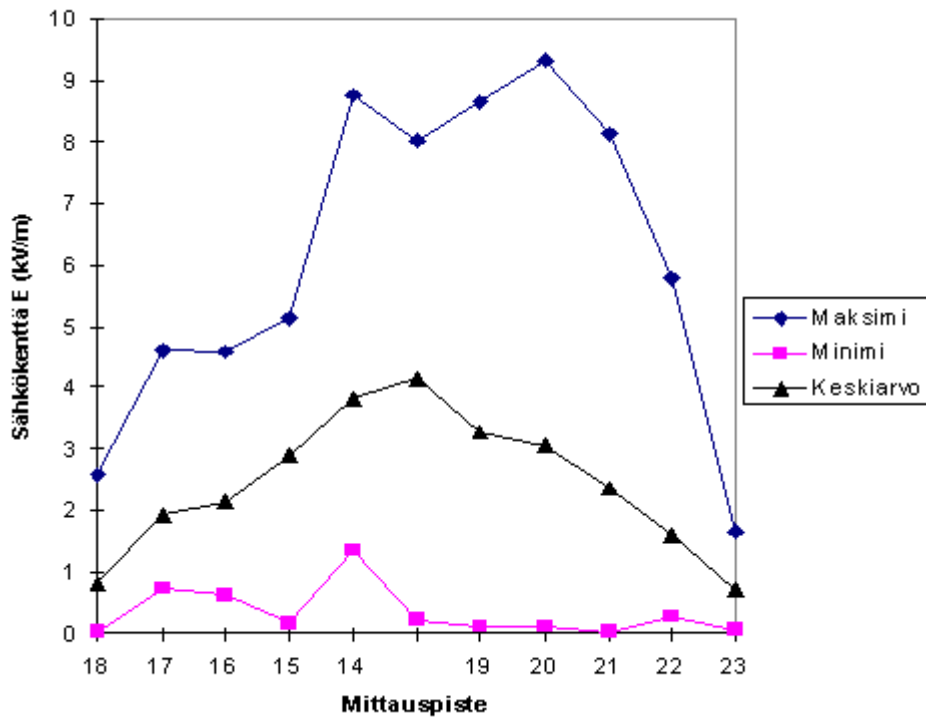
Paimion lähistöllä tehdyissä perusmittauksissa suurimmat mitatut sähkökentän arvot saatiin johdon suuntaisessa mittauksessa. Jännite mittausten aikana oli kuitenkin pienempi kuin johtoa vastaan kohtisuorassa suunnassa.

Perusmittausten mittaustulokset, saadut maksimi- ja minimiarvot sekä lasketut keskiarvot, on yhdistetty kuvissa 3.2 ja 3.3. Kuvassa 3.2 ovat arvot johtoa vastaan kohtisuorassa suunnassa ja kuvan 3.3 arvot ovat johdon suuntaisista mittauksista.



Kuva 3.2. 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 3.2 voidaan nähdä, miten siirryttäessä johdosta kauemmas sähkökenttä pienenee.



Kuva 3.3. Yhdistetyt sähkökentän voimakkuuden maksimi-, keski- ja minimiarvot johdon suuntaisissa mittauksissa (n = 21). Mitattujen johtojen päiden jännitteet vaihtelivat

välillä 391,1 - 407,5 kV.

Kuvasta 3.3 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.

Kuvia 3.2 ja 3.3 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.

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 kulkijat 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 pylväsvälillä. Nämä suurimmat arvot eivät kuitenkaan ylitä työntekijöille asetettua suositusarvoa, 10 kV/m.

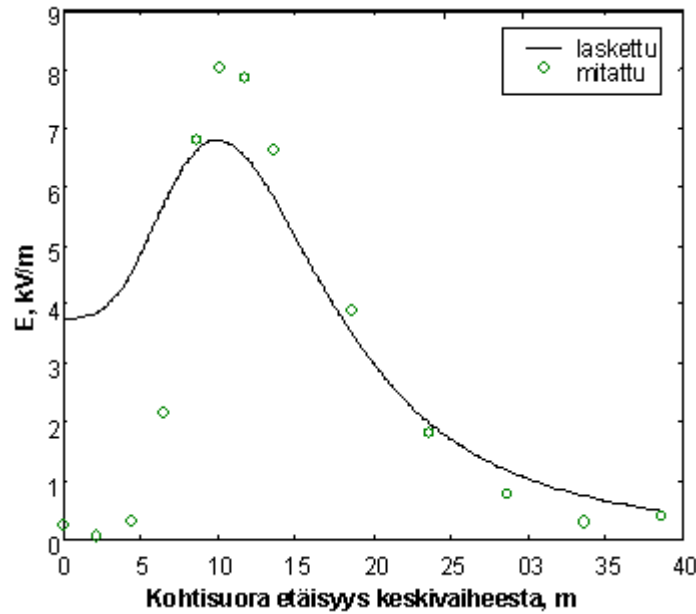
4 KASVILLISUUDEN VAIKUTUS 400 kV VOIMAJOHTOJEN SÄHKÖKENTTIIN

4.1 Kasvillisuuden vaikutus aikaisemmissa mittauksissa

Edellisessä luvussa esitetyt mittaukset on käyty uudestaan läpi ja arvioitu kasvillisuuden vaikutusta mittaustuloksiin. Liitteisiin 1 - 13 on kerätty tulokset kaikista näistä pylväsväleistä, joissa kasvillisuudella on oletettu olevan vaikutusta sähkökenttien suuruuteen. Liitteiden mukaan yleensä kasvillisuus on todennäköisesti pienentänyt mitattuja sähkökenttäärovoja. Pylväsvälillä V13 mitatut arvot ovat kuitenkin suurempia kuin lasketut. Sen tähden pylväsväli on otettu tarkempaan tarkasteluun. Kuvassa 4.1 on esitetty kyseinen pylväsväli ja kuvassa 4.2 mitatut ja lasketut arvot kyseiseltä pylväsväliltä.



Kuva 4.1. Mittauksen toteutus pylväsvälillä V13.



Kuva 4.2. Pylväsväliltä V13 mitatut ja lasketut sähkökentän voimakkuudet.

Pylväsvälin maasto ei ole aivan tasainen, vaan se nousee siirryttäessä pylväsväliltä pois päin. Tämä aiheuttaa ilmeisesti eron mittaustulosten ja laskentatulosten välillä. Yksittäisten mittauspisteiden osalta kuvassa 4.2. esimerkiksi (pisteet välillä 0-6 m) kasvillisuus on myös vaikuttanut pienentämään mitattuja kentänvoimakkuuksia.

Liitteissä 1 - 13 olevien mittaustulosten perusteella on valittu Tampereen alueelta pylväsvälit V2, V4, V5, V8, V9, V10 ja V11 jatkomittauskohteiksi. Näiltä seitsemältä pylväsväliltä mitattiin ensin edellä esitetyllä menetelmällä koko pylväsvälin sähkökentät ja sen jälkeen mitattiin yksittäisten kasvien vaikutusta, mittaamalla sähkökenttä aina 1 m välein johdon suunnassa. Mittaukset aloitettiin joko ihan kasvin vierestä tai 1 m päästä kasvista. Mittauskorkeutena oli 1 m.

4.2 Perusmittaukset esimerkki pylväsväleillä

Kaikilta tarkempaan tarkasteluun valituilta pylväsväleiltä mitattiin ensin luvussa 3 esitetyn mukaisesti sähkökentät.

Taulukossa 4.1 on lueteltu johtoa vastaan kohtisuorasti ja johdon suuntaisesti tehtyjen sähkökenttämittausten suurimmat arvot. Lisäksi taulukossa on johdon jännitteen keskiarvo ja vaihejohtimien korkeudet sekä suhteellinen ilmankosteus ja lämpötila. Taulukossa esitetyissä johdon suuntaisissa tuloksissa ei ole otettu huomioon kohtisuorassa suunnassa saatua maksimiarvoa, joka sijaitsee aina myös johdon suuntaisten mittausten kanssa samalla linjalla.

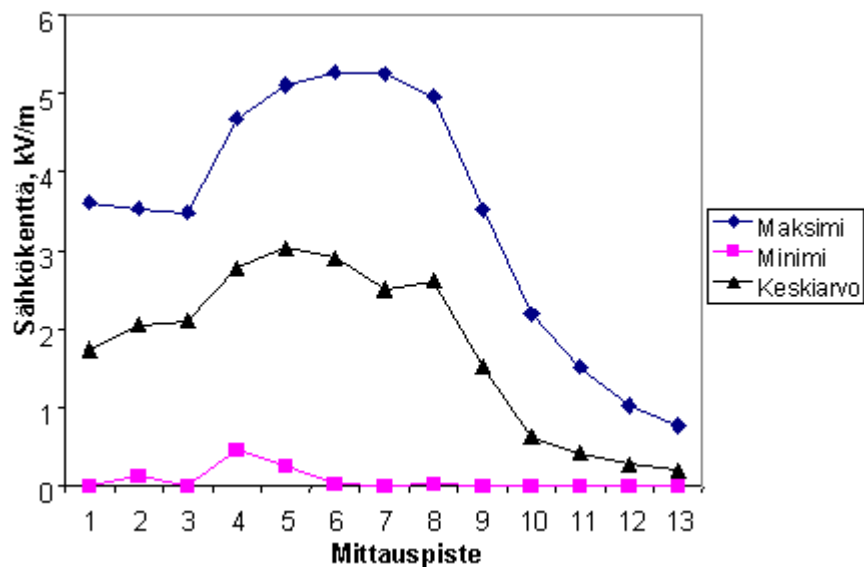
Taulukko 4.1. Suurimmat mittaustulokset ($E_{k,max}$ kohtisuorassa suunnassa; $E_{s,max}$ johdon suuntaisesti).

Mittaus	$E_{k,max}$ kV/m	$E_{s,max}$ kV/m	Jännitteen keskiarvo, kV	Vaihejohtimien korkeudet, m	Suhteellinen ilmankosteus, %	Lämpötila, °C
T2/V2	5,3	4,9	411,8	14,0 ; 13,5 ; 13,5	-	21
T4/V4	3,5	4,7	411,3	15,1 ; 15,1 ; 15,0	50	25

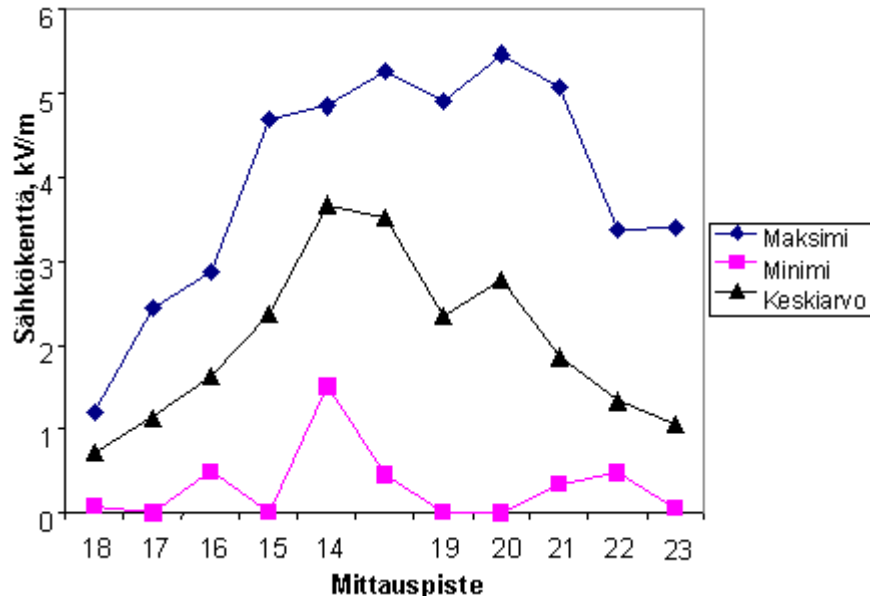
T5/V5	0,5	3,3	407,8	13,5 ; 11,9 ; 11,9	67	23
T8/V8	4,1	3,7	413,9	12,3 ; 12,9 ; 13,3	51	22
T9/V9	4,7	5,5	409,0	12,3 ; 12,2 ; 12,8	58	28
T10/V10	3,2	4,0	407,0	11,7 ; 12,7 ; 13,9	60	26
T11/V11	3,5	3,3	410,4	12,4 ; 12,1 ; 12,1	70	20

Tampereen lähistöllä tehdyissä mittauksissa suurimmat mitatut sähkökentän arvot saatiin kolmella pyläsvälillä (V2, V8 ja V11) johtoa vastaan kohtisuorassa suunnassa ja neljällä pyläsvälillä johdon suuntaisesti mitattaessa. Niistä kahdessa tapauksessa (V4 ja V5), joissa kenttä oli suurempi johdon suuntaisessa mittauksessa kuin kohtisuorissa mittauksissa, myös jännite nousi mittausten aikana. V9:ssä, V10:ssä ja V11:ssä taas johdon suuntaisissa mittauksissa maaston korkeuserot vaihtelivat jopa viisi metriä.

ICNIRP:in suosittelema väestön altistuksen suositusarvo 5 kV/m (50 Hz kentille) ylittyi tehdyissä mittauksissa kahdella pyläsvälillä. Mittaustulokset on yhdistetty kuvissa 4.3 ja 4.4. Saadut maksimi- ja minimiarvot sekä lasketut keskiarvot eri mittauspisteiden mukaan on yhdistetty. Kuvassa 4.3 ovat arvot johtoa vastaan kohtisuorassa suunnassa ja kuvan 4.4 arvot ovat johdon suuntaisista mittauksista.



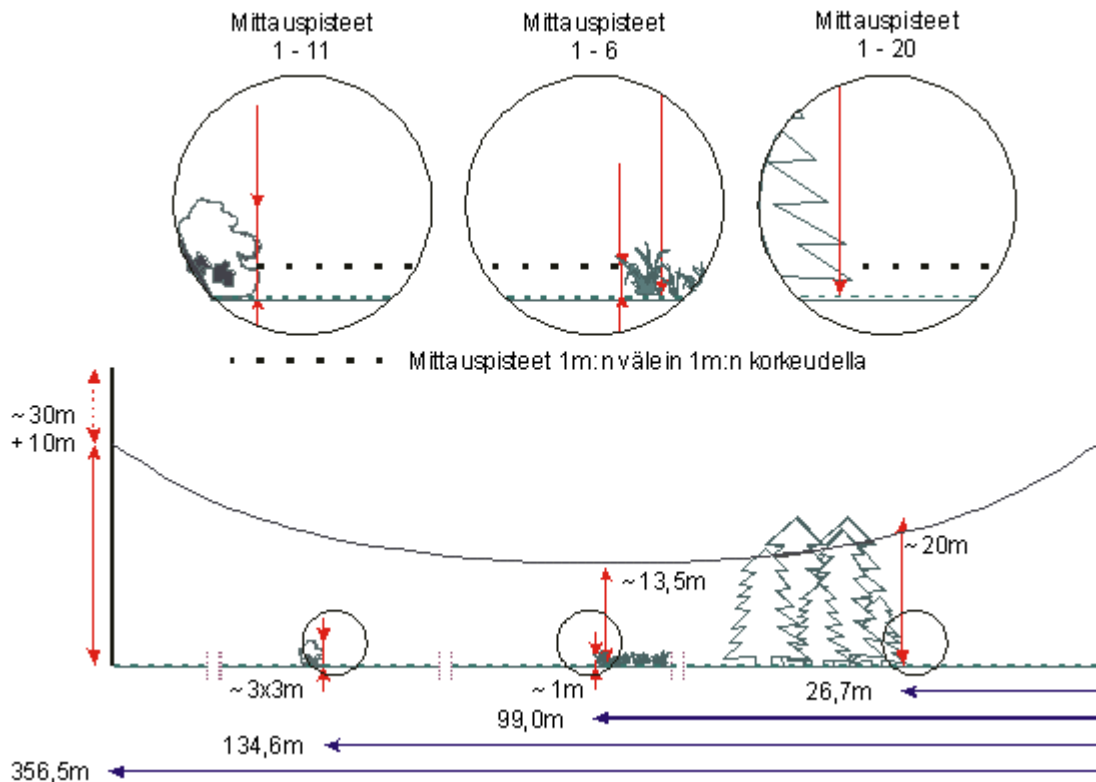
Kuva 4.3. Yhdistetyt sähkökentän voimakkuuden maksimi-, keski- ja minimiarvo johtoa vastaan kohtisuorissa mittauksissa (n = 7). Mitattujen johtojen päiden jännitteet vaihtelivat mittausten aikana välillä 401 - 415 kV.



Kuva 4.4. Yhdistetyt sähkökentän voimakkuuden maksimi-, keski- ja minimiarvot johdon suuntaisissa mittauksissa (n = 7). Mitattujen johtojen päiden jännitteet vaihtelivat välillä 401 - 415 kV.

4.3 Pylväsvälin V2 kasvillisuusmittaukset

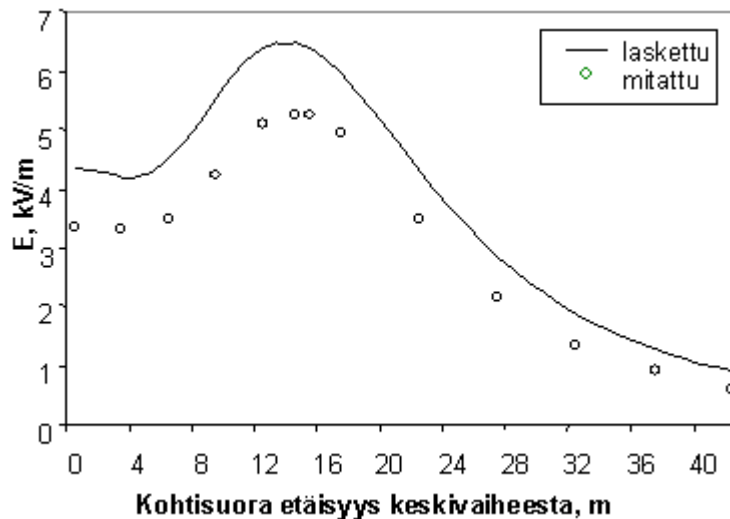
Pylväsvälillä V2 maasto oli pääosin peltoa, jossa kasvoi noin 20 senttimetriä korkea heinikkö. Paikoitellen pellolla kasvoi yksittäisiä pajupensaita ja leppikkoa, joista sai hyviä kasvillisuusmittauksia, sillä maasto oli hyvin tasaista ja muuta merkittävää kasvillisuutta mittauspisteiden ympäristössä ei ollut. Kuvassa 4.5 on esitetty pylväsvälillä V2 ollutta kasvillisuutta ja mittauspisteet.



Kuva 4.5. Mitattujen kasvillisuuksien paikat pylväsvälillä V2. Pylväsvälin pituus oli 356,5 metriä.

Johtovälillä kulki myös johtoja vastaan kohtisuoraan 20 kV:n johto. Sen vaikutus mittauksiin oli ilmeisen vähäinen.

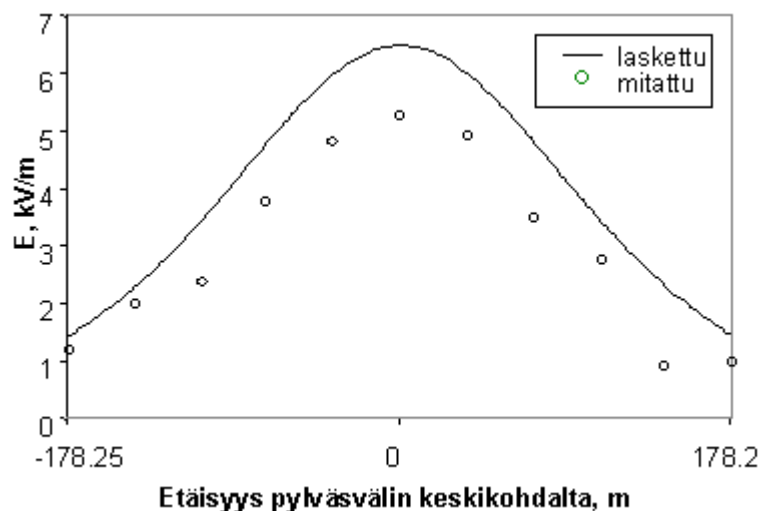
Kuvassa 4.6 on esitetty pylväsvälin V2 kohtisuoran suunnan mittaustulokset ja vastaavat analyyttisen laskennan tulokset.



Kuva 4.6. Mitattu ja laskettu sähkökentän voimakkuus kohtisuorassa suunnassa pylväsvälillä V2.

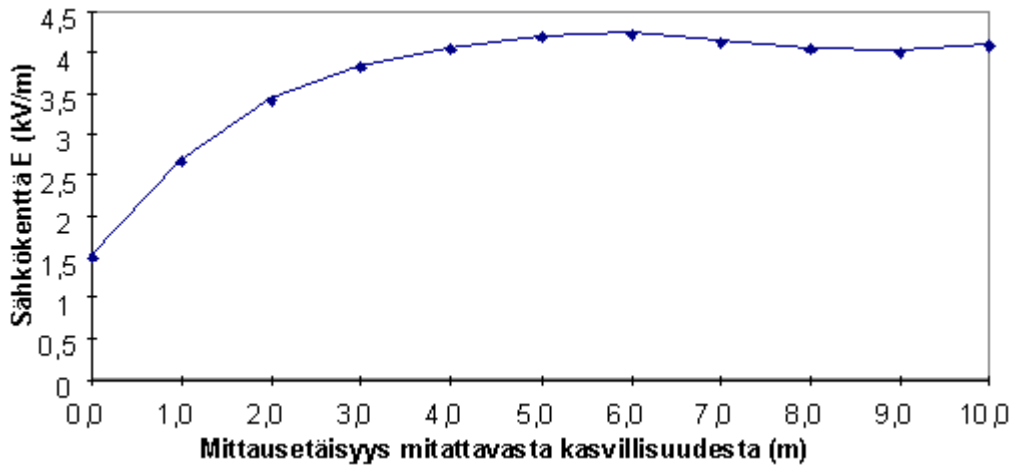
Kuvan 4.6 kuvaajasta nähdään, että kasvillisuudella on vain vähän vaikutusta liikuttaessa kauemmaksi johdoista. Tämä johtuu siitä, että mittauspisteet olivat pellolla. Vaihejohtimien alapuolella ja pisteessä, jossa sähkökenttä sai maksimiarvonsa mittaustulokset ovat pienempiä kuin analyyttisen laskennan tulokset.

Kuvassa 4.7 on esitetty pylväsvälin V2 johdon suuntaiset mittaustulokset ja vastaavat analyyttisen laskennan tulokset.

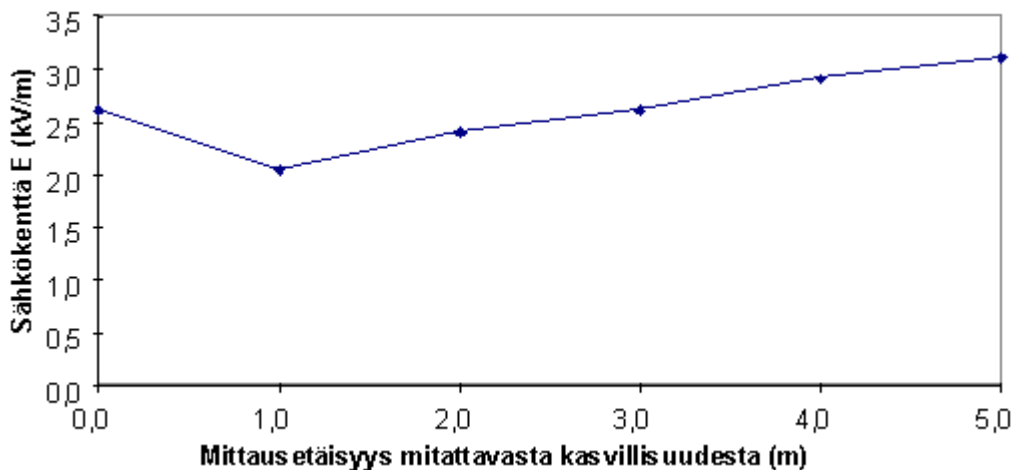


Kuva 4.7. Mitattu ja laskettu sähkökentän voimakkuus johdon suuntaisesti pylväsvälillä V2.

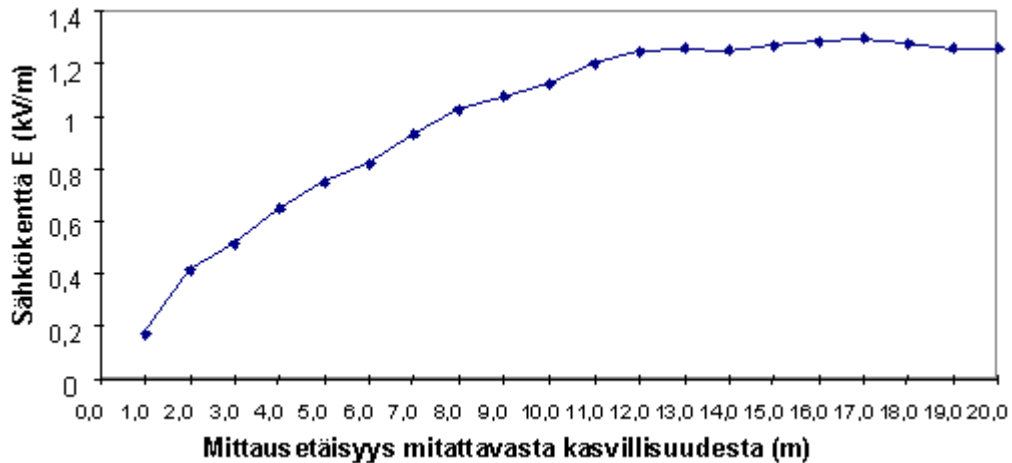
Kuvan 4.7 kuvaajasta nähdään, että laskettujen ja mitattujen tulosten välillä ei ole suurta eroa. Suurimmat erot ovat pylväsvälin keskikohdalla ja toisen pylvään lähistöllä. Pylväsvälillä V2 suoritettiin kolme kasvillisuusmittausta, joiden tulokset on esitetty seuraavissa kuvissa 4.8, 4.9 ja 4.10.



Kuva 4.8. Mittaustulokset pajupensaan vaikutuksesta sähkökenttään. Pajupensaon korkeus oli 3 metriä. Mittauspisteiden kohtisuora etäisyys keskivaiheesta oli 11,6 metriä.



Kuva 4.9. Mittaustulokset lepikon vaikutuksesta sähkökenttään. Lepikko oli 1 metrin korkuinen. Mittauspisteiden kohtisuora etäisyys keskivaiheesta oli 11 metriä.

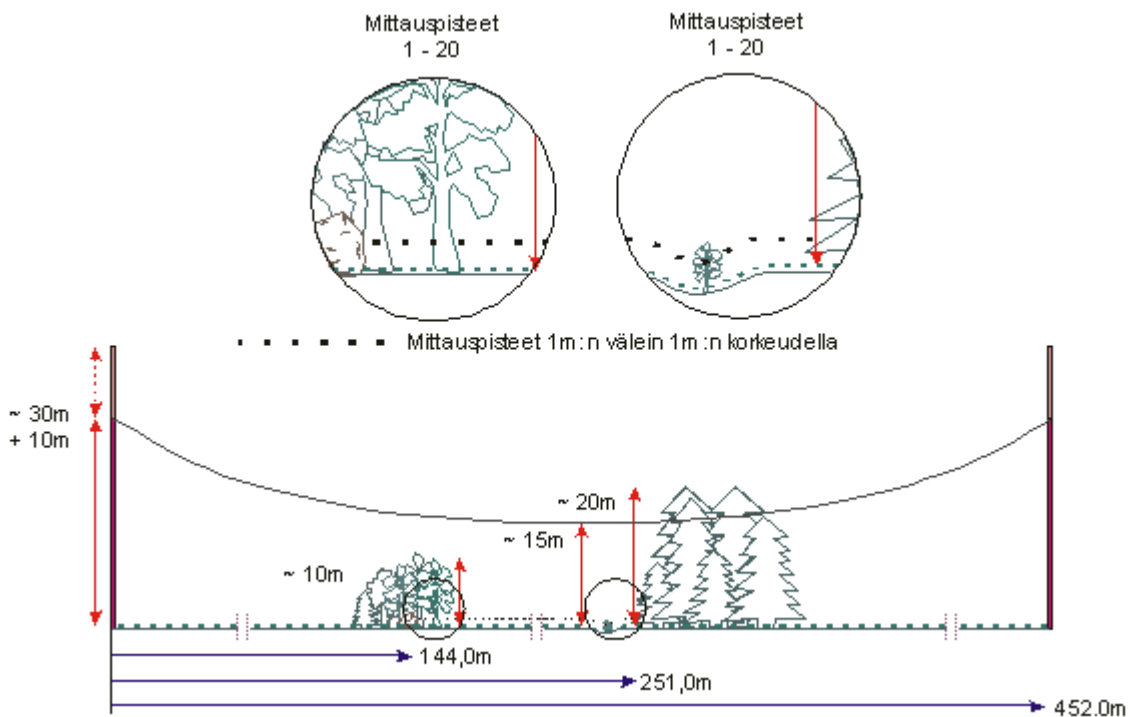


Kuva 4.10. Mittaustulokset kuusimetsän vaikutuksesta sähkökenttään. Kuusimetsän korkeus oli 20 metriä. Mittauspisteiden kohtisuora etäisyys keskivaiheesta oli 23 metriä.

Pajupensas (kuvassa 4.8) vaimentaa sähkökenttiä jonkin verran, mutta vain lähietäisyydellä. Kuvan 4.9 kuvaajasta nähdään, ettei 1 metrin korkuinen lepikko juuri vaikuta sähkökenttään. Kuvasta 4.10 nähdään, kuinka kuusimetsä vaimentaa kenttiä laajalla alueella. Huomattavaa kuusimetsän kuvaajassa on se, että sähkökentän arvo vielä 20 metrin päässä kuusimetsän reunasta on alle 1,4 kV/m.

4.4 Pylväsvälin V4 kasvillisuusmittaukset

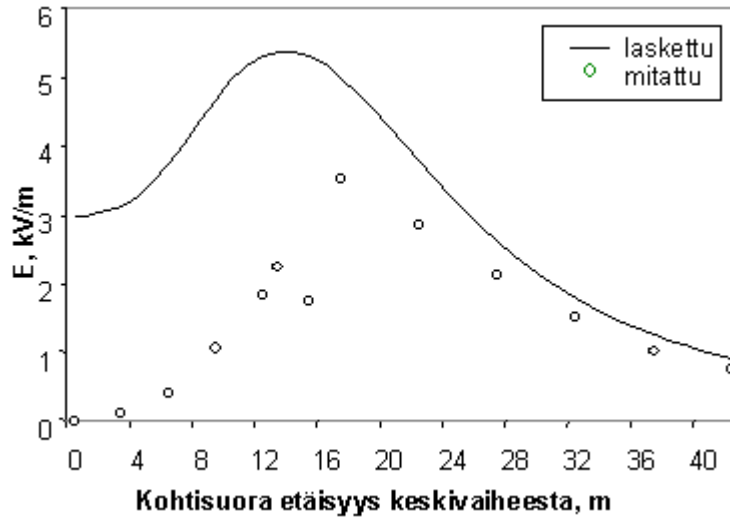
Pylväsvälillä V4 kasvoi tasaisesti 1-3 metriä korkea kasvustoa. Johtovälin sivussa oli kuitenkin peltoa, jossa saatiin tehtyä kasvillisuusmittauksia 20 metriä korkean metsän reunasta sekä 10 metriä korkeista haavoista. Mittaussuunta valittiin niin, ettei muu kasvillisuus vaikuttanut mittauksiin. Kuvassa 4.11 on esitetty pylväsvälillä V4 ollutta kasvillisuutta ja mittauspisteet.



Kuva 4.11. Mitattujen kasvillisuuksien paikat pylväsvälillä V4. Pylväsvälin pituus oli 452

metriä.

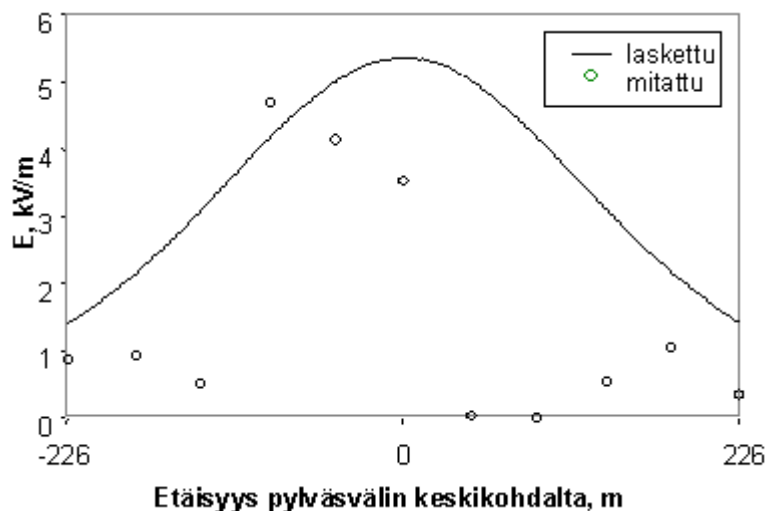
Kuvassa 4.12 on esitetty pylväsvälin V4 kohtisuoran suunnan mittaustulokset sekä vastaavat analyttisen laskennan tulokset.



Kuva 4.12. Mitattu ja laskettu sähkökentän voimakkuus kohtisuorassa suunnassa pylväsvälillä V4.

Pylväsvälin keskikohdalta kohtisuorassa suunnassa tehtyjen mittausten tuloksista huomataan, että välillä 0-16 metriä mittaustulokset poikkeavat huomattavasti lasketuista arvoista, mutta välillä 16-42 metriä mittaustulokset ovat lähellä laskettuja arvoja. Ero mittaustulosten ja laskentatulosten välillä on jopa 3 kV/m vaihejohtimien alapuolella. Tämän voi selittää sillä, että vaihejohtimien alla välillä 0-16 metriä kasvoi tiheästi keskimäärin 3 metriä korkeaa lehtipuustoa. Väli 16-42 metriä taas oli tasaista peltoa, jossa kasvoi 10 senttimetriä korkeaa ruohoa. Kuvan 4.12 kuvaajasta nähdään, että siirryttäessä kauemmaksi uloimmasta vaihejohtimesta ja sähkökentän maksimista ero mittaustulosten ja laskentatulosten välillä pienenee.

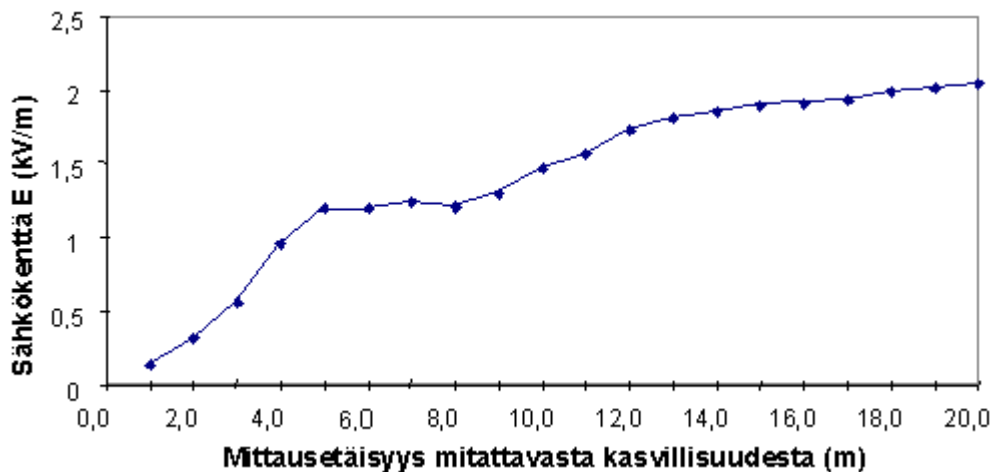
Kuvassa 4.13 on esitetty pylväsvälin V4 johdon suuntaiset mittaustulokset ja vastaavat analyttisen laskennan tulokset.



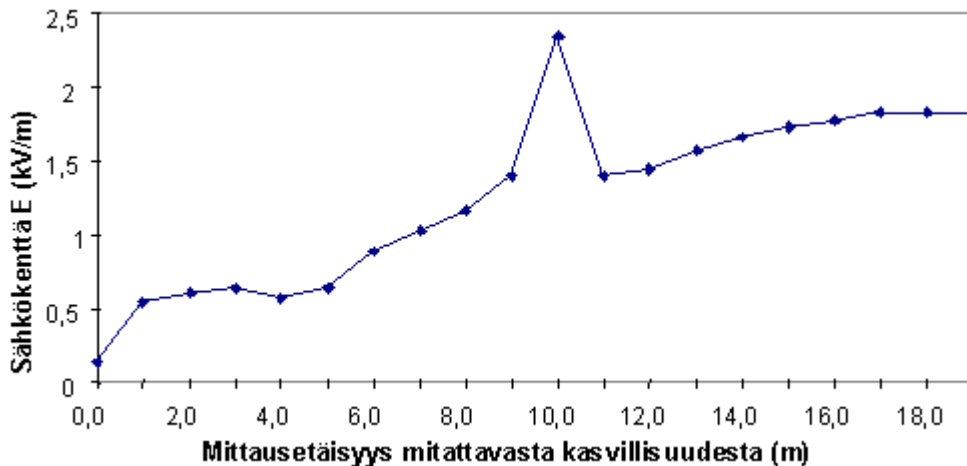
Kuva 4.13. Mitattu ja laskettu sähkökentän voimakkuus johdon suuntaisesti pylväsvälillä V4.

Kuvan 4.13 kuvaajasta nähdään, että mittaustulokset vaihtelevat hyvin paljon vastaavista lasketuista arvoista. Maastossa korkeuserot eivät olleet kovin suuria, mutta noin 1-3 metriä korkeaa kasvillisuutta esiintyi tasaisesti koko pylväsvälillä, joka selittää hyvin pitkälle laskettuun tulokseen nähden pienet mitatut arvot. Kaksi mittauspistettä, joissa saatiin johtovälin suurimmat arvot, sijaitsivat pellolla, jossa ei ollut kasvillisuutta. Suurin mitattu arvo oli suurempi kuin vastaava laskennasta saatu arvo. Selityksenä voi olla mittauksen aikana kasvaneet jännitteet, maaston pinnankorkeuden vaihtelu, jota analyttinen laskenta ei ota huomioon tai mittausvirhe.

Pylväsvälillä V4 suoritettiin kaksi kasvillisuusmittausta, joiden tulokset on esitetty seuraavissa kuvissa 4.14 ja 4.15.



Kuva 4.14. Mittaustulokset haapojen vaikutuksesta sähkökenttään. Haapojen korkeus oli 10 metriä. Mittauspisteiden kohtisuora etäisyys keskivaiheesta oli 27,9 metriä.

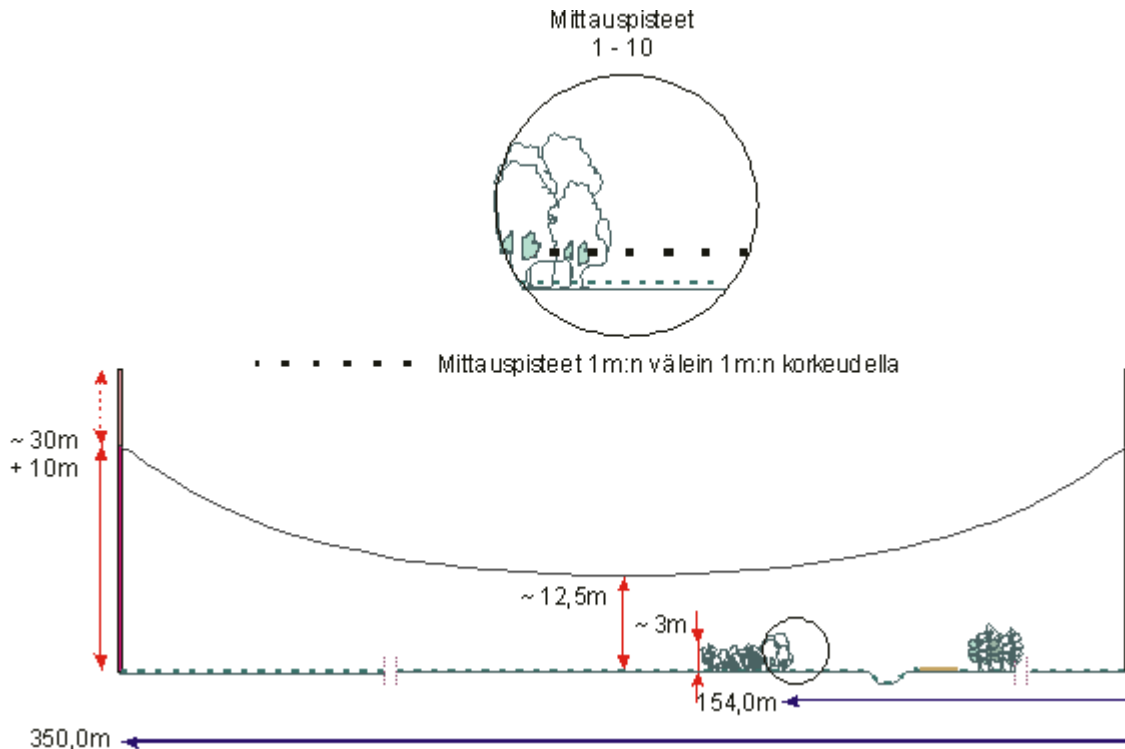


Kuva 4.15. Mittaustulokset kuusimetsän vaikutuksesta sähkökenttään. Kuusimetsän korkeus oli 20 metriä. Mittauspisteiden kohtisuora etäisyys keskivaiheesta oli 24,3 metriä.

Sähkökentän arvo 5 metrin päässä kuusimetsän reunasta oli alle 0,6 kV/m ja 19 metrin päässä alle 2 kV/m. Myös 10 metrin päässä haavoista sähkökentän arvo oli alle 1,5 kV/m. Kuusimetsän tapauksessa mielenkiintoinen mittaustulos oli 10 metrin kohdalla. Kuten kuvan 4.15 kuvaajasta nähdään, 10 metrin kohdalla on huomattava piikki. Tämän mittauspisteen läheisyydessä oli virraton sähköpaimenaita.

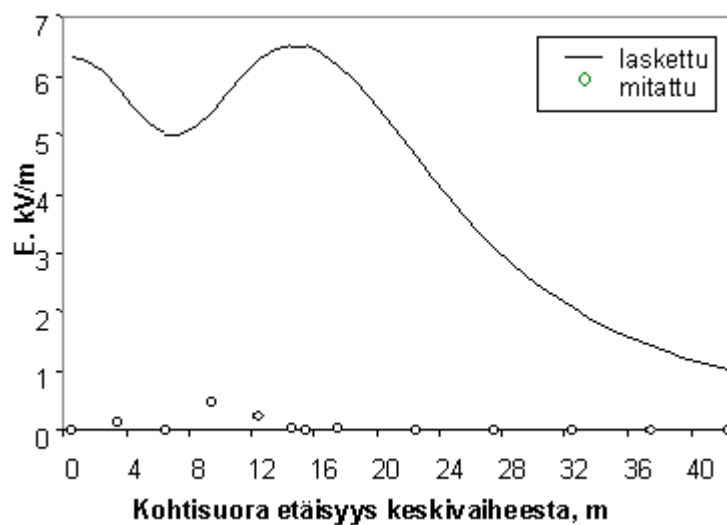
4.5 Pylväsvälin V5 kasvillisuusmittaukset

Pylväsvälillä V5 kasvoi tiheästi 3-4 metriä korkea kasvustoa, jolloin varsinaisten yksittäisten kasvillisuuksien mittaaminen oli vaikeaa. Kuvassa 4.16 on esitetty pylväsvälillä V5 ollutta kasvillisuutta ja mittauspisteet.



Kuva 4.16. Mitattujen kasvillisuuksien paikat pylväsvälillä V5. Pylväsvälin pituus oli 350 metriä.

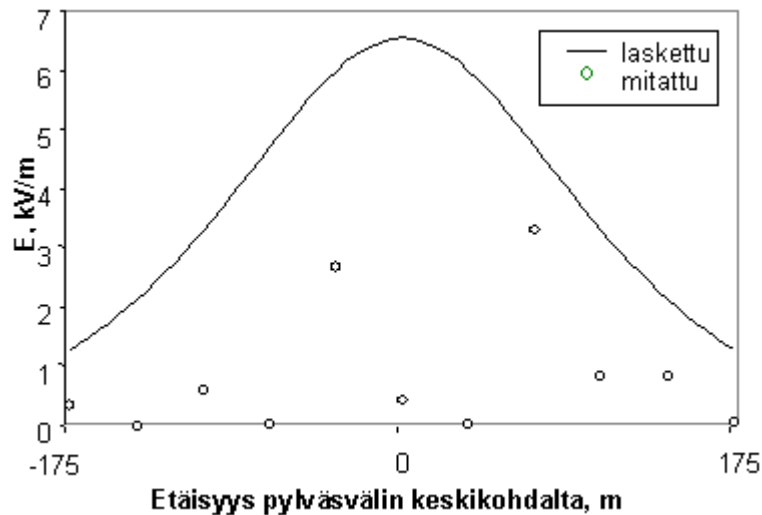
Kuvassa 4.17 on esitetty pylväsvälin V5 kohtisuoran suunnan mittaustulokset ja vastaavat analyttisen laskennan tulokset.



Kuva 4.17. Mitattu ja laskettu sähkökentän voimakkuus kohtisuorassa suunnassa pylväsvälillä V5.

Suurin mittaustulos kohtisuorassa suunnassa oli 0,45 kV/m. Kuvan 4.17 kuvaajasta käy ilmi selvästi kasvillisuuden vaimentava vaikutus. Vaihejohtimien alla kasvoi tiheästi 2-3 metriä korkeita lehtipuita. 22 metrin päässä keskivaiheesta kasvillisuus vaihtui lehtipuista noin 20 metriä korkeaksi kuusimetsäksi.

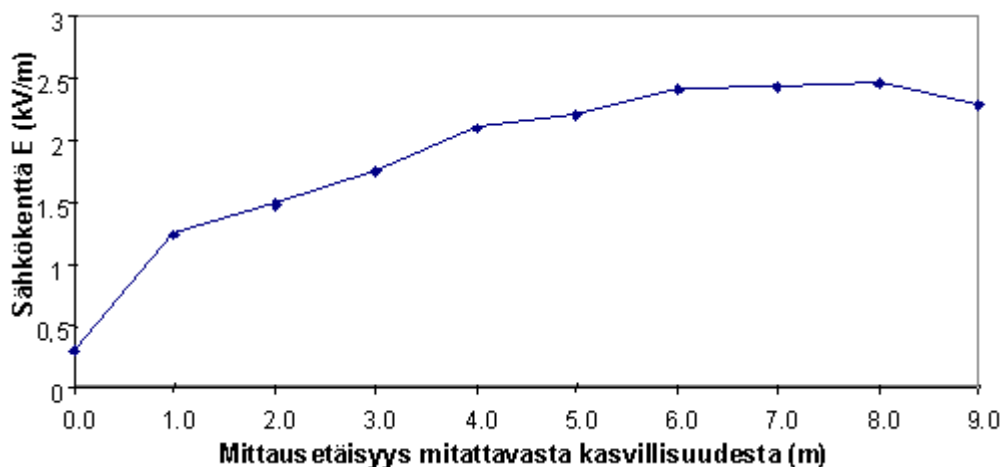
Kuvassa 4.18 on esitetty pylväsvälin V5 johdon suuntaiset mittaustulokset ja vastaavat analyttisen laskennan tulokset.



Kuva 4.18. Mitattu ja laskettu sähkökentän voimakkuus johdon suuntaisesti pylväsvälillä V5.

Laskentaan nähden verraten pienet mitatut arvot johtuvat pääasiassa pylväsvälillä kasvaneesta tiheästä 2-3 metriä korkeasta kasvillisuudesta. Kahden suurimman mitatun arvon selvä poikkeaminen muista mitatuista arvoista johtui siitä, että mittauspisteet sijaitsivat pylväsvälillä kulkeneilla teillä.

Kuten edellä todettiin, pylväsvälillä oli puita niin tiheässä, että yksittäisten kasvillisuusmittausten tekeminen oli hankalaa. Yksi kasvillisuusmittaus kuitenkin onnistuttiin tekemään, kun mittausuunnaksi valittiin johtovälillä kulkenut tie. Kyseisen mittauksen tulokset on esitetty kuvassa 4.19.

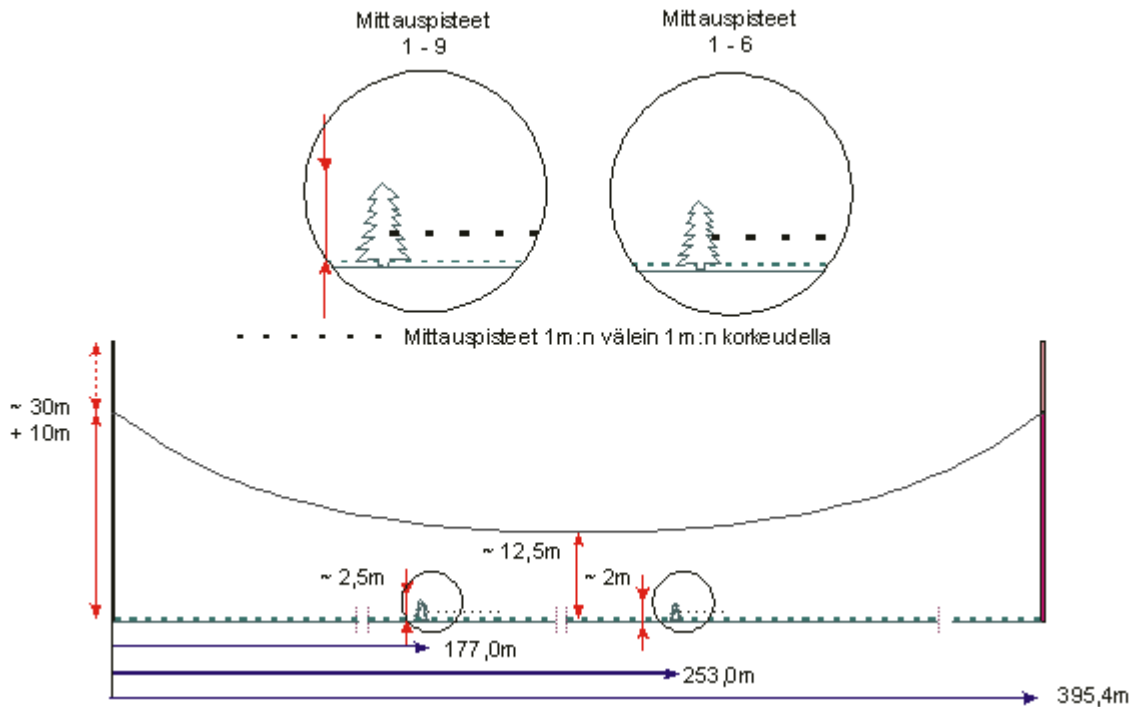


Kuva 4.19. Mittaustulokset lepikon vaikutuksesta sähkökenttään. Lepikko oli 2 metriä korkea. Mittauspisteiden kohtisuora etäisyys keskivaiheesta oli 3,5 metriä.

Mittauspaikka oli 2 metriä korkean lepikon reunassa. Mittauspisteet olivat tasaisessa maastossa, jossa kasvoi 20 senttimetriä korkea heinä. Muuta merkittävää kasvillisuutta ei ollut. Kuvan 4.19 kuvaajasta nähdään, että lepikon välittömässä läheisyydessä sähkökenttä vaimenee nopeasti, mutta metrien etäisyydellä lepikon vaikutus alkaa vähenemään.

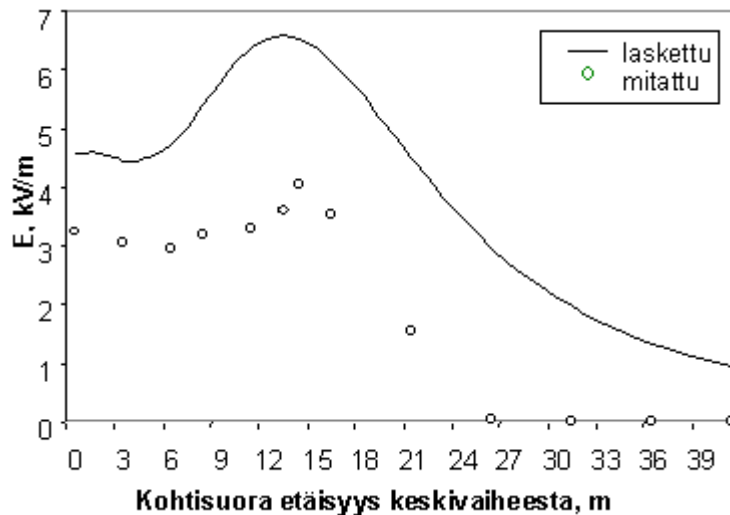
4.6 Pylväsvälin V8 kasvillisuusmittaukset

Pylväsvälillä V8 kasvillisuus oli vaihtelevaa. Osittain maasto oli tasaista ja välillä kasvoi 30-40 senttimetriä korkea heinikko, osittain välillä oli kalliota ja yksittäisiä puita tai puuryhmiä. Kuvassa 4.20 on esitetty pylväsvälillä V8 ollutta kasvillisuutta ja mittauspisteet.



Kuva 4.20. Mitattujen kasvillisuuksien paikat pylväsvälillä V8. Pylväsvälin pituus oli 395,4 metriä.

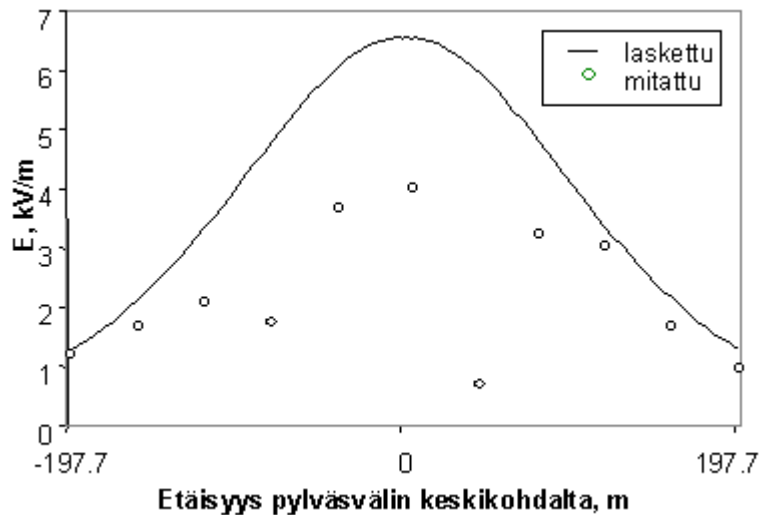
Kuvassa 4.21 on esitetty pylväsvälin V8 kohtisuoran suunnan mitaustulokset ja vastaavat analyttisen laskennan tulokset.



Kuva 4.21. Mitattu ja laskettu sähkökentän voimakkuus kohtisuorassa suunnassa pylväsvälillä V8.

Kuvan 4.21 mittaustulokset poikkeavat selvästi vastaavista lasketuista arvoista. Vaihejohtimien alla kasvoi noin 30-40 senttimetriä korkeaa heinikkoa. 26 metrin päässä mittauksen aloituskohdasta on noin 15 metriä korkean kuusimetsän reuna. Vastaavassa kohdassa nähdään, että mittaustulokset laskevat lähes olemattomiksi.

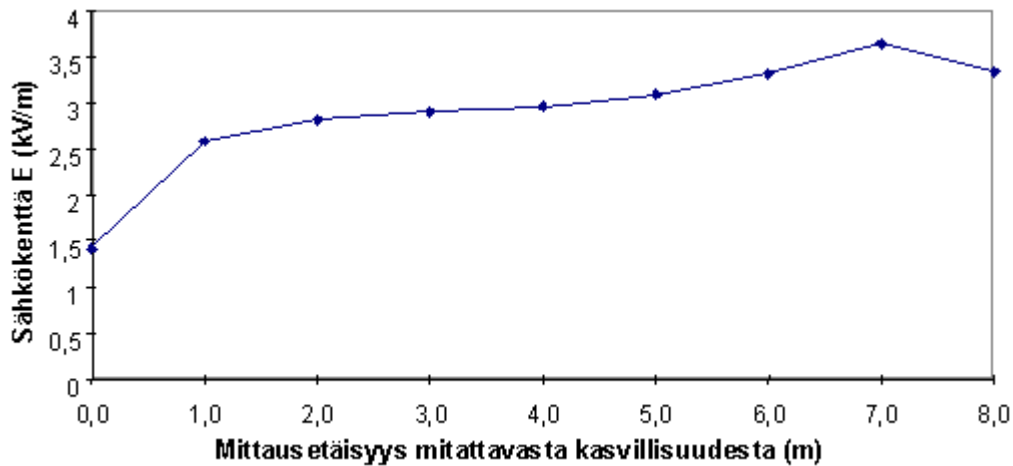
Kuvassa 4.22 on esitetty pylväsvälin V8 johdon suuntaiset mittaustulokset ja vastaavat analyttisen laskennan tulokset.



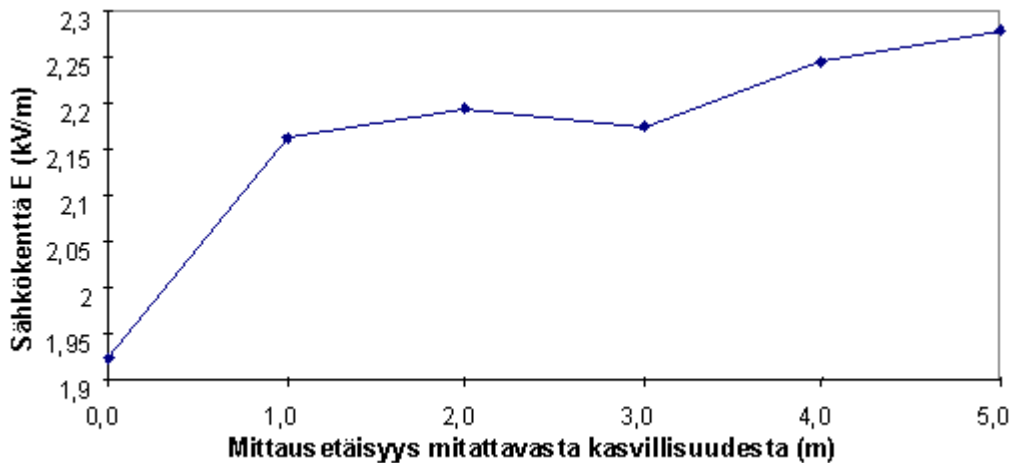
Kuva 4.22. Mitattu ja laskettu sähkökentän voimakkuus johdon suuntaisesti pylväsvälillä V8.

Johtovälin keskellä mittaustulokset poikkeavat selvästi lasketuista tuloksista. Koko johtovälillä kasvoi 0,3-1,0 metriä korkeaa heinikkoa sekä harvahkosti 1-2 metriä korkeita kuusentaimia. Kaksi mittaustuloksista selvästi poikkeavaa arvoa johtui niiden mittauspisteiden välittömässä läheisyydessä olleesta kasvillisuuksista.

Pylväsvälillä V8 suoritettiin kaksi kasvillisuusmittausta, joiden tulokset on esitetty seuraavissa kuvissa 4.23 ja 4.24.



Kuva 4.23. Mittaustulokset kuusen vaikutuksesta sähkökenttään. Kuusi oli 2,5 metriä korkea. Mittauspisteiden kohtisuora etäisyys keskivaiheesta oli 2 metriä.

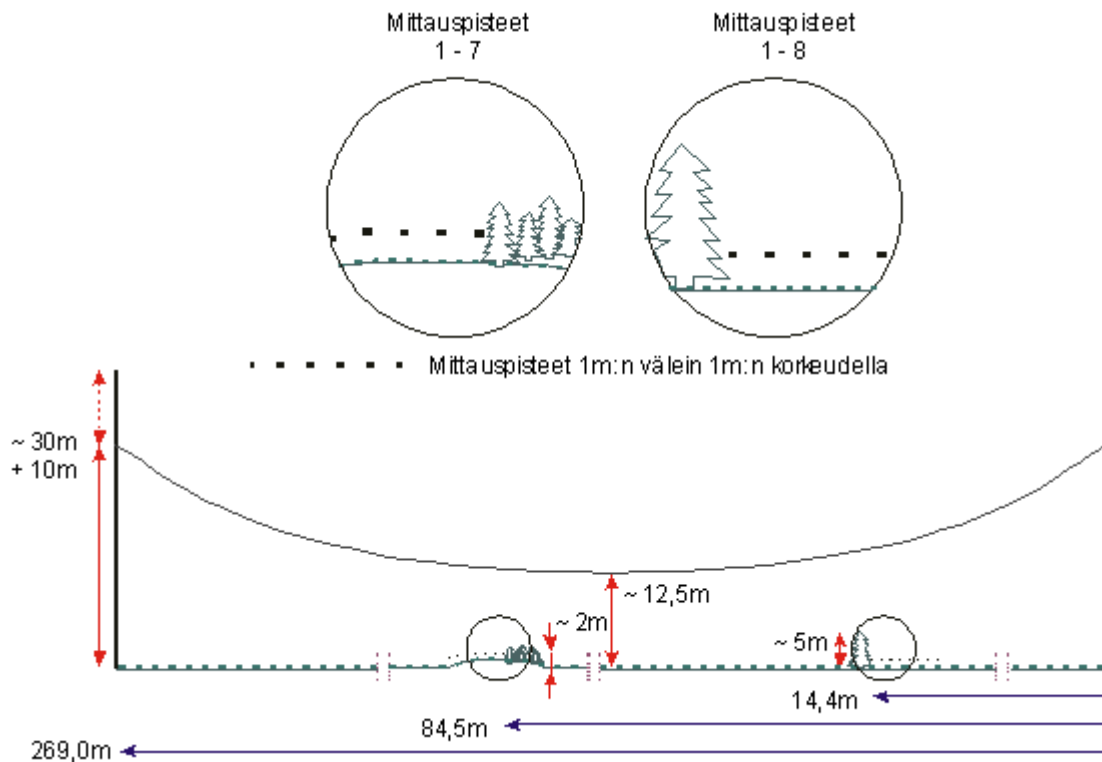


Kuva 4.24. Mittaustulokset kuusen vaikutuksesta sähkökenttään. Kuusen korkeus oli 2 metriä. Mittauspisteet sijaitsivat suoraan keskivaiheen alla.

Kuvien 4.23 ja 4.24 kuvaajista nähdään, että 2 metriä korkeasta kuusesta aiheutuva vaimeneminen on vähäistä, mutta 2,5 metriä korkea kuusi vaimentaa sähkökenttää 7 metrin matkalla noin 2 kV/m. Kokonaisuudessaan vaimeneminen on kuitenkin vähäistä verrattuna korkeampiin puihin.

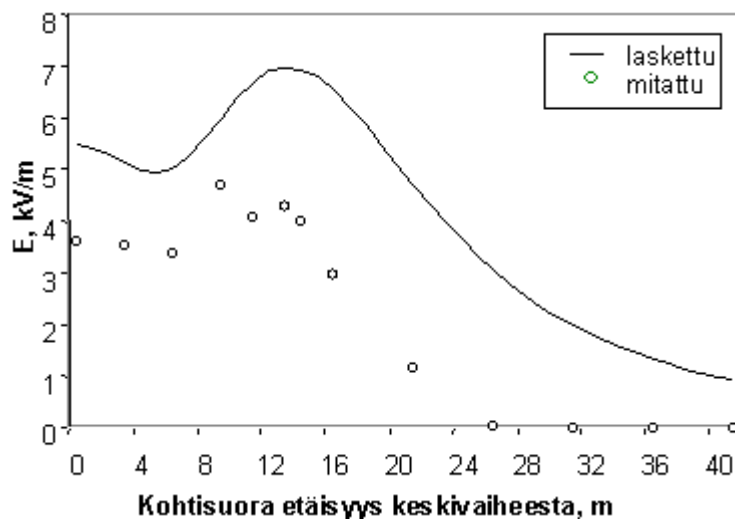
4.7 Pylväsvälin V9 kasvillisuusmittaukset

Pylväsvälillä V9 kasvoi tasaisesti 0,5-1 metrin korkuista kasvillisuutta. Johdinten alapuolella ja lähistöllä kasvoi harvassa yksittäisiä 2-5 metriä korkeita kuusia ja 1,5 metriä korkeaa pajukkoa. Pylväsvälillä V9 oli myös huomattavia maastonkorkeuden vaihteluja. Suurin maastonkorkeuden vaihtelu kahden mittauspisteen välillä oli 4 metriä. Kuvassa 4.25 on esitetty pylväsvälillä V9 ollutta kasvillisuutta ja mittauspisteet.



Kuva 4.25. Mitattujen kasvillisuuksien paikat pylväsvälillä V9. Pylväsvälin pituus oli 269 metriä.

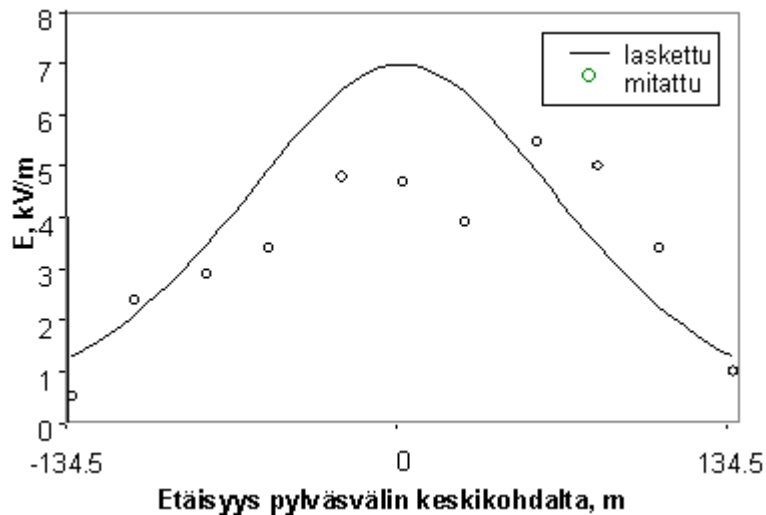
Kuvassa 4.26 on esitetty pylväsvälin V9 kohtisuoran suunnan mittaustulokset ja vastaavat analyttisen laskennan tulokset.



Kuva 4.26. Mitattu ja laskettu sähkökentän voimakkuus kohtisuorassa suunnassa pylväsvälillä V9.

Kuvan 4.26 kuvaajasta nähdään kasvillisuuden tasaisuus johdinten alla ja läheisyydessä. 25 metrin etäisyydellä keski-johtimesta on 10 metriä korkean kuusimetsän reuna, jonka vaimentava vaikutus näkyy selvästi kuvaajasta verrattaessa mittaustuloksia laskentatuloksiin.

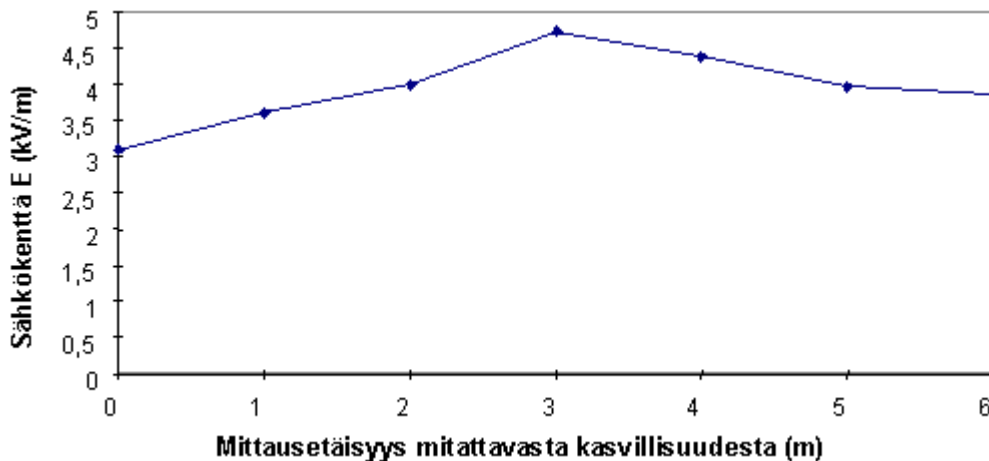
Kuvassa 4.27 on esitetty pylväsvälin V9 johdon suuntaiset mittaustulokset ja vastaavat analyttisen laskennan tulokset.



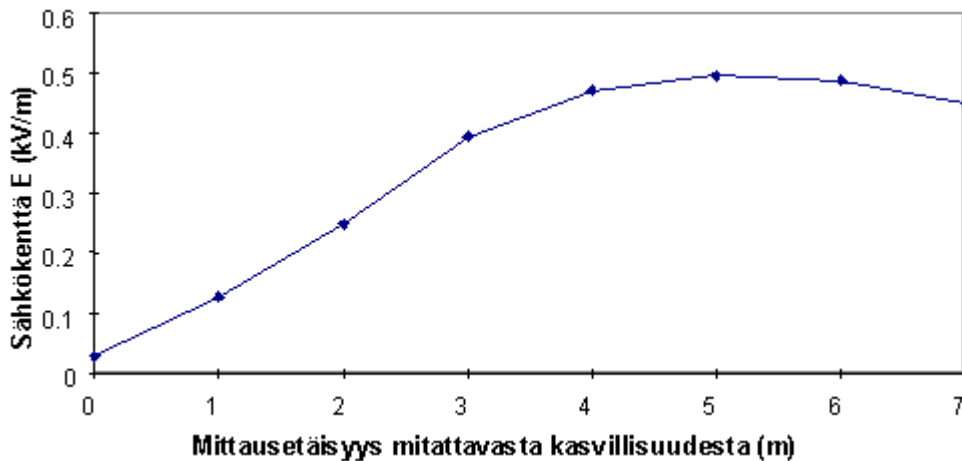
Kuva 4.27 Mitattu ja laskettu sähkökentän voimakkuus johdon suuntaisesti pylsävälillä V9.

Alueella oleva tasainen matala kasvillisuus näkyy kuvan 4.27 mittaustuloksia esittävässä kuvaajassa pieninä poikkeamina analyttisen laskennan tuloksista. Pylsävälin keskivaiheilla ollut kookkaampi puusto näkyy samoin kuvaajassa suurempana poikkeamana. Neljässä pisteessä mitatut arvot ovat suurempia kuin lasketut arvot näissä pisteissä. Tämä johtuu siitä, että analyttinen laskenta ei huomioi maastonkorkeuden vaihteluja, vaan maasto pylsävälillä on oletettu tasaiseksi. Esimerkiksi piste, jossa on mitattu suurin sähkökentän arvo 5,5 kV/m on 3 metriä ylempänä kuin sen vieressä oleva mittauspiste. Todellinen mittauspiste on siis 3 metriä lähempänä vaihejohtimia mittauksissa kuin analyttisessä laskennassa. Pisteissä, joissa saatiin suurimmat arvot, ei ollut merkittävää kasvillisuutta.

Pylsävälillä suoritettiin kaksi kasvillisuusmittausta, joiden tulokset on kuvissa 4.28 ja 4.29.



Kuva 4.28. Mittaustulokset kuusikon vaikutuksesta sähkökenttään. Kuusikko oli 2 metriä korkea. Mittauspisteiden kohtisuora etäisyys keskivaiheesta oli 4,8 metriä.



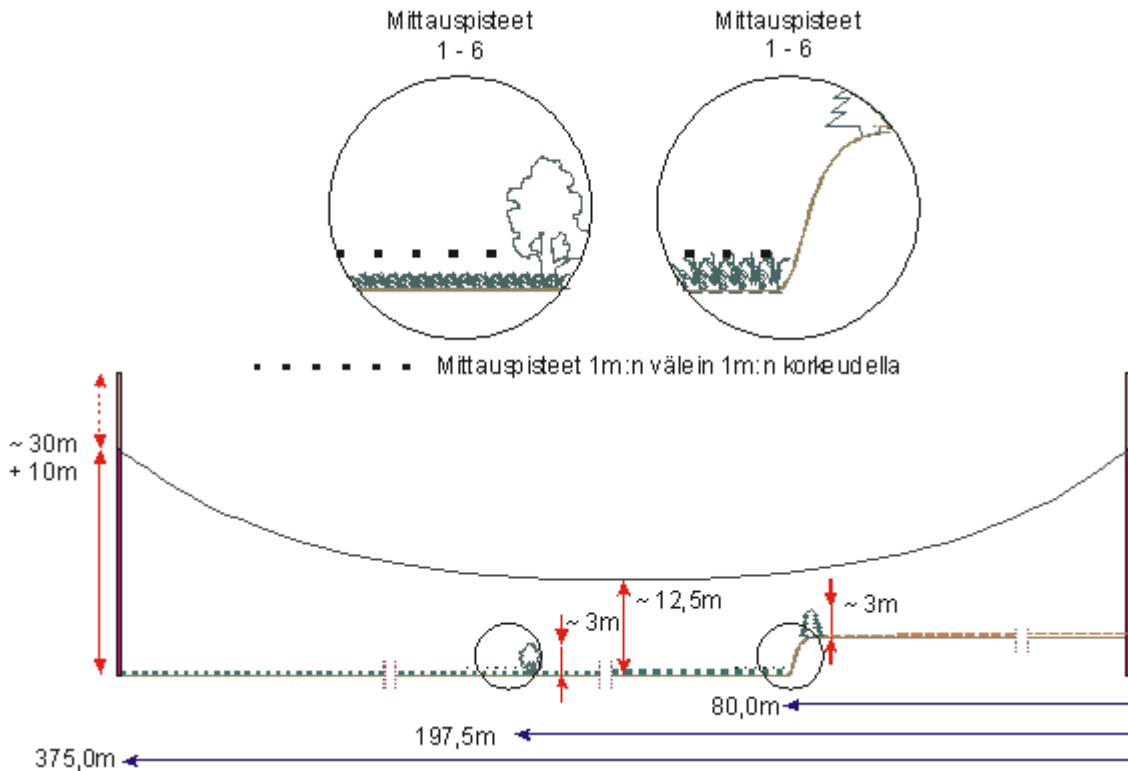
Kuva 4.29. Mittaustulokset kuusen vaikutuksesta sähkökenttään. Kuusi oli 5 metriä korkea. Mittauspisteiden kohtisuora etäisyys keskivaiheesta oli 31,4 metriä.

Kuten kuvan 4.28 kuvaajasta nähdään, sähkökenttä vaimeni lähes 2 kV/m 3 metrin matkalla, jonka jälkeen muu kasvillisuus alkoi vaikuttaa mittaustuloksiin. Mittaus tehtiin pylväsvälin V9 korkeimmalla kohdalla.

Toisessa kasvillisuusmittauksessa (kuva 4.29) sähkökenttä oli varsin pieni. Pieni sähkökenttä aiheutui lähistöllä olleen yli 20 metriä korkean kuusen vaikutuksesta, joten mitatun puun todellista vaimentavaa vaikutusta ei saatu hyvin esiin. 5 metriä korkea kuusi näytti kuitenkin vaimentavan jo ennestäänkin pienen sähkökentän voimakkuutta 0,5 kV/m 5 metrin matkalla.

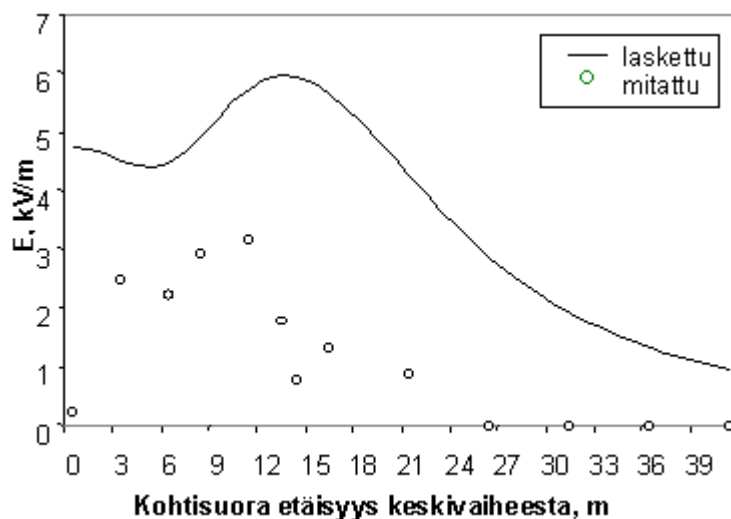
4.8 Pylväsvälin V10 kasvillisuusmittaukset

Pylväsvälillä V10 kasvoi noin 1 metrin korkuista heinikkoa ja 3-5 metriä korkeaa taimikkoa, joka koostui pääosin kuusista. Taimikko oli varsin tiheää lukuunottamatta muutamia aukkoja. Maastonkorkeuden vaihtelu oli parhaimmillaan 5 metriä. Kuvassa 4.30 on esitetty pylväsvälillä V10 ollutta kasvillisuutta ja mittauspisteet.



Kuva 4.30. Mitattujen kasvillisuuksien paikat pylväsvälillä V10. Pylväsvälin pituus oli 375 metriä.

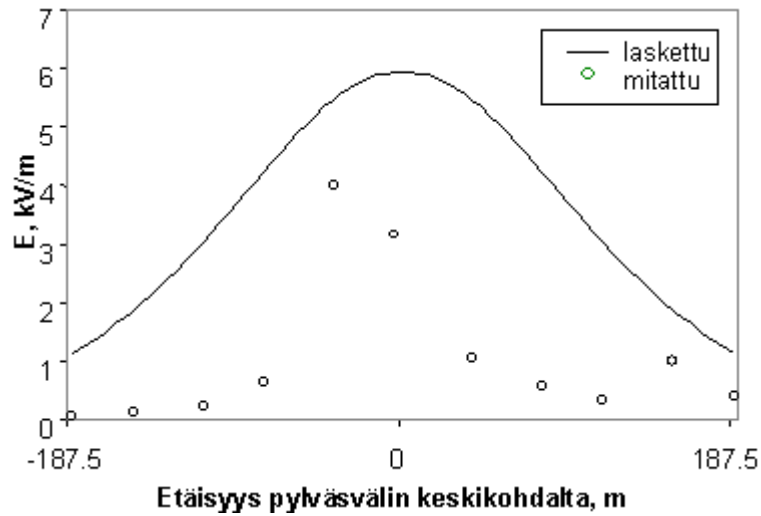
Kuvassa 4.31 on esitetty pylväsvälin V10 kohtisuoran suunnan mittaustulokset ja vastaavat analyttisen laskennan tulokset.



Kuva 4.31. Mitattu ja laskettu sähkökentän voimakkuus kohtisuorassa suunnassa pylväsvälillä V10.

Kuvan 4.31 kuvaajasta nähdään, että sähkökentän voimakkuus johdinten alla ja läheisyydessä on huomattavasti pienempi kuin analyttisen laskennan tulokset. Tällä alueella oli erityisen tiheää metsää. 25 metrin etäisyydellä keskijohdimesta on 20 metriä korkean kuusimetsän reuna, jonka vaimentava vaikutus näkyy selvästi kuvaajasta verrattaessa mittaustuloksia laskentatuloksiin.

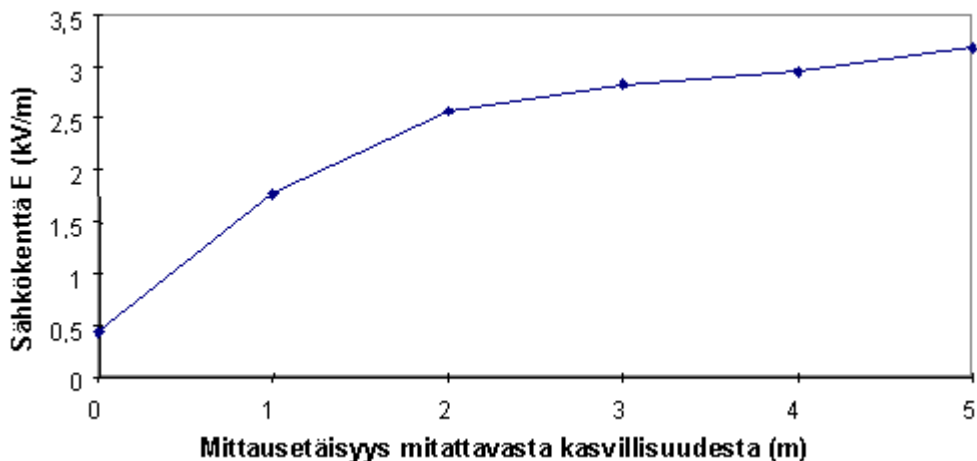
Kuvassa 4.32 on esitetty pylväsvälin V10 johdon suuntaiset mittaustulokset ja vastaavat analyttisen laskennan tulokset.



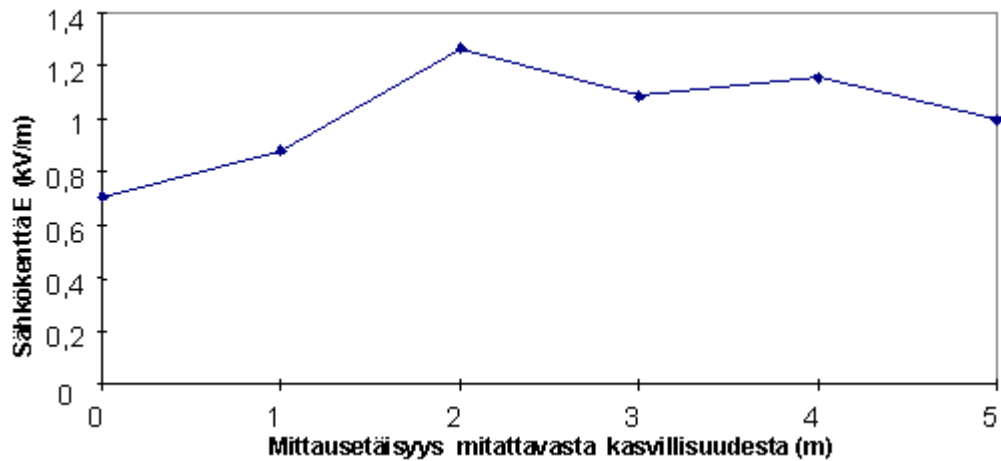
Kuva 4.32. Mitattu ja laskettu sähkökentän voimakkuus johdon suuntaisesti pylväsvälillä V10.

Kuvan 4.32 kuvaajasta nähdään, että alueella oleva tiheä taimikko näkyy suurina poikkeamina analyttisen laskennan tuloksista. Pylväsvälin 10 keskivaiheilla oli kumpare, jolla oli matalaa puustoa ja aluskasvillisuutta. Pylväsvälillä V10 mitatut arvot eivät olleet suurempia kuin lasketut arvot näissä pisteissä, kuten pylväsvälillä V9 (kuva 4.27), vaikka mittauspisteet olivatkin 5 metriä lähempänä johtimia kuin analyttisen laskennan pisteet, jotka oletetaan olevan tasaisessa maastossa. Tässä tapauksessa mittauspisteet ovat niin lähellä pylvästä, että sähkökenttä vaimenee pienemmäksi kuin analyttisen laskennan kentät.

Pylväsvälillä V10 tehtiin kaksi kasvillisuusmittausta, joiden tulokset on esitetty seuraavissa kuvissa 4.33 ja 4.34.



Kuva 4.33. Mittaustulokset koivun vaikutuksesta sähkökenttään. Koivu oli 3 metriä korkea. Mittauspisteiden kohtisuora etäisyys keskivaiheesta oli 2 metriä.



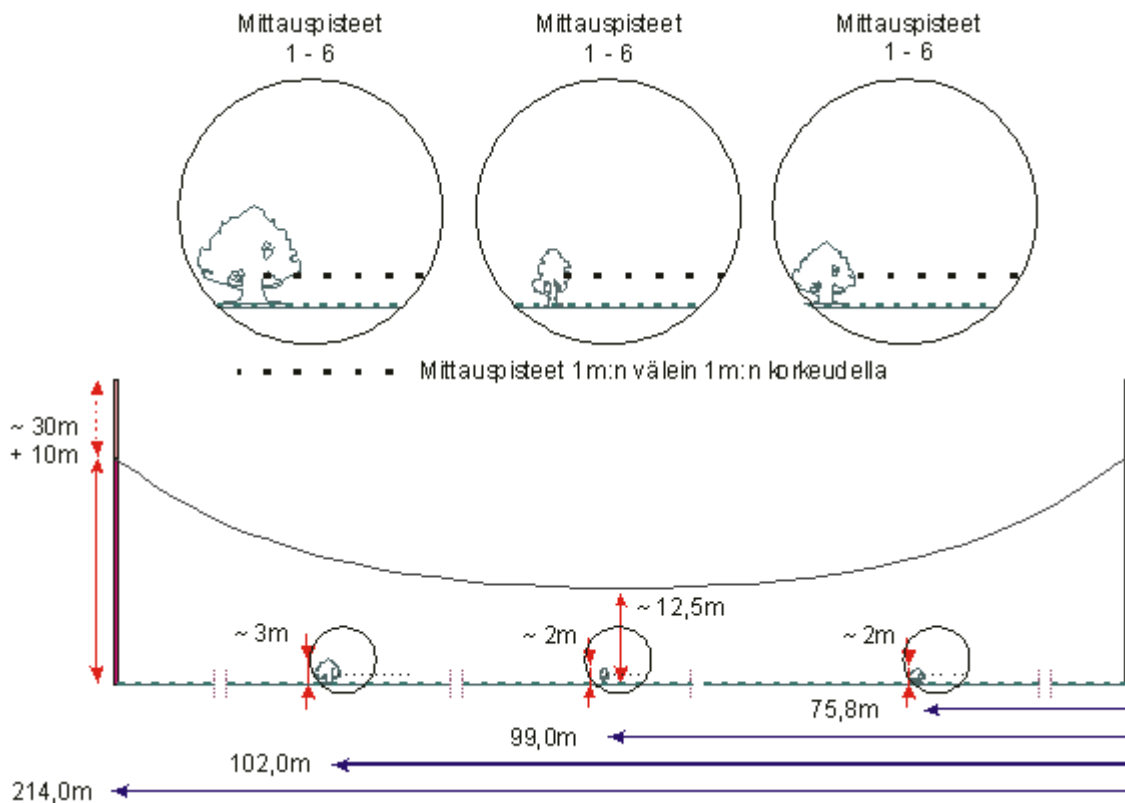
Kuva 4.34. Mittaustulokset kuusen vaikutuksesta sähkökenttään. Kuusi oli 4 metriä korkea. Mittauspisteiden kohtisuora etäisyys keskivaiheesta oli 6 metriä.

Ensimmäisessä kasvillisuusmittauksessa mitattiin 3 metriä korkean koivun vaikutusta kenttään. Sähkökenttä vaimenee lähes 2,5 kV/m 5 metrin matkalla. Huomattavaa kuvan 4.33 kuvaajassa on se, että tämä kasvillisuusmittaus tehtiin kohdalla, jossa sähkökentän voimakkuus oli suurin.

Toinen mittaus 4 metriä korkeasta kuusesta, tehtiin tiheän metsän vieressä, jolloin sen vaikutus ei ollut täysin eliminotavissa. Sen vuoksi sähkökentän voimakkuudetkin ovat varsin pieniä, kuten kuvan 4.34 kuvaajasta nähdään.

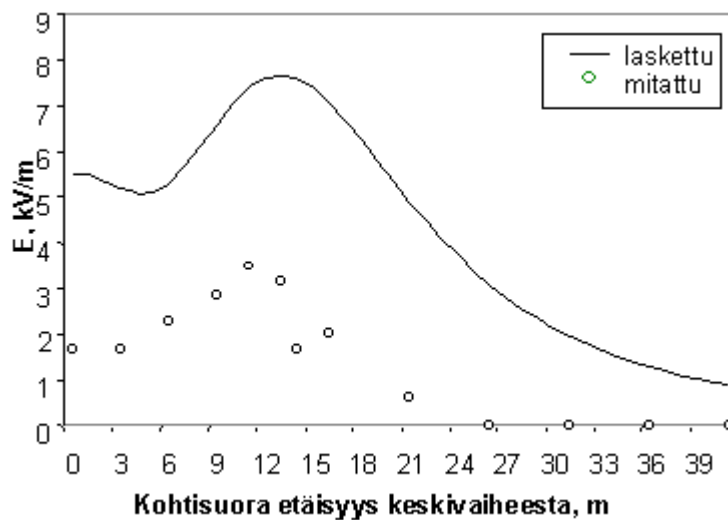
4.9 Pylväsvälin V11 kasvillisuusmittaukset

Pylväsvälillä V11 kasvoi pajuja, koivuja ja katajia, joiden korkeus vaihteli 0,5 metristä 3 metriin. Maasto oli kallioista ja suurin arvioitu korkeusero oli 5 metriä. Pylväsvälillä kasvoi kauttaaltaan noin 1 metrin mittaista taimikkoa. Kuvassa 4.35 on esitetetty pylväsvälillä V11 ollutta kasvillisuutta ja mittauspisteet.



Kuva 4.35. Mitattujen kasvillisuuksien paikat pylväsvälillä V11. Pylväsvälin pituus oli 214 metriä.

Kuvassa 4.36 on esitetty pylväsvälin V11 kohtisuoran mittauksen mitaustulokset ja vastaavat analyttisen laskennan tulokset.

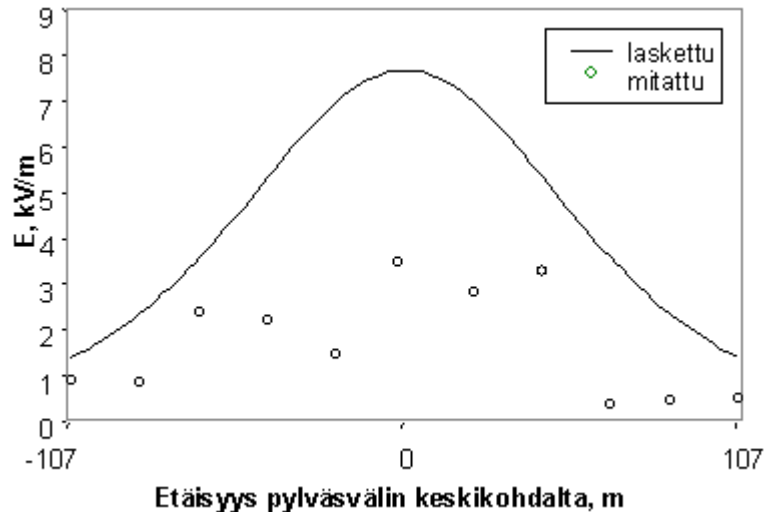


Kuva 4.36. Mitattu ja laskettu sähkökentän voimakkuus kohtisuorassa suunnassa pylväsvälillä V11.

Kuvan 4.36 kuvaajasta nähdään, että mitaustulokset johdinten alla ja läheisyydessä ovat huomattavasti pienempiä kuin analyttisen laskennan tulokset. Tällä alueella oli tiheää kasvillisuutta ja taimikkoa, jonka korkeus oli noin 2 metriä. 22 metrin päässä keskijohtimesta on 25

metriä korkean kuusimetsän reuna, jonka vaimentava vaikutus näkyy selvästi kuvaajasta verrattaessa mittaustuloksia laskentatuloksiin.

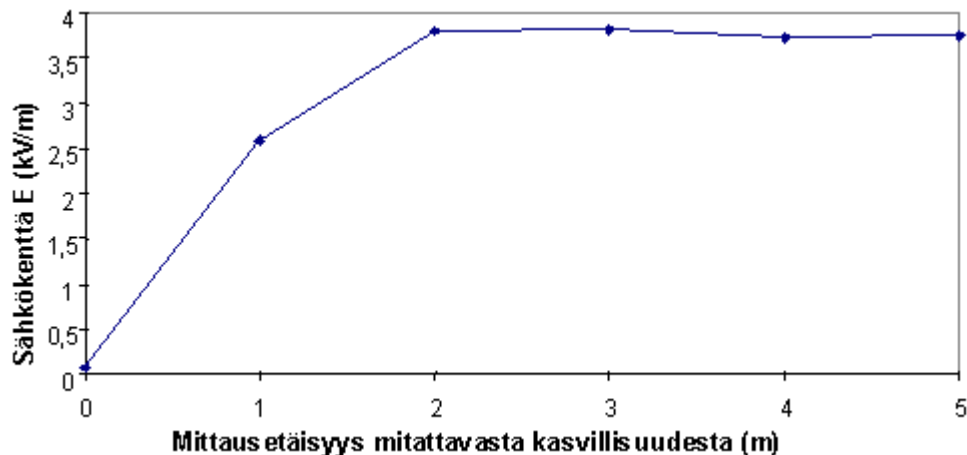
Kuvassa 4.37 on esitetty pylväsvälin V11 johdon suuntaiset mittaustulokset ja vastaavat analyttisen laskennan tulokset.



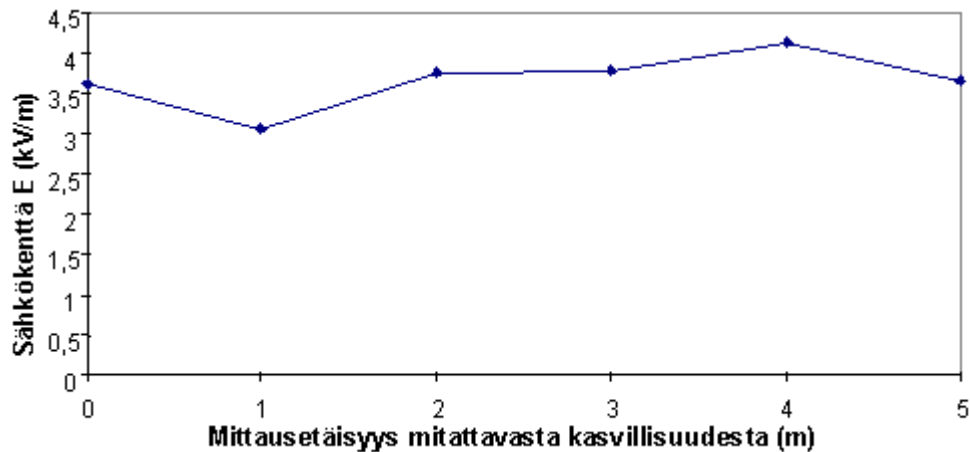
Kuva 4.37. Mitattu ja laskettu sähkökentän voimakkuus johdon suuntaisesti pylävävälin V11.

Pylävävälin V11 on vaihtelevaa kasvillisuutta, mikä näkyy kuvan 4.37 mittattujen tuloksien kuvaajassa vaihtelevina poikkeamina analyttisen laskennan tuloksista. Kuvan 4.37 oikean alalaidan kolmen viimeisen mittauspisteen arvot ovat poikkeuksellisen pieniä, vaikka kaksi viimeistä mittauspistettä olivat tasaisella maalla. Tämä johtuu siitä, että viimeiset mittauspisteet olivat 4-6 metriä alempana kuin muut mittauspisteet ja kolmas mittauspiste oikealta oli keskellä 3 metriä korkeata pajupensasta.

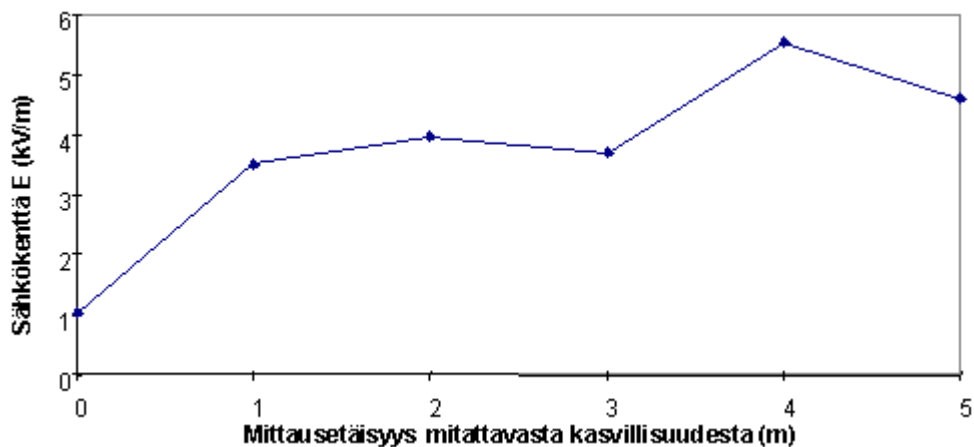
Pylävävälin V11 tehtiin kolme kasvillisuusmittausta, joissa oli vaikea eliminoida muun kasvillisuuden vaikutusta mittauksiin. Mittaustuloksista tehdyt kuvaajat on esitetty seuraavissa kuvissa 4.38, 4.39, ja 4.40.



Kuva 4.38. Mittaustulokset katajan vaikutuksesta sähkökenttään. Kataja oli 3 metriä korkea. Mittauspisteiden kohtisuora etäisyys keskivaiheesta oli 1 metri.



Kuva 4.39. Mittaustulokset pihlajan vaikutuksesta sähkökenttään. Pihlaja oli 2 metriä korkea. Mittauspisteiden kohtisuora etäisyys keskivaiheesta oli 4 metriä.



Kuva 4.40. Mittaustulokset katajan vaikutuksesta sähkökenttään. Kataja oli 2 metriä korkea. Mittauspisteiden kohtisuora etäisyys keskivaiheesta oli 1 metriä.

Kuvan 4.38 kuvaajasta nähdään että, 3 metrin korkeisen katajan tapauksessa sähkökentän arvo vaimenee vain noin kahden metrin säteellä. Kuvan 4.39 mukaan pihlajalla ei ollut juurikaan vaimentavaa vaikutusta sähkökenttään. Kuvasta 4.40 nähdään, että sähkökenttä laskee 4 metrin päässä 2 metriä korkean katajan juurelle mitattaessa 4 kV/m. Mittaustuloksia tarkasteltaessa on kuitenkin huomioitava se, että kasvillisuusmittaukset on suoritettu eri paikoissa, ja täten muun kasvillisuuden vaikutus mittaustuloksiin on erilainen.

5 POHDINTA

Sähkökenttämittausten yhteydessä tehtiin yhteensä 15 kasvillisuusmittausta. Mittauksissa oli mukana useita puutyyppisiä 1 metrin korkeisesta lepikosta 20 metrin korkeiseen kuusimetsään. Monet kasvillisuusmittaukset jouduttiin lopettamaan viiden tai seitsemän metrin kohdalla, koska tällöin muu kasvillisuus alkoi vaikuttaa merkittävästi mittaustuloksiin, tai puun vaimentava vaikutus muuttui merkityksettömäksi. Kaksi 20 metriä korkean kuusimetsän reunaa päästiin mittaamaan aina 20 metrin etäisyydelle saakka. Yhteenveto puiden vaimentavasta vaikutuksesta sähkökenttiin on esitetty taulukossa 5.1.

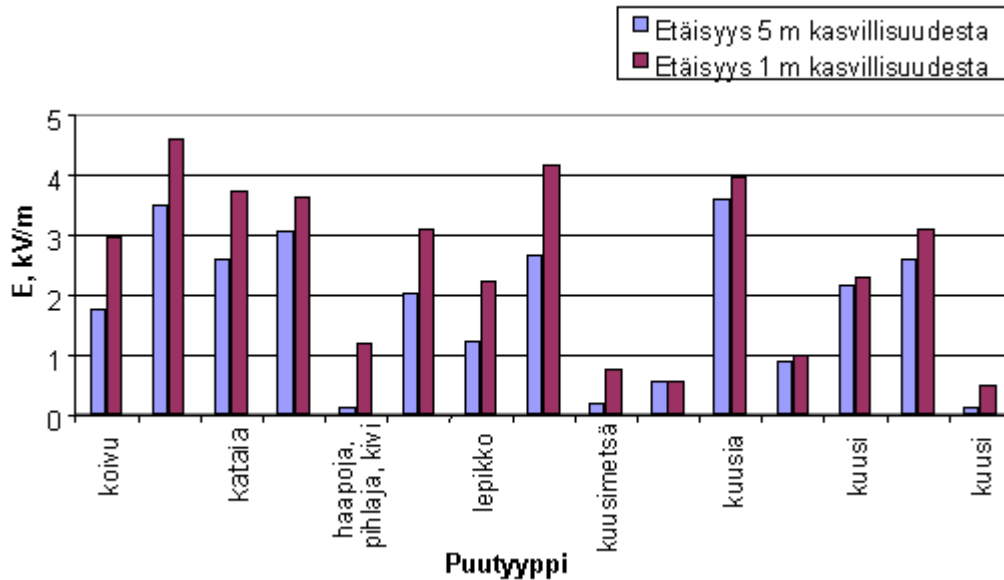
Taulukko 5.1. Puiden vaimentava vaikutus sähkökenttiin.

Puutyyppi	Korkeus, m	E, kV/m (0 m)	E, kV/m (1 m)	E, kV/m (2 m)	E, kV/m (4 m)	E, kV/m (5 m)	E, kV/m (20 m)	Vaimeneminen, % (5-1 m)	Laskettu, E, kV/m, (5 m)
Koivu	3	0,44	1,76	2,58	√2,82	2,96		40,54	4,36
Kataja	2	1,02	3,49	3,96	5,53	4,60		24,18	3,79
Kataja	3	0,07	2,59	3,80	3,73	3,75		30,84	5,31
Pihlaja	2	3,61	3,06	3,76	4,13	3,64		15,92	4,89
Haapoja, pihlaja, kivi	10, 3, 2		0,13	0,32	0,96	1,20	2,04	88,99	2,33
Lepikko	1	2,60	2,04	2,39	2,90	3,12		34,52	4,40
Lepikko	2	0,30	1,23	1,47	2,10	2,21		44,25	5,28
Pajupensas	3	1,48	2,67	3,41	4,04	4,17		36,11	5,44
Kuusimetsä	20		0,17	0,42	0,65	0,75	1,25	76,94	1,97
Kuusimetsä	20	0,14	0,55	0,60	0,64	0,56	1,83	2,90	3,16
Kuusia	2	3,11	3,60	3,98	4,38	3,97		9,34	3,78
Kuusi	4	0,70	0,88	1,26	1,16	0,99		11,37	2,31
Kuusi	2	1,92	2,16	2,19	2,24	2,28		5,10	3,35
Kuusi	2,5	1,41	2,59	2,81	2,97	3,09		16,30	4,42
Kuusi	5	0,03	0,13	0,25	0,47	0,50		74,50	1,39

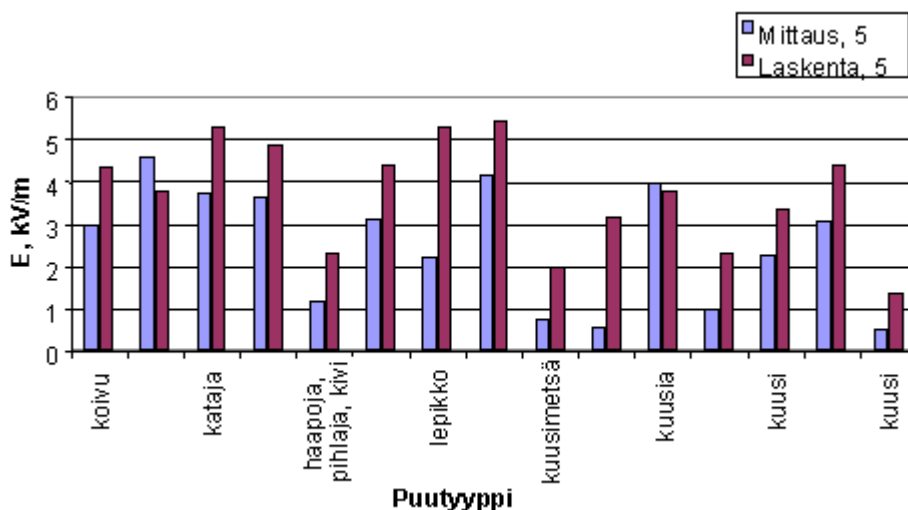
Pelkät lukuarvot taulukossa eivät kerro koko totuutta. Otetaan esimerkiksi jälkimmäinen 20 metriä korkea kuusimetsä ja 3 metriä korkea koivu. Taulukon perusteella koivu vaimentaa sähkökenttää noin 40 % siirryttäessä viiden metrin etäisyydeltä yhden metrin etäisyydelle koivusta. 20 metriä korkean kuusimetsän tapauksessa sähkökentän vaimentuminen on alle 3 %.

On myös tarkasteltava mittauspisteiden arvoja ja niiden muuttumista etäisyyden funktiona. Koivun tapauksessa vaimeneminen on voimakasta alle kahden metrin etäisyydellä. Kuusimetsän vaimentava vaikutus on aivan toista luokkaa, tosin vaimennus alle viiden metrin etäisyydellä on aika heikkoa. Kuusimetsä kuitenkin pitää sähkökentän arvon huomattavasti alle 2 kV/m vielä 20 metrin etäisyydelläkin, kun taas koivun tapauksessa 3 kV/m saavutetaan jo viiden metrin kohdalla. Kuusimetsä siis vaimentaa tehokkaasti sähkökenttiä laajalla alueella ympäristössään.

Taulukossa 5.1 on esitetty myös analyyttisen laskennan tulokset, jotka ilmoittavat, mikä sähkökentän arvo olisi viiden metrin päässä kasvillisuudesta, jos kyseistä puuta ei olisi. Esityksen selventämiseksi mittaustulokset yhden ja viiden metrin päässä kasvillisuudesta on esitetty pylvädiagrammina kuvassa 5.1. Kuvassa 5.2 on esitetty mittaustulos viiden metrin päässä kasvillisuudesta ja analyyttisen laskennan tulos samassa pisteessä.



Kuva 5.1. Mitattu sähkökenttä yhden ja viiden metrin päässä kasvillisuudesta.



Kuva 5.2. Mitattu sähkökenttä viiden metrin päässä kasvillisuudesta ja analyttisen laskennan tulos samassa pisteessä.

Kuvasta 5.1 nähdään, että kuudessa mittauksessa sähkökenttä kasvaa noin 1 kV/m siirryttäessä yhden metrin etäisyydeltä kasvillisuudesta viiden metrin etäisyydelle. Näiden puiden korkeudet ovat 2-3 metriä. Suuremmalla puustolla vaimentava vaikutus alle viiden metrin päässä on huomattavasti vähäisempää. Kuitenkin vaikutus on kokonaisuudessaan laaja-alaisempaa, kuten taulukosta 5.1 nähdään.

Kuvasta 5.2 nähdään, että 12 mittauksessa vaimeneminen on yli 1 kV/m. Huomattavaa kuvassa on myös se, että kahdessa mittauksessa näyttää siltä kuin puun olemassaolo olisi kasvattanut sähkökenttää. Todellisuudessa ero aiheutuu siitä, että mittauspiste kyseisissä mittauksissa on ollut lähempänä vaihejohtimia kuin analyttisessä laskennassa. Analyttinen laskenta on tehty voimajohdon jännitteiden keskiarvoilla.

Eri pylväsväleille lasketut jännitteet vaihtelivat välillä 407 - 413 kV. Täten sähkökentätkin ovat vaihdelleet, mutta vaihtelua ei pidetty niin merkittävänä, että se olisi huomioitu.

Kuva 5.2 osoittaa selvästi, että lähes jokaisessa mittauksessa kasvillisuus vaimentaa sähkökenttää. Etenkin yli 3 metriä korkea kuusimetsä vaimentaa tehokkaasti. Voimajohtojen läheisyydessä esiintyviä suuria kenttiä voitaisiin vähentää istuttamalla voimajohtojen alle puita. Tässä tapauksessa puiden kasvu muodostuisi ongelmaksi, koska liian korkeita puita jouduttaisiin poistamaan johtojen alta aika ajoin. Koska kuusimetsän vaimentava vaikutus ulottuu laajalle alueelle, johtojen alle ja läheisyyteen istutettavien puiden ei tarvitsisi olla erityisen tiheässä, vaan esimerkiksi 4-5 metrin välein.

Voimajohtojen lähiympäristö olisi siis vartenotettava paikka esimerkiksi puuviljelmälle helppohoitoisuutensa ja vaimentavan vaikutuksensa vuoksi. Paras tapa olisikin istuttaa puita sellaisille paikoille, joissa on asutusta lähellä. Tällä tavalla voitaisiin pienentää sähkökentille altistumista ja lisäksi puuston harventaminen olisi myös yksinkertaisempaa hyvien kulkuyhteyksien vuoksi. Tietenkään tämä ei sovellu kaikkiin paikkoihin, kuten pellolle, vaimentamaan kenttiä.

6 YHTEENVETO

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli selvittää kasvillisuuden vaikutusta pientaajuisiin sähkökenttiin 400 kV voimajohtojen alla. Tarkoituksena oli saada selville, miten paljon kasvillisuus vaikuttaa sähkökenttiin voimajohtojen läheisyydessä.

Vuonna 1998 Tampereen teknillisessä korkeakoulussa (TTKK) tehtiin TEKESin rahoituksella tutkimus "Kartoitus pientaajuisista sähkökentistä elin- ja työympäristössä", jonka tarkoituksena oli arvioida sähkökenttäaltistusta. Osana tutkimusta kartoitettiin 400 kV johtojen läheisyydessä esiintyviä sähkökenttiä. Mittausten yhteydessä havaittiin, että joillakin pylväsväleillä esiintyi huomattavia sähkökenttiä. ICNIRP:n (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) suositusarvo väestölle, 5 kV/m, ylittyi yhdeksällä näistä kaikista 25 pylväsvälistä jossakin mitatuista pisteistä. Tutkimustulosten pohjalta alettiin etsiä keinoja sähkökenttien vähentämiseksi tutkimalla kasvillisuuden vaikutusta.

Vuoden 1998 kartoituksen perusteella valittiin seitsemän pylväsväliä, joilla kasvillisuudella oletettiin olevan vaimentavaa vaikutusta sähkökenttiin. Tässä tutkimusprojektissa analysoitiin nämä pylväsvälit uudelleen ja sen lisäksi pylväsväleillä tehtiin yksittäisiä kasvillisuusmittauksia. Johtojen sähkökenttien mittaamisessa käytettiin sovelletusti IEEE 644-1994 standardia.

Pylväsväleille tehtiin myös analyttinen laskenta, jonka antamia sähkökenttien arvoja verrattiin mitattuihin arvoihin. Analyttisen laskennan tulokset olivat odotetusti suurempia kuin sähkökentät mittauksissa. Mittauksista löytyi kuitenkin yksittäisiä pisteitä, joissa mittaustulos oli suurempi kuin analyttisen laskennan arvo. Tämä johtui maastonkorkeuden vaihteluista, joita analyttinen laskenta ei ota huomioon.

Tutkimuksessa mitattiin muun muassa koivun, katajan, pihlajan sekä kuusimetsän vaikutusta. Mitatuilla pylväsväleillä kasvillisuudella oli selvä vaimentava vaikutus voimajohtojen aiheuttamiin sähkökenttiin.

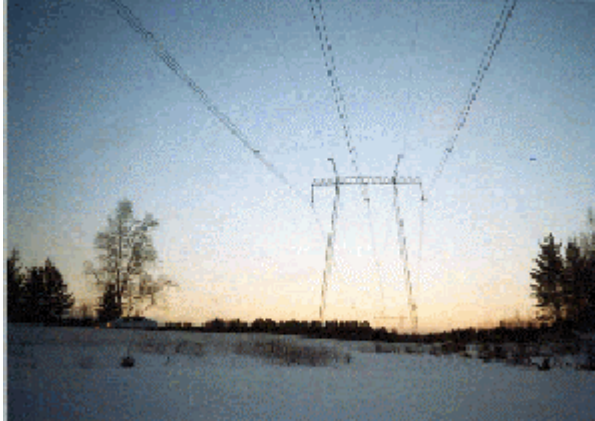
Tutkimustulosten perusteella voidaan sanoa, että alle yhden metrin korkuinen kasvillisuus ei juurikaan vaimenna sähkökenttiä. Tätä korkeammat puut sen sijaan vaimentavat sähkökenttiä huomattavasti, etenkin yli kolme metriä korkea kuusimetsä. Pienet puut vaimentavat sähkökenttiä

varsin suppealla alueella muutaman metrin säteellä. 20 metriä korkea kuusimetsä vaimentaa sähkökenttiä voimakkaasti laajalla alueella. Kuusien vaimentavaa vaikutusta sähkökenttään tutkittiin eniten. Tutkimuksen perusteella voidaan todeta, että kasvillisuuden avulla on mahdollista löytää halpoja ratkaisuja vähentää sähkökenttiä.

LÄHTEET

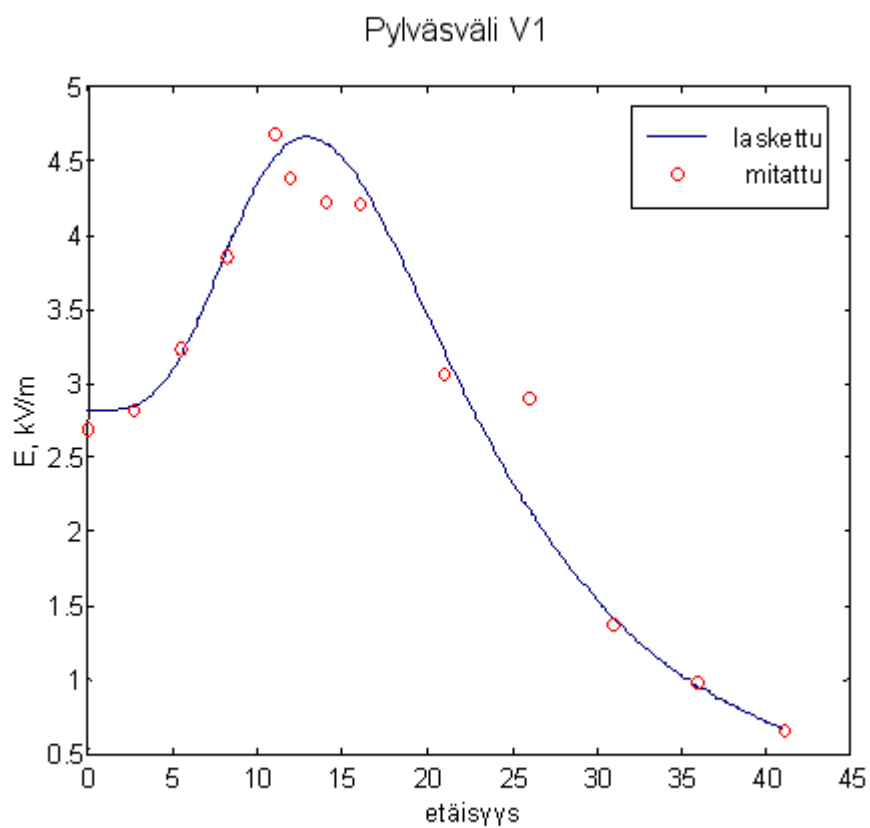
- /1/ Deno, D.W. ja Zaffanella, L.E. Field Effects of Overhead Transmission Lines and Stations. Kirjassa: Transmission Line Reference Book - 345 kV and above. 2. p., Palo Alto, USA, 1982, ss. 329-419.
- /2/ Hänninen, K. & Valjus, J. Voimajohtojen sähkö- ja magneettikentät. Sähkö, vol. 61, no. 3, 1988. ss. 10-14.
- /3/ Euroopan Unionin Neuvosto. Neuvoston suositus väestön sähkömagneettisille kentille (0 Hz–300 GHz) altistumisen rajoittamisesta (1999/519/EY). Euroopan yhteisöjen virallinen lehti L199, 12.7.1999. s. 59-70.
- /4/ 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.
- /5/ IEC 60833. Measurement of power-frequency electric fields. International Electrotechnical Commission, Geneve, Sveitsi, 1987. 46 s.
- /6/ 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.
- /7/ 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, Sähkövoima tekniikka, Raportti 4-98, Tampere, 1998.
- /8/ Korpinen, L.: Voimansiirtojohtojen sähkömagneettisten kenttien terveysvaikutusten arviointi. Lisensiaattityö, Tampereen teknillinen korkeakoulu, Sähköenergiajärjestelmät, Tampere 1990, 122 s.
- /9/ 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.
- /10/ Korpinen L., Isokorpi J., Keikko T.: Kartoitus pientaajuisista sähkökentistä elin- ja työympäristössä. Tampereen teknillinen korkeakoulu, Sähkövoimatekniikka, Raportti 6-98, Tampere 1998, 35 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/ Valjus, J. Pientaajuisien sähkö- ja magneettikenttien fysiologiset vaikutukset. Tutkimus raportti IVO-A-04/87. Imatran Voima Oy, Helsinki, 1987.

Tulokset pylväsvälin V1 sähkökenttien laskennasta ja mittauksesta



Huom. Kuva on otettu myöhemmin kuvausongelmien takia

Pylväsväli V1

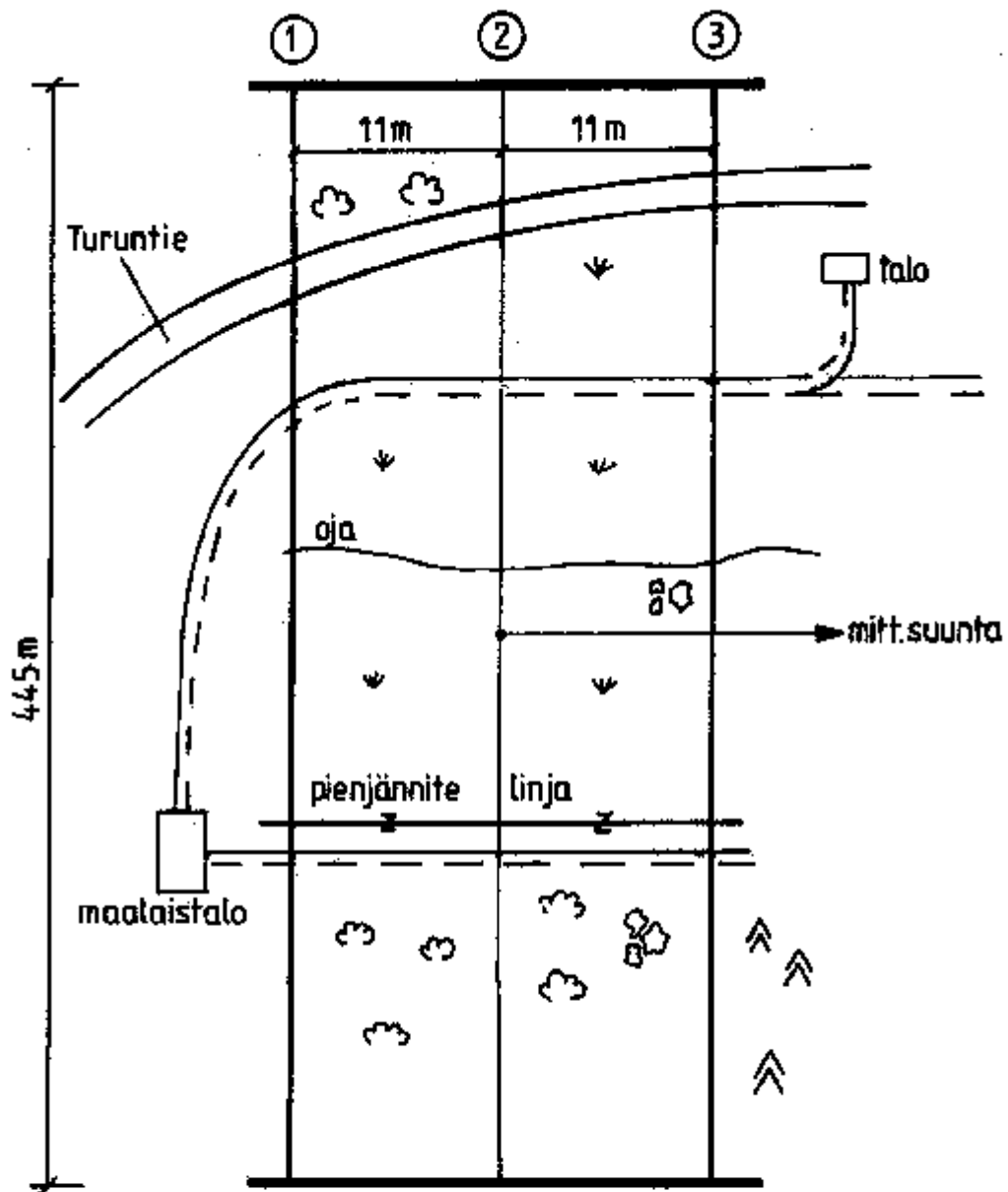


Laskennassa käytetyt arvot:

- jännite 400,5 kV
- vaiheväli 11,0 m
- vaihejohtimen korkeuden keskiarvo 13,9 m

- (mittausten perusteella)

Pylväsväli V1



Linjan korkeus keskeltä

① 14,12 m

② 13,84 m

③ 13,69 m

↘ = peltoa

↗ = metsää

☁ = pajua, koivua
h = 0,5m - 3m

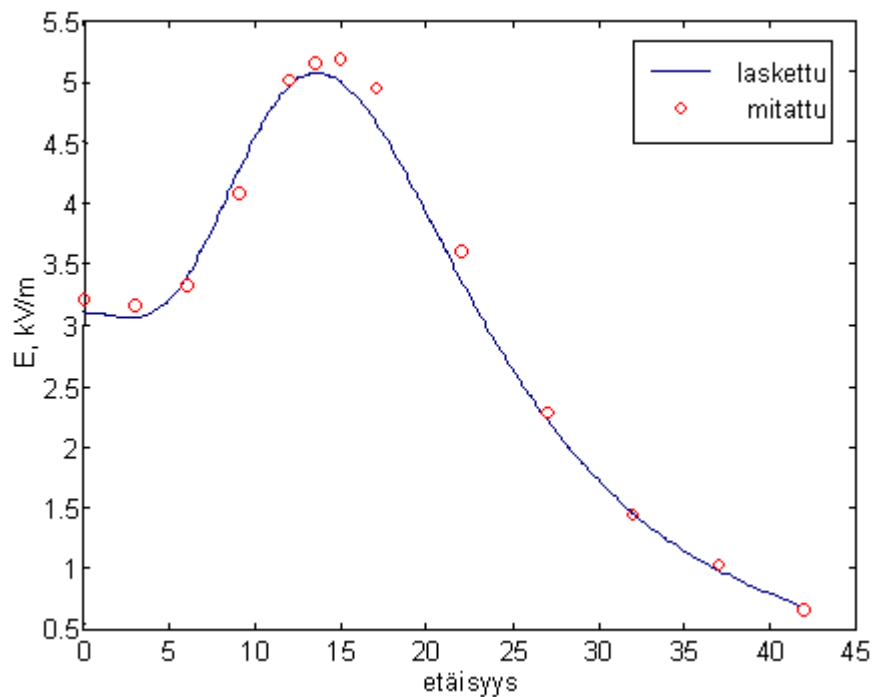
⊕ = kiviä

Tulokset pylväsvälin V2 sähkökenttien laskennasta ja mittauksesta



Huom. Kuva on otettu myöhemmin kuvausongelmien takia

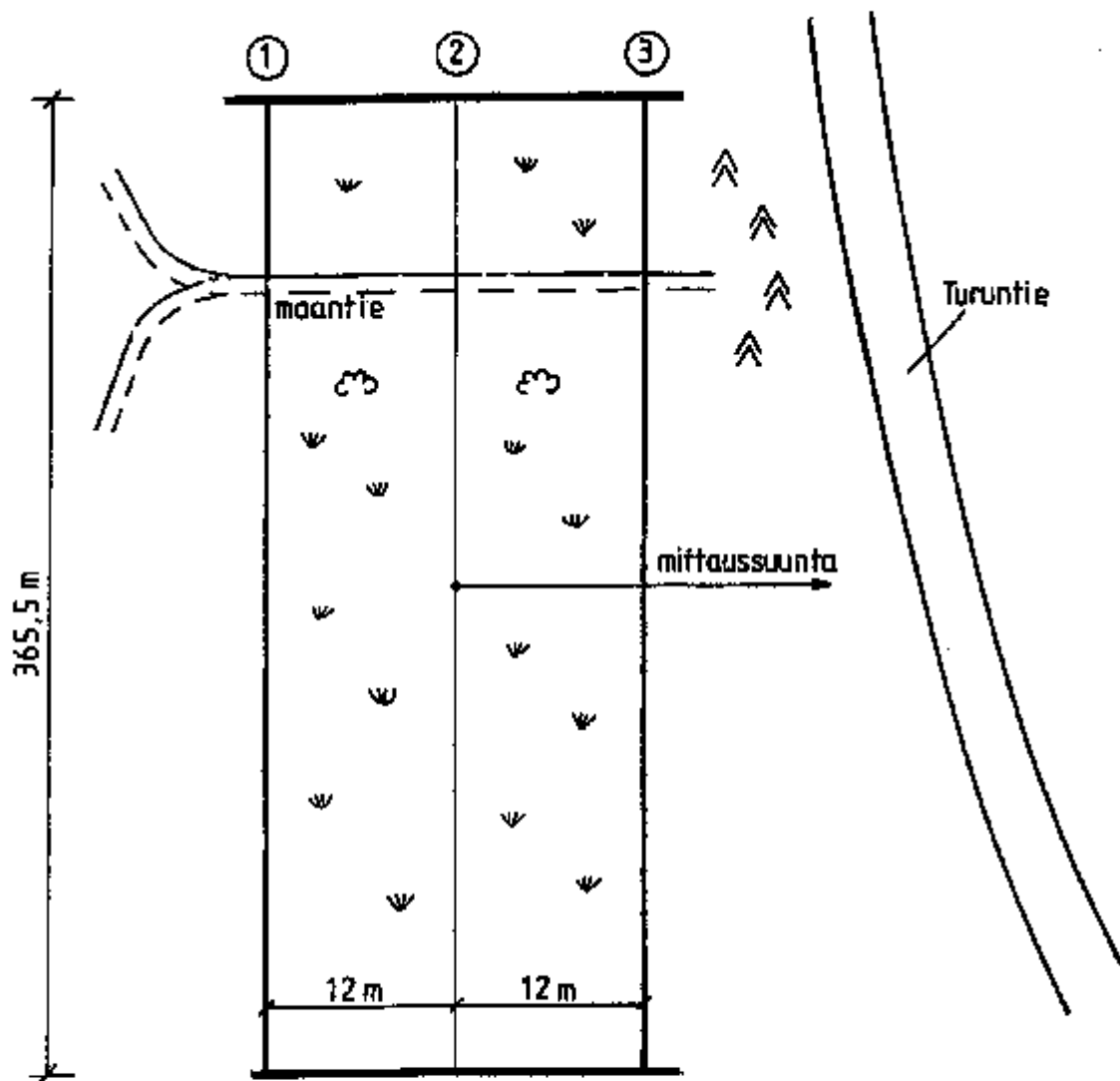
Pylväsväli V2



Laskennassa käytetyt arvot:

- jännite 400,8 kV
- vaiheväli 12,0 m
- vaihejohtimen korkeuden keskiarvo 13,8 m
- (mittausten perusteella)

Pylväsväli V2



Linjan korkeus keskeltä

① 14,12 m

② 13,83 m

③ 13,30 m

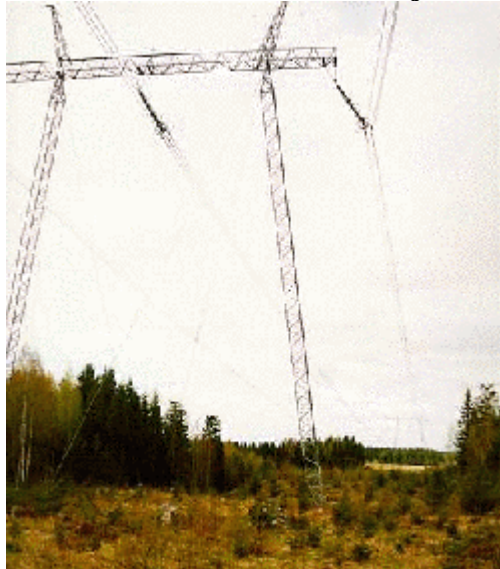
v = peltoa

A = metsää

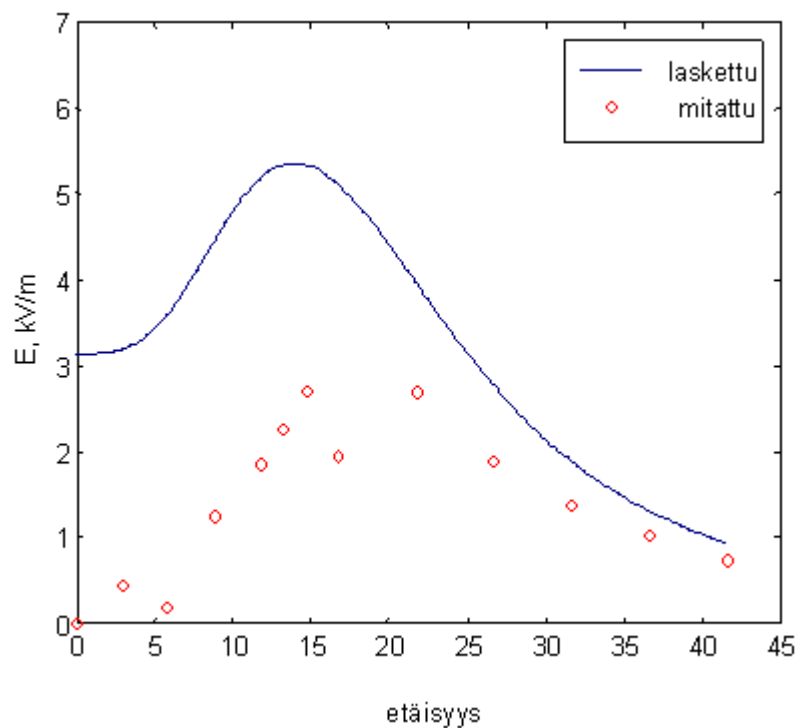
C = pajua, koivua
h = 0,5-3 m

D = kiviä

Tulokset pylväsvälin V4 sähkökenttien laskennasta ja mittauksesta



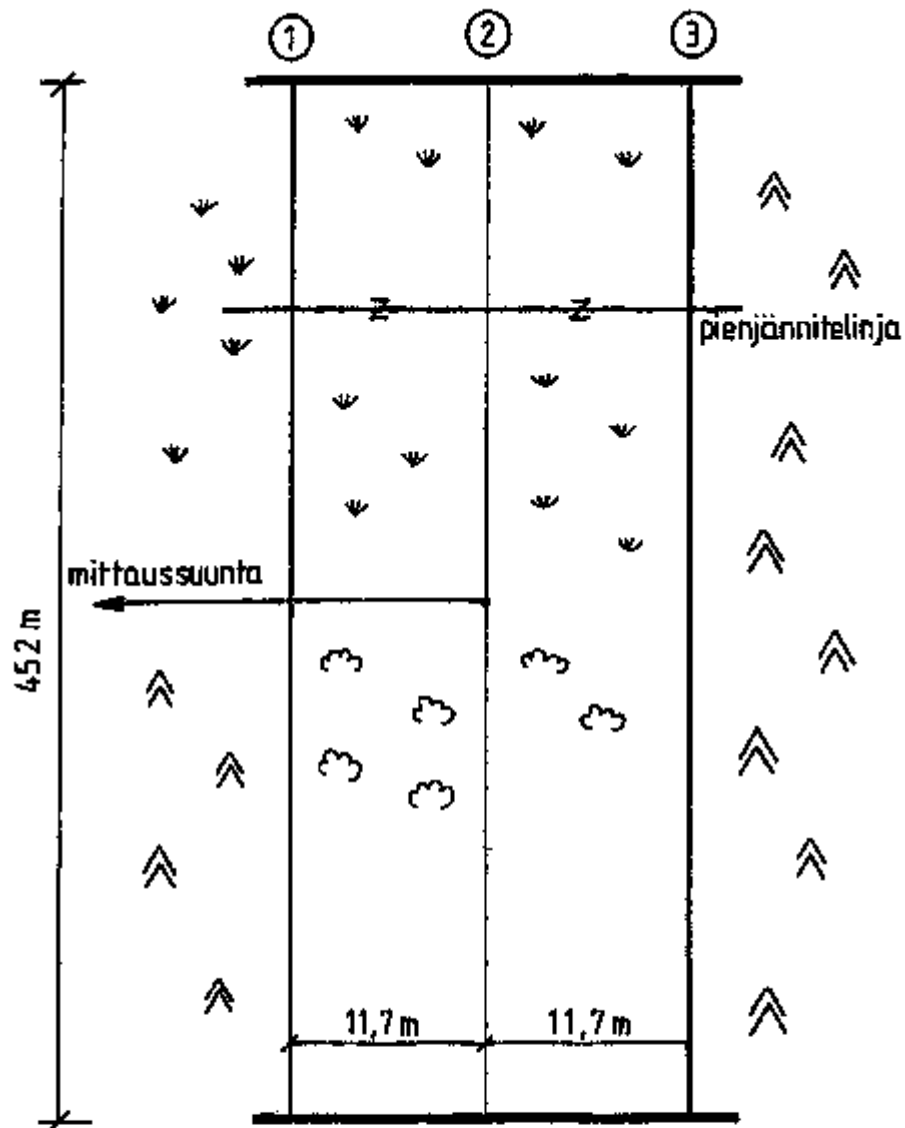
Pylväsväli V4



Laskennassa käytetyt arvot:

- jännite 401,5 kV
- vaiheväli 11,7 m
- vaihejohtimen korkeuden keskiarvo 15,1 m
- (mittausten perusteella)

Pylväsvali V4



Linjan korkeus keskeltä

① 15,8m

② 15,14m

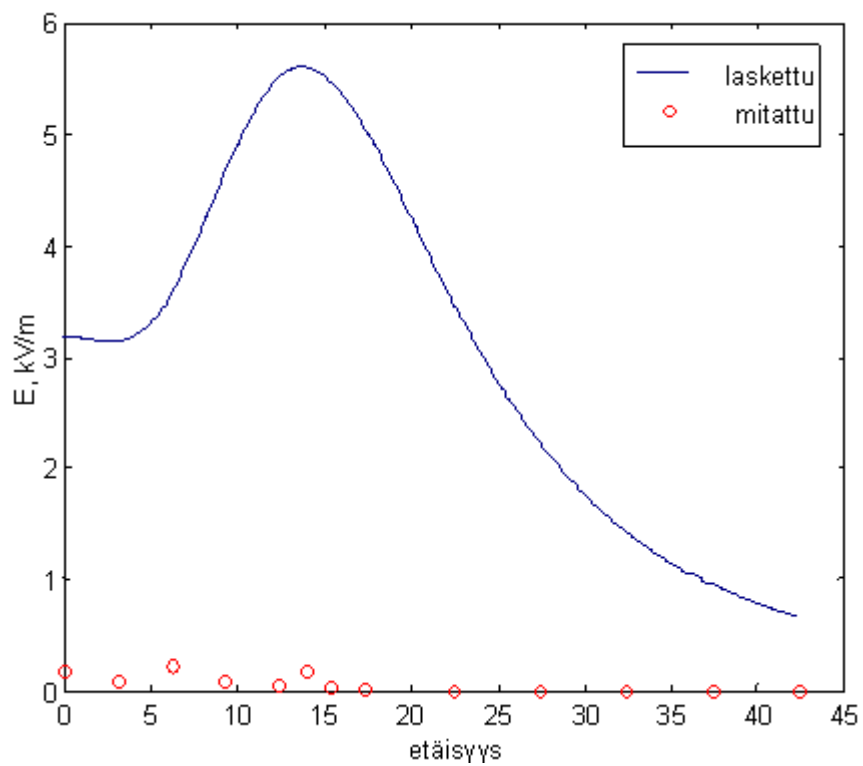
③ 14,95m

↘ = peltoa

↗ = metsää

☁ = pajua, koivua
h=0,5-3m

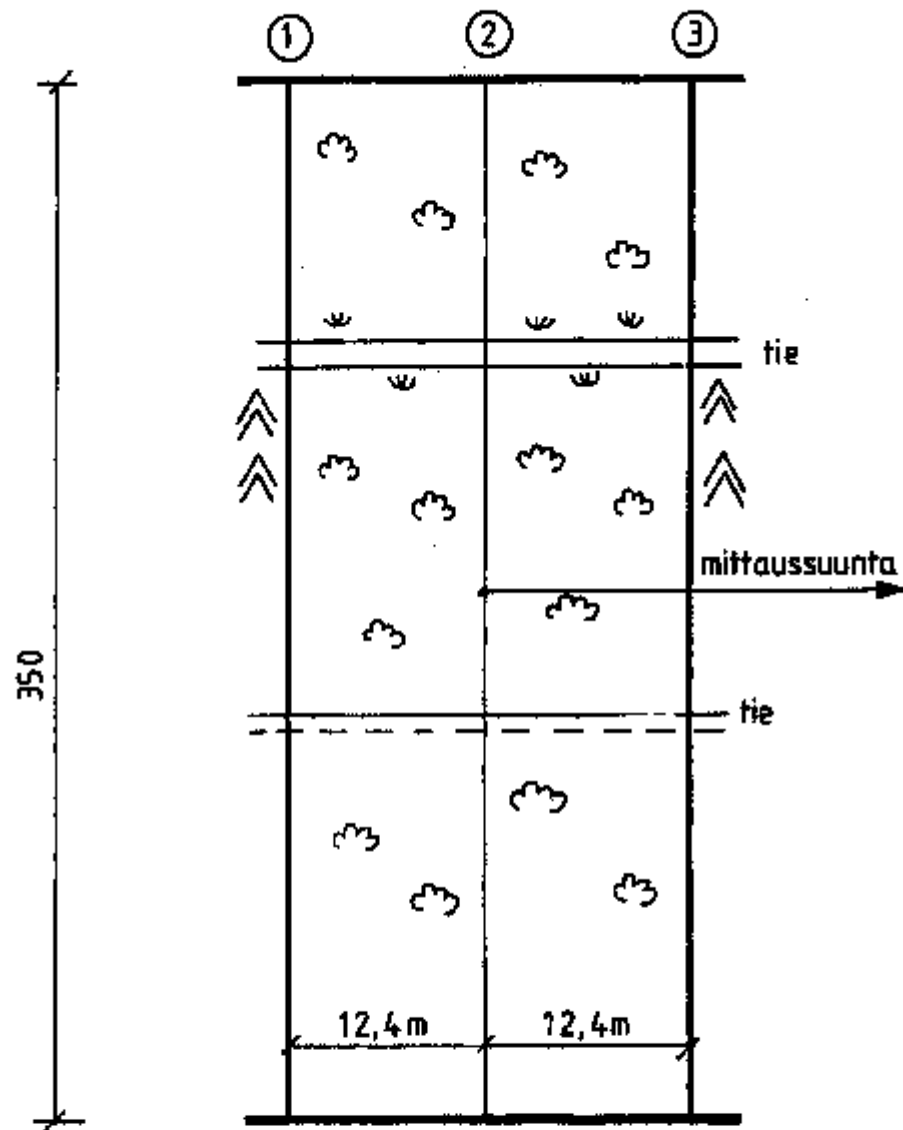
⚡ = kiviä

Tulokset pylväsvälin V5 sähkökenttien laskennasta ja mittauksesta**Pylväsväli V5**

Laskennassa käytetyt arvot:

- jännite 399,0 kV
- vaiheväli 12,4 m
- vaihejohtimen korkeuden keskiarvo 13,6 m
- (mittausten perusteella)

Pylväsvali V5



Linjan korkeus keskeltä

① 14,54 m

② 13,82 m

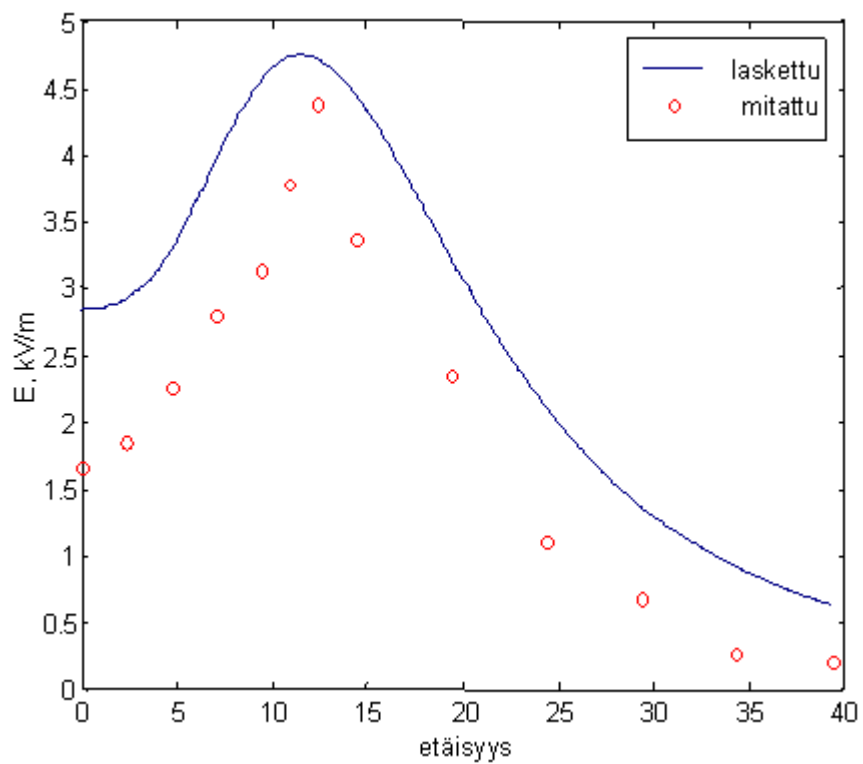
③ 12,52 m

☞ = peltoa

⋈ = metsää

☁ = paju, koivua
h = 0,5-3 m

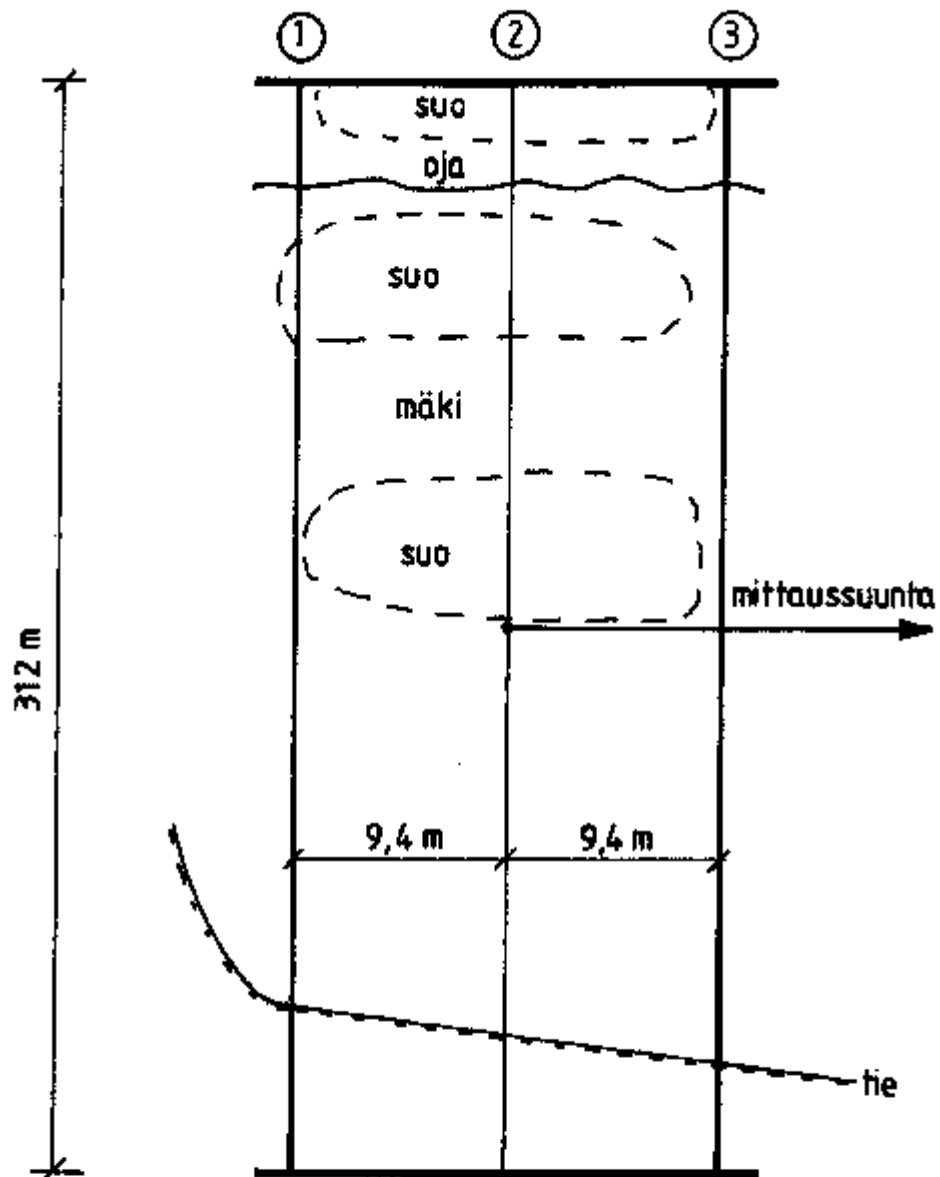
⊙ = kiviä

Tulokset pylväsvälin V6 sähkökenttien laskennasta ja mittauksesta**Pylväsväli V6**

Laskennassa käytetyt arvot:

- jännite 405,6 kV
- vaiheväli 9,4 m
- vaihejohtimen korkeuden keskiarvo 13,1 m
- (mittausten perusteella)

Pylväsväli V6



Linjan korkeus keskeltä

① 13,33 m

② 12,96 m

③ 13,10 m

ψ = peltoa

⋈ = metsää

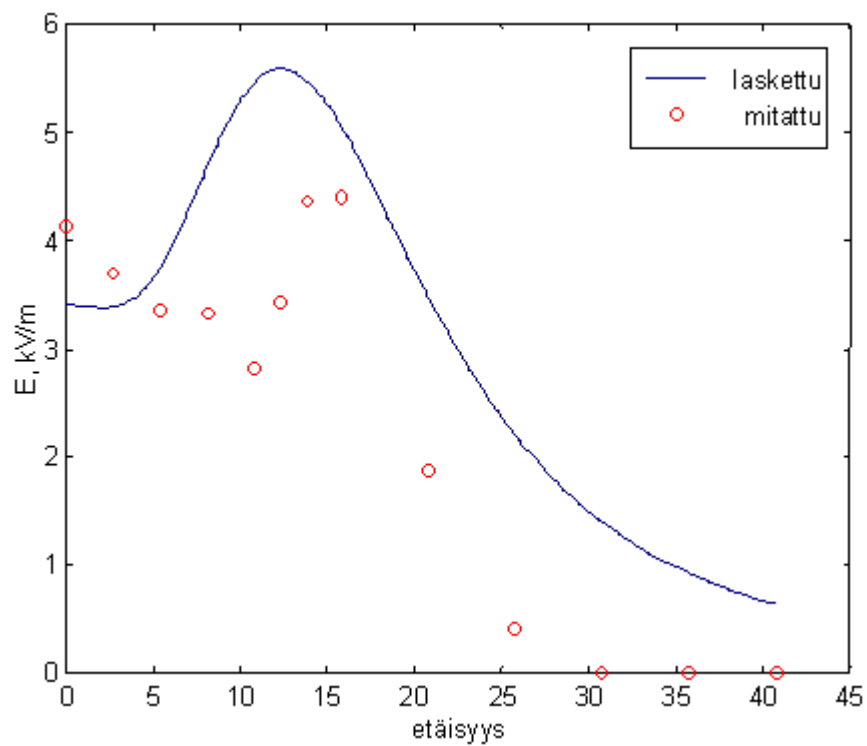
☞ = pajua, koivua
h = 0,5-3 m

⊕ = kiviä

Tulokset pylväsvälin V7 sähkökenttien laskennasta ja mittauksesta



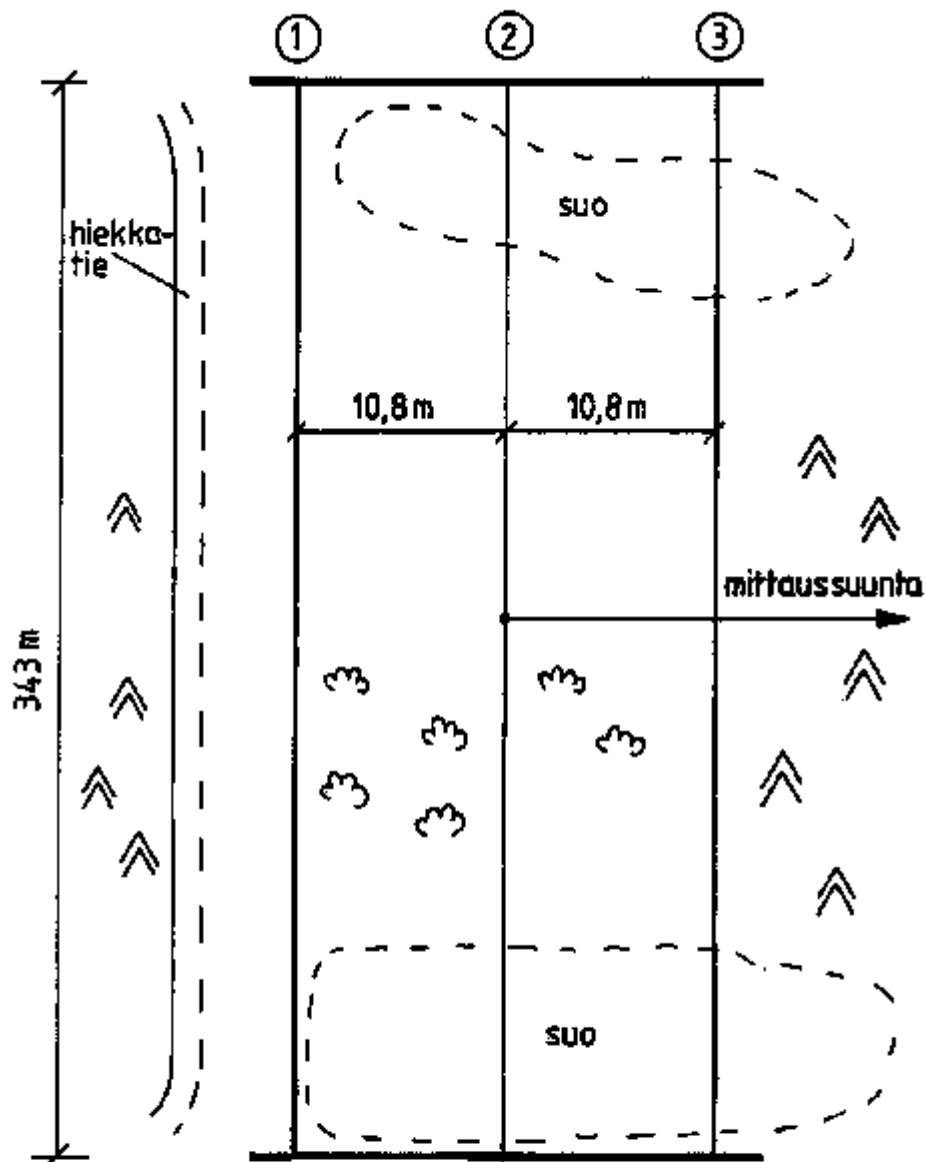
Pylväsväli V7



Laskennassa käytetyt arvot:

- jännite 401,5 kV
- vaiheväli 10,8 m
- vaihejohtimen korkeuden keskiarvo 12,8 m
- (mittausten perusteella)

Pylväsväli V7



Linjan korkeus keskeltä

① 12,25 m

② 12,76 m

③ 13,31 m

☐ = peltoa

⤴ = metsää

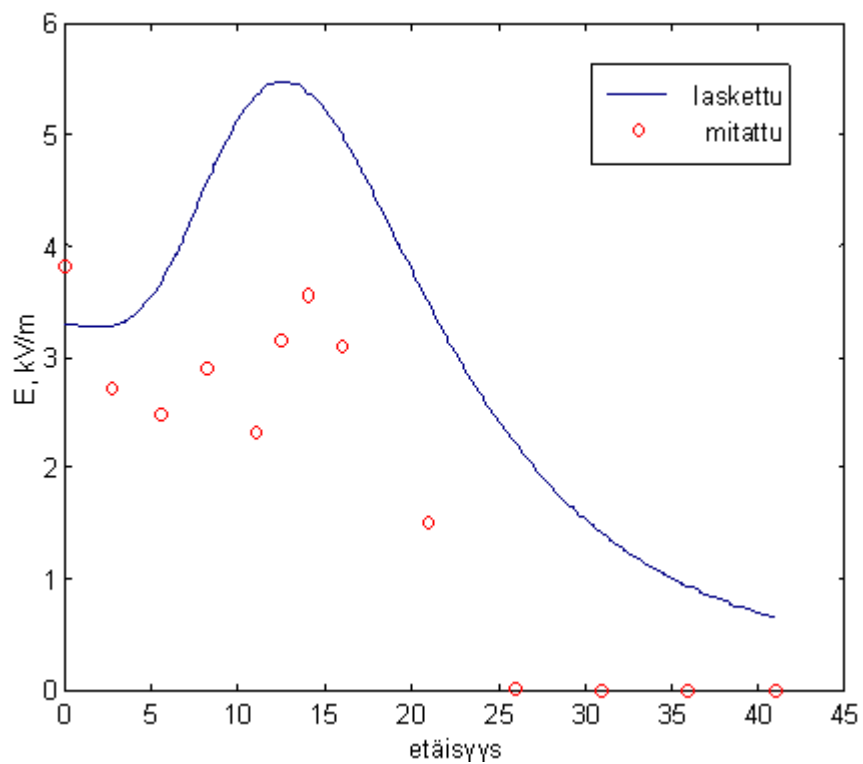
☁ = paju, koivua
h = 0,5-3 m

⊙ = kiviä

Tulokset pylväsvälin V8 sähkökenttien laskennasta ja mittauksesta



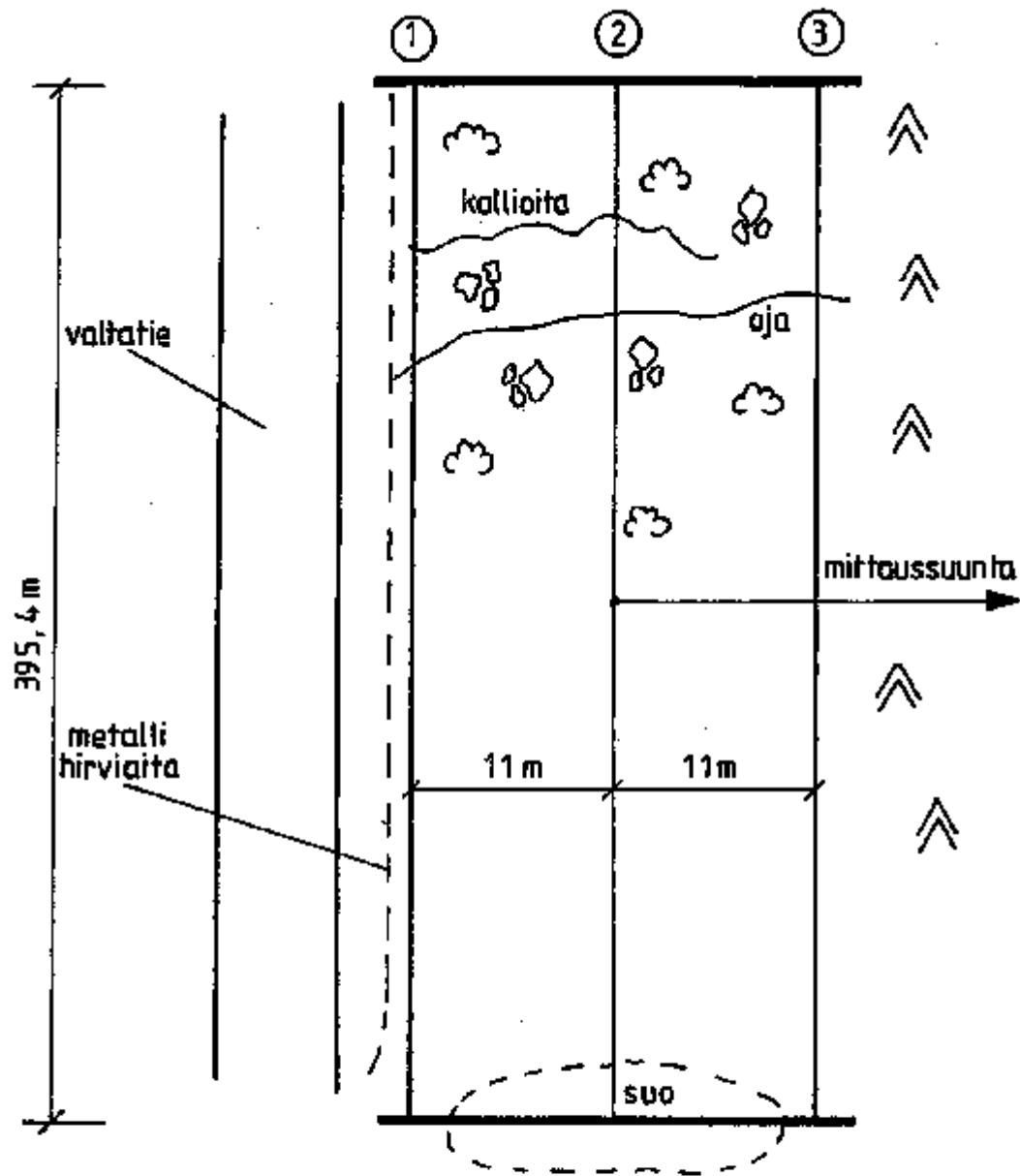
Pylväsväli V8



Laskennassa käytetyt arvot:

- jännite 402,6 kV
- vaiheväli 11,0 m
- vaihejohtimen korkeuden keskiarvo 13,0 m
- (mittausten perusteella)

Pylväsväli V8



Linjan korkeus keskeltä

① 13,61m

② 13,04m

③ 12,46m

Ψ = peltoa

⋈ = metsää

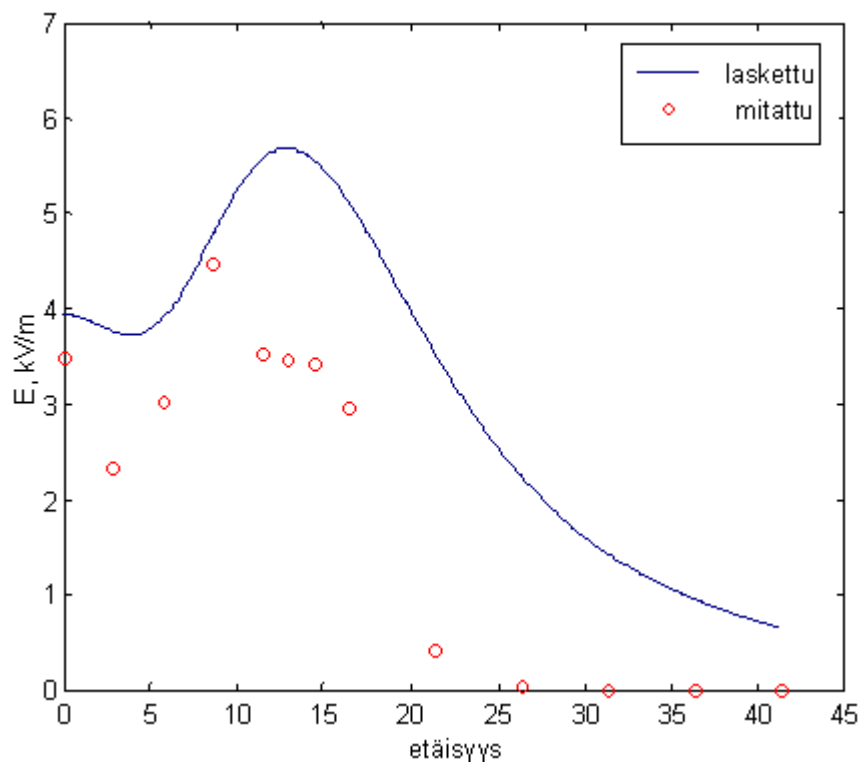
c = pajua, koivua
h=0,5-3 m

D = kiviä

Tulokset pylväsvälin V9 sähkökenttien laskennasta ja mittauksesta



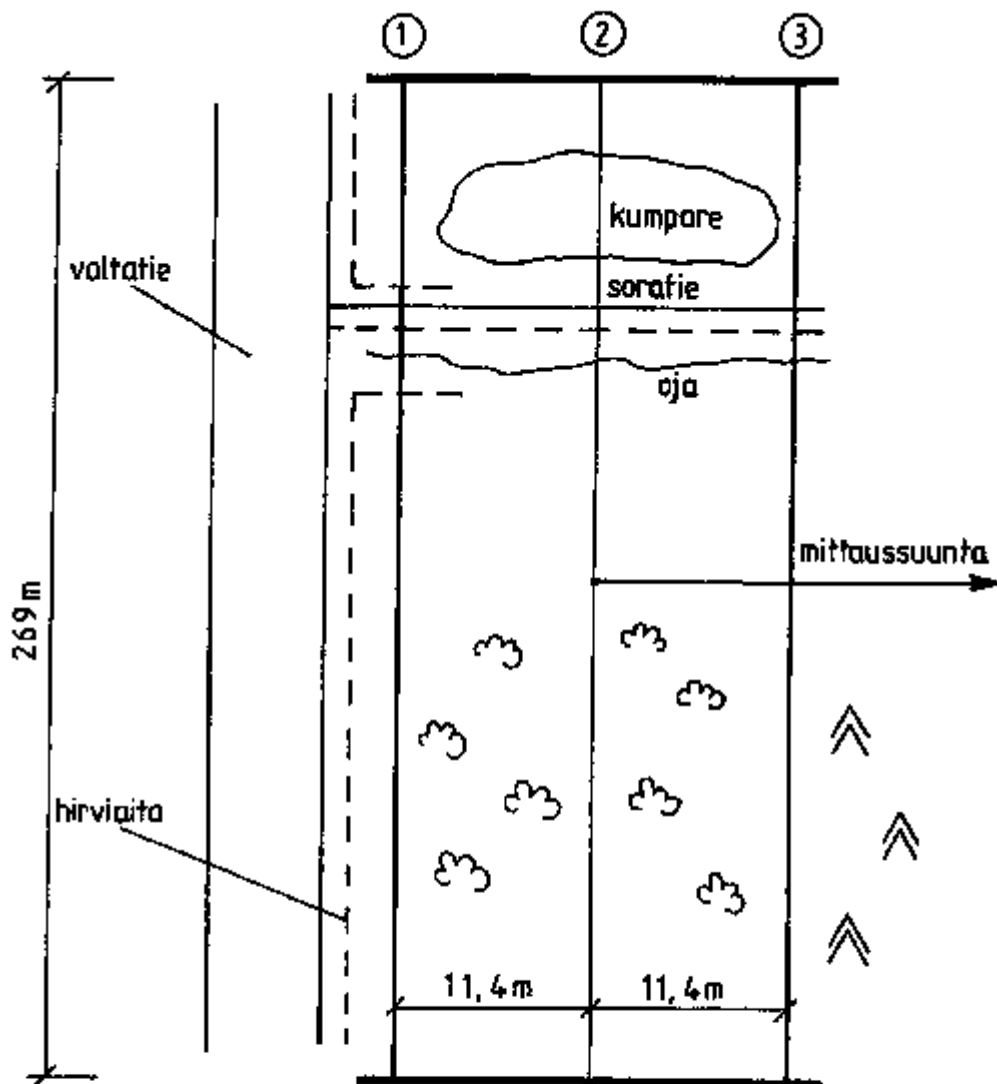
Pylväsväli V9



Laskennassa käytetyt arvot:

- jännite 402,3 kV
- vaiheväli 11,4 m
- vaihejohtimen korkeuden keskiarvo 12,5 m
- (mittausten perusteella)

Pylväsväli V9



Linjan korkeus keskeltä

- ① 12,25 m
- ② 12,33 m
- ③ 12,94 m

☙ = peltoa

⤴ = metsää

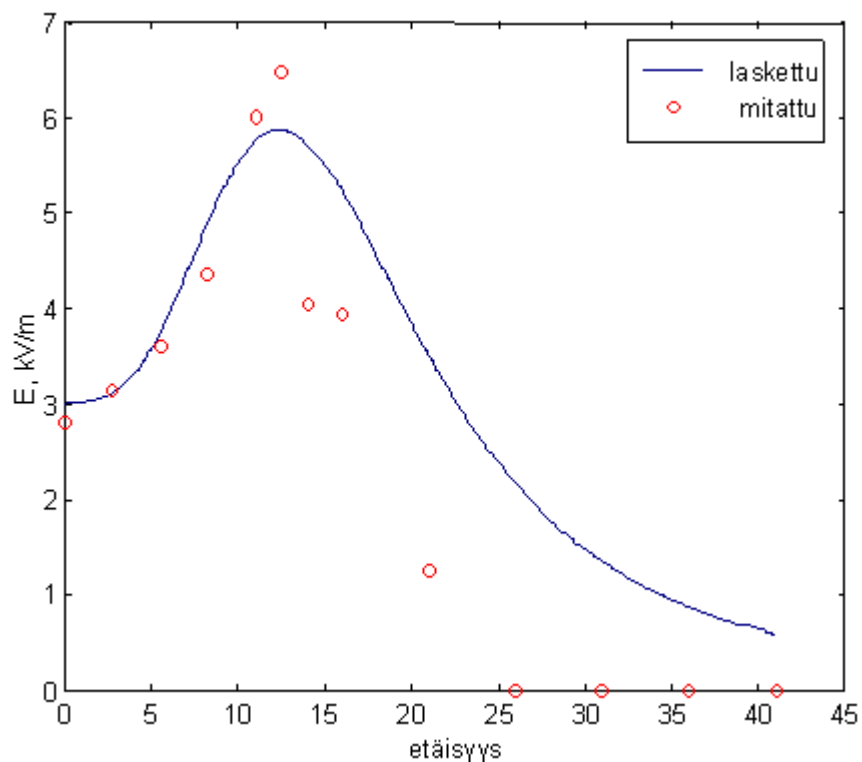
☁ = pajua, koivua
h=0,5-3 m

⊙ = kiviä

Tulokset pylväsvälin V10 sähkökenttien laskennasta ja mittauksesta



Pylväsväli V10



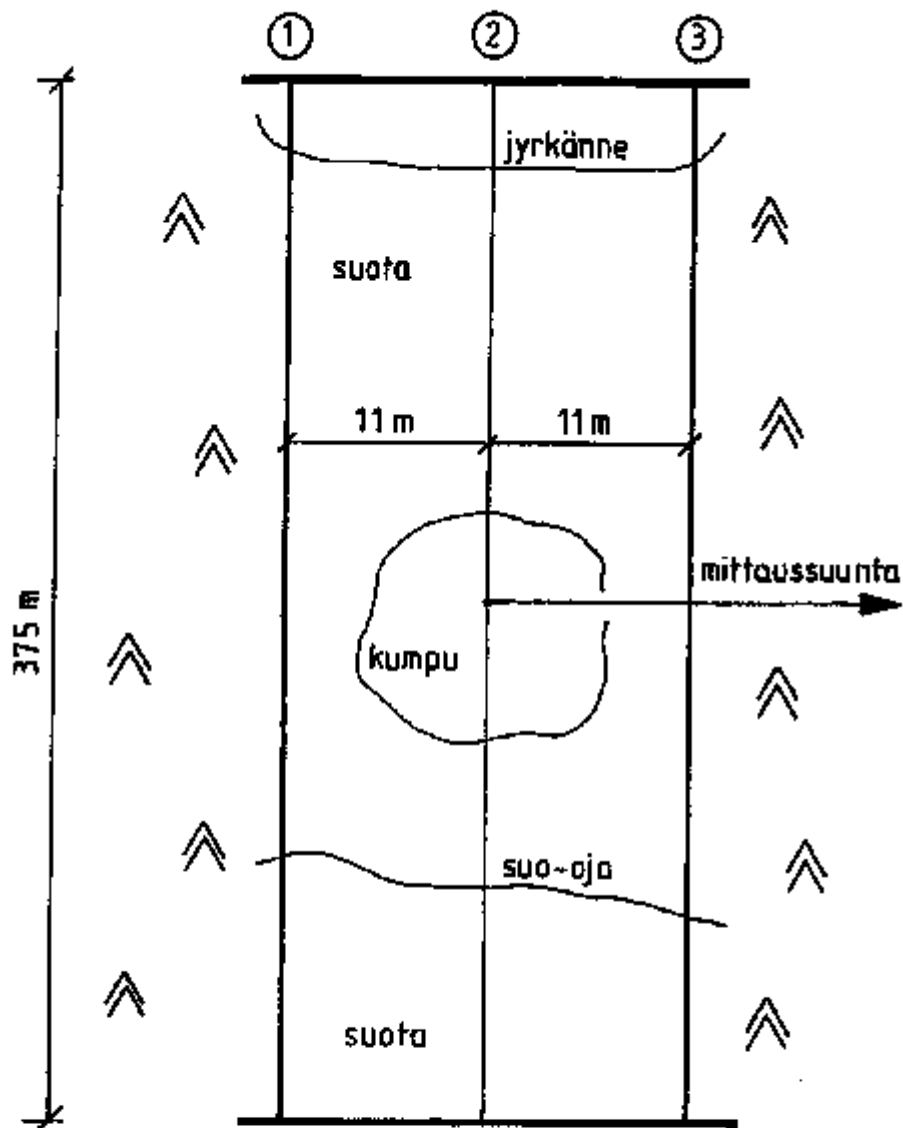
Laskennassa käytetyt arvot:

- jännite 397,1 kV
- vaiheväli 11,0 m
- vaihejohtimen korkeuden keskiarvo 13,2 m
- (mittausten perusteella)

Pylväsväli V10

Kangasala

Valkeakoski



Linjan korkeus keskeittä

① 11,85 m

② 13,40 m

③ 14,40 m

⌞ = peltoa

⋈ = metsää

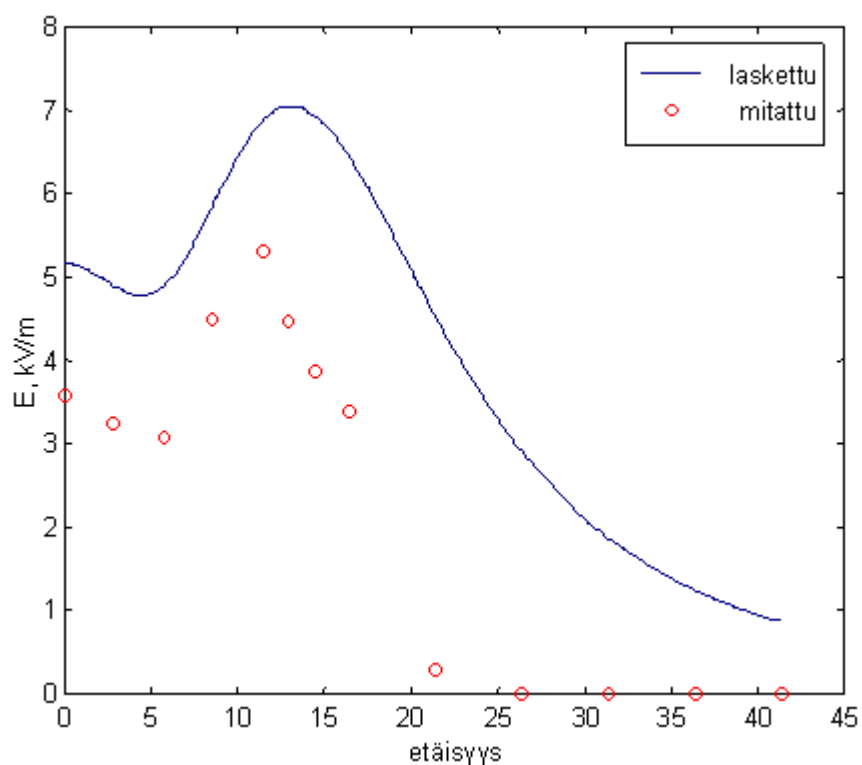
☞ = pajua, koivua
h=0,5-3 m

⊕ = kiviä

Tulokset pylväsvälin V11 sähkökenttien laskennasta ja mittauksesta



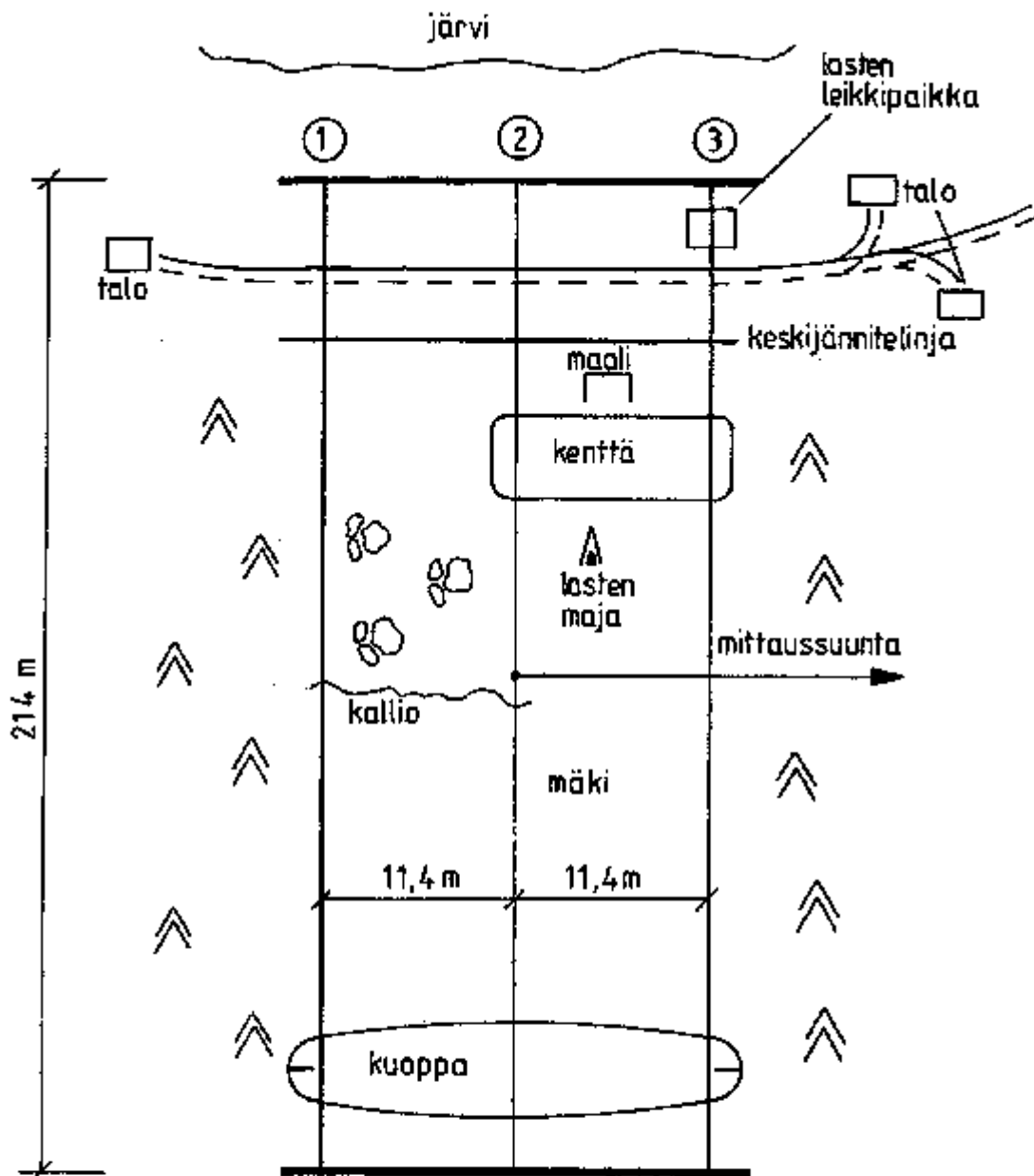
Pylväsväli V11



Laskennassa käytetyt arvot:

- jännite 400,0 kV
- vaiheväli 11,4 m
- vaihejohtimen korkeuden keskiarvo 12,4 m
- (mittausten perusteella)

Pylväsväli V11



Linjan korkeus keskeltä

① 12,28 m

② 12,16 m

③ 12,61 m

☞ = peltoa

⤴ = metsää

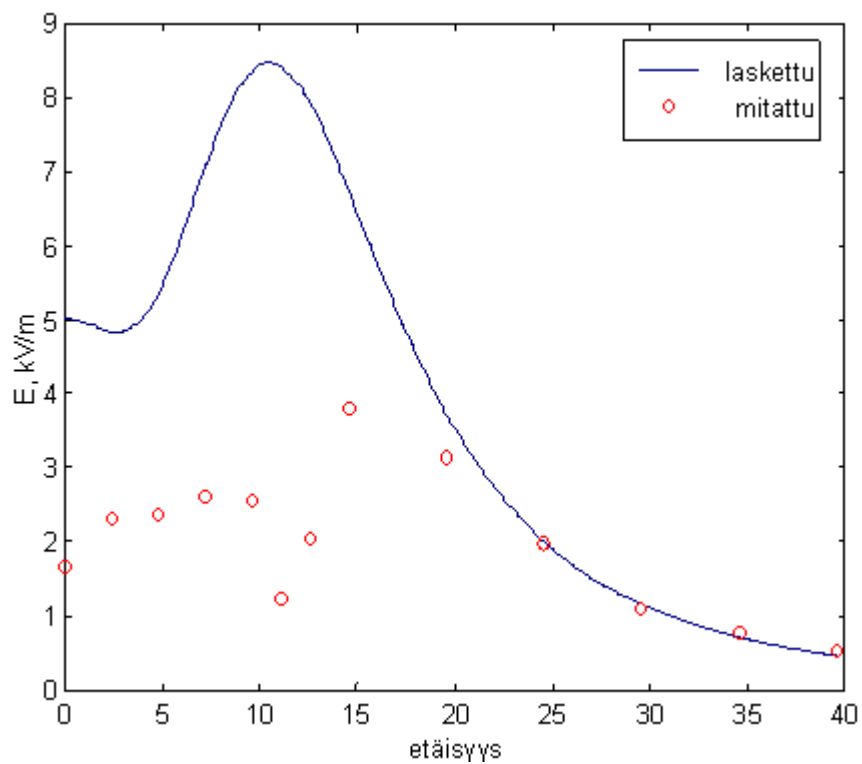
☞ = pajua, koivua
h=0,5-3 m

☞ = kiviä

Tulokset pylväsvälin V12 sähkökenttien laskennasta ja mittauksesta



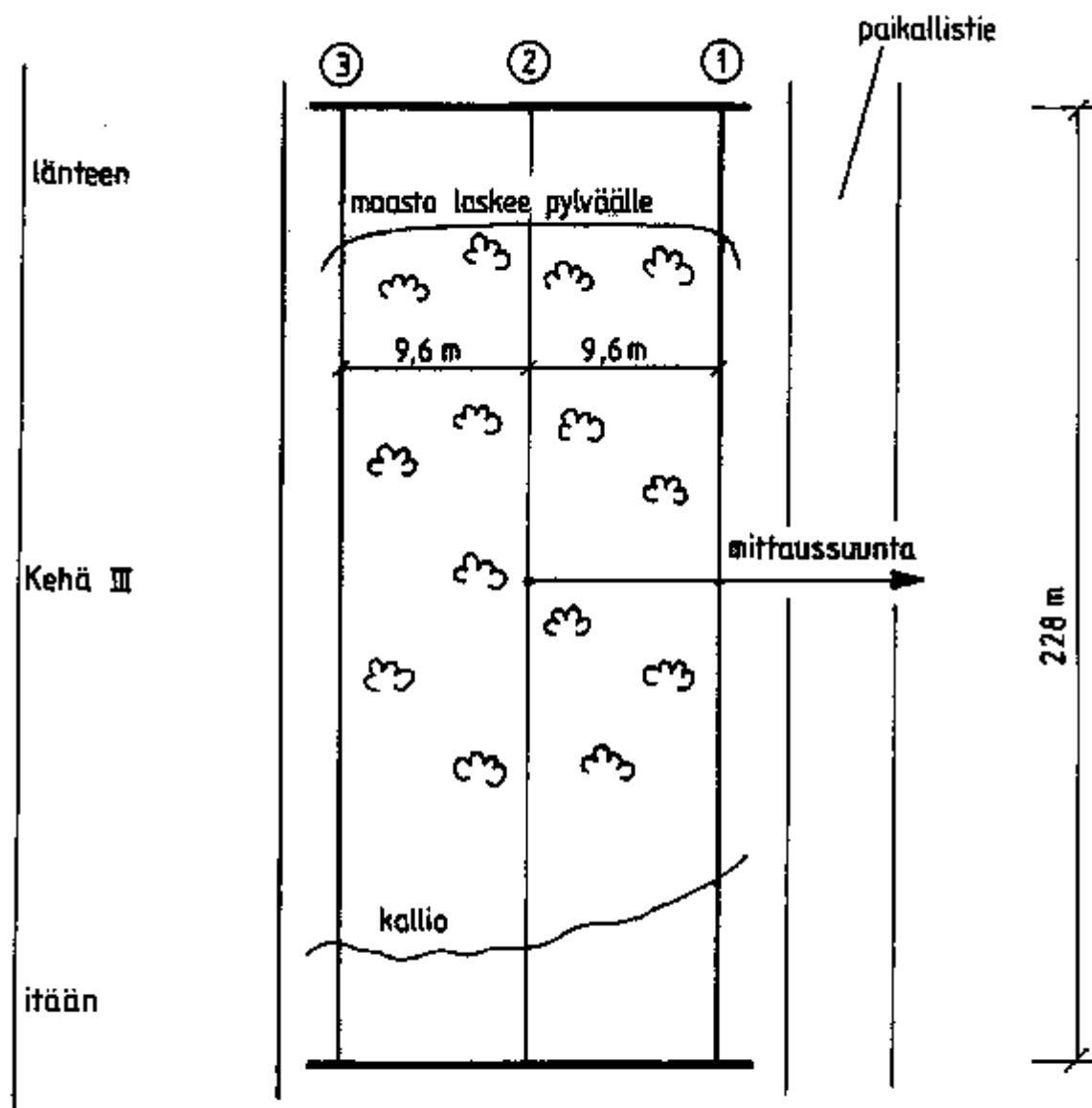
Pylväsväli V12



Laskennassa käytetyt arvot:

- jännite 396,4 kV
- vaiheväli 9,6 m
- vaihejohtimen korkeuden keskiarvo 10,2 m
- (mittausten perusteella)

Pylväsväli V12



Linjan korkeus keskeltä

① 11,22m

② 10,22m

③ 9,09 m

↘ = peltoa

⋈ = metsää

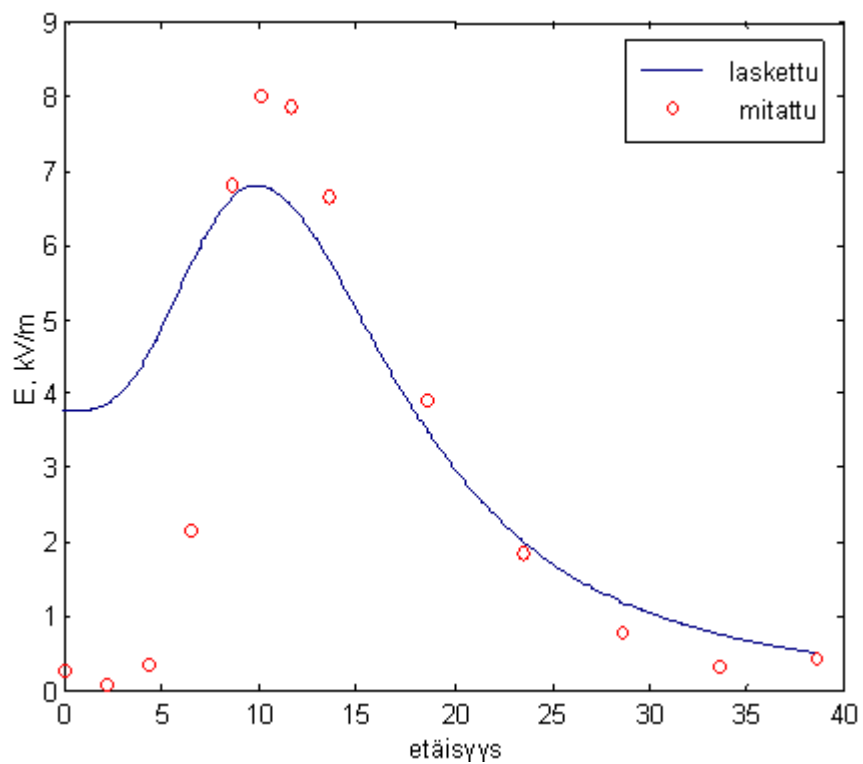
☁ = pajua, koivua
h=0,5-3 m

⊙ = kiviä

Tulokset pylväsvälin V13 sähkökenttien laskennasta ja mittauksesta



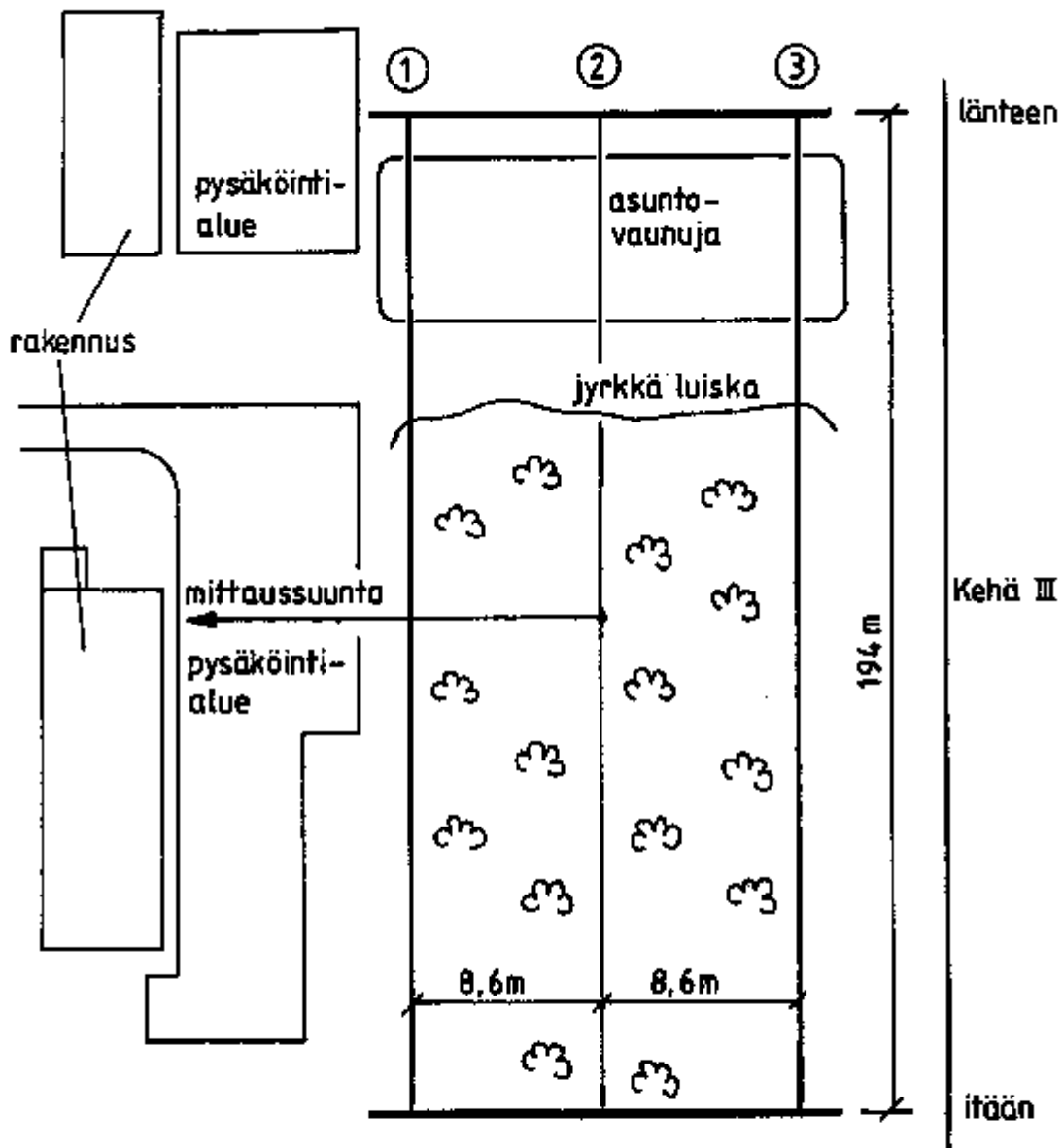
Pylväsväli V13



Laskennassa käytetyt arvot:

- jännite 397,0 kV
- vaiheväli 8,6 m
- vaihejohtimen korkeuden keskiarvo 10,3 m
- (mittausten perusteella)

Pylväsväli V13



Linjan korkeus keskeltä

① 10,20 m

② 10,75 m

③ 9,82 m

↘ = peltoa

⋈ = metsää

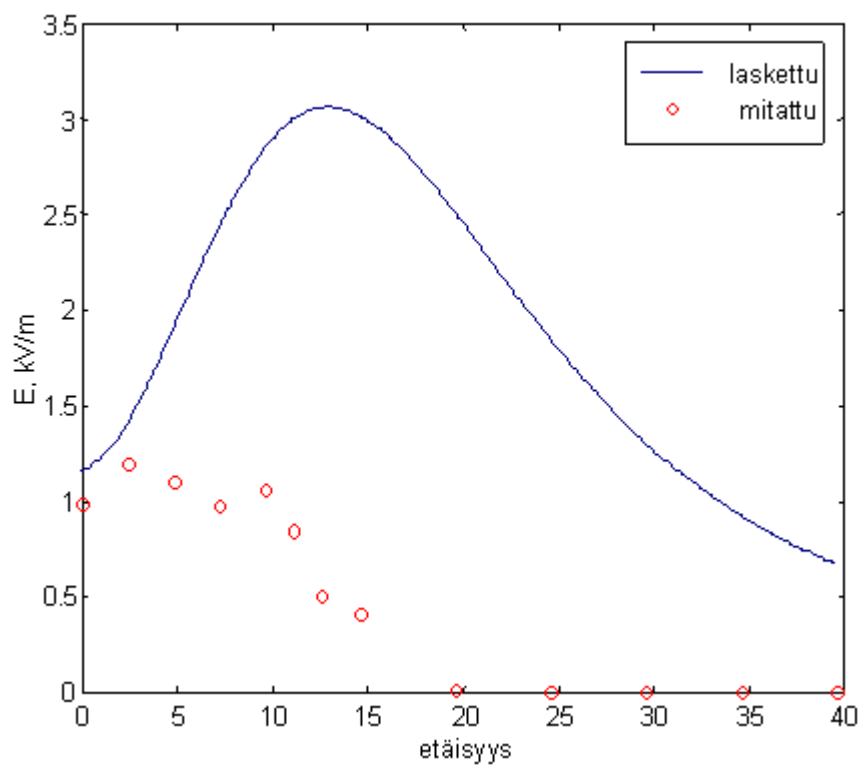
☁ = paju, koivua
h=0,5-3 m

⊕ = kiviä

Tulokset pylväsvälin V14 sähkökenttien laskennasta ja mittauksesta



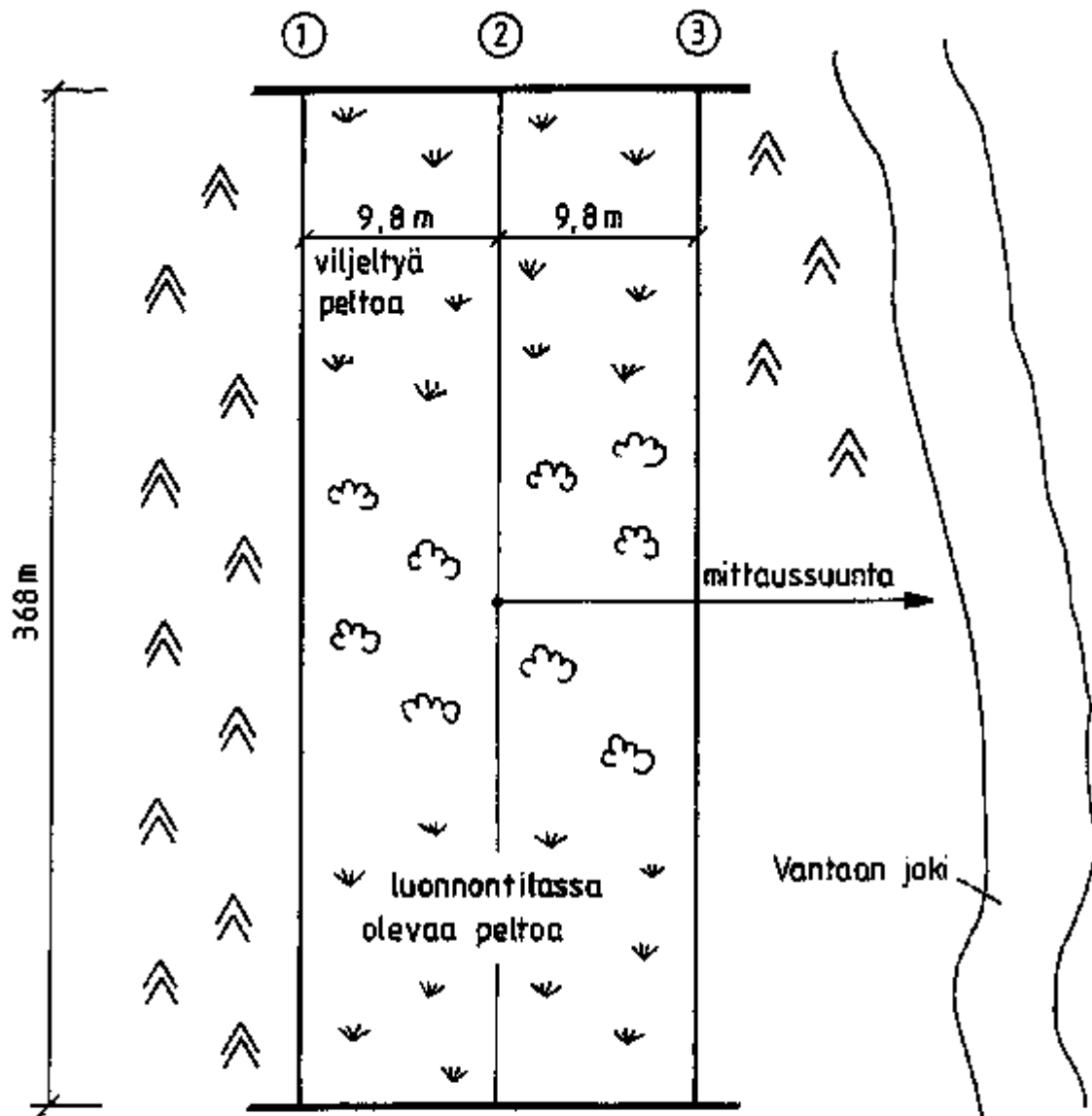
Pylväsväli V14



Laskennassa käytetyt arvot:

- jännite 400,5 kV
- vaiheväli 9,6 m
- vaihejohtimen korkeuden keskiarvo 17,1 m
- (mittausten perusteella)

Pylväsväli V14



Linjan korkeus keskeltä

- | | | | |
|---|---------|---|------------------------------|
| ① | 17,13 m | v | = peltoa |
| ② | 17,27 m | A | = metsää |
| ③ | 16,78 m | B | = pajua, koivua
h=0,5-3 m |
| | | C | = kiviä |

