

Janne Seppänen

# **Ukkosjohtimettoman 110 kV:n avojohtdon käyttömahdollisuudet Suomessa**

## **Sähkötekniikan korkeakoulu**

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi  
diplomi-insinöörin tutkintoa varten Espoossa 20.10.2011.

Työn valvoja:

Prof. Liisa Haarla

Työn ohjaaja:

DI Paavo Tammi



**Aalto-yliopisto**  
Sähkötekniikan  
korkeakoulu

Tekijä: Janne Seppänen		
Työn nimi: Ukkosjohtimettoman 110 kV:n avojohdon käyttömahdollisuudet Suomessa		
Päivämäärä: 20.10.2011	Kieli: Suomi	Sivumäärä: 9+87
Sähkötekniikan laitos		
Professori: Sähkönsiirtojärjestelmät		Koodi: S-18
Valvoja: Prof. Liisa Haarla		
Ohjaaja: DI Paavo Tammi		
<p>Suomessa 110 kV:n avojohdoille asennetaan lähes aina ukkosjohtimet. Ukkosjohtimet suojaavat vaihejohtimia suorilta salamaniskuilta, kuljettavat osaa maasulkuvirrasta ja pienentävät maasulun aikaisia vaarajännitteitä. Toisaalta joillain alueilla ukkosjohtimiin voi kertyä talvisin jääkuormia, jotka voivat aiheuttaa keskeytyksiä sähkönsiirtoon. Jääkuormien aiheuttamista haitoista johtuen ukkosjohtimien poisjättäminen on tietyissä olosuhteissa perusteltua.</p> <p>Tässä työssä tutkittiin Pohjois-Suomeen Kolarin ja Pellon välille vuonna 2009 rakennettua ukkosjohtimettonta 110 kV:n avojohtoa. Kolari–Pello-johdolla ukkosjohtimet on korvattu maahan upotetulla jokaisen pylvään maadoitukseen yhdistetyllä läpimenevällä kuparijohtimella. Tämän maajohtimen tarkoituksena on kuljettaa osaa maasulkuvirrasta ja pienentää vaarajännitteitä.</p> <p>Työn tavoitteena on selvittää, onko Kolari–Pello-johto turvallinen maasulkutilanteessa esiintyvien vaarajännitteiden kannalta. Lisäksi tavoitteena on selvittää, mitkä ovat ukkosjohtimettoman läpimenevällä maajohtimella varustetun 110 kV:n avojohdon yleiset käyttömahdollisuudet Suomessa.</p> <p>Tutkimus toteutettiin mittauksien ja laskelmien avulla. Työssä kehitettiin uusia laskentamenetelmiä, joita tarvittiin edellä kuvatun johtorakenteen maasulkutilanteen tutkimiseen ja vaarajännitteiden arviointiin. Menetelmät perustuvat maajohtimen kuvaamiseen differentiaalisen pienten alkiodien avulla ja niiden perusteella muodostettujen differentiaaliyhtälöiden ratkaisemiseen. Työssä kehitetyillä menetelmillä laskettuja tuloksia verrattiin mittaustuloksiin.</p> <p>Työn tavoitteet saavutettiin. Työn johtopäätökseksi saatiin, että Kolari–Pello-johto on turvallinen. Lisäksi työn tulosten perusteella selvitettiin ehdot, joiden täytyessä ukkosjohtimettomia 110 kV:n avojohtoja voidaan käyttää Suomessa. Mittaustulokset osoittivat, että työssä kehitetyt laskentamenetelmät ovat toimivia. Menetelmiä voidaan hyödyntää arvioitaessa ukkosjohtimettomien läpimenevällä maajohtimella varustettujen avojohdojen vaarajännitteitä.</p>		
Avainsanat: Vaarajännite, maasulku, maadoitus, maajohdin, ukkosjohdin, maadoitusmittaus		

Author: Janne Seppänen		
Title: Feasibility of Unshielded 110 kV Overhead Lines in Finland		
Date: 20 <sup>th</sup> of October 2011	Language: Finnish	Number of pages: 9+87
Department of Electrical Engineering		
Professorship: Electrical Transmission Systems	Code: S-18	
Supervisor: Professor Liisa Haarla		
Instructor: M. Sc. (Tech.) Paavo Tammi		
<p>Traditionally, 110 kV overhead lines in Finland are equipped with shield wires. Shield wires protect the phase conductors against lightning strokes, transfer part of the earth fault current and decrease the hazardous voltages. However, at some locations ice and snow accumulate on the shield wires during winter. These ice and snow accumulations can cause interruptions to the power transmission. Therefore, under certain circumstances it may be justifiable to build overhead lines without shield wires.</p> <p>This master's thesis studies a special 110 kV overhead line structure without shield wires. This overhead line was built in 2009 in Lapland, and connects the substations of Kolari and Pello. The shield wires on this line have been replaced by a buried copper conductor connected to the earthing systems of each tower. The purpose of this continuous counterpoise is to transfer part of the earth fault current and decrease the hazardous voltages.</p> <p>The objective of this thesis is to analyze the hazardous voltages during an earth fault and determine if the Kolari–Pello line is safe. Furthermore, the goal is to analyze the general feasibility of unshielded 110 kV overhead lines in Finland.</p> <p>The research included both measurements and calculations. Novel calculation methods for studying the ground fault situation of an unshielded overhead line equipped with a continuous counterpoise are presented in this thesis. The methods are based on modeling the counterpoise with differential elements and solving the differential equations derived from the model. The validity of the presented calculation methods was evaluated based on the measurements.</p> <p>The conclusion of this study is that the overhead line between Kolari and Pello is safe. This study also presents the general terms under which the unshielded 110 kV lines can be used in Finland. The measurements proved that the presented calculation methods are functional. Therefore, the methods can be utilized when evaluating the hazardous voltages during an earth fault on an unshielded overhead line equipped with a continuous counterpoise.</p>		
Keywords: Hazardous voltages, earth fault, earthing, continuous counterpoise, shield wire, measurement of earthing systems		

## Alkusanat

Tämä diplomityö on tehty siirtotekniikan tutkimusryhmässä sähkötekniikan laitoksella Aalto-yliopiston sähkötekniikan korkeakoulussa. Työtä ovat rahoittaneet Fingrid Oyj, Tornionlaakson Sähkö Oy sekä Energiateollisuus ry.

Työn tekeminen on ollut erittäin mielenkiintoista, palkitsevaa ja myös haastavaa. Yksi työn haastavimmista osioista tuntuu kuitenkin olevan kaikkien työn tekemistä edesauttaneiden henkilöiden kiittäminen heidän ansaitsemallaan tavalla.

Haluan kiittää työni ohjaajaa DI Paavo Tammea lukemattomista arvokkaista neuvoista ja perusteellisista keskusteluista. Myös työni valvoja professori Liisa Haarla ansaitsee suuret kiitokset kiinnostavan diplomityöaiheen järjestämisestä ja erityisesti tieteelliseen kirjoittamiseen liittyvistä neuvoista. Liisa Haarlalle kuuluvat kiitokset myös innostavasta opetuksesta aikaisempien opintojeni aikana.

Haluan kiittää diplomityöni ohjausryhmän kaikkia jäseniä. Kiitän DI Pertti Kurosta ja DI Sauli Kaulasta asiantuntevista neuvoista ja mielenkiinnosta projektia kohtaan. Sauli Kaulaselle kuuluvat erityiskiitokset mittauksen järjestelyistä ja mittauksiin osallistumisesta. Professori Jarmo Elovaaraa ja DI Ulla Huhtasta kiitän kallisarvoisista neuvoista ja mielenkiintoisista keskusteluista. Myös Niklas Löf ja Jari Vuorela ansaitsevat kiitokset hyödyllisistä keskusteluista.

Työkavereilleni kuuluvat kiitokset hyvistä keskusteluista ja mukavasta työilmapiiristä.

Kiitän vanhempiani kaikesta kannustuksesta ja tuesta, jota he ovat opintojeni aikana osoittaneet.

Lämpimät kiitokset Outi-Maarialle, joka on työn tekemisen aikana toiminut muun muassa oikolukijana, atk-tukihenkilönä, kärsivällisenä kuuntelijana ja positiivisena voimavarana.

Espoossa 18.10.2011.

Janne Seppänen



# Sisältö

Tiivistelmä.....	ii
Tiivistelmä (englanniksi).....	iii
Alkusanat.....	iv
Sisältö.....	v
Symbolit ja lyhenteet.....	vii
1 Johdanto.....	1
2 Voimansiirtojärjestelmän maasulku ja maadoittaminen.....	2
2.1 Maasulku.....	2
2.1.1 Maasulku maadoitetussa järjestelmässä.....	2
2.1.2 Maasulku sammutetussa järjestelmässä.....	3
2.2 Maadoitus.....	3
2.2.1 Yleistä.....	3
2.2.2 Maadoitustyytit.....	4
2.2.3 Maadoitusimpedanssi.....	4
2.2.4 Maaperän resistiivisyys.....	5
2.2.5 Maadoitusten mittaukset ja tarkastukset.....	7
2.2.6 Pylväsmaadoitukset.....	7
2.2.7 Asemamaadoitukset.....	10
2.3 Ukkosjohtimet.....	10
2.3.1 Yleistä.....	10
2.3.2 Ukkostiheys ja ukkoshäiriöt.....	12
2.3.3 Ukkosjohtimiin kertyvän jääkuorman aiheuttamat viat.....	13
3 Vaarajännitteet voimajohdon maasulussa.....	16
3.1 Yleistä.....	16
3.2 Maadoitusjännite ja maanpinnan potentiaali.....	17
3.3 Kosketusjännite.....	20
3.4 Askeljännite.....	22
3.5 Siirtyvät potentiaalit.....	22
3.6 Pylväsmaadoitusten suunnittelu vaarajännitteiden kannalta.....	23
4 Maasulku ukkosjohtimettomalla ja ukkosjohtimellisella avojohdolla.....	25
4.1 Maasulku ukkosjohtimettomalla läpimenevällä maajohtimella varustetulla avojohdolla.....	25
4.1.1 Yleistä.....	25
4.1.2 Maajohtimen virran, jännitteen, maahan menevän virran ja maassa kulkevan virran laskenta.....	28
4.1.3 Maanpinnan potentiaalilaskeminen.....	31
4.1.4 Maadoitusjännitteen, vaarajännitteiden ja maadoitusimpedanssin laskeminen.....	33
4.1.5 Maan resistiivisyyden, vikapaikan ja maajohtimen ominaisuuksien vaikutus maasulkutilanteessa.....	34
4.1.6 Maasulkutilanne ja vaarajännitteet maajohtimen katkettua.....	37
4.2 Ukkosjohtimellinen johto.....	41
4.2.1 Maasulku ukkosjohtimellisella johdolla.....	41
4.2.2 Vaarajännitteet yksittäisen pylväsmaadoituksen ympäristössä.....	44

5	Mitatut johdot ja mittausten menetelmät .....	47
5.1	Voimajohdot Kolari–Pello ja Äkäsjokisuus–Niesa .....	47
5.2	Kolari–Pello-johdon mittaukset .....	48
5.3	Äkäsjokisuus–Niesa-johdon mittaukset .....	50
5.4	Mittausten menetelmät .....	51
5.4.1	Voltti-ampeerimittarimenetelmä .....	51
5.4.2	Maaperän resistiivisyyden mittaus .....	53
6	Mittaustulokset .....	55
6.1	Kolari–Pello-johdon skaalatut mittaustulokset .....	55
6.1.1	Maajohtimen virtamittausten sekä vikapaikkojen kosketus- ja askeljännitemittausten skaalatut tulokset .....	55
6.1.2	Maadoitusjännitemittausten skaalatut tulokset .....	57
6.1.3	Maaperän resistiivisyyden mittauksen tulokset .....	57
6.2	Äkäsjokisuus–Niesa-johdon skaalatut mittaustulokset .....	58
6.2.1	Maahan menevien virtojen sekä vikapaikkojen kosketus- ja askeljännitemittausten skaalatut tulokset .....	58
6.2.2	Maadoitusjännitemittauksen skaalatut tulokset .....	59
7	Tulosten tarkastelu ja pohdinta .....	61
7.1	Johtojen mittaustulosten vertailu .....	61
7.2	Mittaustulosten luotettavuuden arviointi .....	62
7.3	Kolari–Pello-johdon mittaustulosten ja laskentamenetelmillä laskettujen tulosten vertailu .....	62
7.3.1	Laskentamenetelmien alkuarvot .....	63
7.3.2	Maajohtimen virta .....	63
7.3.3	Maadoitusjännite, maadoitusimpedanssi ja maanpinnan potentiaali .....	65
7.3.4	Kosketusjännitteet .....	67
7.4	Äkäsjokisuus–Niesa-johdon mittaustulosten ja laskentamenetelmillä laskettujen tulosten vertailu .....	69
7.4.1	Laskentamenetelmien alkuarvot .....	69
7.4.2	Ukkosjohtimien virta ja pylväiltä maahan menevä virta .....	69
7.4.3	Kosketusjännitteet ja maanpinnan potentiaali .....	70
7.5	Laskentamenetelmien pätevyysalueet ja menetelmien luotettavuuden arviointi .....	72
7.6	Ukkosjohtimettoman 110 kV:n avojohdon käyttömahdollisuudet ja johtorakenteen käyttöön liittyvät suositukset .....	73
7.7	Kolari–Pello-johdon turvallisuus .....	74
8	Johtopäätökset .....	76
	Viitteet .....	78
	Liite A: Kolari–Pello-johdon teknisiä tietoja .....	80
	Liite B: Äkäsjokisuus–Niesa-johdon teknisiä tietoja .....	81
	Liite C: Äkäsjokisuus–Niesa-johdon maadoitusten suunnittelumittausten tulokset .....	83

# Symbolit ja lyhenteet

## Symbolit

$3I_0$	maasulkuvirta
$A$	poikkipinta-ala
$a$	kahden maajohtimen välinen etäisyys
$a_p$	piikkiväli
$b$	ukkosjohtimien tai maajohtimen geometrinen keskietäisyys virtajohtimista
$C_0$	vaihejohtimen maakapasitanssi
$C_1, C_2$	integroitivakioita
$d$	maajohtimen tai ukkosjohtimen halkaisija
$\underline{E}_R, \underline{E}_S, \underline{E}_T$	vaiheiden R, S ja T vaihejännitteet, kun järjestelmässä ei ole vikaa
$\underline{E}_v$	viallisen vaiheen vaihejännite ennen vikaa
$g$	maadoituskonduktanssi pituutta kohden
$H$	maapaluvirran ekvivalenttisyvyys
$h$	upotussyvyys
$h_1$	maakerroksen syvyys
$I_0$	mitattu virta, kun mittauspiirin jännitelähde on oikosuljettu
$I_1$	mitattu virta, kun mittauspiirin jännitelähteen vaihetta ei ole käännetty
$I_2$	mitattu virta, kun mittauspiirin jännitelähteen vaihetta on käännetty $180^\circ$
$\underline{I}'$	maadoituselektrodista maahan menevä kokonaisvirta
$\underline{I}'_n$	pylvään numero $n$ maadoituksesta maahan menevä kokonaisvirta
$\underline{I}_a$	syöttöaseman suuntaan maajohtimessa kulkeva kokonaisvirta, joka menee maajohtimesta maahan
$I_B$	kehon kautta kulkeva virta
$\underline{I}_b$	vasta-aseman suuntaan maajohtimessa kulkeva kokonaisvirta, joka menee maajohtimesta maahan
$\underline{I}_c$	vaihejohtimien maakapasitanssien kautta kulkeva virta maasulun aikana
$\underline{I}_f$	vikavirta
$I_m$	todellinen mitattu virta
$\underline{I}_n^a$	syöttöaseman suuntaan ukkosjohtimissa jännevälillä numero $n$ kulkeva virta, joka menee pylväsmaadoituksista maahan
$\underline{I}_n^b$	vasta-aseman suuntaan ukkosjohtimissa jännevälillä numero $n$ kulkeva virta, joka menee pylväsmaadoituksista maahan
$\underline{I}_n^{uj}$	ukkosjohtimissa kulkeva kokonaisvirta jännevälillä numero $n$
$\underline{I}_x$	sammutuskuristimessa kulkeva virta maasulun aikana
$\underline{i}$	maajohtimen virta maajohtimen ollessa ehjä
$\underline{i}'$	maajohtimesta maahan menevä virta pituutta kohden maajohtimen ollessa ehjä
$\underline{i}'_B$	katkenneesta maajohtimesta maahan menevä virta pituutta kohden
$\underline{i}_B$	katkenneen maajohtimen virta

$\underline{i}_{BE}$	maassa kulkeva virta, kun maajohdin on katkennut
$\underline{i}_E$	maassa kulkeva virta maajohtimen ollessa ehjä
$j$	imaginääriyksikkö
$\underline{k}$	reduktiokerroin
$l$	pituus
$l_f$	vikapaikan etäisyys syöttöasemalta
$l_s$	jänteen pituus
$n$	pylvään numero, jännevälin numero tai kokonaislukua kuvaava muuttuja
$p$	maaperän kosteuspitoisuus prosentteina
$R$	resistanssi
$R_A$	lisäresistanssi
$R_{A1}$	jalkineiden resistanssi
$R_{A2}$	seisontakohdan maadoitusresistanssi
$R_E$	maadoitusresistanssi
$R_n$	pylvään numero $n$ maadoitusresistanssi
$r$	etäisyys maanpintaa pitkin mitattuna
$r_0$	maassa kulkevan virran kohtaama resistanssi pituutta kohden
$r_e$	ukkosjohtimien tai maajohtimen ekvivalenttisäde
$r_{eg}$	maajohtimen ekvivalenttisäde konduktanssia laskettaessa
$r_j$	ukkosjohtimien tai maajohtimen resistanssi pituutta kohden
$s$	matka
$t_F$	vian kesto aika
$U_0$	mitattu jännite, kun mittauspiirin jännitelähde on oikosuljettu
$U_1$	mitattu jännite, kun mittauspiirin jännitelähteen vaihetta ei ole käännetty
$U_2$	mitattu jännite, kun mittauspiirin jännitelähteen vaihetta on käännetty $180^\circ$
$\underline{U}_{BE}$	katkenneen maajohtimen maadoitusjännite
$\underline{U}_{BT}$	takaperoinen kosketusjännite
$\underline{U}_E$	maadoitusjännite
$U_m$	todellinen mitattu jännite
$\underline{U}_{Nf}$	tähtipisteen jännite maahan nähden maasulun aikana
$\underline{U}_{Rf}, \underline{U}_{Tf}, \underline{U}_{Sf}$	vaiheiden R, S ja T vaihejännitteet maasulun aikana
$\underline{U}_S$	askeljännite
$\underline{U}_T$	kosketusjännite
$U_{TB}$	ihmiskehon yli vaikuttava kosketusjännite
$U_{TP}$	siirtyvä potentiaali
$\underline{u}$	maajohtimen jännite referenssimaahan nähden maajohtimen ollessa ehjä
$\underline{u}_B$	katkenneen maajohtimen jännite referenssimaahan nähden
$\underline{V}$	maapinnan potentiaali
$\underline{V}_S$	maanpinnan potentiaali seisontakohdassa
$X$	reaktanssi
$X_N$	tähtipisteen reaktanssi

$x_j$	ukkosjohtimet–maapiirin tai maajohdin–maapiirin reaktanssi pituutta kohden
$x_m$	ukkosjohtimien ja virtajohtimien tai maajohtimen ja virtajohtimien välinen keskinäisreaktanssi pituutta kohden
$Z_0$	vikapaikasta näkyvä nollaimpedanssi ilman tähtipisteen impedanssia
$Z_1$	myötaverkon impedanssi
$Z_2$	vastaverkon impedanssi
$Z_B$	ihmiskehon kokonaisimpedanssi
$Z_{BE}$	katkenneen maajohtimen maadoitusimpedanssi
$Z_E$	maadoitusimpedanssi
$Z_f$	vikaimpedanssi
$Z_k$	ukkosjohtimien ja suppeiden pylväsmadoitusten muodostama ketjuimpedanssi
$Z_n^a$	pylväältä numero $n$ näkyvä ukkosjohtimien ja pylväsmadoitusten muodostama ketjuimpedanssi syöttöaseman suuntaan
$Z_n^b$	pylväältä numero $n$ näkyvä ukkosjohtimien ja pylväsmadoitusten muodostama ketjuimpedanssi vasta-aseman suuntaan
$Z_N$	tähtipisteen impedanssi
$Z$	maapaluuimpedanssi metriä kohden
$Z_{uj}$	ukkosjohtimien maapaluuimpedanssi jänneväliä kohden
$\alpha$	kulma
$\gamma$	etenemiskerroin
$\kappa$	heijastuskerroin
$\mu_0$	tyhjiön permeabiliteetti = $4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m
$\mu_r$	ukkosjohtimien tai maajohtimen suhteellinen permeabiliteetti
$\rho$	maaperän resistiivisyys
$\rho_{ma}$	mitattu resistiivisyys
$\rho_v$	maaperän veden resistiivisyys
$\omega$	kulmataajuus

## Lyhenteet

ANSI	American National Standards Institute
CIGRE	International Council on Large Electric Systems
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
INSKO	Insinöörijärjestöjen koulutuskeskus
KLR	Äkäsjoki (sähköasema)
KLRI	Kolari (sähköasema)
NIE	Niesa (kytkinasema)
PEN	Yhdistetty suojamaadoitus- ja nollajohdin
PLL	Pello (sähköasema)
SFS	Suomen Standardisoimisliitto

# 1 Johdanto

Suomessa 110 kV:n avojohdoilla käytetään perinteisesti ukkosjohtimia suojaamaan vaihejohtimia salamaniskuilta. Ukkosjohtimet myös kytkevät voimajohdon pylväät toisiinsa, kuljettavat osaa maasulkuvirrasta, pienentävät maasulkuvirran kohtaamaa impedanssia sekä vaarajännitteitä ja edesauttavat relesuojauksen toimintaa. Kun maaperän resistiivisyys on suuri, vaarajännitteiden aiheuttamat riskit saattavat olla pääsiallinen syy ukkosjohtimien käytölle alueilla, joilla salamatiheys on alhainen. Edellä mainituista syistä kantaverkkoon liittyville jännitetasoltaan vähintään 110 kV:n avojohdoille vaaditaan asennettavaksi ukkosjohtimet. Toisaalta joillain alueilla ukkosjohtimiin voi kertyä talvisin jääkuormia, jotka voivat aiheuttaa toistuvia vikoja tai keskeytyksiä sähkönsiirtoon. Lisäksi jääkuormien pudottaminen voi aiheuttaa vaaratilanteita. Näin ollen tietyissä erityisolosuhteissa ukkosjohtimien poisjättäminen on perusteltua.

Jääkuormien aiheuttamista ongelmista johtuen Tornionlaakson Sähkö Oy rakennutti vuonna 2009 Kolarin ja Pellon välille 66 km pitkän ukkosjohtimettoman 110 kV:n avojohdon. Kolari–Pello-johdolle asennettiin ukkosjohtimien sijaan koko johdon mittainen yhtenäinen maahan upotettu paljas kuparijohdin, joka kytkettiin jokaisen pylvään maadoitukseen. Tämän maajohtimen tarkoituksena on kuljettaa osaa maasulkuvirrasta ja pienentää maasulun aikaisia vaarajännitteitä.

Tässä diplomityössä tutkitaan maasulkutilannetta ukkosjohtimettomalla läpimenevällä maajohtimella varustetulla 110 kV:n avojohdolla. Erityispainotus on vaarajännitteisiin liittyvillä asioilla sekä johtorakenteen turvallisuuden selvittämisellä. Aikaisemmissa tutkimuksissa on tarkasteltu varsin kattavasti muun muassa maasulkutilanteita ukkosjohtimellisilla johdoilla ja sellaisilla ukkosjohtimettomilla johdoilla, joiden pylvälle on tehty erilliset pylväasmaadoitukset. Sen sijaan voimajohtorakennetta, jossa pylväasmaadoitukset on yhdistetty koko johdon mittaiseen maajohtimeen, ei ole aikaisemmin kattavasti tutkittu.

Työn tavoitteena on selvittää, onko Kolarin ja Pellon välille rakennettu voimajohto turvallinen maasulkutilanteessa ja täyttääkö johto vaarajännitevaatimusten ehdot. Lisäksi tavoitteena on selvittää, millaisten ehtojen täytyessä ukkosjohtimettomia läpimenevällä maajohtimella varustettuja 110 kV:n avojohdota voidaan käyttää Suomessa.

Tutkimus toteutettiin mittausten ja teoreettisten laskelmien avulla. Mittauksia tehtiin sekä ukkosjohtimettomalle että tavalliselle ukkosjohtimelliselle johdolle ja johtojen mittaustuloksia verrattiin keskenään. Työssä kehitettiin uusia laskentamenetelmiä, joita käytettiin ukkosjohtimettoman läpimenevällä maajohtimella varustetun avojohdon maasulkutilanteen tutkimiseen ja vaarajännitteiden arvioimiseen erilaisissa olosuhteissa. Menetelmät perustuvat maajohtimen kuvaamiseen differentiaalisen pienten alkioiden avulla ja niiden perusteella muodostettujen differentiaaliyhtälöiden ratkaisemiseen. Työssä kehitetyillä menetelmillä laskettuja tuloksia verrattiin mittaustuloksiin.

Työn alussa luvussa 2 luodaan katsaus voimajärjestelmän maasulkutilanteeseen ja maadoittamiseen liittyviin asioihin. Samalla pohditaan ukkosjohtimien merkitystä avojohdosten kannalta. Luvussa 3 paneudutaan maasulkutilanteen yhteydessä esiintyviin vaarajännitteisiin sekä niihin liittyviin turvallisuusvaatimuksiin. Luvussa 4 tarkastellaan teoreettisesti maasulkutilannetta ukkosjohtimettomalla ja ukkosjohtimellisellä avojohdolla. Samalla esitellään tässä työssä kehitettyjä laskentamenetelmiä. Luvussa 5 esitellään työssä käytetyt mittausten menetelmät ja luvussa 6 saadut mittaustulokset. Luvussa 7 vertaillaan mittaustulosten ja teoreettisten tarkasteluiden vastaavuutta ja arvioidaan tulosten luotettavuutta. Samalla arvioidaan Kolari–Pello-johdon turvallisuutta ja ukkosjohtimettoman 110 kV:n avojohdon käyttömahdollisuuksia Suomessa. Luvussa 8 esitellään työn johtopäätökset.

## 2 Voimansiirtojärjestelmän maasulku ja maadoittaminen

Tämän luvun alussa tarkastellaan voimansiirtojärjestelmän maasulkutilannetta. Luvussa paneudutaan myös voimansiirtojärjestelmän maadoittamiseen ja maadoituksiin liittyviin ilmiöihin. Painotus on erityisesti voimajohtojen maadoituksilla. Luvun lopussa pohditaan ukkosjohtimien merkitystä avojohtojen kannalta.

### 2.1 Maasulku

Suurjännitesähköasennuksia koskevan standardin SFS 6001 mukaan maasulku on vian aiheuttama johtava yhteys päävirtapiiriin vaihejohtimen ja maan tai maadoitetun osan välillä [1, s. 17]. Johtava yhteys voi syntyä esimerkiksi valokaaren, vikaantuneen eristyksen tai johtavien rakenteiden kautta ja sillä voi olla merkittävä impedanssi.

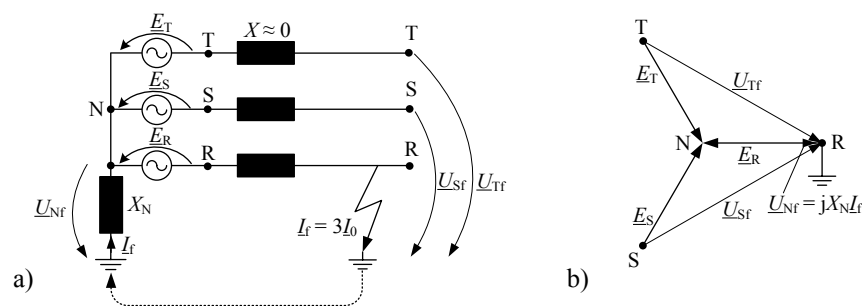
Järjestelmän maasulkuvirran suuruus riippuu verkon nolla-, myötä-, ja vastaimpedanssista sekä vikaimpedanssista. Nollaimpedanssi riippuu erityisesti verkon maadoitustavasta. Maasulkuvirta  $3I_0$  voidaan laskea komponenttiverkkojen impedanssien avulla:

$$3I_0 = \frac{3E_v}{Z_0 + Z_1 + Z_2 + 3 \cdot (Z_N + Z_f)}, \quad (1)$$

jossa  $E_v$  on viallisen vaiheen vaihejännite ennen vikaa,  $Z_0$  vikapaikasta näkyvä nollaimpedanssi ilman tähtipisteen impedanssia,  $Z_1$  myötäverkon impedanssi,  $Z_2$  vastaverkon impedanssi,  $Z_N$  tähtipisteen impedanssi ja  $Z_f$  vikaimpedanssi.

#### 2.1.1 Maasulku maadoitetussa järjestelmässä

Impedanssin kautta maadoitetussa järjestelmässä ainakin yhden muuntajan, maadoitusmuuntajan tai generaattorin tähtipiste maadoitetaan impedanssin kautta [1, s. 15]. Kuvassa 1 on esitetty maasulkutilanne ja sitä vastaava osoitindiagrammi järjestelmässä, joka on maadoitettu maasulkuvirtaa rajoittavan reaktanssin  $X_N$  kautta.



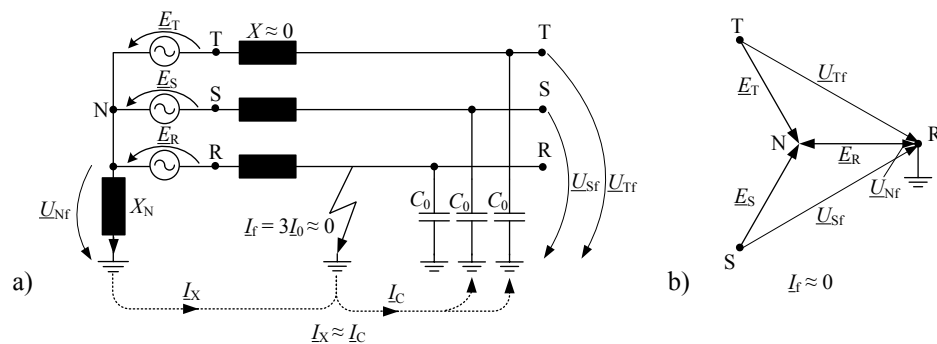
Kuva 1: a) Maasulkutilanne reaktanssin  $X_N$  kautta maadoitetussa järjestelmässä ja b) sitä vastaava osoitindiagrammi. Yksinkertaistettu kuva, jossa vikaresistanssi on nolla.

Suomessa 400 kV:n ja 220 kV:n verkoissa muuntajien tähtipisteet on maadoitettu jokaisella asemalla virtaa rajoittavan kuristimen kautta. Kuristimet on mitoitettu niin, ettei terveiden vaiheiden ylijänniterasitus maasulussa kasva liian suureksi ja maasulkuvirrat pysyvät riittävän alhaisina. Maasulkuvirtojen tulee kuitenkin olla suojauksen toiminnan kannalta tarpeeksi suuria. 110 kV:n rengasverkossa on tähtipistemadoitus vain

joillain asemilla suojauksen tarvitsemien riittävien vikavirtojen aikaansaamiseksi. [2, s. 212], [3, s. 1]

## 2.1.2 Maasulku sammutetussa järjestelmässä

Sammutetussa järjestelmässä ainakin yksi muuntajan tai maadoitusmuuntajan tähtipiste maadoitetaan sammutuskelan kautta ja kaikkien sammutuskelojen kokonaisinduktanssi viritetään kompensoimaan järjestelmän maakapasitanssien vaikutus käyttötaajuudella [1, s. 15]. Sammutetussa järjestelmässä maasulkuvirrat jäävät paljon pienemmiksi kuin maadoitetussa järjestelmässä ja valokaarimaasulut sammuvat usein itsestään. Sammutettu järjestelmä voi olla yli-, ali- tai täysin kompensoitu. Kuvassa 2 on esitetty maasulkutilanne ja sitä vastaava osoitindiagrammi täysin kompensoidussa sammutetussa järjestelmässä.



Kuva 2: a) Maasulku täysin kompensoidussa järjestelmässä ja b) sitä vastaava osoitindiagrammi. Yksinkertaistettu kuva, jossa vikaresistanssi on nolla.

Suomessa Lapin ja Koillis-Pohjan 110 kV:n verkot ovat sammutettuja. Sammutettuja verkkoja ei käytetä renkaina, vaan johdot ovat säteittäiskäytössä. [3, s. 1]

## 2.2 Maadoitus

Tässä luvussa käsitellään voimajärjestelmän maadoittamista ja siihen vaikuttavia tekijöitä. Luvun alussa tarkastellaan maadoitukseen liittyviä käsitteitä ja lopussa perehdytään voimajohtojen pylväsmaadoituksiin.

### 2.2.1 Yleistä

SFS-standardin 6001 mukaan maadoituksella tarkoitetaan maadoittamiseen liittyvien asioiden ja toimenpiteiden kokonaisuutta. Kaikki sähköjärjestelmän jännitteelle alttiit osat tulee maadoittaa. Muut johtavat osat suositellaan maadoitettaviksi, jos se on tarkoituksenmukaista esimerkiksi valokaaren ja kapasitiivisen sekä induktiivisen kytkennän takia. [1, s. 13, 76]

Maadoituksen tarkoituksena on yhdistää jokin laite tai virtapiirin kohta maahan mahdollisimman tehokkaasti maassa olevan metallisen kappaleen eli maadoituselektrodin välityksellä. Tehokkuuden mittana käytetään yleensä elektrodin maadoitusimpedanssia. [4, s. 427] Maadoitusimpedanssia tarkastellaan lähemmin luvussa 2.2.3.

Suurjännitteisten sähköasennusten maadoitusjärjestelmien on täytettävä seuraavalla sivulla esitetyt vaatimukset.



- Maadoituksilla on riittävä mekaaninen lujuus ja korroosionkestävyys.
- Maadoitusten terminen vikavirran kestoisuus on riittävä.
- Maadoitukset varmistavat voimajohdolle tietyn luotettavuuden.
- Maadoitukset estävät vahingot omaisuudelle ja laitteille.
- Maadoitukset varmistavat henkilöturvallisuuden huomioon ottaen maasulun aikana esiintyvät jännitteet.

Jos asennuksessa on kaksi tai useampia jännitetasoja, edellä kuvattujen vaatimusten tulee täytyä jokaisella jännitetasolla. Samanaikaisia vikoja erijännitteisissä piireissä ei kuitenkaan tarvitse ottaa huomioon. [5, s. 156, 158] Vaarajännitteisiin liittyviä vaatimuksia tarkastellaan yksityiskohtaisesti luvussa 3.

## 2.2.2 Maadoitustyypit

Maadoitustyypit voidaan jakaa suurjännitesähköasennuksia koskevan standardin SFS 6001 mukaisesti järjestelmän maadoitukseen, suojamaadoitukseen ja ukkos-suojausmaadoitukseen [1, s. 15]. Jotkut maadoitusjärjestelmät voivat toimia useana eri maadoitustyypinä samanaikaisesti.

Järjestelmän maadoitus tarkoittaa virtapiirin pisteen maadoitusta, jota vaaditaan laitteiden oikean toiminnan mahdollistamiseksi [1, s. 15]. Yleensä järjestelmän maadoitus on tähtipisteessä, jolloin sillä saadaan synnytettyä maasulkusuojauksen tarvitsema maasulkuvirta, mutta toisaalta estetään terveiden vaiheiden liian suuri jännitteen nousu maasulun aikana. Järjestelmän maadoituksen tulee pitää virtajohtimien jännite maata vasten sellaisena, ettei se aiheuta vaaratilanteita tai vaurioita. Lisäksi järjestelmän maadoituksen tulee pitää jännite-epäsymmetria ja maavirta niin pienenä, että heikkovirtalaitoksille aiheutuvat häiriöt jäävät mahdollisimman vähäisiksi [4, s. 427]. Järjestelmän maadoitusta voidaan kutsua myös käyttömaadoitukseksi.

Suojamaadoituksella tarkoitetaan virtapiiriin kuulumattoman jännitteelle alttiin johdettavan osan yhdistämistä maadoitukseen. Suojamaadoituksen tehtävänä on estää vaarallisen kosketusjännitteen syntyminen vikatilanteessa jännitteelliseksi muuttuvaan kosketeltavaan osaan ja pienentää muita vikapaikan ympäristössä mahdollisesti esiintyviä vaarajännitteitä. [4, s. 427]

Ukkossuojausmaadoituksen tehtävänä on johtaa salamavirta maahan [1, s. 15]. Luvussa 2.3 käsitellään ukkosjohtimia tarkemmin.

## 2.2.3 Maadoitusimpedanssi

Maadoitusimpedanssi tarkoittaa maadoitusjärjestelmän ja referenssimaan välistä impedanssia [1, s. 15]. Maadoitusimpedanssi on riippuvainen maadoituselektrodin ja sitä ympäröivän maaperän ominaisuuksista.

Maadoitusimpedanssilla on resistiivinen ja reaktiivinen komponentti. Suppeissa maadoituksissa reaktiivinen komponentti on merkityksetön sähkönsiirron taajuuksilla, mutta laajoissa maadoitusjärjestelmissä myös reaktiivinen komponentti pitää ottaa huomioon. [6, s. 18]

Kun tunnetaan maadoituselektrodista maahan menevä virta  $\underline{I}'$  ja elektrodin maadoitusjännite  $\underline{U}_E$ , voidaan laskea elektrodin maadoitusimpedanssi

$$\underline{Z}_E = \frac{\underline{U}_E}{\underline{I}'}. \quad (2)$$

## 2.2.4 Maaperän resistiivisyys

Maaperän resistiivisyys  $\rho$  ilmoittaa yksikköpinta-alaisen maakuution resistanssin pituusyksikköä kohden [7, s. 1 III]. Maa-alueen, jonka poikkipinta-ala on  $A$  ja pituus  $l$ , resistanssi  $R$  voidaan laskea seuraavasti:

$$R = \rho \frac{l}{A}. \quad (3)$$

Maaperän resistiivisyys on riippuvainen muun muassa seuraavista tekijöistä:

- maalaji,
- maalajin tiiviys,
- raesuuruus ja sen jakautuma,
- maan kosteuspitoisuus,
- maan sisältämään veteen liuenneiden suolojen kemiallinen koostumus ja
- lämpötila. [7, s. 2 III]

Maaperän resistiivisyyteen eniten vaikuttavat tekijät ovat maan kosteuspitoisuus ja maalajin sisältämän veden resistiivisyys. Maaperän resistiivisyyden riippuvuus sen sisältämästä vesimäärästä voidaan esittää kokemukseräisen yhtälön perusteella seuraavasti:

$$\rho = \left( \frac{150}{p} - 0,5 \right) \rho_v, \quad (4)$$

jossa  $p$  on maan kosteuspitoisuus prosentteina ja  $\rho_v$  tämän veden resistiivisyys. [8, s. 10]

Maaperän resistiivisyys pienenee maan lämmitessä, koska maassa olevan veden johtavuus kasvaa lämpötilan noustessa. Lämpötilojen 0 °C ja +30 °C välillä veden johtavuus lisääntyy noin 2 % astetta kohden. Kun vesi tai maaperä jäätyy, sen resistiivisyys kasvaa moninkertaiseksi. [3, s. 20] Taulukossa 1 on esitetty erilaisten maalajien tyypillisiä resistiivisyyksiä sekä resistiivisyyksien tavallisia vaihteluvälejä.

Taulukko 1: Erilaisten aineiden resistiivisyyksiä. [1, s. 101]

Aine	Keskimäärin [ $\Omega\text{m}$ ]	Tavallisimmat vaihteluvälit [ $\Omega\text{m}$ ]
Savi	40	25–70
Saven sekainen hiekka	100	40–300
Lieju, turve, multa	150	50–250
Hiekka, hieta	2000	1000–3000
Moreenisora	3000	1000–10000
Harjusora	15000	3000–30000
Graniittikallio	20000	10000–50000
Betoni tuoreena tai maassa	100	50–500
Betoni kuivana	10000	2000–100000
Järvi- ja jokivesi	250	100–400
Pohja-, kaivo- ja lähdevesi	50	10–150
Merivesi (Suomenlahti)	2,5	1–5

Maaperä on usein epähomogeenista ja voi koostua esimerkiksi useista erilaisista kerroksista. Suomessa pintamaan alapuolella on yleensä graniittikalliota, jonka resistiivisyys on suuri.

Sähkövirran kulku maassa on pääasiassa elektrolyyttistä. Toisaalta jotkut maan sisältämät mineraalit johtavat sähköä niiden metallipitoisuuden takia [7, s. 1 III]. Metalleihin verrattuna maa johtaa huonosti sähköä, mutta koska maahan johdettu virta leviää laajalle alalle, maavirran kohtaama resistanssi on melko pieni. Maavirran kohtaama resistanssi  $r_0$  pituutta kohden voidaan laskea seuraavasti:

$$r_0 = \frac{\omega \mu_0}{8}, \quad (5)$$

jossa  $\omega$  on kulmataajuus ja  $\mu_0$  tyhjiön permeabiliteetti. [9, s. 2 XIV/L1] Taajuudella 50 Hz maapiirin resistanssiksi saadaan noin 50 m $\Omega$ /km.

Maassa kulkeva virta keskittyy virtajohtimien alle ja maapaluuimpedanssin laske- mista varten sen voidaan ajatella kulkevan ekvivalenttisyvydessä  $H$  sijaitsevassa joh- timessa [9, s. 4 XIV/L1]. Homogeenisessa maassa saadaan maapaluuvirran ekvivalent- tisyvydeksi

$$H = 1,85 \cdot \sqrt{\frac{\rho}{\omega \mu_0}}. \quad (6)$$

Ekvivalenttisyvyysajattelu pätee tarkasti ainoastaan homogeenisessa maaperässä, kun virran maassa kulkema matka on pitkä. Tällöin virta ehtii jakaantua riittävästi, jotta sen voidaan ajatella kulkevan ekvivalenttisyvydessä.

## 2.2.5 Maadoitusten mittaukset ja tarkastukset

Maadoitusjärjestelmälle asetettujen vaatimusten toteutuminen tulee yleensä varmistaa mittaamalla järjestelmän maadoitusimpedanssi määräväleihin. Lisäksi järjestelmän turvallisuuden varmistamiseksi joudutaan toisinaan tekemään vaarajännitemittauksia.

Maadoitusjärjestelmien tarkastus- ja mittaustarve on harkittava ottaen huomioon muun muassa kokemukseräiset tiedot korroosion esiintymisestä ja maaperän ominaisuuksista. Jos maadoitusten rakenne tai ympäristö on muuttunut esimerkiksi lähellä tehtyjen rakennustöiden takia, maadoitusten tarkastus tai mittaus voi olla tarpeen. Standardin SFS 6001 mukaisesti maadoitusimpedanssien mittaussväleiksi suositellaan alla esitettyjä arvoja.

- 6 vuotta, kun maadoitus on yhden maadoitusjohtimen varassa.
- 12 vuotta, kun maadoitus on useamman kuin yhden maadoitusjohtimen varassa.

Laajan maadoitusjärjestelmän tai potentiaalinojauselektrodin impedanssia ei tarvitse mitata, vaan maadoituksen riittävyys ja kunto voidaan todeta muulla tavalla. [1, s. 78] Pylväsmaadoitusten osalta on huomioitava niiden vaurioitumisriskit. Esimerkiksi routa, kaivuutyöt, maanviljelys- ja metsäkoneet sekä ilkivalta ovat tyypillisiä syitä pylväsmaadoitusten vaurioitumiselle [7, s. 14 V].

Suppeiden maadoitusjärjestelmien maadoitusimpedanssien mittausta varten on olemassa useita erilaisia menetelmiä. Niitä ovat esimerkiksi käännepistemenetelmä, lyhyt käännepistemenetelmä, virta-jännitemittausmenetelmä, suurtaajuusmenetelmä ja voltti-ampeerimittarimenetelmä. Tarkempia tietoja menetelmistä löytyy muun muassa IEEE-järjestön julkaisusta ”*IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System*“ [6] ja suurjännitesähköasennuksia koskevasta standardista SFS 6001 [1, s. 107–108].

Suurien maadoitusjärjestelmien mittauksiin soveltuu ainoastaan voltti-ampeerimittarimenetelmä. Voltti-ampeerimittarimenetelmä on myös ainoa menetelmä, joka soveltuu vaarajännitteiden mittauksiin [1, s. 95]. Voltti-ampeerimittarimenetelmää on tarkasteltu luvussa 5.4.1.

Maaperän resistiivisyys mitataan yleensä maadoitusjärjestelmän suunnitteluvaiheessa. Maaperän resistiivisyyden mittaus tehdään lähes aina Wennerin neljän piikin menetelmällä. Neljän piikin menetelmää on tarkasteltu luvussa 5.4.2.

## 2.2.6 Pylväsmaadoitukset

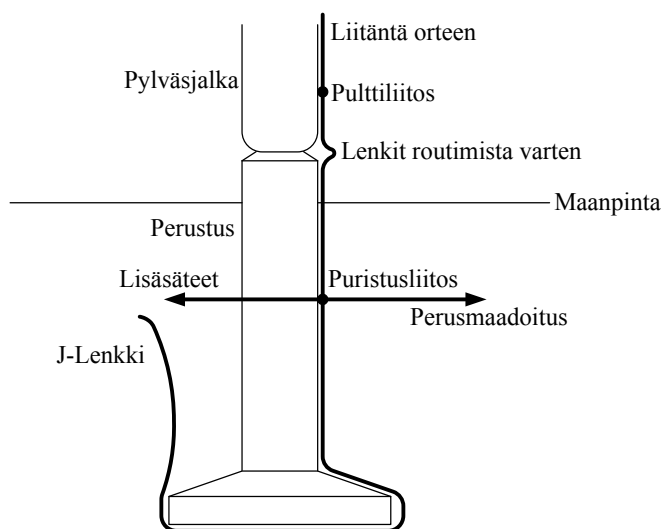
Suomessa 110, 220 ja 400 kV:n pylväät maadoitetaan lähes aina. Pylväsmaadoitusten tehtäviä ovat:

- pienentää pylvään potentiaalia siten, että pylvääseen tai ukkosjohtimeen osunut salamanisku ei aiheuta takaiskua ja näin vähentää ukkoshäiriöiden määrää,
- mahdollistaa ukkosjohtimettomalla johdolla maasulkusuojauksen toiminta ja parantaa sen toimintaherkkyttä ukkosjohtimellisellä johdolla sekä
- pienentää vaarajännitteitä pylvään ympäristössä. [4, s. 436]

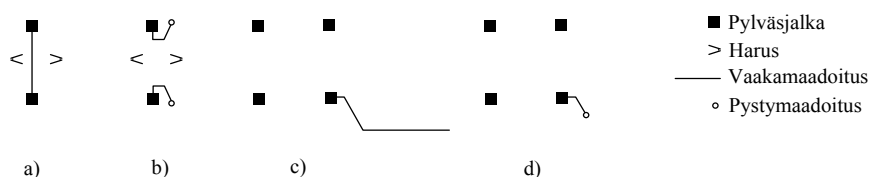
Pylväsmaadoitus koostuu pylvään perusmaadoituksesta ja mahdollisista lisämaadoituksista. Perusmaadoitus tehdään vähimmäistoimenpiteenä lähes kaikille pylväille ja lisämaadoituksia tehdään tarpeen mukaan. [4, s. 435]

Perusmaadoitukseen kuuluvat portaalipylväillä perustukset, niiden alle sijoitettavat J-lenkit, harukset sekä harusankkurit ja pylvään jalat yhdistävä kupariköysi. Perusmaadoitukset voidaan korvata tekemällä kummallekin jalalle oma pystymaadoitus. Vapaasti

seisovilla pylväillä perusmaadoitus koostuu yhdestä säteittäismaadoituksesta tai pysty- maadoituksesta. Perusmaadoituksen maadoitusresistanssia kutsutaan luonnolliseksi maadoitusresistanssiksi. [4, s. 435], [7, s. 11 V] Kuvassa 3 on esitetty tyypillinen esi- merkki portaalipylvään perustukseen liitettävistä maadoituksista ja kuvassa 4 esimerkkejä erilaisten pylväiden perusmaadoituksista.

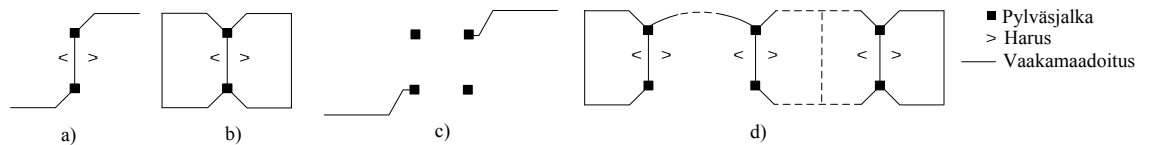


Kuva 3: Perustukseen liitettävät maadoitukset. [7, s. 11 V]

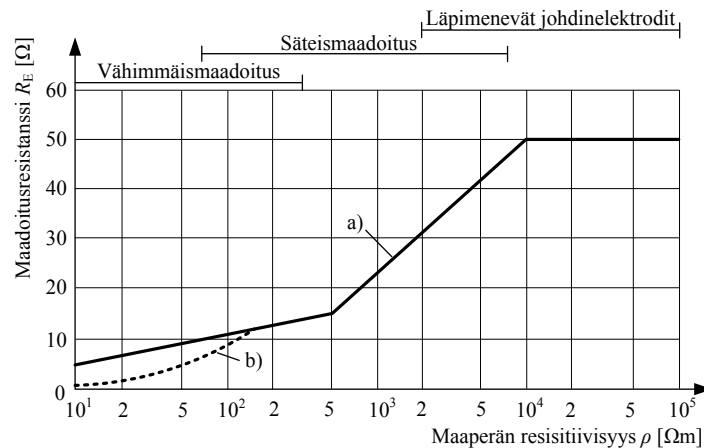


Kuva 4: Pylväiden perusmaadoituksia: a) portaalipylväs vaakamaadoituksella, b) portaalipylväs pystymaadoituksella, c) vapaasti seisova pylväs vaakamaadoituksella ja d) vapaasti seisova pylväs pystymaadoituksella. [7 s. 12 V]

Mikäli luonnollisella maadoitusresistanssilla ei päästä tavoitearvoon, käytetään lisämaadoituksia. Yleensä ensimmäisenä toimenpiteenä käytetään säteittäismaadoituksia, jotka ovat routarajan alapuolelle kaivettuja johtokadun suuntaisia kupariköysiä. Huonosti johtavassa maaperässä voidaan käyttää myös pylväältä toiselle ulottuvia läpime- neviä maadoituselektrodeja, jos säteittäismaadoituksella ei päästä maadoitusresistanssin tavoitearvoon. Erittäin huonoissa maadoitusolosuhteissa käytetään toisinaan ylipitkiä maadoituselektrodeja, jotka vedetään alueelle, jossa maaperän resistiivisyys on pieni. [4, s. 435], [3, s. 27] Kuvassa 5 on esitetty esimerkkejä lisämaadoituksista ja kuvassa 6 pylväsmaadoitusten mitoituksen tavoitearvoja Suomessa 110–400 kV:n johtojen osalta.

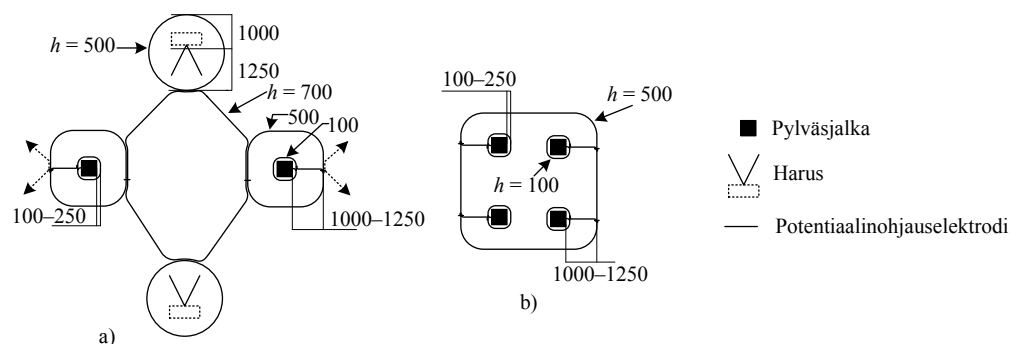


Kuva 5: Lisämaadoituksia: a) portaalipylväs kahdella lisäsäteellä, b) portaalipylväs neljällä lisäsäteellä, c) vapaasti seisova pylväs kahdella lisäsäteellä ja d) läpimeneviä maadoituselektrodeja. [4, s. 436], [7, s. 12 V]



Kuva 6: 110–400 kV:n johtojen pylväsmaadoitusten mitoittaminen Suomessa: a) tavoitearvot ja b) perusmaadoituksella saatava keskimääräinen arvo. Asemien lähellä vaatimukset ovat tiukemmat. [4, s. 445]

Potentiaalinhojauselektrodeilla voidaan rajoittaa kosketus- ja askeljännitteitä pylvään läheisyydessä. Potentiaalinhojauselektrodeja käytetään paikoissa, joissa pylväspotentiaali on suuri ja ihmiset voivat todennäköisesti koskea pylvästä. Pylväiden potentiaalinhojauselektrodit koostuvat sisemmistä ja uloimmista potentiaalintasausrenkaista sekä yhdys- ja liittymisjohtimista. [3, s. 27] Kuva 7 esittää esimerkkejä potentiaalinhojauselektrodeista.



Kuva 7: Potentiaalinhojauselektrodeja: a) harustetulla pylväällä ja b) vapaasti seisovalla pylväällä. Mitat on esitetty millimetreissä.  $h$  on asennussyvyys. [4, s. 436]

## 2.2.7 Asemamaadoitukset

Sähköasemien maadoitusten on vikatilanteessa kyettävä estämään vaarallisten jännitteiden syntyminen sähköasemalla ja sen ympäristössä. Lisäksi niiden on rajoitettava esimerkiksi salamaniskujen ja kytkentöjen aiheuttamia ylijännitteitä. Asemien maadoitukset toimivat tarvittaessa myös osana järjestelmän maadoitusta. [7, s. 1 IV]

Sähköaseman maadoitus muodostuu normaalisti maadoitusruudukosta ja mahdollisesti asemalta lähtevistä vaakamaadoituselektrodeista. Maadoitusruudukko on verkkoomainen maadoituselektrodi, jolla tasataan potentiaalia ja johon yhdistetään laitteiden maadoitusjohtimet. Maadoitusruudukko yhdistetään asemalta lähtevien johtojen ukkosjohtimiin ja sitä kautta ukkosjohtimien ja pylväasmaadoitusten muodostamiin ketjuihin. Vaakamaadoituselektrodeja voidaan käyttää, jos asema on rakennettu huonosti johtavalle maaperälle. Elektrodit vedetään aseman ympäristössä oleville hyvin johtaville alueille. [4, s. 446]

## 2.3 Ukkosjohtimet

Tässä luvussa havainnollistetaan aluksi ukkosjohtimien merkitystä maadoitusten ja maasulkutilanteen kannalta. Sen jälkeen tarkastellaan ukkostiheyttä ja ukkoshäiriöitä Suomessa. Lopuksi luvussa tutkitaan ukkosjohtimiin talvisin kertyvän jääkuorman aiheuttamia häiriöitä.

### 2.3.1 Yleistä

Avojohtoja koskevan standardin SFS-EN 50341-1 mukaan ukkosjohtimella tarkoitetaan maahan joillakin tai kaikilla pylväillä yhdistettyä johdinta, joka on tavallisesti sijoitettu vaihejohtimien yläpuolelle antamaan tietyn asteisen suojan salamaniskuja vastaan [5, s. 32]. Ukkosjohtimien tehtävät on lueteltu alla.

- Estää salamaniskujen osuminen vaihejohtimiin.
- Kuljettaa osaa maasulkuvirrasta, jolloin maan kautta palaava virta ja sen aiheuttamat vaarajännitteet ja sähkömagneettisen kentän vaikutus pienenevät.
- Kytkeä vikapylväs tai asema rinnan toisten pylväiden tai läheisen aseman kanssa, jolloin maasulkuvirran kohtaama impedanssi ja maadoitusjännite pienenevät. [10, s. 1–2 VII]

Ukkosjohtimet myös pienentävät salamavirran kohtaama aaltoimpedanssia, jolloin salaman iskiessä pylväeseen takaiskujen ja monivaiheisten vikojen määrä pienenee. Lisäksi ukkosjohtimet edesauttavat relesuojauksen toimintaa pienentämällä maasulkuvirran kohtaamaa impedanssia. Ukkosjohtimet voivat myös sisältää optisia kuituja viestiyhteyksiä varten.

Ukkosjohtimien ja suppeiden pylväasmaadoitusten ketjun impedanssi  $Z_k$  pylvään kohdalta saadaan laskettua seuraavasti:

$$Z_k = \frac{1}{2} \sqrt{R_E \cdot z \cdot l_s}, \quad (7)$$

jossa  $R_E$  on pylväiden maadoitusresistanssi,  $l_s$  on jänteen pituus ja  $z$  ukkosjohdinnipun impedanssi pituutta kohden maan ollessa paluupiirinä. Yhtälö (7) on likimääräinen ja siinä oletetaan, että johto on hyvin pitkä tarkastellulta pylväältä kumpaankin suuntaan,

jokaisen pylvään maadoitusresistanssi on yhtä suuri ja jännepituudet ovat samat. [10, s. 4 VII]

Ukkosjohtimien tai muiden maahan yhteydessä olevien johtimien maapaluuimpedanssi voidaan laskea seuraavasti:

$$\underline{z} = r_j + r_0 + j \cdot x_j, \quad (8)$$

jossa  $r_j$  on ukkosjohtimien resistanssi pituutta kohden,  $x_j$  ukkosjohtimien reaktanssi pituutta kohden ja  $r_0$  on maapaluuimpedanssi pituutta kohden laskettu maapiirin resistanssi. [9, s. 7 XIV/L1] Maapiirin resistanssi  $r_0$  voidaan laskea luvussa 2.2.4 esitetyllä yhtälöllä (5).

Ukkosjohtimien reduktiokertoimella tarkoitetaan maan kautta palaavan virran suhdetta kokonaismaasulkuvirtaan kohdassa, joka on niin kaukana vikapaikasta ja syöttöpisteestä, että virran jakautumien naapuripylväille ukkosjohtimia myöten ei ulotu kyseiseen kohtaan. Ukkosjohtimien tai muiden reduktiojohtimien reduktiokerroin  $\underline{k}$  voidaan laskea seuraavilla yhtälöillä:

$$\underline{k} = \frac{r_j + j \cdot (x_j - x_m)}{r_j + r_0 + j \cdot x_j}, \quad (9)$$

$$x = \frac{\omega \mu_0}{2\pi} \left( \ln \left( \frac{H}{r_e} \right) + \frac{\mu_r}{4n} \right), \quad (10)$$

$$x_m = \frac{\omega \mu_0}{2\pi} \ln \left( \frac{H}{b} \right), \quad (11)$$

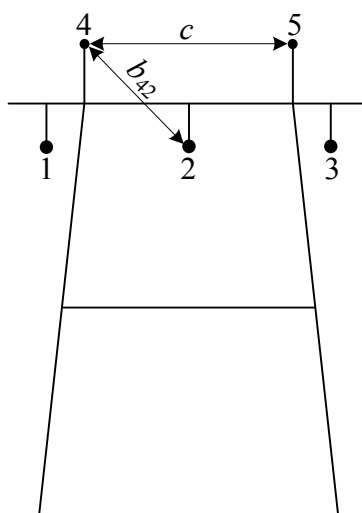
joissa  $x_m$  on ukkosjohtimien ja virtajohtimien välinen keskinäisreaktanssi pituutta kohden,  $\omega$  on kulmataajuus,  $\mu_0$  on tyhjiön permeabiliteetti,  $\mu_r$  ukkosjohtimien suhteellinen permeabiliteetti,  $n$  ukkosjohtimien määrä ja  $H$  maavirran ekvivalenttinen tunkeutumissyvyys. Maavirran ekvivalenttinen tunkeutumissyvyys  $H$  saadaan laskettu luvussa 2.2.4 esitetyllä yhtälöllä (6). Yhtälössä (11)  $b$  on ukkosjohtimien geometrinen keskietäisyys virtajohtimista ja yhtälössä (10)  $r_e$  on ukkosjohtimien ekvivalenttisäde reaktanssia laskettaessa. Geometrinen keskietäisyys ja ekvivalenttisäde voidaan laskea seuraavilla yhtälöillä:

$$b = \sqrt[3n]{b_{41} \cdot b_{42} \cdot b_{43} \cdot b_{51} \cdot b_{52} \cdot b_{53}}, \quad (12)$$

$$r_e = \sqrt{\frac{d}{2} c^{n-1}}, \quad (13)$$

joissa  $d$  on ukkosjohtimen halkaisija. Muut yhtälöissä (12) – (13) tarvittavat etäisyydet on määritelty kuvassa 8. Mikäli ukkosjohtimia on enemmän kuin kaksi, täytyy etäisyyden  $c$  tilalla käyttää ukkosjohtimien geometristä keskietäisyyttä toisistaan. [9, s. 7 XIV/L1]





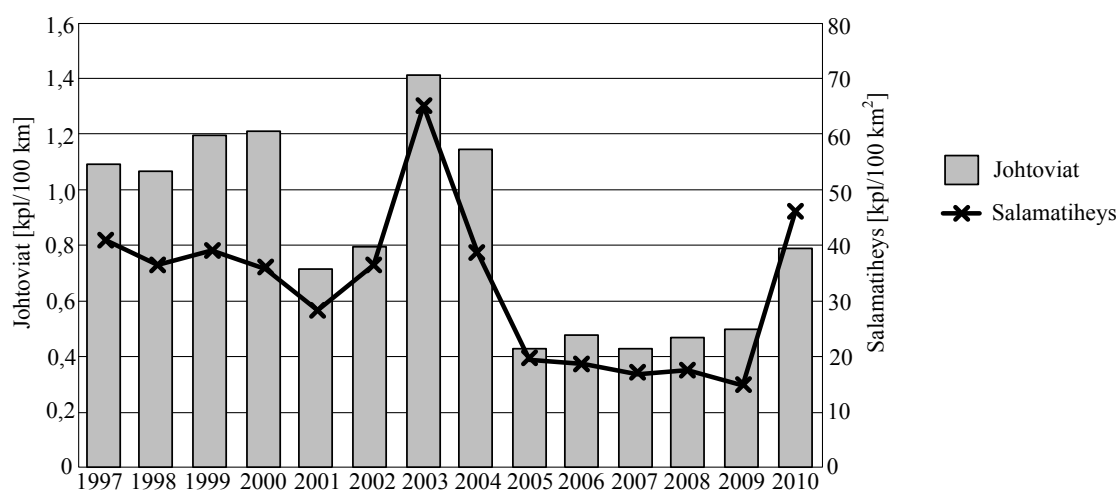
Kuva 8: Esimerkki yhtälöissä (12) – (13) tarvittavista etäisyyksistä.

### 2.3.2 Ukkostiheys ja ukkoshäiriöt

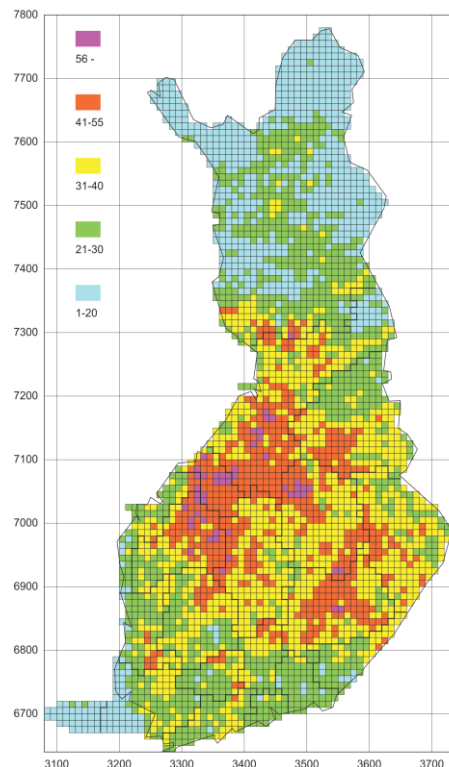
Ukkonen on tyypillisin vianaiheuttaja avojohdoilla. Avojohtojen ukkoshäiriötiheyteen vaikuttavia parametreja ovat esimerkiksi:

- alueen salamatiheys,
  - ukkosjohtimet, pylväsmadoitukset ja johdon syöksyjännitelujuus sekä
  - johdon korkeus ja johtoa mahdollisesti ympäröivän metsän korkeus.
- [11, s. 37–43]

Voimajohtoon osuvien salamaniskujen lukumäärä on lähes lineaarisesti riippuvainen alueen salamatiheydestä. Kuvassa 9 on esitetty Suomen keskimääräinen vuotuinen salamatiheys sekä ukkososen aiheuttamat johtoviat Fingridin 110 kV:n johdoilla vuosina 1997–2010. Kuva 10 esittää keskimääräisen salamatiheyden Suomessa alueittain vuosina 1998–2010.



Kuva 9: Ukkosviat Fingridin 110 kV:n johdoilla ja Suomen keskimääräinen vuotuinen salamatiheys vuosina 1997–2010. [12]



*Kuva 10: Salamoiden keskimääräinen vuotuinen määrä 10×10 km ruuduilla Suomessa vuosina 1998–2010. [13, s. 47]*

Suunniteltaessa johtojen ukkossuojausta ei yleensä huomioida alueen salamatiheyttä, vaan alueesta riippumatta uudet johdot suojataan ukkosta vastaan niin tehokkaasti kuin taloudellisesti on kannattavaa. Suunniteltaessa uutta johtoa olisi periaatteessa mahdollista ottaa alueen salamatiheys huomioon siten, että suojauksen tehokkuus vaihtelisi salamatiheyden mukaan. Näin ollen ukkossuojausta voisi tehostaa Keski- ja Kaakkois-Suomessa sekä Pohjanmaan eteläosissa esimerkiksi Pohjois-Suomen johtojen kustannuksella.

Ukkosjohtimeen osunut salamanisku aiheuttaa takaiskun, mikäli salamavirran aiheuttama jänniterasitus vaihejohtimen ja maadoitetun osan yli kasvaa niin suureksi, että niiden välisen ilmavälin jännitelujuus ylittyy. Takaiskun syntyminen riippuu salamavirran lisäksi ukkosjohtimista, pylväsmadoituksista ja voimajohdon syöksyjännitelujuudesta [11, s. 39–40]. Karkeasti arvioituna kunnollisilla pylväsmadoituksilla varustetulle portaalipylväsjohdolle asennettavat ukkosjohtimet vähentävät ukkoshäiriöitä suhteessa 1:3,6 [11, s. 62]. Tällaisiin arvioihin liittyy kuitenkin aina suuri epävarmuus.

### 2.3.3 Ukkosjohtimiin kertyvän jääkuorman aiheuttamat viat

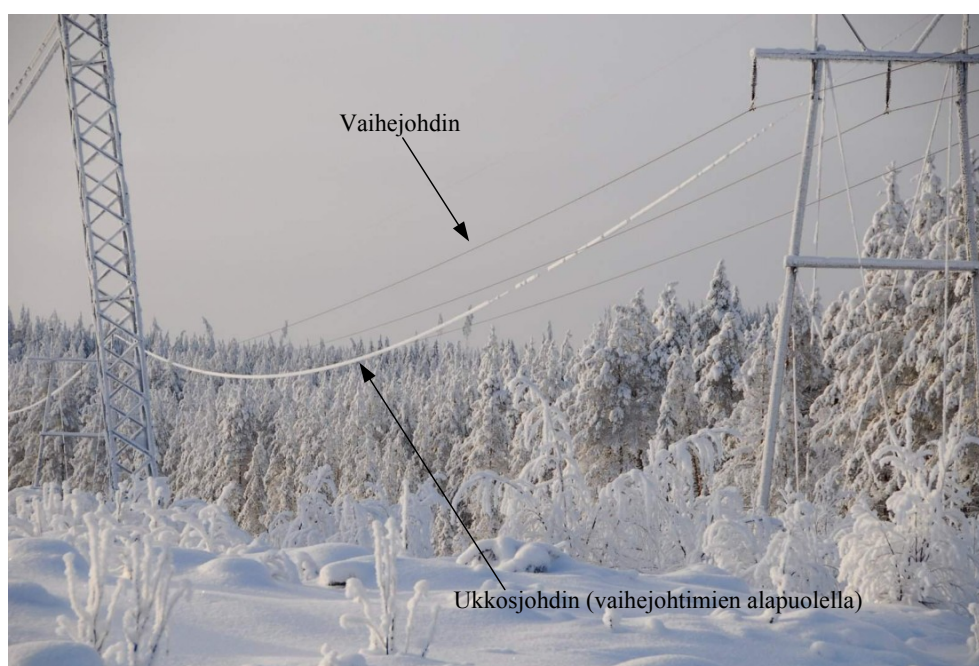
Suomen olosuhteissa ukkosjohtimiin voi kertyä talvisin jääkuormia. Tyypillinen jääkuormavika syntyy, kun ukkosjohdin venyy jään painon vaikutuksesta ja osuu vaihejohtimeen tuulenpuuskan seurauksena. Usein jääkuormaviat ovat toistuvia vikoja ukkosjohtimen heilahdellessa useita kertoja vaihejohtinta vasten. Lisäksi ukkosjohtimet voivat heilahdella voimakkaasti, jos suuri osa niiden jääkuormasta putoaa kerralla. Jääkuormavikojen paikallistaminen on usein työlästä.

Jääkuormia syntyy pääsääntöisesti kahdella mekanismilla: pilven tai sumun sisällä jäätyessä sekä vesi- tai lumisateen vaikutuksesta [14, s. 16]. Taulukossa 2 on esitetty jääkuormien tyyppiä ja niiden ominaisuuksia. Kuvassa 11 on esitetty esimerkki ukkosjohtimen huurrekuormasta.

*Taulukko 2: Erilaisten jääkuormien ominaisuuksia. [14, s. 18], [15, s. 18–21], [16, s. 328–329]*

Jääkuorman tyyppi	Tiheys [kg/m <sup>3</sup> ]	Kuvaus
Kirkas jää ja jäähuurre*	700–900	Läpikuultavaa kiinteää jäätä, jossa on joskus jääpuikkoja johtimien alapuolella. Tiheys voi vaihdella riippuen jään sisältämien ilmakuplien määrästä. Vaikea irrottaa johtimesta.
Kova huurre	300–700	Homogeeninen rakenne, sisältää ilmakuplia, ei läpinäkyvää. Vaikea irrottaa johtimesta.
Pehmeä huurre	150–300	Rakeinen koostumus. Helppo irrottaa johtimesta käsin.
Märkä lumi	100–850	Erilaisia koostumuksia riippuen mm. tuulen nopeudesta. Kun lämpötila on nollan tuntumassa, voi olla osittain nestemäistä ja irtoaa johtimista helposti. Jos lämpötila laskee alle nollan, voi tarttua tiukasti kiinni johtimiin.
Kuiva lumi	50–100	Kevyttä lunta. Erilaisia rakenteita. Helppo irrottaa.
Kuura	<100	Kristallimainen rakenne. Helppo irrottaa.

\* Kirkasta jäätä voi syntyä jäätävän vesisateen seurauksena. Jäähuurretta syntyy pilvipisaroista huurtamalla tehokkaimmin, kun pakkaslukemat ovat aivan nollan tuntumassa.



*Kuva 11: Huurrekuormaa ukkosjohtimessa 110 kV:n voimajohdolla Petäjävesi-Koivisto.*

Jääkuorman kertymiseen vaikuttavat erityisesti ilmastolliset olosuhteet ja maaston muodot. Pitkään kestävä pakkasjakso voi aiheuttaa johtimien ympärille suuren huurrekuorman. Sään lauhtuminen voi tiputtaa kuorman johtimista, mutta pahojen jääkuormatilanteiden yhteydessä johtimiin voi kertyä vuorotellen sekä huurretta että kosteaa lunta ja lumisateiden välissä pakkaneen kiinnittää jääkuorman yhä tiukemmin johtimiin kiinni. Korkeilla maaston kohdilla johtimet ovat mataliin paikkoihin verrattuna useammin pilven sisällä ja näin ollen voimakkaammin alttiina huurtumiselle. Vaarojen rinteet voivat olla myös jääkuormien kannalta ongelmallisia paikkoja, koska rinteeseen osuva ja ylöspäin nouseva ilmavirtaus voi saada aikaan vesi- tai lumisateita. [17], [18]

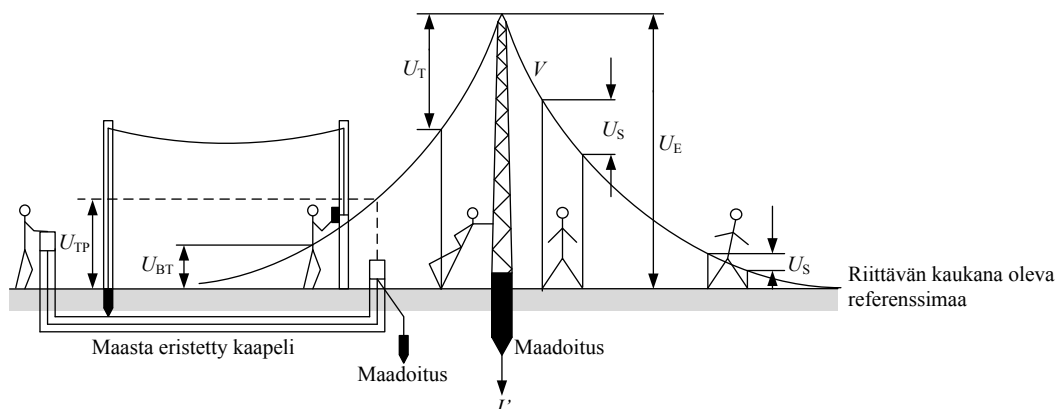
Tässä työssä tutkittiin jääkuormien aiheuttamia vikoja Pohjois-Suomessa 110 kV:n voimajohdoilla vuosina 1995–2010. Tutkimukset tehtiin Fingrid Oyj:n vikatilastojen ja asiantuntija-arvioiden [18] perusteella. Tutkimusten perusteella ukkosjohtimien aiheuttamia jääkuormavikoja esiintyy ongelmallisilla voimajohdoilla keskimäärin noin 2–3 vuoden välein. Jääkuormia käydään kuitenkin pudottamasta johdoilta, joten voidaan päätellä, että ilman kuormien pudottamista vikoja esiintyisi useammin. Vioista noin puolet on toistuvia. Ongelmallisimpia alueita jääkuormien kannalta Pohjois-Suomessa ovat Kainuun vaaramaisemat, Koillismaa sekä välit Valajaskoski–Vajukoski, Meltaus–Kolari ja Vajukoski–Sirikka.

### 3 Vaarajännitteet voimajohdon maasulussa

Tässä luvussa tarkastellaan vaarajännitteitä ja esitetään niihin liittyvät turvallisuusvaatimukset. Luvun lopussa käsitellään avojohtojen pylväsmadoitusten suunnittelua vaarajännitevaatimusten näkökulmasta.

#### 3.1 Yleistä

Maasulussa koko vikavirta tai osa vikavirrasta palaa sähköverkon syöttöpisteisiin maan kautta. Vikavirtaa menee maahan pylväsmadoitusten kautta. Maahan menevä virta aiheuttaa ympäristössään vaarajännitteitä, jotka riippuvat virran suuruudesta, maaperän resistiivisyydestä ja maadoitusjärjestelmän ominaisuuksista. Lisäksi maasulkuvirta voi indusoida muihin johtoihin ja johtaviin rakenteisiin induktiojännitteitä. Kuva 12 havainnollistaa maasulkupaikan ympäristössä esiintyviä vaarajännitteitä.



Kuva 12: Maanpinnan potentiaali  $V$ , maadoitusjännite  $U_E$ , kosketusjännite  $U_T$ , takape-roinen kosketusjännite  $U_{BT}$ , askeljännite  $U_S$  ja siirtyvä potentiaali  $U_{TP}$ . Kuvassa esitetyt kosketus- ja askeljännitteet ovat kuormittamattomia kosketuspiirin lähdejännitteitä. [4, s. 429]

Virran vaarallisuus ihmiselle riippuu virran suuruudesta, vaikutusajasta ja virtatiestä ihmisen kehossa. Ihmiskehon kautta kulkeva virta voi aiheuttaa esimerkiksi lihaskouristuksia, hengitysvaikeuksia, verenpaineen nousua, palovammoja, sydämen toimintahäiriöitä tai sydänkammiovärinän. Sähkökuolemia aiheuttavista syistä sydänkammiovärinää esiintyy yleensä pienimmällä jännitteellä. [4, s. 497–498] Kun sydänkammiovärinän todennäköisyys on alle 5 prosenttia ja virtatie kulkee vasemmasta kädestä molempiin jalkoihin, saadaan taulukossa 3 esitetyt sallitut virtarajat.

Taulukko 3: Sallittu kehon kautta kulkeva virta  $I_B$  vian kestoajan  $t_F$  funktiona. [5, s. 298]

Vian kesto aika $t_F$ [s]	Kehon kautta kulkeva virta $I_B$ [mA]
0,05	900
0,1	750
0,2	600
0,5	200
1,00	80
2,00	60
5,00	51
10,00	50

Ihmiskehon kokonaisimpedanssi riippuu kosketusjännitteestä ja virran kulkureitistä kehossa. Ihmiskehon kokonaisimpedanssin arvot virtatielle kädestä käteen tai kädestä jalkaan on esitetty taulukossa 4. Kehon impedanssit ovat 50 prosentin todennäköisyydellä enintään taulukossa 4 esitetyn arvon suuruisia.

Taulukko 4: Ihmiskehon kokonaisimpedanssin  $Z_B$  riippuvuus kuormittamattomasta kosketusjännitteestä  $U_T$ , kun virtatie on kädestä käteen tai kädestä jalkaan. [5, s. 300]

Kuormittamaton kosketusjännite $U_T$ [V]	Ihmiskehon kokonaisimpedanssi $Z_B$ [ $\Omega$ ]
25	3250
50	2625
75	2200
100	1875
125	1625
220	1350
700	1100
1000	1050

### 3.2 Maadoitusjännite ja maanpinnan potentiaali

Maadoitusjännite kuvaa maadoitusjärjestelmän ja riittävän etäällä olevan referenssi-maan välistä jännitettä. Maadoitusjännitettä kutsutaan myös maapotentiaaliksi nousuksi. Maanpinnan potentiaalilla tarkoitetaan maanpinnan tietyn kohdan ja riittävän kaukana sijaitsevan neutraalin referenssimaan välillä olevaa jännitettä. [1, s. 16] Kuvassa 12 maadoitusjännite on esitetty symbolilla  $U_E$  ja maanpinnan potentiaali symbolilla  $V$ .

Kun maadoitusjärjestelmästä maahan menevä virta  $I'$  ja maadoitusjärjestelmän maadoitusimpedanssi  $Z_E$  tunnetaan, voidaan laskea maadoitusjännite

$$U_E = Z_E \cdot I' . \quad (14)$$

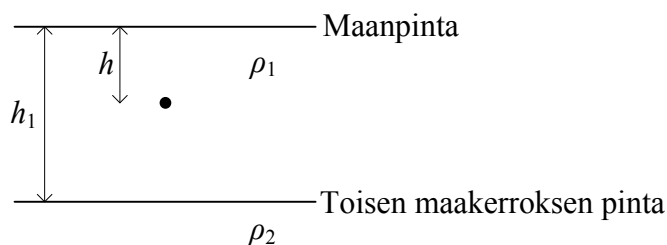
Avojohtoja koskevan standardin SFS-EN 50341-1 mukaan yli 45 kV:n avojohdolla suurin sallittu maadoitusjännite saa olla enintään kaksinkertainen suurimpaan sallittuun kosketusjännitteeseen verrattuna [5, s. 164]. Kosketusjännitteiden suurimmat sallitut arvot on esitetty luvussa 3.3.

Maadoituksesta maahan menevä virta nostaa maadoitusta ympäröivän maan aineksen potentiaalia, jolloin maadoituksen ympärille syntyy potentiaalisuppilo. Homogeeniseen maahan syvyyteen  $h$  upotetun pistemäisen virtalähteen aiheuttama maanpinnan potentiaalın nousu voidaan laskea seuraavasti:

$$\underline{V}(r) = \frac{\rho_1 I'}{2\pi\sqrt{r^2+h^2}}, \quad (15)$$

jossa  $\rho$  on maaperän resistiivisyys ja  $r$  on pistemäisen virtalähteen ja tarkasteltavan maanpinnan pisteen välinen etäisyys maanpintaa pitkin mitattuna. [19, s. 139]

Jos pistemäinen virtalähde sijaitsee kuvan 13 mukaisesti kaksikerrosmaassa, maanpinnan potentiaalın laskennassa joudutaan ottamaan huomioon myös alemman maakerroksen vaikutus.



Kuva 13: Pistelähde kaksikerrosmaassa.

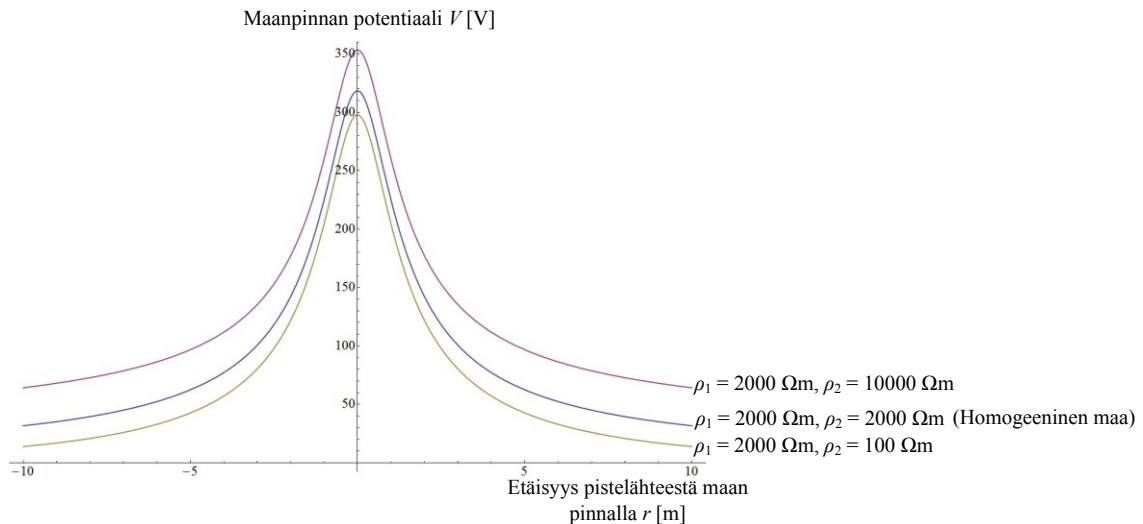
Kuvan 13 mukaisessa tilanteessa kaksikerrosmaassa syvyydessä  $h$  sijaitsevan pistemäisen virtalähteen aiheuttama maanpinnan potentiaalın nousu voidaan laskea seuraavasti:

$$\underline{V}(r) = \frac{\rho_1 I'}{2\pi} \left[ \frac{1}{\sqrt{r^2+h^2}} + \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{\kappa^n}{\sqrt{r^2+(2nh_1-h)^2}} + \frac{\kappa^n}{\sqrt{r^2+(2nh_1+h)^2}} \right\} \right], \quad (16)$$

jossa  $\kappa$  on heijastuskero. [20, s. 167–169] Heijastuskero voidaan laskea seuraavasti:

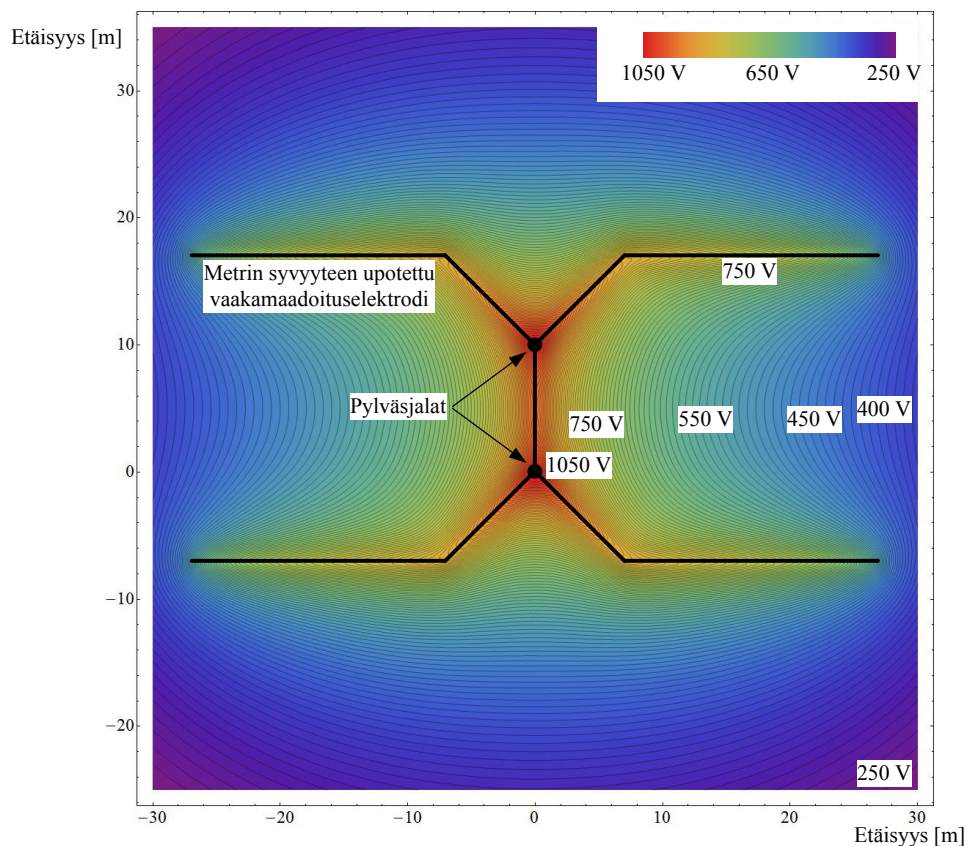
$$\kappa = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}. \quad (17)$$

Kuvassa 14 on esitetty maanpinnan potentiaali pistemäisen virtalähteen ympärillä, kun maaperä koostuu erilaisista kerroksista.



Kuva 14: Maanpinnan potentiaali pistemäisen virtalähteen ympäristössä, kun maa koostuu kahdesta kerroksesta. Virtalähteestä maahan menevä virta on 1 A, virtalähteen upotussyvyys on 1 m ja ensimmäisen maakerroksen syvyys on 10 m.

Avojohton maasulussa vikaantuneen pylvään ympärille syntyvä potentiaalisuppilo riippuu pylväsmaadoituksen kautta maahan menevästä virrasta, pylväsmaadoituksen ulottuvuuksista ja sähköisistä ominaisuuksista sekä maaperän resistiivisyydestä. Kuvassa 15 on esitetty esimerkki maanpinnan potentiaalिन noususta perusmaadoituksesta ja neljästä lisäsäteestä koostuvan pylväsmaadoituksen ympärillä. Kuva on saatu tässä työssä kehitetyllä laskentamenetelmällä. Menetelmä esitellään tarkemmin luvussa 4.2.2.



Kuva 15: Maanpinnan potentiaali ylhäältä päin katsottuna perusmaadoituksesta ja neljästä lisäsäteestä koostuvan pylväsmaadoituksen ympärillä, kun pylväsmaadoituksesta maahan menevä kokonaisvirta on 30 A ja maaperän resistiivisyys on 2000  $\Omega\text{m}$ .



### 3.3 Kosketusjännite

Kosketusjännite on se osa maadoitusjännitteestä, joka vaikuttaa ihmiskehon yli virran kulkiessa kehon kautta kädestä jalkoihin siten, että jalkojen vaakasuora etäisyys jännitteelle alttiista osasta on yksi metri [1, s. 16]. Kosketusjännite on suurimmillaan pylvään vieressä kohdassa, jossa jännitteelliseen osaan voi koskea ja jännitteellisen osan ja maanpinnan välinen potentiaaliero on suurin mahdollinen. Kuvassa 12 kosketusjännite on esitetty symbolilla  $U_T$ . Kosketusjännite voi syntyä myös takaperoisesti, jos ihminen koskettaa vikapaikan lähellä maasta eristettyä johdinta, joka on maadoitettu kaukana vikapaikasta [4, s. 428].

Kun tunnetaan maadoitusjärjestelmän maadoitusjännite  $\underline{U}_E$  ja maanpinnan potentiaali seisontakohdassa  $\underline{V}_S$ , kuormittamaton kosketusjännite voidaan laskea seuraavasti:

$$\underline{U}_T = \underline{U}_E - \underline{V}_S . \quad (18)$$

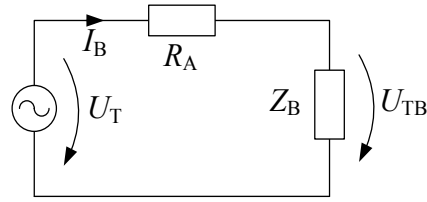
Kuormittamaton kosketusjännite kuvaa kosketuspiirin lähdejännitettä. Kehon yli vaikuttaa kuormittamaton kosketusjännite, jos ihminen seisoo kosketuskohdassa paljain jaloin. Jos ihmisellä on eristävät jalkineet jalassa, kehon yli vaikuttava kosketusjännite on pienempi.

Kosketusjännitteille asetetut vaatimukset ovat verkon käyttöjännitteestä riippumattomia ja niiden perusteena on sähkön vaarallisuus ihmiselle. Käyttämällä taulukoiden 3 ja 4 arvoja on mahdollista laskea iteratiivisesti kuormittamattoman kosketusjännitteen suurimmat sallitut arvot kaikille vian kestoajoille. Käytettäessä taulukon 4 arvoja tulee lisäksi huomioida, että kosketusjännitteen aiheuttama kehon läpi kulkeva virta kulkee kädestä jalkoihin ja näin ollen käyttää kehon impedanssille korjauskerrointa 0,75. Taulukossa 5 on esitetty avojohtoja koskevan standardin SFS-EN 50341-1 mukaisia raja-arvoja kuormittamattomalle kosketusjännitteelle. [5, s. 298, 300]

*Taulukko 5: Raja-arvoja kuormittamattomalle kosketusjännitteelle. [5, s. 300]*

Vian kesto aika $t_F$ [s]	Sallittu kuormittamaton kosketusjännite $U_T$ [V]
0,05	735
0,1	633
0,2	528
0,5	204
1	107
2	90
5	81
10	80

Taulukossa 5 esitettyjen raja-arvojen toteutuminen vaaditaan ainoastaan paikoissa, joissa voidaan olettaa ihmisten liikkuvan paljain jaloin. Paikoissa, joissa ihmiset käyttävät todennäköisesti jalkineita, kuormittamattomalle kosketusjännitteelle sallitaan suurempia arvoja. Kuvassa 16 on esitetty sijaiskytkentä, johon perustuen voidaan laskea suurimpia sallittuja kosketusjännitteitä paikoissa, joissa ihmiset käyttävät todennäköisesti jalkineita. [5, s. 302]



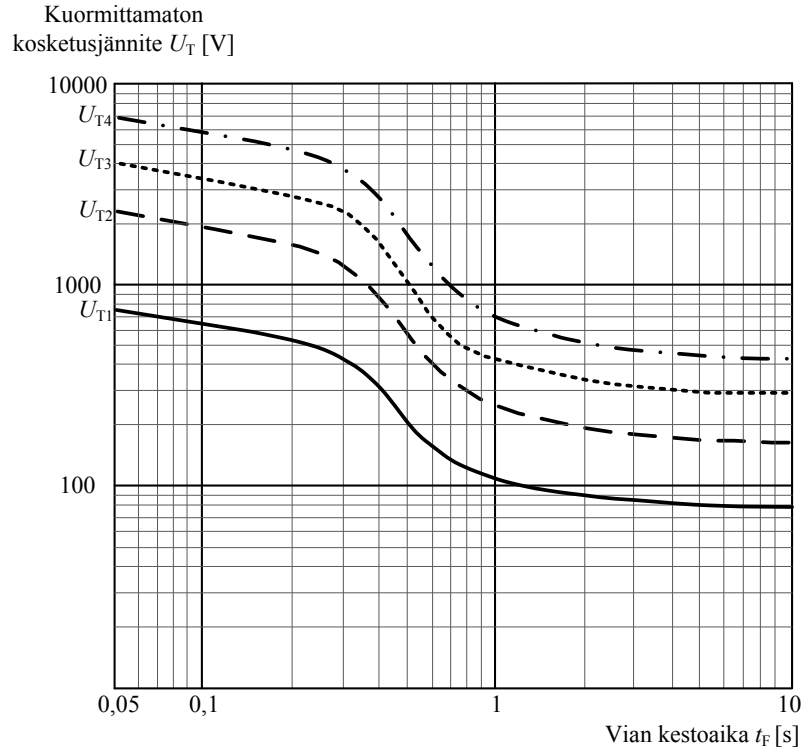
Kuva 16: Sallitun kosketusjännitteen laskeminen lisäresistanssi  $R_A$  huomioiden. [5, s. 302]

Suurimmat sallitut kosketusjännitteet erilaisissa sijaintipaikoissa voidaan laskea standardin SFS-EN 50341-1 mukaisesti seuraavilla yhtälöillä:

$$U_T(t_F) = U_{TB}(t_F) \cdot \left(1 + \frac{R_A}{Z_B(U_{TB}(t_F))}\right), \quad (19)$$

$$R_A = R_{A1} + R_{A2} = R_{A1} + 1,5 \frac{1}{[\text{m}]} \cdot \rho, \quad (20)$$

joissa  $U_T(t_F)$  on kuormittamattoman kosketusjännitteen suurin sallittu arvo, kun vian kesto on  $t_F$ ,  $U_{TB}(t_F)$  on ihmiskehon yli vaikuttava kosketusjännite,  $Z_B(U_{TB}(t_F))$  on kehon kokonaisimpedanssi,  $R_{A1}$  on jalkineiden resistanssi,  $R_{A2}$  on seisontakohdan maadoitusresistanssi ja  $\rho$  on maaperän resistiivisyys lähellä maanpintaa. Yhtälön (19) arvot  $U_{TB}(t_F)$  saadaan taulukoista 3 ja 5 interpoloimalla ja arvot  $Z_B(U_{TB}(t_F))$  saadaan vastaavasti taulukoista 3 ja 4. Kuvassa 17 on esitetty yhtälöllä (19) laskettuja suurimpia sallittuja arvoja kosketusjännitteille erilaisissa sijaintipaikoissa. [5, s. 302]



Kuva 17: Kosketusjännitteiden suurimpia sallittuja arvoja eri lisäresistansseilla.  $U_{T1}$ :  $R_A = 0 \Omega$ ;  $U_{T2}$ :  $R_A = 1\,750 \Omega$ ,  $R_{A1} = 1\,000 \Omega$ ,  $\rho = 500 \Omega\text{m}$ ;  $U_{T3}$ :  $R_A = 4\,000 \Omega$ ,  $R_{A1} = 1\,000 \Omega$ ,  $\rho = 2\,000 \Omega\text{m}$ ;  $U_{T4}$ :  $R_A = 7\,000 \Omega$ ,  $R_{A1} = 1\,000 \Omega$ ,  $\rho = 4\,000 \Omega\text{m}$ . [5, s. 164]

Kuvassa 17 käyrä  $U_{T1}$  vastaa sijaintipaikkoja, joilla ihmiset voivat oleskella paljain jaloin. Tällaisia alueita ovat muun muassa leikkikentät, uima-altaat, leirintäalueet ja virkistysalueet. Käyrä  $U_{T2}$  vastaa sijaintipaikkoja, joilla voidaan kohtuudella otaksua, että ihmiset käyttävät kenkiä. Tällaisia alueita ovat esimerkiksi yleisten teiden jalkakäytävät ja pysäköintialueet. Käyrä  $U_{T3}$  vastaa sijaintipaikkoja, joilla voidaan kohtuudella otaksua, että ihmiset käyttävät kenkiä ja että maaperän resistiivisyys on korkea. Käyrä  $U_{T4}$  vastaa sijaintipaikkoja, joilla voidaan kohtuudella otaksua, että ihmiset käyttävät kenkiä ja että maaperän resistiivisyys on hyvin korkea. [5, s. 166]

### 3.4 Askeljännite

Askeljännite on se osa maadoitusjännitteestä, jonka ihminen saa yhden metrin askelvälillä virran kulkiessa kehon kautta jalasta toiseen [1, s. 16]. Askeljännite on suurimmillaan siinä kohdassa, jossa potentiaalisuppilon muoto muuttuu jyrkimmin. Kuvassa 12 askeljännite on esitetty symbolilla  $U_S$ . Kun maanpinnan potentiaali tunnetaan, kuormittamaton askeljännite voidaan laskea seuraavasti:

$$\underline{U}_S = \underline{V}_{S1} - \underline{V}_{S2} , \quad (21)$$

jossa  $\underline{V}_{S1}$  on maanpinnan potentiaali ensimmäisen jalan kohdalla ja  $\underline{V}_{S2}$  maanpinnan potentiaali toisen jalan kohdalla.

Standardeissa ei määritellä askeljännitteille suurimpia sallittuja arvoja. Askeljännitteille voitaisiin sallia suuremmat arvot kuin kosketusjännitteille, sillä virtatie jalasta jalkaan ei ole yhtä vaarallinen kuin kädestä jalkoihin. Jos kosketusjännitevaatimukset toteutuvat, voidaan yleensä olettaa, että vaarallisia askeljännitteitä ei myöskään esiinny. [5, s. 160]

### 3.5 Siirtyvät potentiaalit

Siirtyvä potentiaali tarkoittaa potentiaalia, joka siirtyy erillistä johdinta pitkin alueelle, jossa on referenssimaahan nähden alhainen jännite tai ei jännitettä lainkaan. Potentiaali voi siirtyä esimerkiksi metalliputkistoa, metallista aitaa, kaapelivaippaa tai PEN-johdinta pitkin. [1, s. 17] Kuvassa 12 siirtyvä potentiaali on esitetty symbolilla  $U_{TP}$ .

Viestintävirasto määrittelee viestintäverkkoon siirtyville potentiaaleille suurimmat sallitut arvot. Vähintään 110 kV:n suurjännitelaitteiston yksivaiheisessa maasulussa viestintäverkon laitteiden virtapiireihin ja kosketeltaviin metalliosiin maata vasten siirtynyt tai indusoitunut sähkömotorinen voima saa nousta korkeintaan alla esitettyihin arvoihin.

- 1200 V, kun sen vaikutusaika on enintään 0,2 s.
- 900 V, kun sen vaikutusaika on enintään 0,35 s.
- 650 V, kun sen vaikutusaika on enintään 0,5 s.

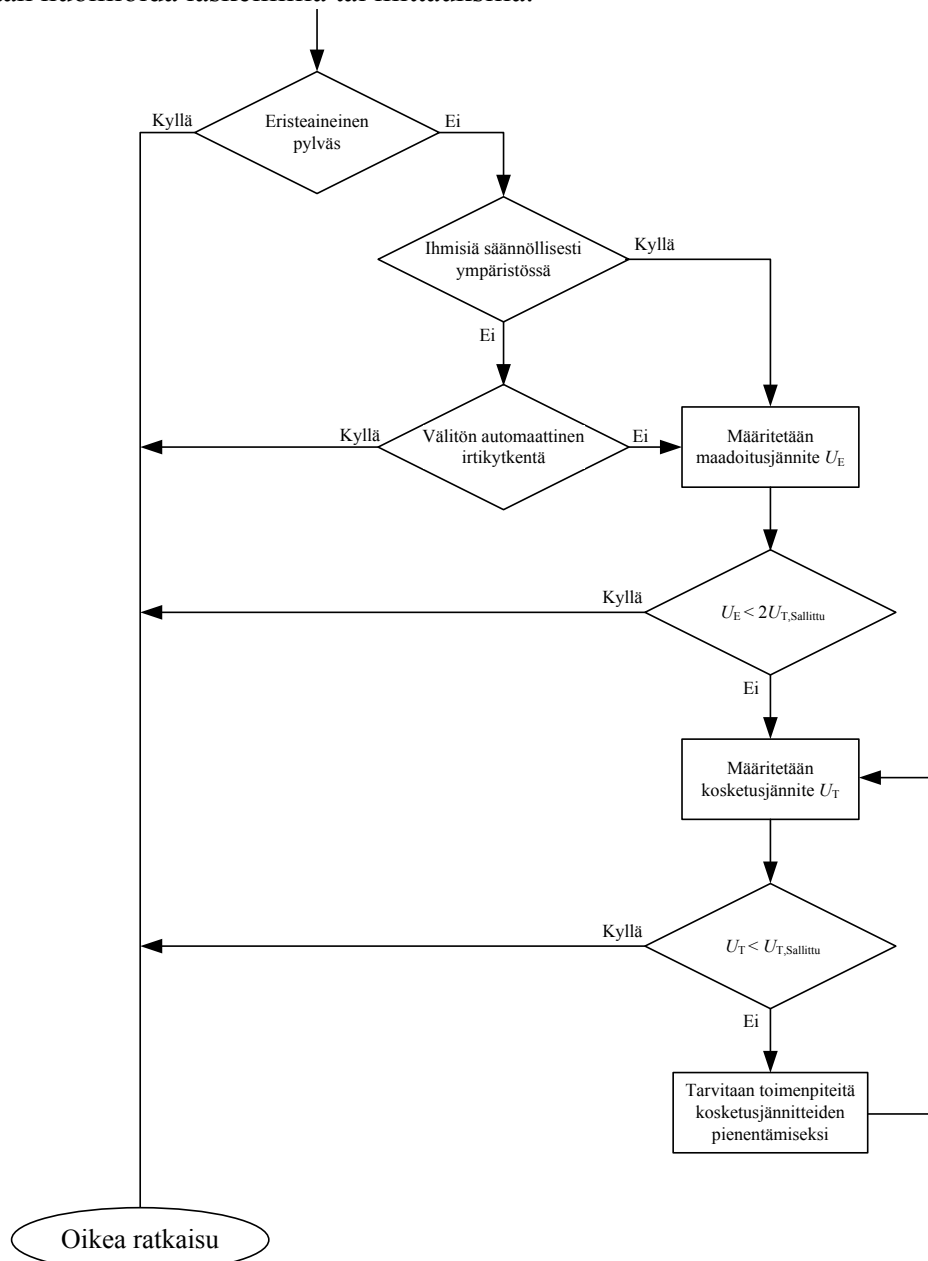
Yli 0,5 sekunnin laukaisuajoilla käytetään raja-arvoa 430 V. Jos järjestelmää ei kytketä itsetoimivasti pois maasulussa, siirtyvä potentiaali saa olla enintään 100 V. [21, s. 7]

Siirtyvät potentiaalit on tarkistettava myös silloin, kun asennus tai sen maadoituselektrodit ovat alle 100 metrin päässä pienjännitejohdon maadoituselektrodista tai muusta PEN-johtimeen ja maahan yhdistetystä metalliosasta. Siirtyvät potentiaalit eivät saa ylittää arvoa  $1500 \text{ V}/\sqrt{t_F}$ , jossa  $t_F$  on maasulun kesto aika sekunteina. [22, s. 34] Jos suurjännite- ja pienjännitejärjestelmien maadoitukset on yhdistetty, täytyy lisäksi huo-

mioida suurjännitejärjestelmän maasulun aiheuttamien rasisusjännitteiden suurimmat sallitut arvot. Nämä arvot on määritelty standardissa SFS 6000-4-44 [23].

### 3.6 Pylväsmaadoitusten suunnittelu vaarajännitteiden kannalta

Kuvassa 18 on havainnollistettu voimajohtojen pylväsmaadoitusten suunnittelua vaarajännitevaatimusten kannalta. Kuvassa on keskitytty kosketusjännitteisiin liittyviin vaatimuksiin. Suunniteltaessa pylväsmaadoituksia on kuvassa 18 esitettyjen asioiden lisäksi huomioitava myös siirtyviin potentiaaleihin liittyvät vaatimukset. Siirtyvät potentiaalit voidaan huomioida laskelmilla tai mittauksilla.



Kuva 18: Pylväsmaadoitusten suunnittelu kosketusjännitevaatimusten kannalta. Suurin sallittu kosketusjännite  $U_{T,sallittu}$  saadaan kuvasta 17 tai laskemalla yhtälöllä (19) ja huomioimalla pylvään sijaintipaikka sekä vian kesto aika. [5, s. 162]

Kuvan 18 mukaisesti sähköä johtamattomilla pylväillä, joissa ei ole maahan yhteydessä olevia johtavia osia, maadoitukselle ei ole mitään vaatimuksia. Mikäli johto on varustettu suojaavalla automaattisella irtikytkennällä, kosketusjännitteitä ei tarvitse myöskään huomioida sellaisilla pylväiden sijaintipaikoilla, joihin ihmiset eivät voi vapaasti päästä tai joilla ihmisiä liikkuu harvoin. Tällaisia sijaintipaikkoja ovat esimerkiksi metsät ja avoimet paikat maaseudulla. Pylväiden sijaintipaikkoja, joiden lähellä ihmisten voidaan olettaa joko oleskelevan suhteellisen pitkiä aikoja muutamien viikkojen aikana tai lyhyitä aikoja säännöllisesti, täytyy tarkastella yksityiskohtaisemmin. Tällaisia sijaintipaikkoja ovat esimerkiksi pylväspaikat lähellä asuntoalueita tai pelikenttiä. [5, s. 162]

Sijaintipaikoilla, joilla ihmisiä liikkuu säännöllisesti, on määritettävä pylvään maadoitusjännite joko laskemalla tai mittaamalla. Mikäli maadoitusjännite on pienempi kuin kaksinkertainen suurin sallittu kosketusjännite, maadoitusratkaisu on hyväksyttävä. Jos maadoitusjännite ei täytä vaatimuksia, on määritettävä kosketusjännitteet. [5, s. 164]

Maadoitusjännitettä voidaan pienentää rajoittamalla maasulkuvirtaa, parantamalla maadoituksia tai lisäämällä reduktiojohtimia. Kosketusjännitteitä voidaan lisäksi pienentää käyttämällä potentiaalinohjausta, eristämällä vaara-alue aidalla tai eristämällä vaara-alueen maaperän pintakerros esimerkiksi soralla, sepelillä tai asfaltilla. Joskus voi olla myös järkevää siirtää vaaralle altistuvat kohteet kokonaan pois vaara-alueelta. [3, s. 19]

## 4 Maasulku ukkosjohtimettomalla ja ukkosjohtimellisella avojohdolla

Tässä luvussa paneudutaan maasulkutilanteeseen ukkosjohtimettomalla ja ukkosjohtimellisella avojohdolla. Luvun alussa esitellään tässä työssä kehitettyjä menetelmiä, joiden avulla voidaan tarkastella maasulkutilannetta ja arvioida vaarajännitteitä johtora-kenteella, joka on ukkosjohtimien sijaan varustettu koko johdon mittaisella maahan upotetulla läpimenevällä maajohtimella. Lopuksi esitetään työssä kehitettyjä menetelmiä, joiden avulla voidaan tarkastella maasulkutilannetta ja arvioida vaarajännitteitä ukkosjohtimellisella avojohdolla.

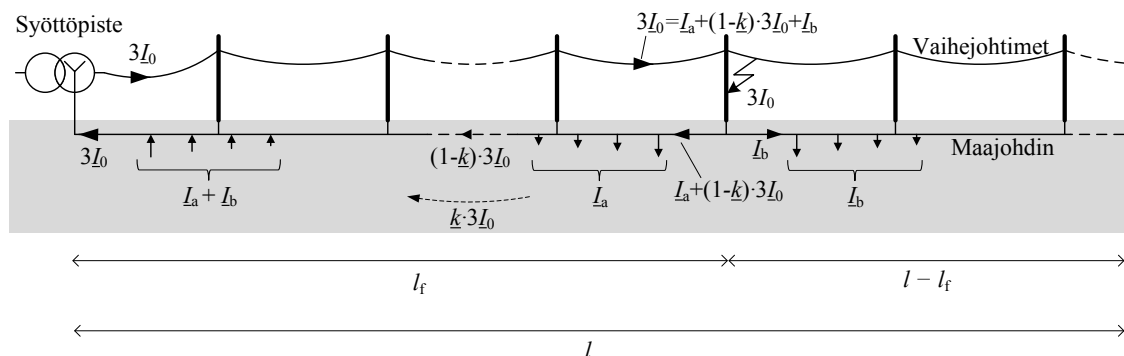
### 4.1 Maasulku ukkosjohtimettomalla läpimenevällä maajohtimella varustetulla avojohdolla

#### 4.1.1 Yleistä

Tässä luvussa tarkastellaan maasulkutilannetta avojohdolla, jolle on ukkosjohtimien sijaan asennettu koko johdon mittainen läpimenevä maajohdin. Tilannetta lähestytään kuvaamalla maajohdinta differentiaalisien pienten alkioden avulla. Toinen lähestymistapa ongelmaan voisi olla maasulkutilanteen mallintaminen elementtimenetelmän avulla. Elementtimenetelmässä suuret mittakaavaerot maajohtimen ja tarkasteltavien alueiden välillä tekevät ongelman ratkaisusta kuitenkin hyvin hankalaa.

Kuvaamalla maajohdinta differentiaalisien pienten alkioden avulla ja ratkaisemalla niiden perusteella muodostetut differentiaaliyhtälöt, voidaan muodostaa yhtälöt muun muassa maajohtimen virralle, maahan menevälle virralle, maadoitusimpedanssille, maadoitusjännitteelle ja maanpinnan potentiaalille maajohtimen ympäristössä. Osa yhtälöistä pystytään ratkaisemaan analyttisesti, mutta osa vaatii numeerista integrointia. Numeeriseen integrointiin on tässä työssä käytetty Wolfram Mathematica 8 -ohjelmaa.

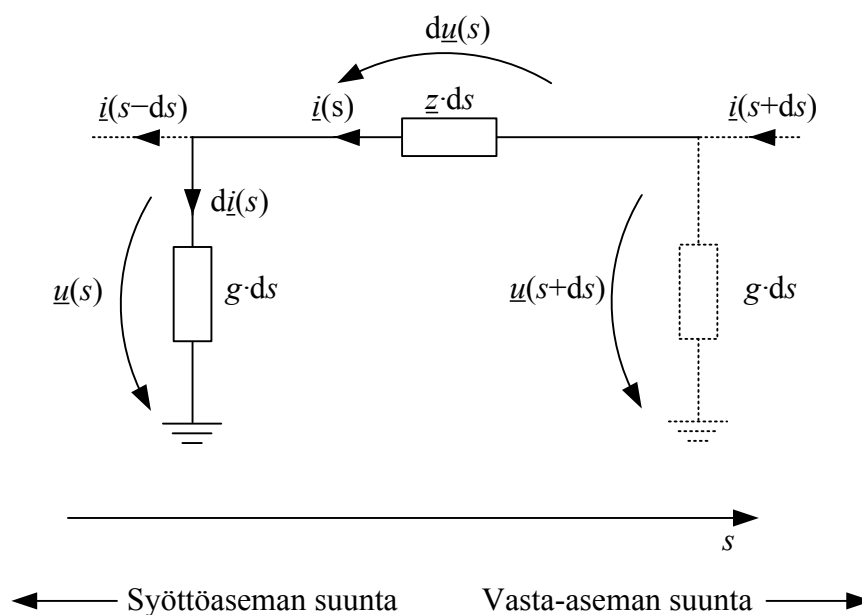
Maasulkutilanteen tarkastelussa oletetaan, että johto on säteittäiskäytössä, jolloin vikavirta tulee vain yhdestä suunnasta. Maajohtimen oletetaan olevan koko matkaltaan paljas johdin, jolloin se on jatkuvassa yhteydessä maahan. Lisäksi oletetaan, että johdin on galvaanisessa yhteydessä jokaisen pylvään maadoitukseen. Johdon päissä sijaitsevien asemien maadoitukset jätetään huomioimatta, mutta syöttöpisteessä sijaitsevan järjestelmän tähtipisteen oletetaan olevan galvaanisessa yhteydessä maajohtimeen. Kuva 19 havainnollistaa maasulkutilannetta ukkosjohtimettomalla läpimenevällä maajohtimella varustetulla avojohdolla.



Kuva 19: Maasulkutilanne ukkosjohtimettomalla läpimenevällä maajohtimella varustetulla avojohdolla. Maasulku tapahtuu etäisyydellä  $l_f$  syöttöpisteestä.

Kuvan 19 mukaisessa tilanteessa maasulkuvirta  $3I_D$  menee kokonaisuudessaan viikaantuneen pylvään kautta maajohtimeen. Virta jakaantuu maajohtimessa vikapaikan kohdalla syöttöpisteen ja vasta-aseman suuntaan lähteviin virtoihin  $I_a + (1 - k) \cdot 3I_D$  ja  $I_b$ . Maajohtimella on samanlainen reduktiovaikutus kuin ukkosjohtimilla, joten reduktiovirta  $(1 - k) \cdot 3I_D$  pysyy johtimessa koko matkan vikapaikasta syöttöpisteeseen aiheuttamatta maan potentiaalinnousua. Loppuosat vikavirrasta  $I_a$  ja  $I_b$  menevät maajohtimesta maahan ja palaavat takaisin maajohtimeen syöttöpisteen lähellä.

Kuva 20 esittää maajohtimen sijaiskytkennän, jonka avulla voidaan johtaa yhtälöt maajohtimen virralle, jännitteelle, maahan menevälle virralle ja maassa kulkevalle virralle. Sijaiskytkentä kuvaa differentiaalisen pientä osaa maajohtimesta.



Kuva 20: Sijaiskytkentä, joka kuvaa differentiaalisen pientä osaa maajohtimesta. Kuvassa  $\underline{i}(s)$  on maajohtimen virta,  $\underline{u}(s)$  maajohtimen jännite referenssimaahan nähden,  $\underline{z}$  maajohtimen maapaluuimpedanssi pituutta kohden ja  $g$  maadoituskonduktanssi pituutta kohden. Syöttöasema sijaitsee pisteessä  $s = 0$  (ei näy kuvassa).

Kuvan 20 perusteella voidaan muodostaa pitkien siirtojohtojen yhtälöiden kaltaiset yhtälöt maajohtimen virran laskemista varten. Seuraavat yhtälöt pätevät ainoastaan maasulkuvirran maahan menevälle osalle.

$$d\underline{u}(s) = \underline{i}(s) \cdot \underline{z} \cdot ds \Leftrightarrow \frac{d\underline{u}(s)}{ds} = \underline{i}(s) \cdot \underline{z} \quad (22)$$

$$d\underline{i}(s) = \underline{u}(s) \cdot g \cdot ds \Leftrightarrow \underline{u}(s) = \frac{1}{g} \frac{d\underline{i}(s)}{ds} \quad (23)$$

Derivoimalla yhtälö (23) matkan  $s$  suhteen ja sijoittamalla se yhtälöön (22) päästään maajohtimen virran käyttäytymistä kuvaavaan differentiaaliyhtälöön

$$\frac{d^2 \underline{i}(s)}{ds^2} - g \cdot \underline{z} \cdot \underline{i}(s) = 0. \quad (24)$$

Yhtälöstä (24) voidaan ratkaista maajohtimen virta  $\underline{i}(s)$ . Maajohtimen virran yhtälöksi saadaan

$$\underline{i}(s) = C_1 e^{\underline{\gamma} s} + C_2 e^{-\underline{\gamma} s}, \quad (25)$$

jossa  $C_1$  ja  $C_2$  ovat integrointivakioita ja  $\underline{\gamma}$  on etenemiskerroin. Etenemiskerroin saadaan laskettua seuraavasti:

$$\underline{\gamma} = \sqrt{g \underline{z}}. \quad (26)$$

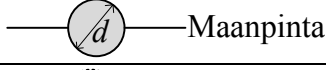
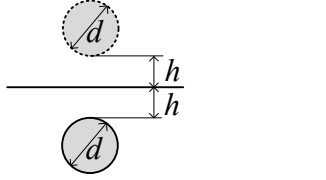
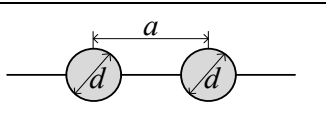
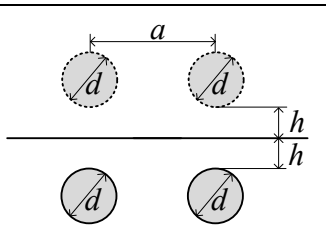
Maadoituskonduktanssi  $g$  pituutta kohden voidaan laskea Pesonen et al. [24, s. 15] esittämällä yhtälöllä:

$$g = \frac{2\pi}{\rho \cdot \ln\left(\frac{H}{r_{eg}}\right)}, \quad (27)$$

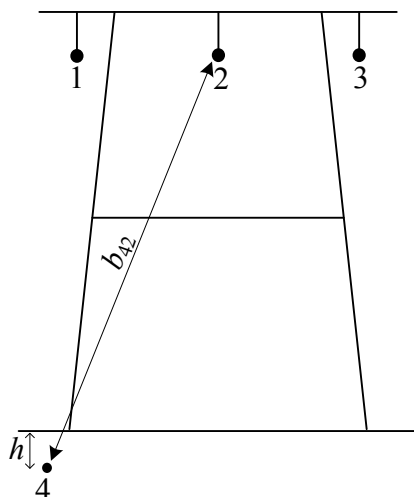
jossa  $\rho$  on maaperän resistiivisyys,  $H$  on virran ekvivalenttisyvyys maassa ja  $r_{eg}$  on maajohtimen tai useamman maajohtimen muodostaman nipun ekvivalenttisäde konduktanssia laskettaessa. Ekvivalenttisäde konduktanssia laskettaessa saadaan laskettua luvussa 2.3.1 esitettyä yhtälöllä (13), mutta laskennassa tulee huomioida myös maajohtimen peilikuvat maanpinnan suhteen. Yhtälö (27) on likimääräinen ja sen käyttö vaatii, että maajohdin on pitkä. [24, s. 15]

Maajohtimen maapaluuimpedanssi  $\underline{z}$  ja reduktiokerroin  $\underline{k}$  voidaan laskea luvussa 2.3.1 esitettyillä yhtälöillä (8) – (11). Yhtälöitä käytettäessä on huomioitava, että laskettaessa maajohdin–maapiirin reaktanssia maajohtimen peilikuvia ei huomioida. Taulukossa 6 on esitetty erilaisten maajohtimien ekvivalenttisäteitä ja kuvassa 21 on havainnollistettu reduktiokertoimen laskentaa varten tarvittavia etäisyyksiä.

Taulukko 6: Maajohtimen ekvivalenttisäteet. [7, s. 17 II]

Maajohdin tai maajohtimet ( $d$ on maajohtimen halkaisija)	Ekvivalenttisäde $r_e$ reaktanssia laskettaessa	Ekvivalenttisäde $r_{eg}$ maadoituskonduktanssia laskettaessa
 Maanpinta	$d/2$	$d/2$
	$d/2$	$\sqrt{dh}$
	$\sqrt{\frac{d}{2} a}$	$\sqrt{\frac{d}{2} a}$
	$\sqrt{\frac{d}{2} a}$	$\sqrt[4]{dah\sqrt{a^2 + (2h)^2}}$





Kuva 21: Etäisyyksiä maajohtimen reduktiokertoimen laskennassa.

#### 4.1.2 Maajohtimen virran, jännitteen, maahan menevän virran ja maassa kulkevan virran laskenta

Mikäli kuvassa 19 esitetyt etäisyydet  $l_f$  ja  $l - l_f$  ovat pitkiä ja maaperä on homogeenista, voidaan olettaa, että  $\underline{I}_a = -\underline{I}_b = \frac{1}{2}\underline{k} \cdot 3\underline{I}_0$ . Tällöin reduktiovirta  $(1 - \underline{k}) \cdot 3\underline{I}_0$  kulkee maajohtimessa syöttöaseman ja vikapaikan välillä ja loppuosaa maasulkuvirrasta jakautuu vikapaikassa puoliksi kumpaankin suuntaan. Puoliksi jakautuneet virrat  $\underline{I}_a$  ja  $\underline{I}_b$  menevät maajohtimesta vikapaikan ympäriltä maahan ja palaavat syöttöpisteen lähellä takaisin maajohtimeen.

Maajohtimessa kulkeva virta voidaan ratkaista yhtälön (25) avulla, kun virran alkuarvoina käytetään edellä esitettyä virran jakautumista vikapaikasta kumpaankin suuntaan ja oletetaan lisäksi, että maahan mennyt virta on palannut kokonaisuudessaan maajohtimeen juuri ennen syöttöpistettä. Maajohtimen virraksi  $\underline{i}(s)$  ja maassa kulkevaksi virraksi  $\underline{i}_E(s)$  matkan  $s$  funktiona saadaan

$$\underline{i}(s) = \begin{cases} 3\underline{I}_0 \cdot \underline{k} \cdot \frac{\frac{1}{2}\sinh(\underline{\gamma}s) + \sinh(\underline{\gamma}(l_f - s))}{\sinh(\underline{\gamma}l_f)} + 3\underline{I}_0 \cdot (1 - \underline{k}), & 0 < s < l_f \\ -3\underline{I}_0 \cdot \underline{k} \cdot \frac{\frac{1}{2}\sinh(\underline{\gamma}(l - s))}{\sinh(\underline{\gamma}(l - l_f))}, & l_f \leq s < l \end{cases}, \quad (28)$$

$$\underline{i}_E(s) = \begin{cases} 3\underline{I}_0 \cdot \underline{k} \cdot \left(1 - \frac{\frac{1}{2}\sinh(\underline{\gamma}s) + \sinh(\underline{\gamma}(l_f - s))}{\sinh(\underline{\gamma}l_f)}\right), & 0 < s < l_f \\ 3\underline{I}_0 \cdot \underline{k} \cdot \frac{\frac{1}{2}\sinh(\underline{\gamma}(l - s))}{\sinh(\underline{\gamma}(l - l_f))}, & l_f \leq s < l \end{cases}. \quad (29)$$

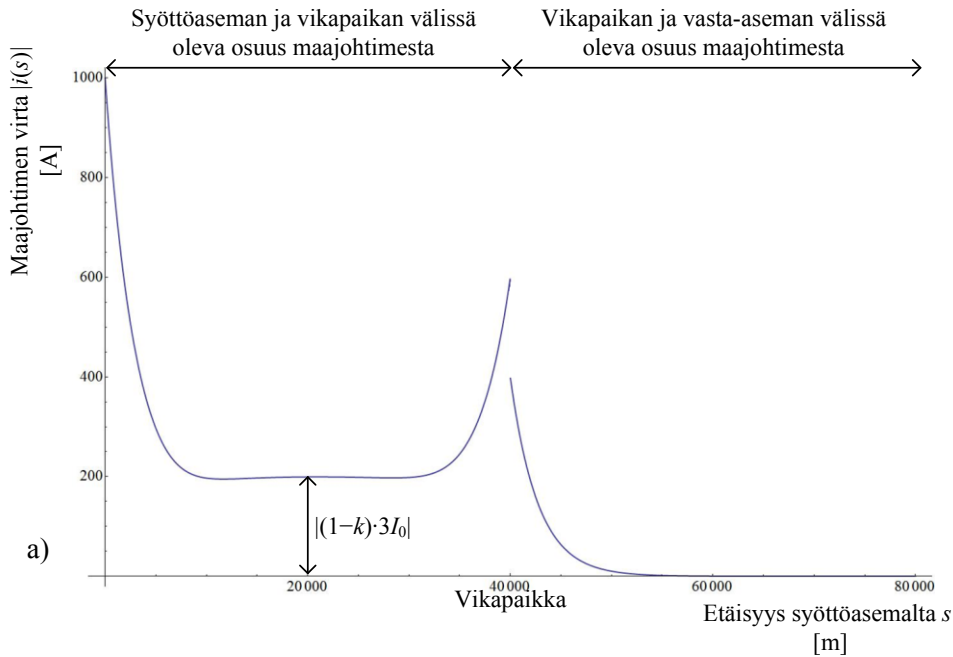
Maajohtimesta maahan menevä virta  $\underline{i}'(s)$  johtimen pituutta kohden saadaan derivoimalla virran  $\underline{i}(s)$  lauseke yhtälöstä (28) matkan  $s$  suhteen. Maahan menevä virta on

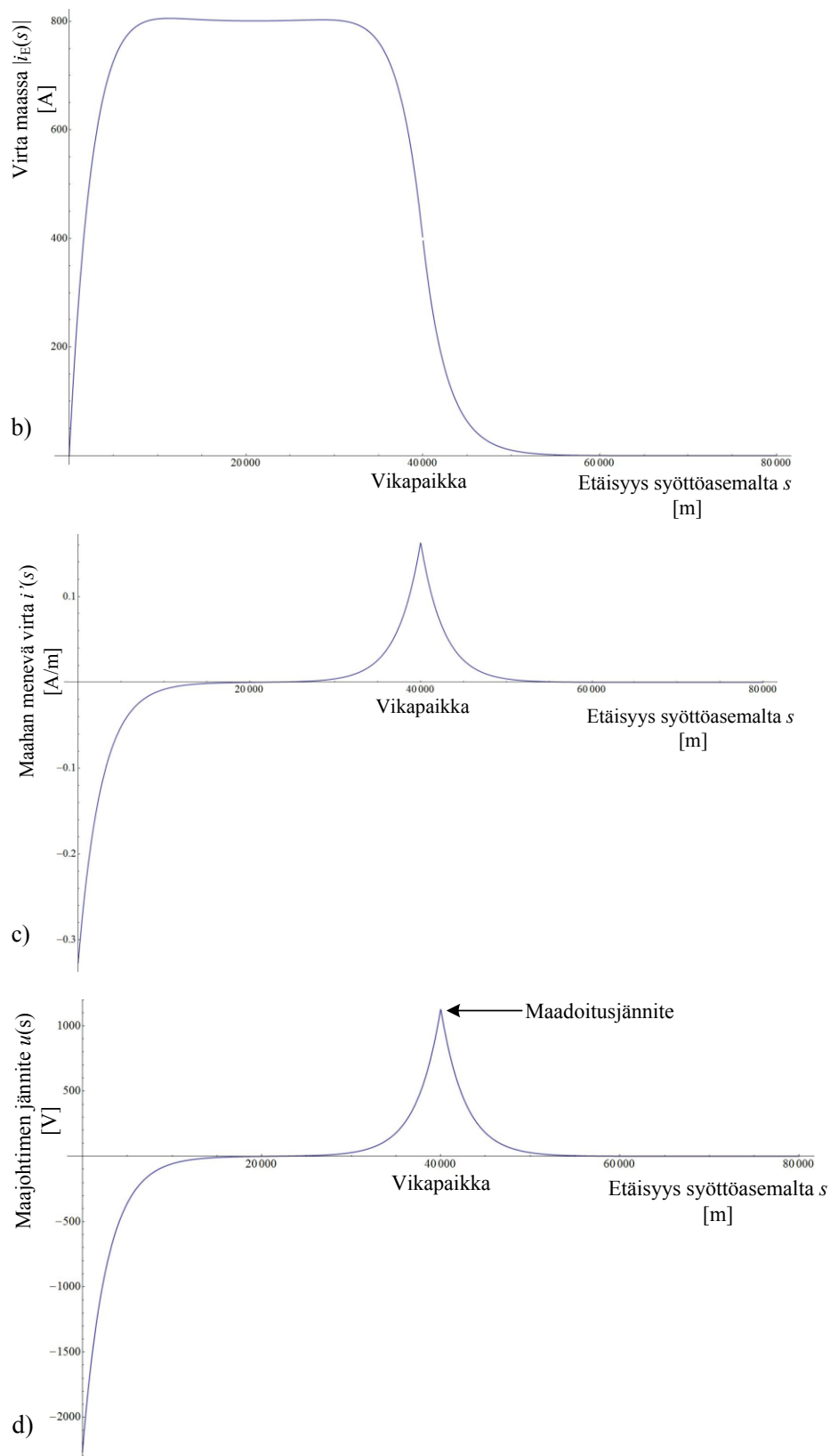
$$\underline{i}'(s) = \begin{cases} 3\underline{I}_0 \cdot \underline{k} \cdot \underline{\gamma} \cdot \frac{\frac{1}{2}\cosh(\underline{\gamma}s) - \cosh(\underline{\gamma}(l_f - s))}{\sinh(\underline{\gamma}l_f)}, & 0 < s < l_f \\ 3\underline{I}_0 \cdot \underline{k} \cdot \underline{\gamma} \cdot \frac{\frac{1}{2}\cosh(\underline{\gamma}(l - s))}{\sinh(\underline{\gamma}(l - l_f))}, & l_f \leq s < l \end{cases} \quad (30)$$

Maajohtimen jännite  $\underline{u}(s)$  saadaan kertomalla johtimesta maahan menevä virta pituutta kohden lasketun maadoituskonduktanssin  $g$  käänteisarvolla. Maajohtimen jännite on

$$\underline{u}(s) = \begin{cases} 3\underline{I}_0 \cdot \underline{k} \cdot \underline{\gamma} \cdot \frac{\frac{1}{2}\cosh(\underline{\gamma}s) - \cosh(\underline{\gamma}(l_f - s))}{g \cdot \sinh(\underline{\gamma}l_f)}, & 0 < s < l_f \\ 3\underline{I}_0 \cdot \underline{k} \cdot \underline{\gamma} \cdot \frac{\frac{1}{2}\cosh(\underline{\gamma}(l - s))}{g \cdot \sinh(\underline{\gamma}(l - l_f))}, & l_f \leq s < l \end{cases} \quad (31)$$

Kuvassa 22 on esitetty yhtälöillä (28) – (31) laskettu maajohtimen virta, maassa kulkeva virta, maahan menevä virta sekä maajohtimen jännite, kun vika sattuu 40 km:n etäisyydellä syöttöasemasta 80 km pitkällä johdolla ja maasulkuvirta on 1 kA. Kuva 22 a) on esitetty alla ja kuvat 22 b), c) ja d) seuraavalla sivulla. Kuvassa 22 c) positiiviset arvot kuvaavat johtimesta maahan menevää virtaa ja negatiiviset arvot johtimeen palaavaa virtaa.





Kuva 22: a) Maajohtimessa kulkeva virta, b) maassa kulkeva virta, c) maahan menevä virta ja d) maajohtimen jännite. Käyrät kuvaavat tilannetta, jossa maaperän resistiivisyys on  $2000 \Omega m$ , maajohtimen reduktiokerroin on  $0,8$  ja maajohdin on metrin syvyyteen upotettu kuparijohdin, jonka poikkipinta-ala on  $25 \text{ mm}^2$ .

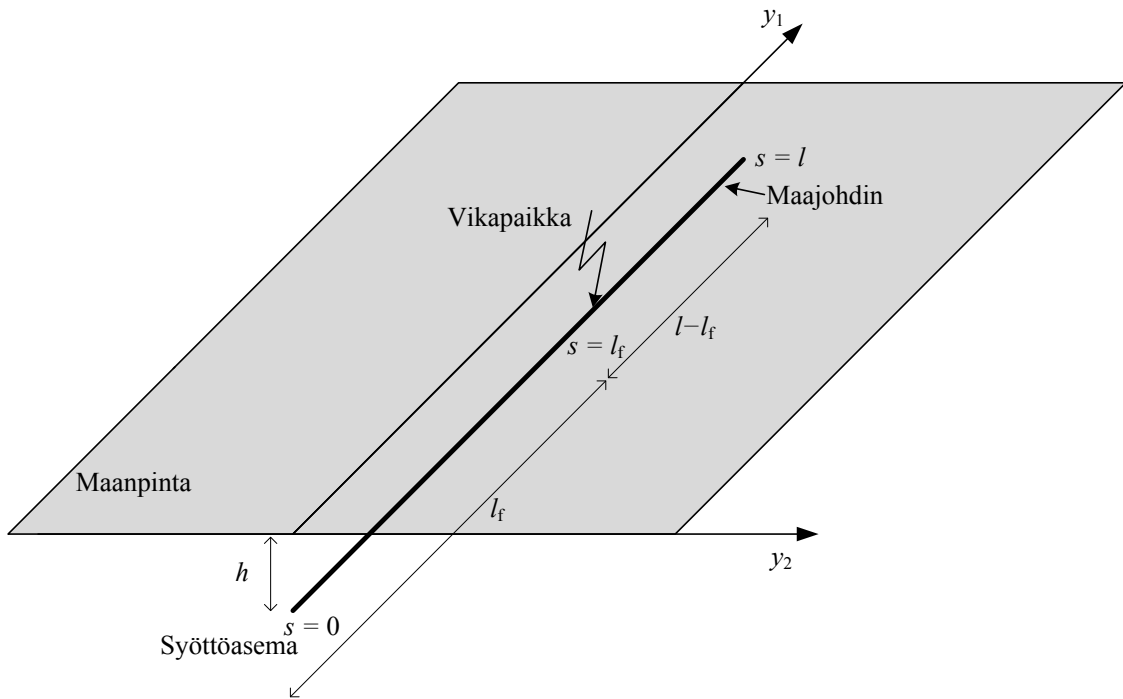
### 4.1.3 Maanpinnan potentiaalin laskeminen

Maajohtimesta maahan menevä virta aiheuttaa maanpinnan potentiaalin nousun. Yhdistämällä luvussa 4.1.2 esitetty yhtälö (30) ja luvussa 3.2 esitetty yhtälö (15) ja käyttämällä kuvan 23 mukaisia merkintöjä, maanpinnan potentiaali maajohtimen ympäristössä voidaan laskea seuraavasti:

$$V(y_1, y_2) = \frac{\rho}{2\pi} \int_0^l \frac{\underline{i}'(s)}{\sqrt{h^2 + (r(s))^2}} ds, \quad (32)$$

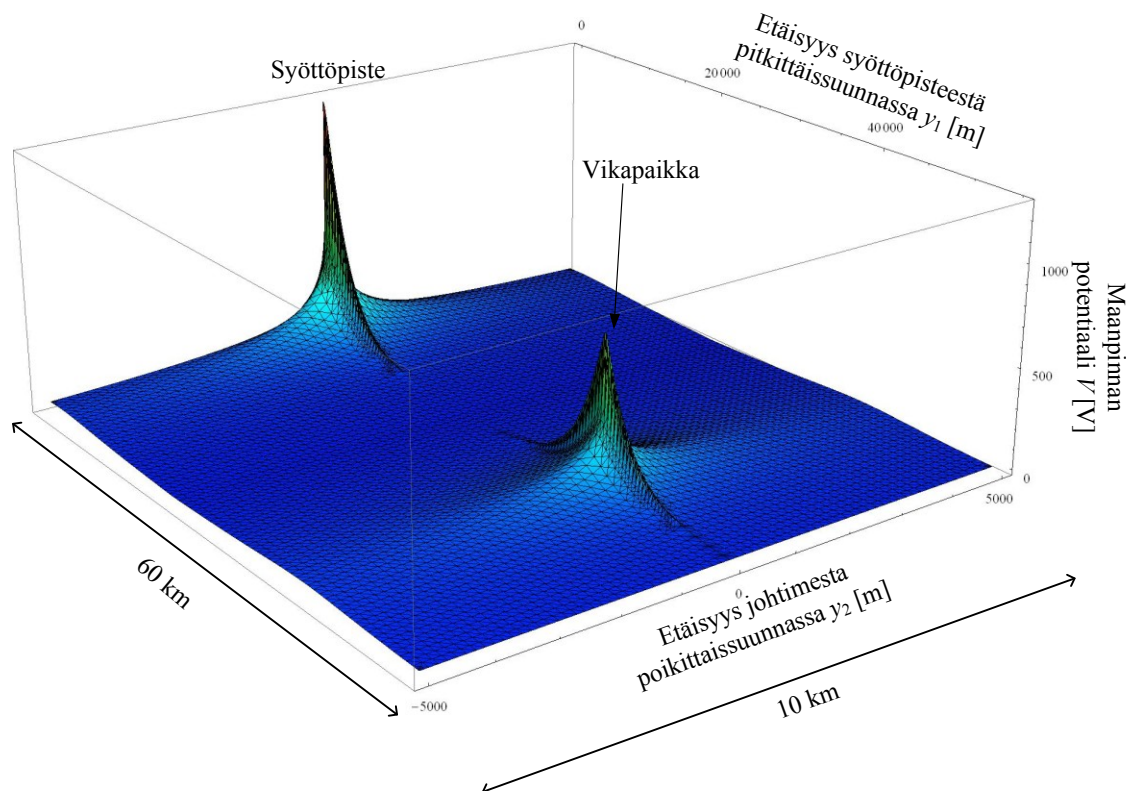
jossa  $\underline{i}'(s)$  on yhtälö (30),  $h$  on maajohtimen upotussyvyys ja  $r(s)$  kuvaa maanpinnan pisteen  $(y_1, y_2)$  ja maajohtimella kohdassa  $s$  sijaitsevan pistemäisen virtalähteen välistä etäisyyttä maanpintaa pitkin. Etäisyyttä  $r(s)$  saadaan laskettua seuraavasti:

$$r(s) = \sqrt{(s - y_1)^2 + y_2^2}. \quad (33)$$



Kuva 23: Maanpinnan potentiaalin laskeminen.

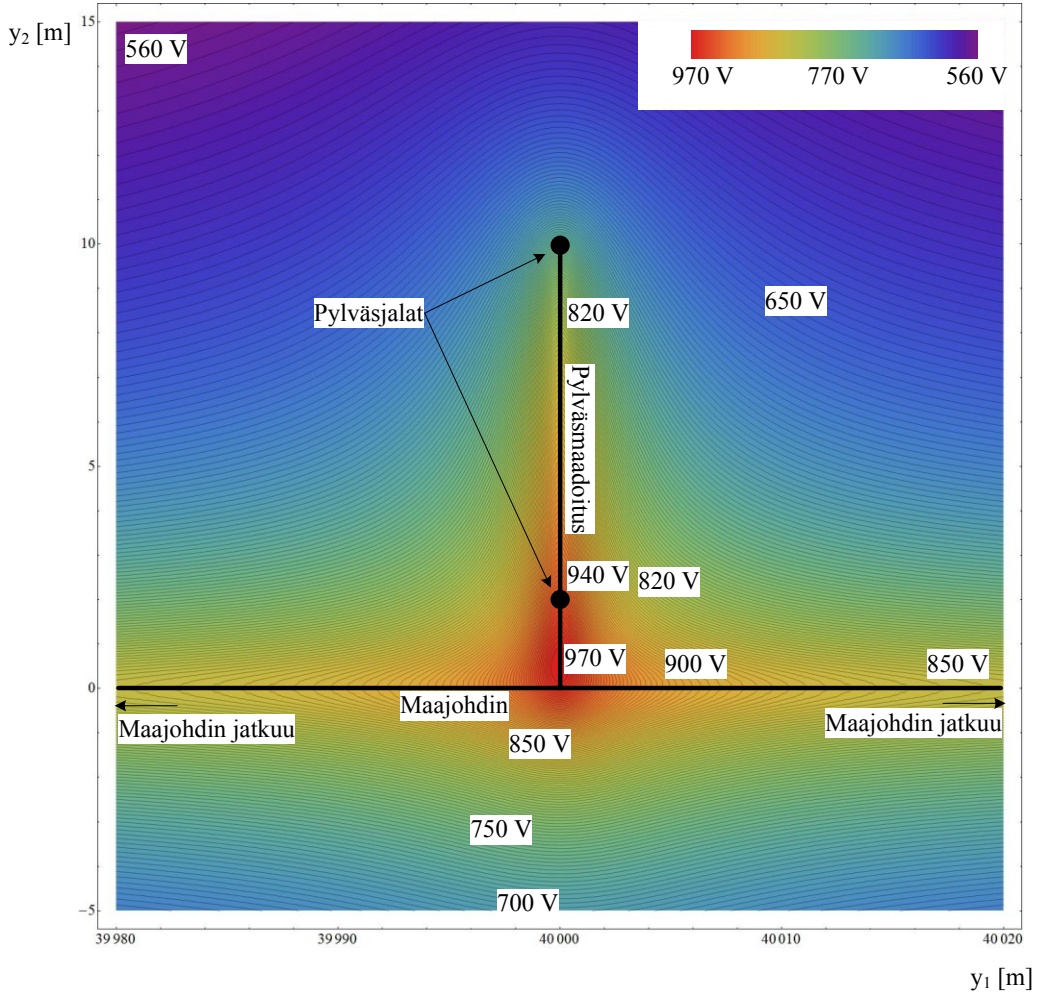
Yhtälö (32) perustuu ajatukseen, että maanpinnan potentiaalin nousu muodostuu äärettömän monen maajohtimella sijaitsevan pistemäisen virtalähteen yhteisvaikutuksesta. Yhtälön (32) mukainen maanpinnan potentiaali voidaan laskea numeerisesti integroimalla. Kuvassa 24 on esitetty itseisarvona numeerisesti ratkaistu maanpinnan potentiaali maajohtimen ympäristössä, kun vika tapahtuu 40 km:n päässä syöttöpisteestä.



Kuva 24: Maanpinnan potentiaali maajohtimen ympäristössä. Maajohdin on metrin syvyyteen upotettu kuparijohdin, jonka poikkipinta-ala on  $25 \text{ mm}^2$ . Maasulkuvirta on  $1 \text{ kA}$ , maaperän resistiivisyys on  $2000 \Omega\text{m}$  ja maajohtimen reduktiokerroin on  $0,8$ .

Kuvan 24 mukaisesti maanpinnan potentiaalin nousu leviää vikapaikan ympärillä hyvin laajalle alueelle. Vikapaikan lisäksi myös syöttöpisteen lähelle muodostuu potentiaalisuppilo. Todellisuudessa syöttöpisteessä on syöttöaseman maadoitus, joten sen ympärille ei muodostu yhtä suurta potentiaalisuppiloa kuin kuvassa 24 esitetään.

Jos vikaantuneella pylväällä on maajohtimen lisäksi oma maadoitus, tämän maadoituksen vaikutus tulee huomioida, kun lasketaan maanpinnan potentiaalia hyvin lähellä vikapaikkaa. Maanpinnan potentiaali hyvin lähellä vikapaikkaa pitää tuntea, jos lasketaan esimerkiksi kosketusjännitteitä. Laskennassa voidaan olettaa, että vikaantuneen pylvään pylväsmaadoituksesta menee maahan virtaa pituutta kohden saman verran kuin maajohtimesta vikapaikan kohdalla. Kuvassa 25 on esitetty numeerisesti laskettu maanpinnan potentiaali läpimenevällä maajohtimella varustetun johdon vikaantuneen pylvään lähellä, kun vikaantuneella pylväällä on pylväsjalat yhdistävä perusmaadoitus. Kuva on saatu käyttämällä yhtälöä (32) ja huomioimalla pylväsmaadoituksen vaikutus luvussa 4.2.2 esitettävän menetelmän avulla.



Kuva 25: Maanpinnan potentiaali vikapaikan lähellä ylhäältä päin katsottuna, kun vika tapahtuu 40 km:n päässä syöttöasemalta ja pylväsmaadoituksen vaikutus on huomioitu. Maajohdin on metrin syvyyteen upotettu kuparijohdin, jonka poikkipinta-ala on  $25 \text{ mm}^2$ . Maasulkuvirta on  $1 \text{ kA}$ , maaperän resistiivisyys on  $2000 \Omega\text{m}$  ja maajohtimen reduktiokerroin on  $0,8$ .

#### 4.1.4 Maadoitusjännitteen, vaarajännitteiden ja maadoitusimpedanssin laskeminen

Ukkosjohtimettoman läpimenevällä maajohtimella varustetun johdon yksittäisen pylvään maadoitusjännite  $\underline{U}_E$  saadaan ratkaistua yhtälöstä (31) sijoittamalla siihen  $s = l_f$ . Maadoitusjännite on

$$\underline{U}_E = 3\underline{I}_D \cdot \underline{k} \cdot \underline{\gamma} \cdot \frac{\coth(\underline{\gamma}(l - l_f))}{2g}. \quad (34)$$

Jos maadoitusjohdin on pitkä, yhtälön termi  $\coth(\underline{\gamma}(l - l_f)) \approx 1$ . Näin ollen maadoitusjännite  $\underline{U}_E$  on likimäärin

$$\underline{U}_E = 3I_0 \cdot \underline{k} \cdot \frac{\gamma}{2g} = 3I_0 \cdot \underline{k} \cdot \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\underline{Z}}{g}}. \quad (35)$$

Kun tunnetaan vikaantuneen pylvään maadoitusjännite ja maanpinnan potentiaali pylvään läheisyydessä, kosketusjännitteet voidaan laskea luvussa 3.3 esitetyllä yhtälöllä (18). Askeljännitteet saadaan vastaavasti luvussa 3.4 esitetyllä yhtälöllä (21).

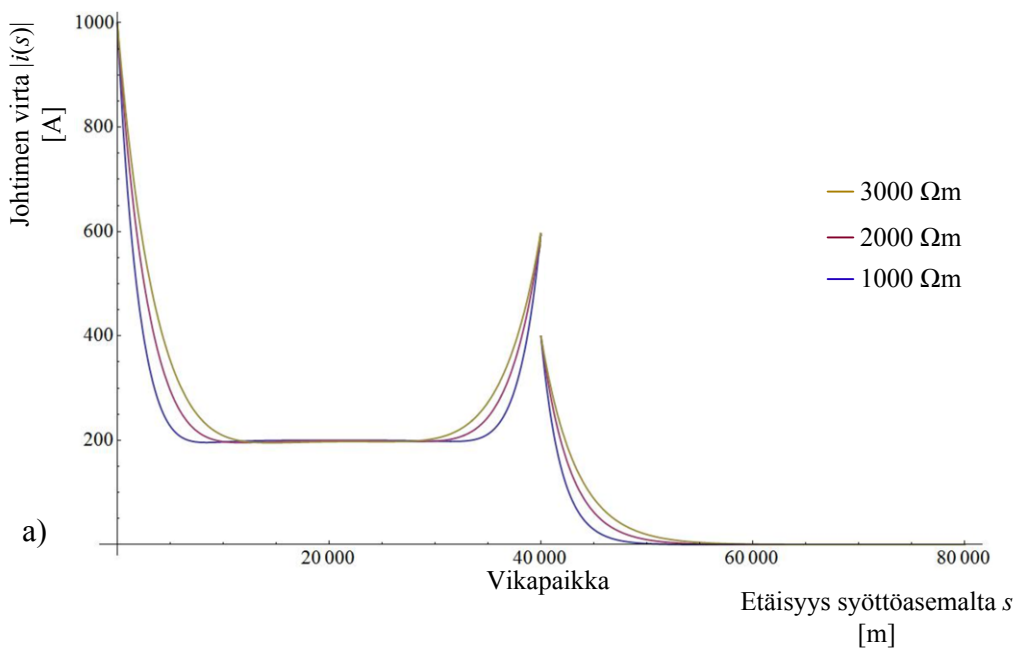
Jakamalla maadoitusjännite  $\underline{U}_E$  maasulkuvirran maahan menevällä osalla  $3I_0 \cdot \underline{k}$  voidaan laskea jokaisen riittävän kaukana syöttö- ja vasta-asehasta olevan pylvään maadoitusimpedanssi  $\underline{Z}_E$ . Maadoitusimpedanssi on

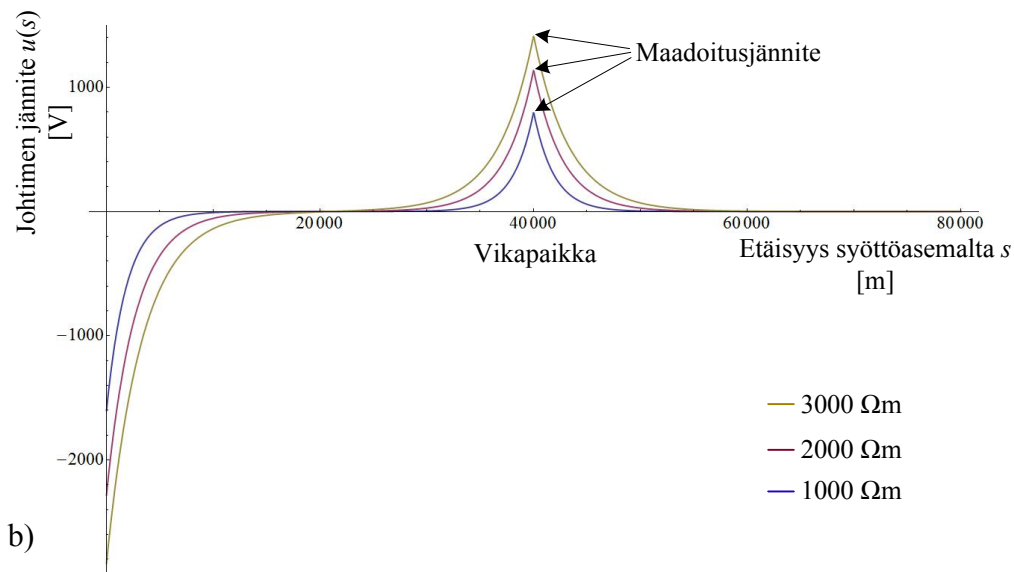
$$\underline{Z}_E = \frac{\underline{U}_E}{3I_0 \cdot \underline{k}} = \frac{\gamma}{2g} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\underline{Z}}{g}}. \quad (36)$$

Yhtälö (36) on samanlainen kuin aiemmissa tutkimuksissa on todettu. Esimerkiksi Pesonen et al. [24, s. 3] ovat esittäneet yhtälöä (36) vastaavia tuloksia.

#### 4.1.5 Maan resistiivisyyden, vikapaikan ja maajohtimen ominaisuuksien vaikutus maasulkutilanteessa

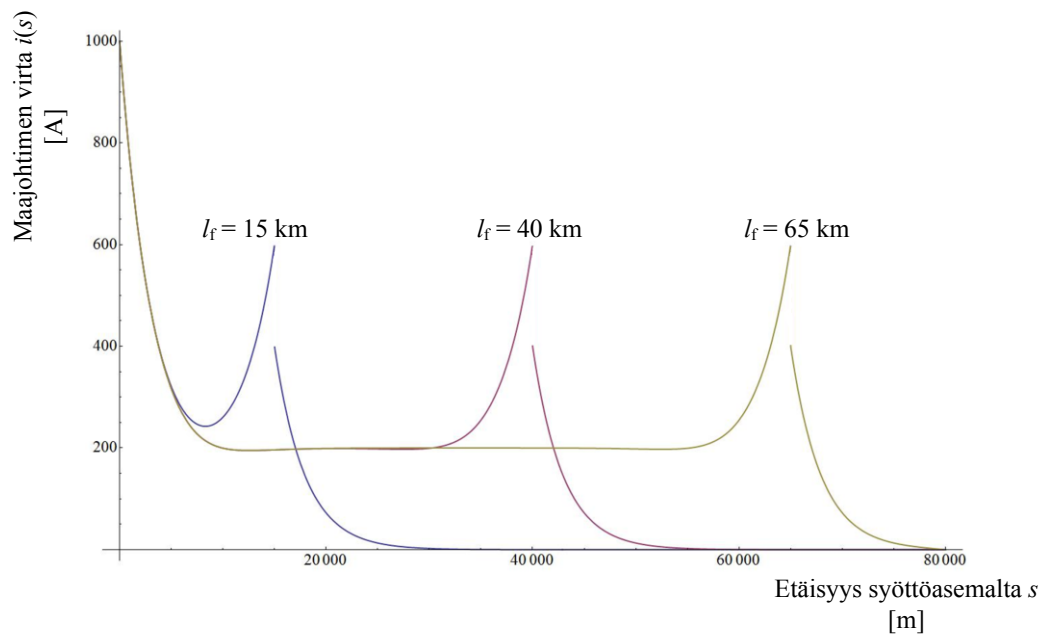
Mikäli maaperän resistiivisyys on pieni, virta menee maajohtimesta lyhyemmällä matkalla maahan. Maadoitusjännite, maadoitusimpedanssi, maanpinnan potentiaalinen nousu ja vaarajännitteet jäävät hyvin johtavassa maassa pieniksi. Kuva 26 esittää maajohtimen virran ja jännitteen erilaisilla maaperän resistiivisyyden arvoilla, kun vika tapahtuu 40 km:n päässä syöttöpisteestä. Kuva 26 a) on esitetty alla ja kuva 26 b) seuraavalla sivulla.





Kuva 26: Maaperän resistiivisyyden vaikutus a) johtimen virtaan ja b) johtimen jännitteeseen. Maajohdin on metrin syvyyteen upotettu kuparijohdin, jonka poikkipinta-ala on  $25 \text{ mm}^2$ . Maasulkuvirta on  $1 \text{ kA}$  ja maajohtimen reduktiokerroin on  $0,8$ .

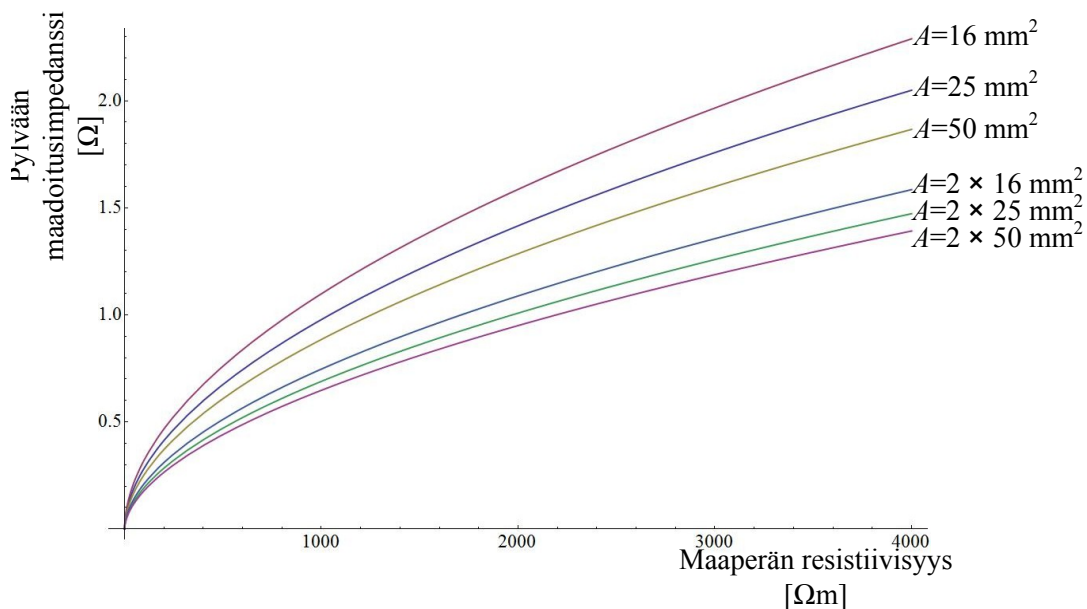
Vikapaikalla ei ole juurikaan vaikutusta vaarajännitteiden suuruuteen, jos maaperän resistiivisyyden oletetaan pysyvän likimain vakiona koko johdon matkalla ja vika tapahtuu kaukana, esimerkiksi yli kymmenen kilometrin päässä syöttöpisteestä. Jos vika kuitenkin sattuu hyvin lähellä syöttöpistettä, suuri osa vikavirrasta palaa takaisin tähtipisteeseen käymättä lainkaan maassa. Tällöin myös vaarajännitteet jäävät pienemmiksi verrattuna tilanteeseen, jossa vika sattuu kaukana syöttöpisteestä. Kuva 27 esittää maajohtimen virran, kun vikapaikka on etäisyydellä  $15 \text{ km}$ ,  $40 \text{ km}$  ja  $65 \text{ km}$  syöttöpisteestä.



Kuva 27: Vikapaikan vaikutus johtimen virtaan. Maajohdin on metrin syvyyteen upotettu kuparijohdin, jonka poikkipinta-ala on  $25 \text{ mm}^2$ . Maasulkuvirta on  $1 \text{ kA}$ , maaperän resistiivisyys on  $2000 \text{ Ohm}\cdot\text{m}$  ja maajohtimen reduktiokerroin on  $0,8$ .



Vaarajännitteiden kannalta paksumpi maajohdin on turvallisempi kuin ohut johdin. Mitä pienempi resistanssi maajohtimella on, sitä pienemmäksi maasulun aikaiset vaarajännitteet jäävät. Tämä johtuu siitä, että maasulkuvirta pysyy pidemmän matkan johtimessa, jolla on pieni resistanssi. Lisäksi resistanssin pienentäminen pienentää maajohtimen maadoitusimpedanssia ja parantaa reduktiokerrointa. Kuvassa 28 on esitetty yhden tai kahden maajohtimen maadoitusimpedanssi maaperän resistiivisyyden funktiona. Taulukossa 7 on esitetty yhden tai kahden maajohtimen reduktiokertoimia.



Kuva 28: Laskettu maajohtimen tai maajohtimien maadoitusimpedanssi maaperän resistiivisyyden funktiona, kun maajohtimet on tehty kuparista ja upotettu metrin syvyyteen. Jos maajohtimia on kaksi, niiden välinen etäisyys on 10 m.

Taulukko 7: Laskettuja maajohtimien reduktiokertoimia, kun maajohtimet on tehty kuparista ja upotettu metrin syvyyteen. Johtimien geometrinen keskietäisyys virtajohtimista on 20 m. Jos maajohtimia on kaksi, niiden välinen etäisyys on 10 m.

Maajohtimen poikkipinta-ala [mm <sup>2</sup> ]	Maan resistiivisyys [ $\Omega$ m]	Reduktiokerroin
16	100	0,87 $\angle$ -8°
	1000	0,85 $\angle$ -10°
	2000	0,84 $\angle$ -11°
	10000	0,82 $\angle$ -12°
25	100	0,81 $\angle$ -8°
	1000	0,77 $\angle$ -10°
	2000	0,76 $\angle$ -11°
	10000	0,74 $\angle$ -13°
50	100	0,73 $\angle$ -5°
	1000	0,68 $\angle$ -7°
	2000	0,67 $\angle$ -8°
	10000	0,64 $\angle$ -9°
2x16	100	0,77 $\angle$ -13°
	1000	0,72 $\angle$ -16°
	2000	0,71 $\angle$ -17°
	10000	0,68 $\angle$ -19°
2x25	100	0,68 $\angle$ -12°
	1000	0,62 $\angle$ -15°
	2000	0,61 $\angle$ -16°
	10000	0,58 $\angle$ -18°
2x50	100	0,59 $\angle$ -7°
	1000	0,53 $\angle$ -9°
	2000	0,51 $\angle$ -10°
	10000	0,48 $\angle$ -11°

#### 4.1.6 Maasulkutilanne ja vaarajännitteet maajohtimen katkettua

Maajohtimen katkeamisella on oleellinen vaikutus vaarajännitteisiin. Vaarajännitteet ovat suurimmat, kun maajohdin on mennyt poikki aivan vikaantuneen pylvään vierestä syöttöaseman puolelta. Tällöin koko maasulkuvirta lähtee maajohtimessa vasta-aseman suuntaan, eikä reduktiovaikutus pienennä vaarajännitteitä.

Poikki menneen maajohtimen virralle  $\underline{i}_B(s)$ , maassa kulkevalle virralle  $\underline{i}_{BE}(s)$ , maahan menevälle virralle  $\underline{i}'_B(s)$  ja maajohtimen jännitteelle  $\underline{u}_B(s)$  etäisyyden  $s$  funktiona voidaan johtaa samantyyppiset yhtälöt kuin aiemmin ehjälle johtimelle. Seuraavat yhtälöt on saatu ratkaisemalla luvussa 4.1.2 esitetty yhtälö (25) ja huomioimalla reuna-ehtoina, että koko maasulkuvirta lähtee maajohtimessa vikapaikasta vasta-aseman suuntaan ja palaa ennen syöttöpistettä takaisin maajohtimeen.

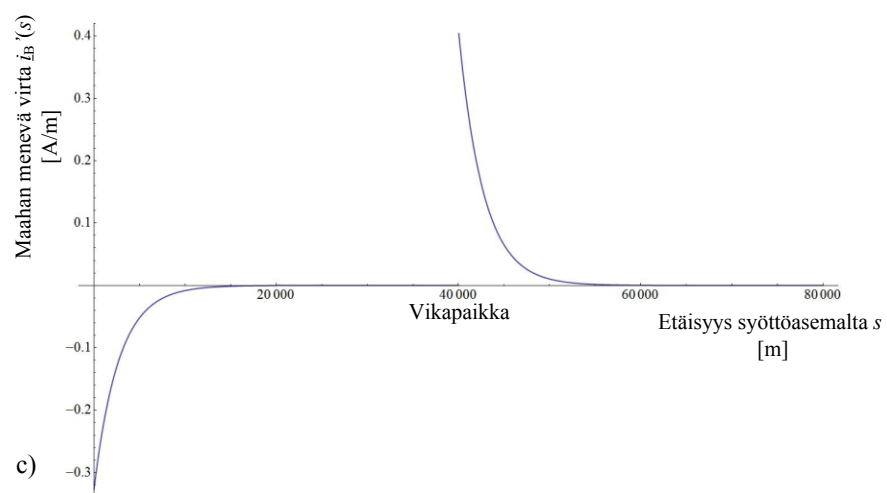
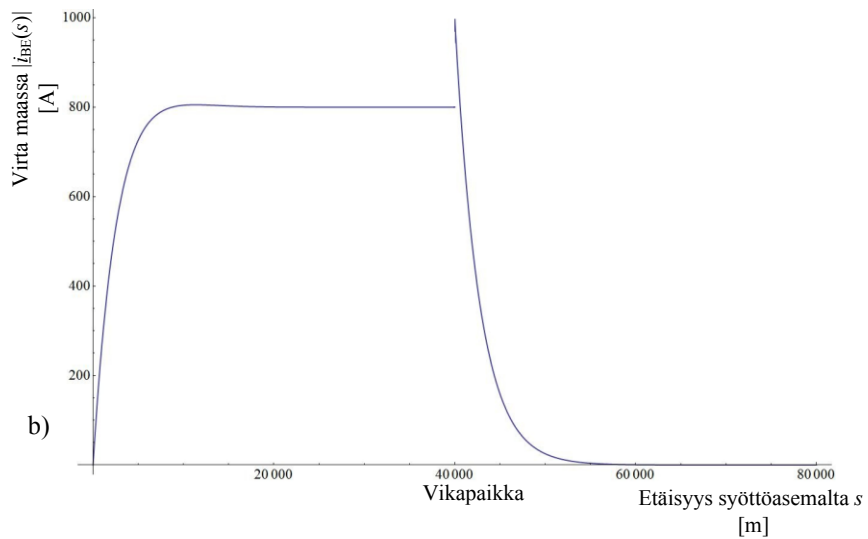
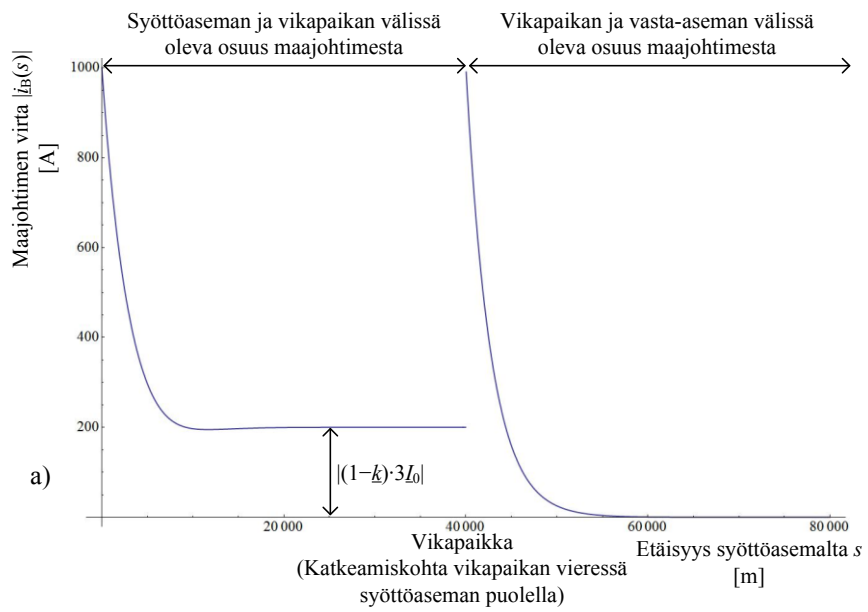
$$\underline{i}_B(s) = \begin{cases} 3I_0 \cdot \underline{k} \cdot \frac{\sinh(\underline{\gamma}(l_f-s))}{\sinh(\underline{\gamma}l_f)} + 3I_0 \cdot (1-k), & 0 < s < l_f \\ -3I_0 \cdot \frac{\sinh(\underline{\gamma}(l-s))}{\sinh(\underline{\gamma}(l-l_f))}, & l_f \leq s < l \end{cases} \quad (37)$$

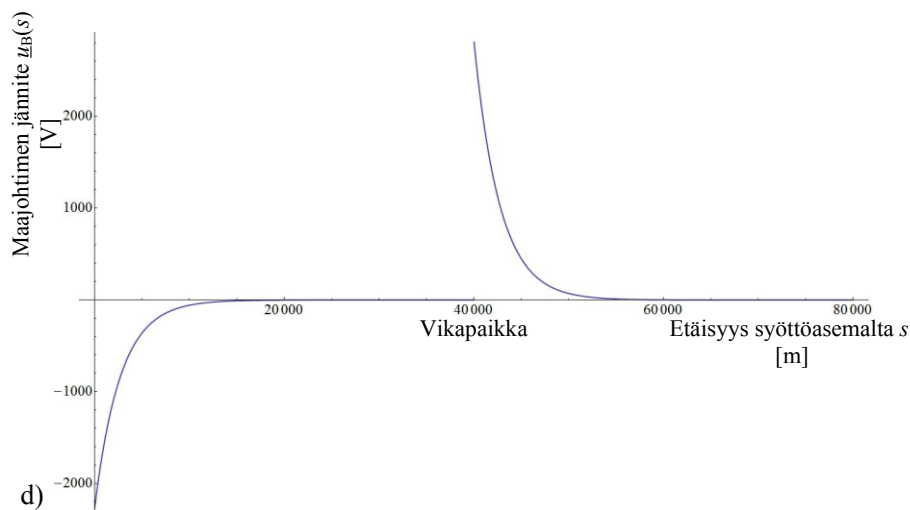
$$\underline{i}_{BE}(s) = \begin{cases} 3I_0 \cdot \underline{k} \cdot \left(1 - \frac{\sinh(\underline{\gamma}(l_f-s))}{\sinh(\underline{\gamma}l_f)}\right), & 0 < s < l_f \\ 3I_0 \cdot \frac{\sinh(\underline{\gamma}(l-s))}{\sinh(\underline{\gamma}(l-l_f))}, & l_f \leq s < l \end{cases} \quad (38)$$

$$\underline{i}'_B(s) = \begin{cases} -3I_0 \cdot \underline{k} \cdot \underline{\gamma} \cdot \frac{\cosh(\underline{\gamma}(l_f-s))}{\sinh(\underline{\gamma}l_f)}, & 0 < s < l_f \\ 3I_0 \cdot \underline{\gamma} \cdot \frac{\cosh(\underline{\gamma}(l-s))}{\sinh(\underline{\gamma}(l-l_f))}, & l_f \leq s < l \end{cases} \quad (39)$$

$$\underline{u}_B(s) = \begin{cases} -3I_0 \cdot \underline{k} \cdot \underline{\gamma} \cdot \frac{\cosh(\underline{\gamma}(l_f-s))}{g \cdot \sinh(\underline{\gamma}l_f)}, & 0 < s < l_f \\ 3I_0 \cdot \underline{\gamma} \cdot \frac{\cosh(\underline{\gamma}(l-s))}{g \cdot \sinh(\underline{\gamma}(l-l_f))}, & l_f \leq s < l \end{cases} \quad (40)$$

Yhtälöissä (37) – (40) esiintyvät parametrit  $\underline{k}$ ,  $\underline{\gamma}$  ja  $g$  ovat samoja kuin ehjän maajohtimen vastaavat parametrit. Kahdella seuraavalla sivulla kuvassa 29 on esitetty yhtälöillä (37) – (40) laskettu poikki menneen maajohtimen virta, maassa kulkeva virta, maahan menevä virta ja maajohtimen jännite, kun vika sattuu 40 km:n etäisyydellä syöttöasemasta 80 km pitkällä johdolla ja maasulkuvirta on 1 kA. Kuvassa 29 c) positiiviset arvot kuvaavat johtimesta maahan menevää virtaa ja negatiiviset arvot johtimeen palaa-vaa virtaa.





Kuva 29: a) Poikki menneessä maajohtimessa kulkeva virta, b) maassa kulkeva virta, c) maahan menevä virta ja d) maajohtimen jännite. Käyrät kuvaavat tilannetta, jossa maaperän resistiivisyys on  $2000 \Omega\text{m}$ , reduktiokerroin on  $0,8$  ja maajohdin on metrin syvyyteen upotettu kuparijohdin, jonka poikkipinta-ala on  $25 \text{ mm}^2$ .

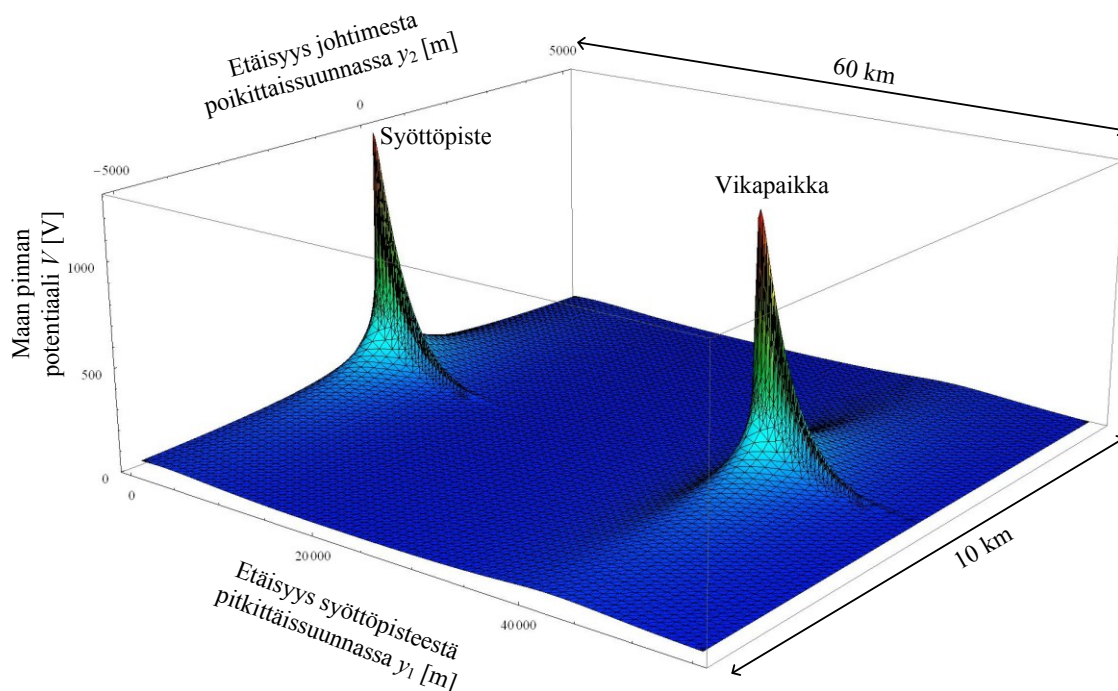
Kuvan 29 mukaisesti vikapaikan ja syöttöaseman välisessä osassa maajohdinta kulkee reduktiovirtaa. Tämä reduktiovirta johtuu siitä, että arvon  $(1 - k) \cdot 3I_0$  suuruisen osa maassa kulkevasta virrasta palaa maajohtimeen kuvan 29 a) mukaisesti, vaikka maajohdin olisikin poikki. Todellisuudessa koko reduktiovirta ei kuitenkaan palaa maajohtimeen heti katkeamispaikan kohdalla, vaan palaaminen tapahtuu usean kilometrin matkalla.

Vaikka maajohdin menisi poikki, pylväiden maadoitusimpedanssit pysyvät pieninä, koska maajohdinta jää jäljelle pitkä osa katkeamispaikasta kumpaankin suuntaan. Poikki menneen maajohtimen maadoitusjännitteen ja maadoitusimpedanssin yhtälöt saadaan määritettyä vastaavalla tavalla kuin luvussa 4.1.4. Poikki menneen maajohtimen maadoitusjännite  $\underline{U}_{BE}$  ja maadoitusimpedanssi  $\underline{Z}_{BE}$  ovat:

$$\underline{U}_{BE} = 3I_0 \cdot \frac{\gamma}{g} = 3I_0 \sqrt{\frac{z}{g}}, \quad (41)$$

$$\underline{Z}_{BE} = \frac{\underline{U}_{BE}}{3I_0} = \frac{\gamma}{g} = \sqrt{\frac{z}{g}}. \quad (42)$$

Maanpinnan potentiaalin nousu ja vaarajännitteet poikki menneen maajohtimen ympäristössä voidaan laskea samoilla menetelmillä kuin luvuissa 4.1.3 ja 4.1.4. Kuva 30 esittää maanpinnan potentiaalin itseisarvona poikki menneen maajohtimen ympäristössä, kun vika sattuu katkeamiskohdan vieressä  $40 \text{ km}$ :n etäisyydellä syöttöasemasta  $80 \text{ km}$  pitkällä johdolla.



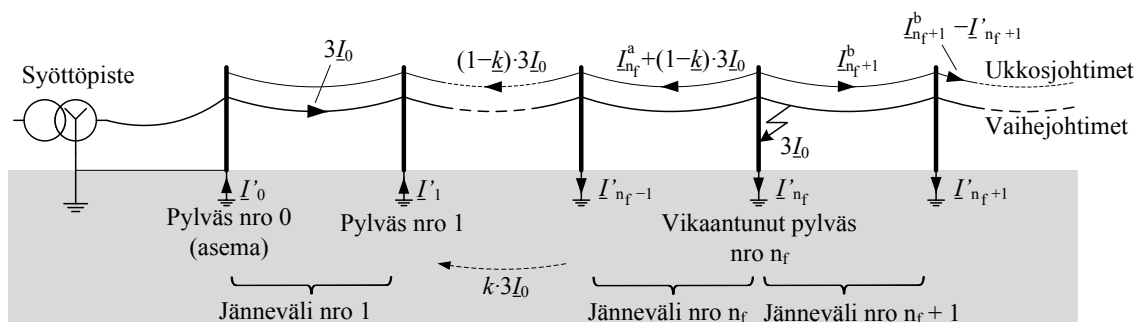
Kuva 30: Maanpinnan potentiaali katkenneen maajohtimen ympäristössä, kun maasulkuvirta on 1 kA, maaperän resistiivisyys on  $2000 \Omega\text{m}$  ja reduktiokerroin on 0,8. Maajohdin on metrin syvyyteen upotettu kuparijohdin, jonka poikkipinta-ala on  $25 \text{ mm}^2$ .

Kuvan 30 mukaisesti maanpinnan potentiaali vikapaikan lähellä on merkittävästi suurempi tapauksessa, jossa maajohdin on poikki kuin tapauksessa, jossa maajohdin on ehjä. Vikapaikan lisäksi myös syöttöpisteen lähelle muodostuu potentiaalisuppilo. Todellisuudessa syöttöpisteessä on aseman maadoitus, joten sen ympärille muodostuva potentiaalisuppilo ei ole yhtä korkea kuin kuvassa 30 esitetään.

## 4.2 Ukkosjohtimellinen johto

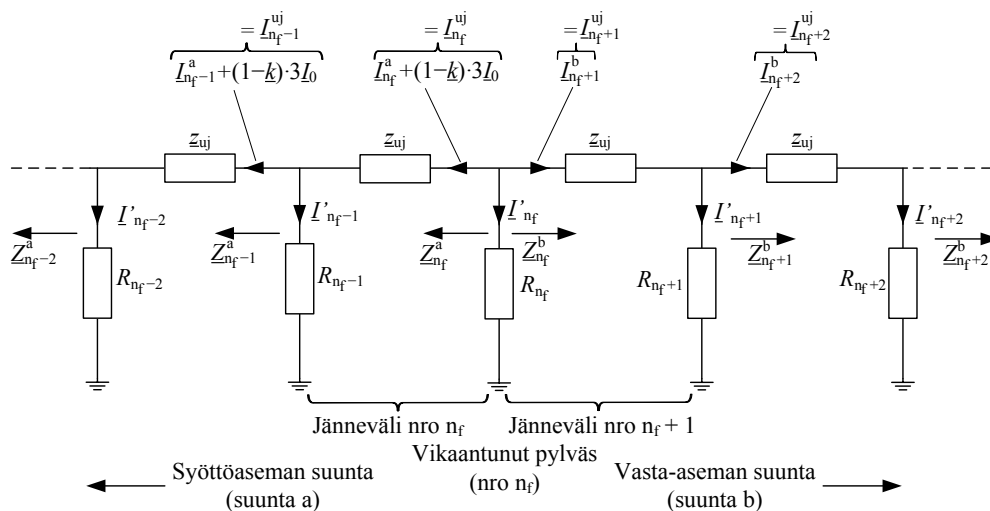
### 4.2.1 Maasulku ukkosjohtimellisella johdolla

Ukkosjohtimellisen johdon maasulkutilanteessa osa virrasta menee vikaantuneen pylvään maadoituksesta maahan ja loppuosa menee ukkosjohtimiin. Ukkosjohtimiin menevä virta menee maahan vikapaikan ympärillä olevien pylväiden maadoitusten kautta. Reduktiovirta pysyy kuitenkin ukkosjohtimissa koko matkan vikapaikasta syöttöpisteeseen. Kuvassa 31 on havainnollistettu maasulkuvirran jakaantumista ukkosjohtimellisellä johdolla, kun johto on säteittäiskäytössä.



Kuva 31: Maasulkuvirran jakaantuminen ukkosjohtimellisella johdolla, kun vika sattuu pylväällä numero  $n_f$ . Virta  $I'_{n_f}$  on vikaantuneelta pylväältä maahan menevä virta. Virrat  $I_{n_f}^a$  ja  $I_{n_f}^b$  ovat vikaantuneelta pylväältä ukkosjohtimia pitkin syöttö- ja vasta-aseman suuntaan lähtevät virrat, jotka menevät vikapaikan viereisistä pylväsmaadoituksista maahan. Virta  $(1 - k) \cdot 3L_0$  on reduktiovirta, joka pysyy ukkosjohtimissa.

Jos vika sattuu kaukana syöttöasemasta, se osa maasulkuvirrasta, joka ei ole ukkosjohtimissa pysyvää reduktiovirtaa tai mene vikaantuneelta pylväältä maahan, jakaantuu vikapaikassa puoliksi kumpaankin suuntaan ukkosjohtimia pitkin lähteviin virtoihin. Tällöin jakaantuneet virrat vikaantuneen pylvään kohdalla ovat kuvan 31 merkinnöillä:  $I_{n_f}^a = -I_{n_f+1}^b = \frac{1}{2}(k \cdot 3L_0 - I'_{n_f})$ . Kuvassa 32 on esitetty tilanteen sijaiskytkentä virtojen laskemista varten.



Kuva 32: Sijaiskytkentä ukkosjohtimellisen johdon maasulkutilanteen virtojen laskemista varten. Kuvan merkintöjen mukaisesti  $n$  on pylvään numero ja samalla ukkosjohtimien jännevälin numero,  $R_n$  on pylvään  $n$  maadoitusresistanssi,  $z_{uj}$  on ukkosjohtimien maapaluuimpedanssi jänneväliä kohden,  $Z_{n_f}^a$  on pylväältä  $n$  näkyvä ukkosjohtimien ja pylväsmaadoitusten muodostama ketjuimpedanssi syöttöaseman suuntaan ja  $Z_{n_f}^b$  on pylväältä  $n$  näkyvä ketjuimpedanssi vasta-aseman suuntaan. Virrat  $I'_n$  ovat pylväältä numero  $n$  maahan meneviä virtoja. Virrat  $I_{n_f}^a$  ja  $I_{n_f}^b$  ovat ukkosjohtimissa syöttö- ja vasta-aseman suuntaan jännevälillä  $n$  kulkevia virtoja, jotka menevät vikapaikan viereisistä pylväsmaadoituksista maahan. Virta  $(1 - k) \cdot 3L_0$  on reduktiovirta, joka pysyy ukkosjohtimissa. Virrat  $I_n^{uj}$  ovat ukkosjohtimissa jännevälillä  $n$  kulkevia kokonaisvirtoja.

Tässä työssä kehitettiin menetelmä, jossa pylväältä maahan menevät virrat ja ukkosjohtimissa kulkevat virrat lasketaan virranjaolla. Menetelmässä lasketaan jokaisen

pylvään kohdalla virranjaolla, kuinka suuri osa ukkosjohtimissa kulkevasta virrasta menee tarkasteltavan pylvään maadoituksesta maahan ja kuinka suuri osa jatkaa ukkosjohtimissa. Kun käytetään kuvan 32 merkintöjä, virranjakosäännöllä laskettu vikaantuneelta pylväältä maahan menevä virta on

$$\underline{I}'_{n_f} = \frac{\frac{\underline{Z}_{n_f}^a \cdot \underline{Z}_{n_f}^b}{\underline{Z}_{n_f}^a + \underline{Z}_{n_f}^b}}{R_{n_f} + \frac{\underline{Z}_{n_f}^a \cdot \underline{Z}_{n_f}^b}{\underline{Z}_{n_f}^a + \underline{Z}_{n_f}^b}} \underline{k} 3 \underline{I}_0 . \quad (43)$$

Yleisesti avojohdon pylväältä numero  $n$  maahan menevä virta  $\underline{I}'_n$  ja ukkosjohtimissa jänneväliä  $n$  kulkeva kokonaisvirta  $\underline{I}_n^{uj}$  voidaan laskea seuraavasti:

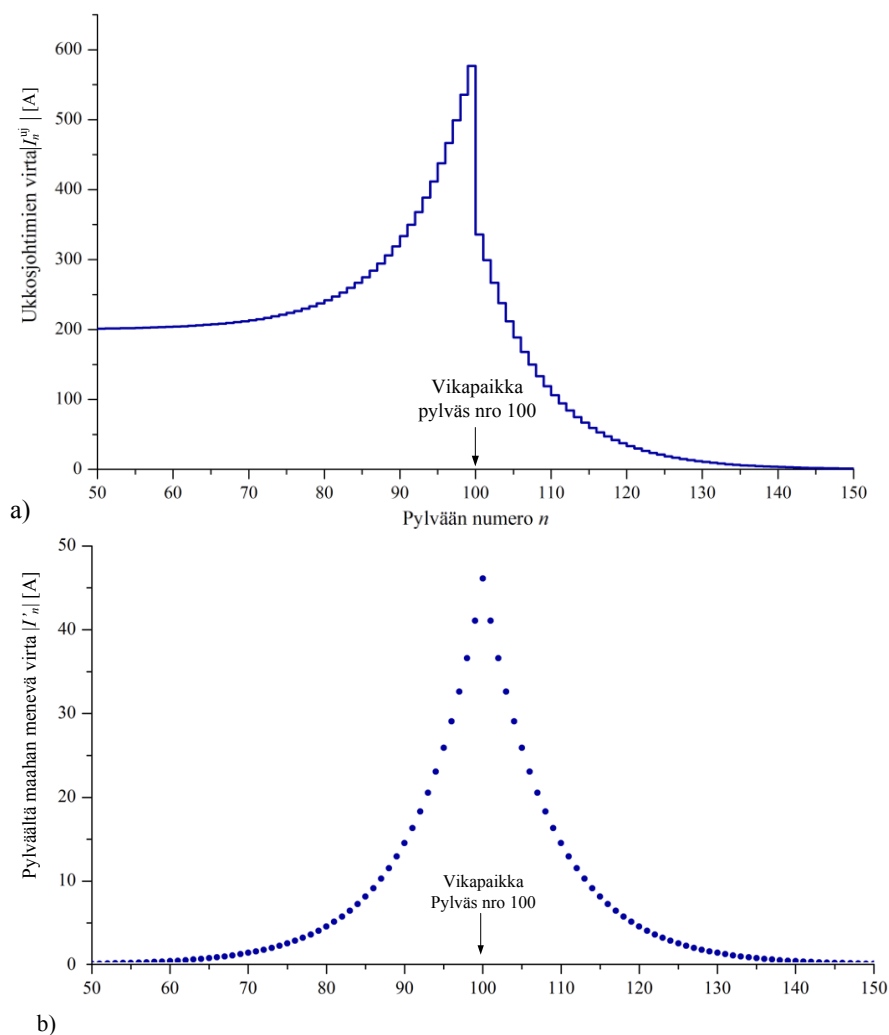
$$\underline{I}'_n = \begin{cases} \frac{\underline{Z}_n^a}{R_n + \underline{Z}_n^a} \underline{I}_{n+1}^a, & n < n_f \\ \underline{I}'_{n_f}, & n = n_f \\ \frac{\underline{Z}_n^b}{R_n + \underline{Z}_n^b} \underline{I}_n^b, & n > n_f \end{cases} , \quad (44)$$

$$\underline{I}_n^{uj} = \begin{cases} \underline{I}_{n+1}^{uj} - \underline{I}'_n, & n < n_f \\ \frac{1}{2} (\underline{k} \cdot 3 \underline{I}_0 - \underline{I}'_{n_f}) + (1 - \underline{k}) \cdot 3 \underline{I}_0, & n = n_f \\ \frac{1}{2} (\underline{k} \cdot 3 \underline{I}_0 - \underline{I}'_{n_f}), & n = n_f + 1 \\ \underline{I}_{n-1}^{uj} - \underline{I}'_{n-1}, & n > n_f + 1 \end{cases} . \quad (45)$$

Yhtälöt (44) ja (45) eivät päde enää syöttöaseman lähellä, jossa virta alkaa palata pylväsmaadoitusten kautta ukkosjohtimiin.

Seuraavalla sivulla kuvassa 33 a) esitetään edellä kuvatulla menetelmällä laskettu ukkosjohtimien kokonaisvirta ja kuvassa 33 b) pylväältä maahan menevän virta, kun vika tapahtuu pylväällä numero 100.





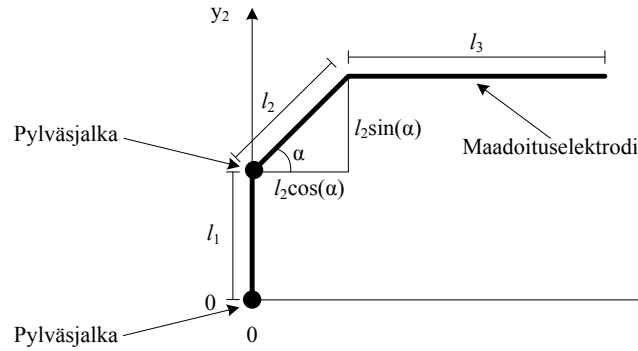
Kuva 33: a) Ukkosjohtimien virta ja b) pylväältä maahan menevä virta, kun vika sattuu pylväällä numero 100. Jokaisen pylvään maadoitusresistanssi on  $30 \Omega$ , ukkosjohtimien reduktiokerroin on  $0,8$  ja ukkosjohtimien maapaluuimpedanssi jännevälillä kohden on  $0,4 \Omega$ . Maasulkuvirta on  $1 \text{ kA}$ .

Kuvan 33 b) mukaisesti vikaantuneelta pylväältä menee eniten virtaa maahan ja viereisiltä pylväiltä maahan menevän virran määrä vähenee liikuttaessa kauemmaksi vikapaikasta. Kuvan 33 mukainen maasulkuvirran jakaantuminen vastaa myös ennen tätä työtä tehtyjen tutkimusten tuloksia. Esimerkiksi Karlsson et al. [25] ja Sebo [26] ovat esittäneet vastaavia tuloksia.

#### 4.2.2 Vaarajännitteet yksittäisen pylväsmaadoituksen ympäristössä

Pylvään maadoitusjännite voidaan laskea luvussa 3.2 esitetyllä yhtälöllä (14), kun tunnetaan pylväsmaadoituksen maadoitusresistanssi ja maadoituksesta maahan menevä virta. Kosketusjännitteiden ja askeljännitteiden laskemista varten tulee lisäksi tuntea maanpinnan potentiaali pylväsmaadoituksen ympäristössä.

Tässä työssä kehitettiin maanpinnan potentiaalilaskemista varten menetelmä, jossa ajatellaan potentiaalilaskemista varten muodostuvan äärettömän monen pylväsmaadoituksella sijaitsevan pistemäisen virtalähteen yhteisvaikutuksesta. Kuvassa 34 on havainnollistettu menetelmän käyttöä.



Kuva 34: Esimerkkimaadoitus, jonka ympärillä olevaa maanpinnan potentiaalia tarkastellaan. Maadoitus koostuu perusmaadoituksesta  $l_1$  ja lisäsiteestä  $l_2+l_3$ . Maadoituksen kokonaispituus on  $l = l_1+l_2+l_3$ . Kuvassa esitetään tilanne ylhäältä päin katsottuna.

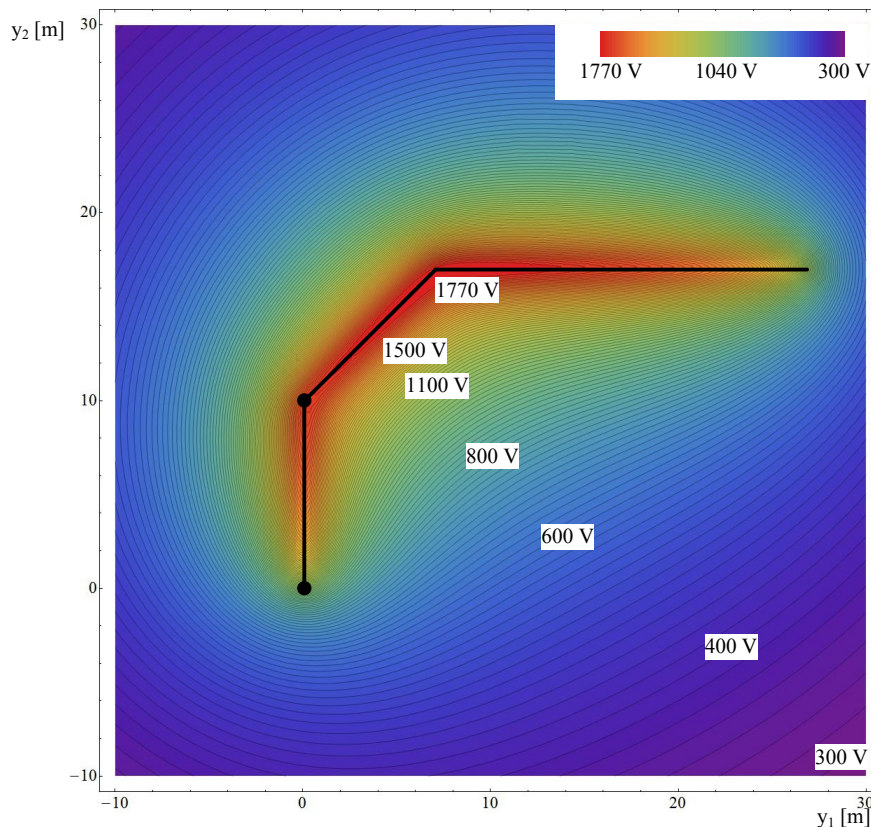
Koska yksittäinen pylväsmaadoitus on suppea, voidaan olettaa, että jännite sen yli pysyy likimain vakiona ja että maadoituksen joka kohdasta menee yhtä paljon virtaa maahan. Todellisuudessa virta pakkautuu osittain maadoituselektrodin päiden ympärille [19, s. 165–166], mutta edellä esitetyllä oletuksella päästään riittävään tarkkuuteen. Kun merkitään pylväsmaadoituksen yhteenlaskettua pituutta merkinnällä  $l$  ja maadoituksesta maahan menevää kokonaisvirtaa merkinnällä  $I'$ , virtaa menee pylväsmaadoituksesta pituutta kohden maahan arvo  $I'/l$ . Käyttämällä kuvassa 34 esitettyjä merkintöjä ja hyödyntämällä yksittäisen pistemäisen virtalähteen aiheuttamalle maanpinnan potentiaalinnousulle luvussa 3.2 esitettyä yhtälöä (15) voidaan maanpinnan potentiaalinnousu laskea esimerkkimaadoituksen ympäristössä seuraavasti:

$$V(y_1, y_2) = \frac{\rho I'}{2\pi l} \left( \int_0^{l_1} \frac{1}{\sqrt{h^2 + (r_1(s))^2}} ds + \int_0^{l_2} \frac{1}{\sqrt{h^2 + (r_2(s))^2}} ds + \int_0^{l_3} \frac{1}{\sqrt{h^2 + (r_3(s))^2}} ds \right), \quad (46)$$

jossa  $h$  on pylväsmaadoituksen upotussyvyys ja  $r_1(s)$ ,  $r_2(s)$  sekä  $r_3(s)$  kuvaavat maanpinnan pisteen  $(y_1, y_2)$  ja maadoituksen pinnalla sijaitsevaan pistelähteeseen välistä etäisyyttä maanpintaa pitkin. Etäisyydet  $r_1(s)$ ,  $r_2(s)$  ja  $r_3(s)$  saadaan seuraavasti:

$$\begin{cases} r_1(s) = \sqrt{y_1^2 + (s - y_2)^2} \\ r_2(s) = \sqrt{(s \cdot \cos\alpha - y_1)^2 + (l_1 + s \cdot \sin\alpha - y_2)^2} \\ r_3(s) = \sqrt{(l_2 \cos\alpha + s - y_1)^2 + (l_1 + l_2 \sin\alpha - y_2)^2} \end{cases} \quad (47)$$

Yhtälön 46 voi ratkaista analyyttisessä muodossa tai käyttämällä numeerista integrointia. Tässä työssä on käytetty numeerista integrointia. Kuvassa 35 on esitetty edellä kuvatulla menetelmällä laskettu maanpinnan potentiaali kuvan 34 mukaisen esimerkkimaadoituksen ympäristössä.



Kuva 35: Maanpinnan potentiaali esimerkimaadoituksen ympärillä ylhäältä päin katsottuna, kun maadoituksessa on yksi lisäsäde. Pylväismaadoituksesta maahan menevä virta on 30 A, maaperän resistiivisyys 2000  $\Omega\text{m}$  ja pylväismaadoituksen upotussyvyys 1 m.

Mikäli maaperä maadoituksen ympärillä koostuu kahdesta kerroksesta, yksittäisen pistemäisen virtalähteen aiheuttaman maanpinnan potentiaalın nousun laskemiseksi tulee käyttää luvussa 3.2 esitettyä yhtälöä (16). Tällöin maanpinnan potentiaali kuvan 34 mukaisen esimerkimaadoituksen ympäristössä voidaan laskea seuraavasti:

$$V(y_1, y_2) =$$

$$\begin{aligned} & \frac{\rho_1 l'}{2\pi l} \left[ \int_0^{l_1} \left( \frac{1}{\sqrt{h^2 + (r_1(s))^2}} + \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{\kappa^n}{\sqrt{(r_1(s))^2 + (2nh_1 - h)^2}} + \frac{\kappa^n}{\sqrt{(r_1(s))^2 + (2nh_1 + h)^2}} \right\} \right) ds + \right. \\ & \int_0^{l_2} \left( \frac{1}{\sqrt{h^2 + (r_2(s))^2}} + \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{\kappa^n}{\sqrt{(r_2(s))^2 + (2nh_1 - h)^2}} + \frac{\kappa^n}{\sqrt{(r_2(s))^2 + (2nh_1 + h)^2}} \right\} \right) ds + \\ & \left. \int_0^{l_3} \left( \frac{1}{\sqrt{h^2 + (r_3(s))^2}} + \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{\kappa^n}{\sqrt{(r_3(s))^2 + (2nh_1 - h)^2}} + \frac{\kappa^n}{\sqrt{(r_3(s))^2 + (2nh_1 + h)^2}} \right\} \right) ds \right], \quad (48) \end{aligned}$$

jossa  $\rho_1$  on ylemmän maakerroksen resistiivisyys,  $h_1$  ylemmän maakerroksen syvyys ja  $h$  pylväismaadoituksen upotussyvyys. Etäisyydet  $r_1(s)$ ,  $r_2(s)$  ja  $r_3(s)$  voidaan laskea yhtälöllä (47). Heijastuskerroin  $\kappa$  voidaan laskea luvussa 3.2 esitettyllä yhtälöllä (17).

## 5 Mitatut johdot ja mittausmenetelmät

Tässä työssä tehtiin vaarajännite- ja maadoitusvirtamittauksia kahdelle 110 kV:n voimajohdolle. Johdot olivat Kolari–Pello ja Äkäsjokisuu–Niesa. Kolari–Pello-johto on ukkosjohtimeton ja se on varustettu jokaisen pylvään maadoitukseen kytketyllä läpimenevällä maajohtimella. Niesa–Äkäsjokisuu-johto on tavallinen ukkosjohtimellinen johto. Tässä luvussa esitellään johdot, mittauspaikat sekä käytetyt mittausmenetelmät.

### 5.1 Voimajohdot Kolari–Pello ja Äkäsjokisuu–Niesa

Kolari–Pello-johto on 66 km pitkä ja se kulkee pääosin asumattomien erämaiden halki. Luvun 5.2 kuvassa 36 on esitetty Kolari–Pello-johdon johtoreitti kartalla. Kolari–Pello-johdolla ukkosjohtimet on korvattu jokaisen pylvään maadoitukseen kytketyllä läpimenevällä maajohtimella. Ukkosjohtimet on jätetty rakentamatta, koska talvisin niihin todennäköisesti kertyisi vikoja aiheuttavia jääkuormia. Kolarin ja Pellon sähköasemien lähelle on kuitenkin rakennettu ukkosjohtimet noin 2 km:n matkalle. Tähän on syynä se, että sähköasemien lähellä on pyritty estämään suurin osa suorista salamaniskuista vaihejohtimiin ja näin ollen pienentämään salamaniskujen aiheuttamia asemille tulevia syöksyaaltoja.

Kolari–Pello-johdolla läpimenevä maajohdin on metrin syvyyteen upotettu paljas kuparijohdin, jonka poikkipinta-ala on  $25 \text{ mm}^2$ . Johdon pylväille on tehty ainoastaan perusmaadoitukset, jotka yhdistävät pylväsjalat toisiinsa. Maajohdin on liitetty näihin maadoituksiin pylväsjalkojen ulkopuolelta. Liitteessä A on esitetty tarkemmin Kolari–Pello-johdon teknisiä tietoja.

Kolari–Pello-johtoa käytetään säteittäisenä ja se on kytketty käyttötilanteesta riippuen joko sammutettuun verkkoon tai maadoitettuun kantaverkkoon. Sammutetussa verkossa maasulkuvirrat ja samalla vaarajännitteet jäävät pieniksi. Mikäli johto on kytketty maadoitettuun kantaverkkoon, maasulkuvirrat ovat huomattavasti suurempia. Taulukossa 8 on esitetty lasketut maasulkuvirrat Kolari–Pello-johdolla vuoden 2011 tilanteessa, kun johto on kytketty kantaverkkoon.

*Taulukko 8: Lasketut maasulkuvirrat Kolari–Pello-johdolla, kun johto on liitetty maadoitettuun kantaverkkoon. Kantaverkon liityntäpiste on Keminmaa, jossa maasulkuvirta on 3 kA. Johdon suojausten toiminta-aika on 0,2 s.*

Vian etäisyys Pellon sähköasemasta [km]	0	13	26	40	53	66
Maasulkuvirta $3I_0$ [kA]	0,58	0,55	0,51	0,49	0,46	0,43

Toinen mitattu johto, Äkäsjokisuu–Niesa on 10,6 km pitkä ukkosjohtimellinen johto, joka yhdistää Äkäsjokisuun sähköaseman ja Niesassa sijaitsevan kytkinaseman. Luvun 5.3 kuvassa 37 on esitetty voimajohdon johtoreitti kartalla. Äkäsjokisuu–Niesa-johtoa käytetään aina säteittäisenä ja se on kytketty sammutettuun verkkoon. Näin ollen johdon maasulkuvirrat jäävät pieniksi.

Äkäsjokisuu–Niesa-johdolla lähdettäessä Äkäsjokisuun sähköasemalta ukkosjohtimet ovat 5,4 km:n verran  $2 \times$  Imatra-johdinta ( $93/39 \text{ mm}^2 \text{ Al/Fe}$ ) ja loppumatkalla ne ovat poikkipinnaltaan  $2 \times 50 \text{ mm}^2$  olevat teräsukkosjohtimet. Liitteessä B on esitetty tarkemmin Äkäsjokisuu–Niesa-johdon teknisiä tietoja.

## 5.2 Kolari–Pello-johdon mittaukset

Kolari–Pello-johdolle tehtiin mittauksia varten maasulku vuorotellen kolmeen eri paikkaan. Vikapaikoista mitattiin vaarajännitteitä sekä maajohtimeen menevää virtaa. Lisäksi voimajohdon varrelta mitattiin useasta mittauspaikasta maajohtimessa kulkevaa virtaa. Taulukossa 9 on esitetty vikapaikat ja niitä vastaavat virranmittauspaikat johdon varrella. Kuvassa 36 on esitetty kaikki mittauspaikat johtoreitillä.

Taulukko 9: Vikapaikat ja maajohtimen virran mittauspaikat Kolari–Pello-johdolla.

Vikapaikka	Mittauspaikka maajohtimen virralle	Pylvään nro	Etäisyys Kolarista [km]	Maalaji
Vikapaikka 1, Havelanpää (ehjä maajohdin): <ul style="list-style-type: none"> <li>• Pylväs nro 33</li> <li>• Etäisyys Kolarista 58,9 km</li> <li>• Maalaji moreeni</li> </ul>	Pylväs 34 etelä	34	58,7	Märkä hiekka
	Naamijoki	88	45,3	Hiekka
	Pylväs 135 pohjoinen	135	33,8	Hiekka
	Kolarin rautatiesilta	259	3,4	Suo

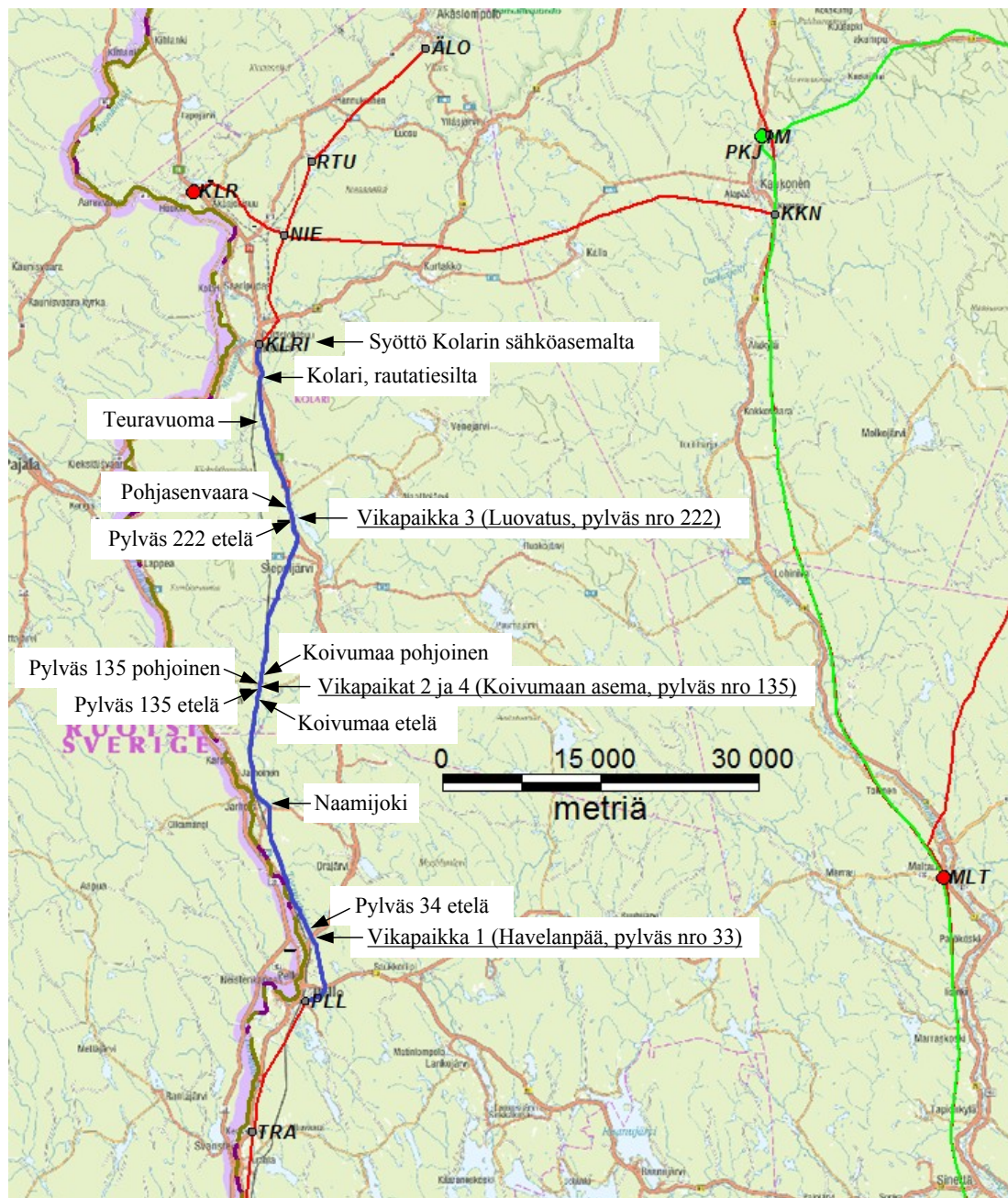
Vikapaikka 2, Koivumaan asema (ehjä maajohdin): <ul style="list-style-type: none"> <li>• Pylväs nro 135</li> <li>• Etäisyys Kolarista 33,8 km</li> <li>• Maalaji hiekka</li> </ul>	Koivumaa etelä	129	35,3	Suo
	Pylväs 135 etelä	135	33,8	Hiekka
	Pylväs 135 pohjoinen	135	33,8	Hiekka
	Koivumaa pohjoinen	140	32,6	Hiekka
	Pohjasenvaara	230	10,6	Suo
	Kolarin rautatiesilta	259	3,4	Suo

Vikapaikka 3, Luovatus (ehjä maajohdin): <ul style="list-style-type: none"> <li>• Pylväs nro 222</li> <li>• Etäisyys Kolarista 12,5 km</li> <li>• Maalaji suo</li> </ul>	Pylväs 222 etelä	222	12,5	Suo
	Pohjasenvaara	230	10,6	Suo
	Teuravuoma	254	4,6	Suo
	Kolarin rautatiesilta	259	3,4	Suo

Vikapaikka 4, Koivumaan asema (katkaistu maajohdin):* <ul style="list-style-type: none"> <li>• Pylväs nro 135</li> <li>• Etäisyys Kolarista 33,8 km</li> <li>• Maalaji hiekka</li> </ul>	Naamijoki	88	45,3	Hiekka
	Koivumaa etelä	129	35,3	Suo
	Pylväs 135 etelä	135	33,8	Hiekka
	Koivumaa pohjoinen	140	32,6	Hiekka
	Pohjasenvaara	230	10,6	Suo
	Kolarin rautatiesilta	259	3,4	Suo

\* Maajohdin katkaistiin virranmittauspaikasta Pylväs 135 pohjoinen. Katkaisukohta oli aivan vikapaikan vieressä Kolarin sähköaseman puolella.





Kuva 36: Mittauspaikat Kolarin–Pello-johdon johtoreitillä.

Kolarin–Pello-johdon vikapaikoista mitattiin:

- maajohtimeen menevä virta,
- kosketusjännitteitä pylväältä useasta kohdasta,
- kosketusjännitteet haruseristimien yli ja
- askeljännitteitä useasta kohdasta vikapaikan ympäriltä.

Lisäksi vikapaikassa Koivumaan asema mitattiin vikaantuneen pylvään maadoitusjännite. Vikapaikoissa Koivumaan asema ja Luovatus mitattiin maaperän resistiivisyys. Virranmittauspaikoissa mitattiin ainoastaan maajohtimessa kulkeva virta. Sää oli aurinkoinen tai puolipilvinen kaikkien mittausten aikana.

### 5.3 Äkäsjokisuu–Niesa-johdon mittaukset

Äkäsjokisuu–Niesa-johdolle tehtiin vuorotellen maasulku kahteen paikkaan. Vikapaikoista mitattiin vaarajännitteitä ja pylväsmaadoituksista maahan menevää virtaa. Lisäksi vikapaikan viereisiltä pylväiltä mitattiin maahan menevää virtaa. Taulukossa 10 on esitetty vikapaikat ja pylväiltä maahan menevän virran mittauspaikat. Kuvassa 37 on esitetty kaikki mittauspaikat johtoreitillä.

*Taulukko 10: Vikapaikat ja maahan menevän virran mittauspaikat Äkäsjokisuu–Niesa-johdolla.*

Vikapaikka	Mittauspaikka maahan menevälle virralle	Etäisyys Äkäsjokisuun sähköasemasta [km]	Maalaji
Vikapaikka 1, Niesa: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Pylväs nro 515</li> <li>• Vikapaikassa teräsukkosjohtimet</li> <li>• Etäisyys Äkäsjokisuulta 8,4 km</li> <li>• Maalaji suo</li> </ul>	Pylväs 513	8,8	Suo
	Pylväs 514	8,6	Suo
	Pylväs 516	8,2	Suo
	Pylväs 517	8,0	Suo

Vikapaikka 2, Äkäsjoki: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Pylväs nro 541</li> <li>• Vikapaikassa teräsalumiiniukkosjohtimet</li> <li>• Etäisyys Äkäsjokisuulta 2,5 km</li> <li>• Maalaji suo</li> </ul>	Pylväs 539	2,9	Suo
	Pylväs 540	2,7	Suo
	Pylväs 542	2,3	Suo
	Pylväs 543	2,1	Suo



Kuva 37: Äkäsjokisuu–Niesa-johtoon mittauspaikat johtoreitillä.

Äkäsjokisuu–Niesa-johtoon vikapaikoista mitattiin:

- vikaantuneelta pylväältä maahan menevä virta,
- kosketusjännitteitä pylväältä useasta kohdasta,
- kosketusjännitteet haruseristimien yli,
- askeljännitteitä useasta kohdasta vikapaikan ympäriltä ja
- ukkosjohtimissa kulkeva virta.

Lisäksi vikapaikassa Niesa mitattiin vikaantuneen pylvään maadoitusjännite. Vikapaikkojen ympärillä olevilta pylväiltä mitattiin ainoastaan niiden maadoituksista maahan menevä virta. Sää oli aurinkoinen tai puolipilvinen kaikkien mittausten aikana.

Pylväiden maadoitusresistanssien ja pylväspaikkojen maaperän resistiivisyyden mittaukset oli tehty voimajohdon rakentamisen yhteydessä 1970-luvulla. Näiden mittausten tulokset tässä työssä mitattujen pylväiden osalta on esitetty liitteessä C.

## 5.4 Mittausmenetelmät

Tässä työssä mitattiin virtoja sekä vaarajännitteitä voltti-ampeerimittarimenetelmällä. Maan resistiivisyys mitattiin Wennerin neljän piikin menetelmällä. Tässä luvussa esitellään kyseiset menetelmät.

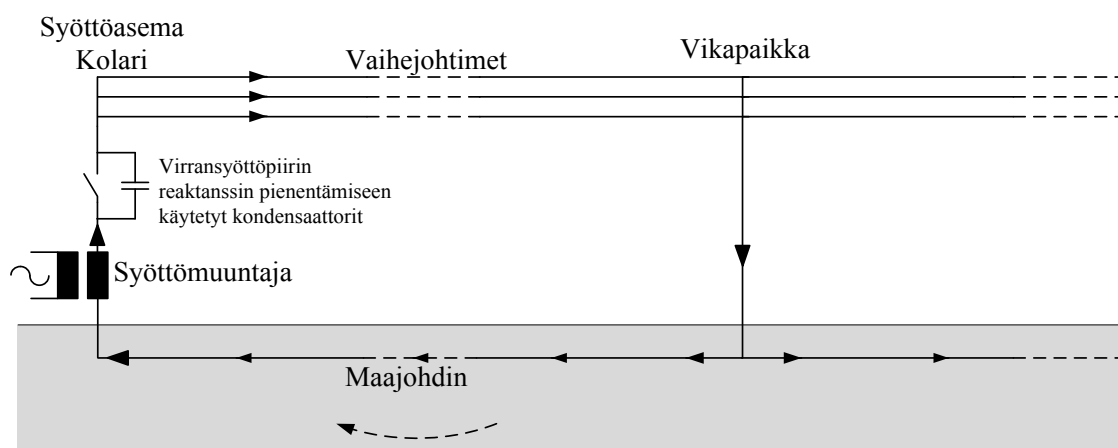
### 5.4.1 Voltti-ampeerimittarimenetelmä

Voltti-ampeerimittarimenetelmässä mittausvirta syötetään maadoitusjärjestelmään kytkemällä käyttötaajuinen tai lähellä käyttötaajuutta oleva mittausjännite mitattavan maadoituksen ja kaukana sijaitsevan vastamaadoituksen välille. Vastamaadoitus on normaalisti sähköaseman maadoitus. Virtaa syötetään yleensä avojohdon vaihejohtimia pitkin, jolloin kyseinen johto on otettava irti muusta verkosta. Mitattavasta maadoitusjärjestel-

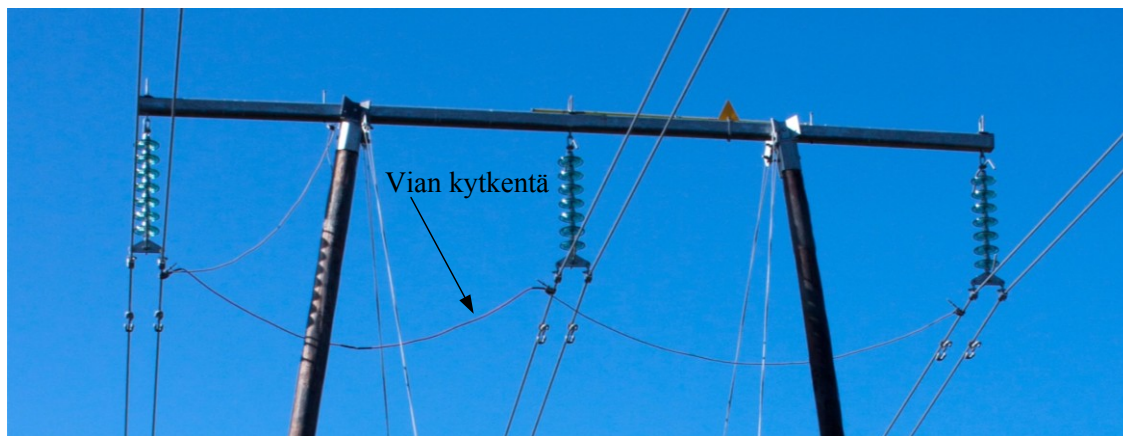


mästä maahan menevä virta nostaa maanpinnan potentiaalia ympäristössään, joten vian aiheuttamia vaarajännitteitä voidaan mitata. [1, s. 107–108]

Tässä työssä virran syöttämiseen käytettiin erityistä syöttömuuntajaa. Kolari–Pello-johdon mittauksissa muuntaja kytkettiin Kolarin sähköasemalle ja Äkäsjokisuu–Niesajohdon mittauksissa Äkäsjokisuu sähköasemalle. Muuntaja kytkettiin aseman maadoituksen ja tutkittavan johdon välille. Kaikki vaihejohtimet kytkettiin rinnan, jolloin vaikuttava reduktiokerroin vastasi todellista maasulkutilannetta keskimäärin parhaiten jokaiselle vaiheelle. Samalla virransyöttöpiirin impedanssi saatiin mahdollisimman pieneksi. Joissakin mittauksissa virransyöttöpiirin reaktanssia pienennettiin käyttämällä apuna sarjakondensaattoreita. Kuvassa 38 on havainnollistettu käytettyä voltti-ampereimittarimenetelmän kytkentää Kolari–Pello-johdolla.



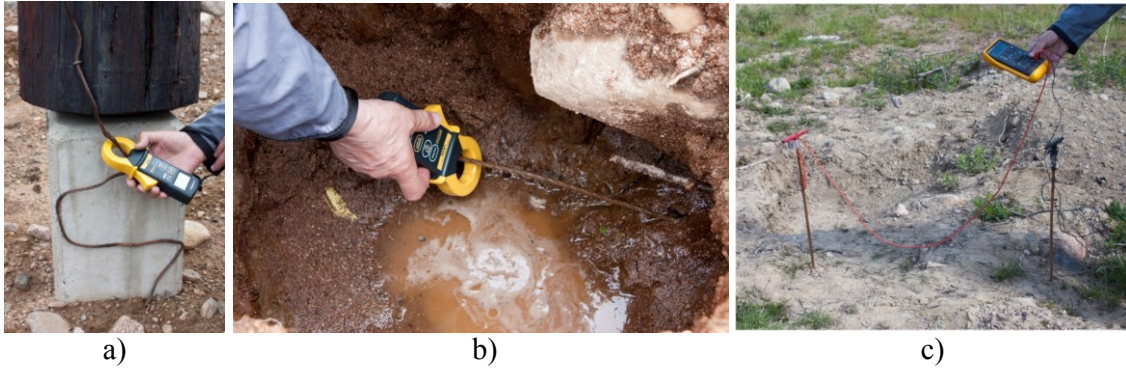
a)



b)

Kuva 38: Voltti-ampereimittarimenetelmän käyttö Kolari–Pello-johdolla: a) virransyöttöpiirin kytkentä (nuolet kuvaavat virtoja) ja b) vikapaikan kytkentä.

Kosketus- ja askeljännitemittaukset tehtiin ilman lisäresistansseja. Ihmisen jalkoja kuvaavana elektrodina käytettiin standardin SFS-EN 50341-1 mukaisesti vähintään 20 cm:n syvyyteen maahan työnnettävää piikkielektrodia [5, s. 304]. Mittausvirran aiheuttama maadoitusjännite mitattiin käyttämällä noin 5 km pitkä mittajohdinta ja piikkielektrodia. Mittajohdin vedettiin 90 asteen kulmaan voimajohtoon nähden. Tällöin mittauspiirien välinen keskinäisimpedanssi oli likimain nolla ja mittajohtimeen indusoidut häiriöjännitteet saatiin minimoitua. Kuvassa 39 on valokuvia erilaisista mittauksista.



Kuva 39: Valokuvia mittauksista: a) virran mittaus pylvään alastulojohtimesta, b) virran mittaus maajohtimesta ja c) askeljännitemittaus piikkielektrodien avulla.

Mittauksissa käytettiin todellisia maasulkuvirtoja huomattavasti pienempiä virtoja. Todelliset maasulun aikaiset virrat ja vaarajännitteet ovat kuitenkin suoraan verrannollisia mitattuihin arvoihin. Mitatut virrat ja jännitteet skaalattiin todellisiksi maasulun aikaisiksi arvoiksi kertomalla ne todellisen maasulkuvirran ja mittausvirran suhteella.

Mittauspiirin laajuudesta johtuen voltti-ampeerimittarimenetelmä on altis maan potentiaalierojen, magneettikenttien ja esimerkiksi kuormitettujen johtojen indusoimien virtojen aiheuttamille häiriöille. Tässä työssä joissakin mittauspaikoissa käytettiin häiriöiden kompensointiin napaisuudenvaihtomenetelmää. Useimmissa mittauspaikoissa napaisuudenvaihtomenetelmää ei tarvittu, koska häiriöt havaittiin merkityksettömiksi. Napaisuudenvaihtomenetelmällä voidaan eliminoida käyttötaajuisia häiriöitä, mikäli ne pysyvät mittauksen aikana samansuuruisina. Menetelmässä mittaukset tehdään käyttämällä virran syöttöön kahta vastakkaisvaiheista, amplitudiltaan samansuuruisista jännitteistä. Näiden mittauksen lisäksi mittaus toistetaan, kun mittauspiirin jännitelähde on oikosuljettu eikä mittauspiiriin syötetä virtaa. Todellinen mitattu virta  $I_m$  ja jännite  $U_m$  saadaan laskettua seuraavasti:

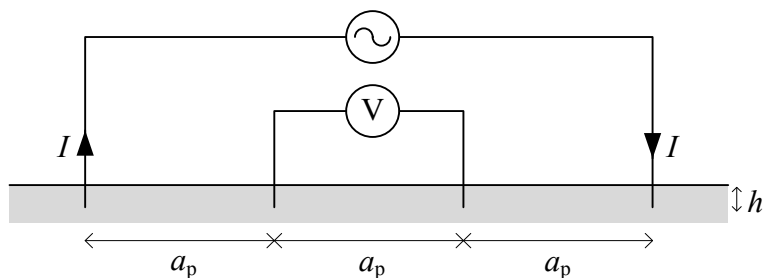
$$I_m = \sqrt{\frac{I_1^2 + I_2^2}{2} - I_0^2}, \quad (49)$$

$$U_m = \sqrt{\frac{U_1^2 + U_2^2}{2} - U_0^2}, \quad (50)$$

joissa  $I_1$  ja  $U_1$  sekä  $I_2$  ja  $U_2$  ovat mitattuja vastakkaisvaiheisia virtoja ja jännitteitä. Virta  $I_0$  ja jännite  $U_0$  ovat mitattuja virtoja ja jännitteitä, kun mittauspiirin jännitelähde on oikosuljettu. [1, s. 109]

#### 5.4.2 Maaperän resistiivisyyden mittaus

Tässä työssä mitattiin maaperän resistiivisyys käyttämällä Wennerin neljän piikin menetelmää. Menetelmässä asetetaan neljä elektrodia maahan riviin tasavälein. Uloimpien elektrodien kautta syötetään maahan virtaa ja sisempien elektrodien välinen jännite-ero mitataan. Jännite-ero on riippuvainen maaperän resistiivisyydestä. [7, s. 6 III] Kuva 40 esittää esimerkin Wennerin neljän piikin menetelmän mittauskytkennästä.



Kuva 40: Maan resistiivisyyden mittaus Wennerin neljän piikin menetelmällä.

Jos elektrodit oletetaan pistelähteiksi, elektrodien syvyys pieneksi ( $h < 0,1 \cdot a_p$ ) ja maa homogeeniseksi, maaperän resistiivisyydelle voidaan johtaa yhtälö

$$\rho = 2\pi a_p \frac{U}{I} = 2\pi a_p R, \quad (51)$$

jossa  $U$  on keskimmäisten elektrodien välinen jännite-ero,  $I$  on mittausvirta ja  $R$  on mitattu resistanssi. [7, s. 7 III]

Jos maa on homogeenista, maaperän resistiivisyydelle saadaan sama tulos kaikilla piikkiväleillä. Jos maassa on kaksi erilaista kerrosta, mittaustulokset eri piikkiväleillä vaihtelevat. Kaksikerrosmaassa mitatun näennäisen resistiivisyyden  $\rho_{\text{ma}}$  arvo voidaan laskea seuraavasti:

$$\rho_{\text{ma}} = \rho_1 \left[ 1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{\kappa^n}{\sqrt{1 + \left(\frac{2nh_1}{a_p}\right)^2}} - \frac{\kappa^n}{\sqrt{4 + \left(\frac{2nh_1}{a_p}\right)^2}} \right) \right], \quad (52)$$

jossa  $\rho_1$  on ylemmän kerroksen resistiivisyys,  $h_1$  ylemmän kerroksen syvyys,  $\kappa$  heijastuskerroin ja  $a_p$  piikkiväli. Heijastuskerroin  $\kappa$  voidaan laskea luvussa 3.2 esitetyllä yhtälöllä (17). [20, s. 37]

## 6 Mittaustulokset

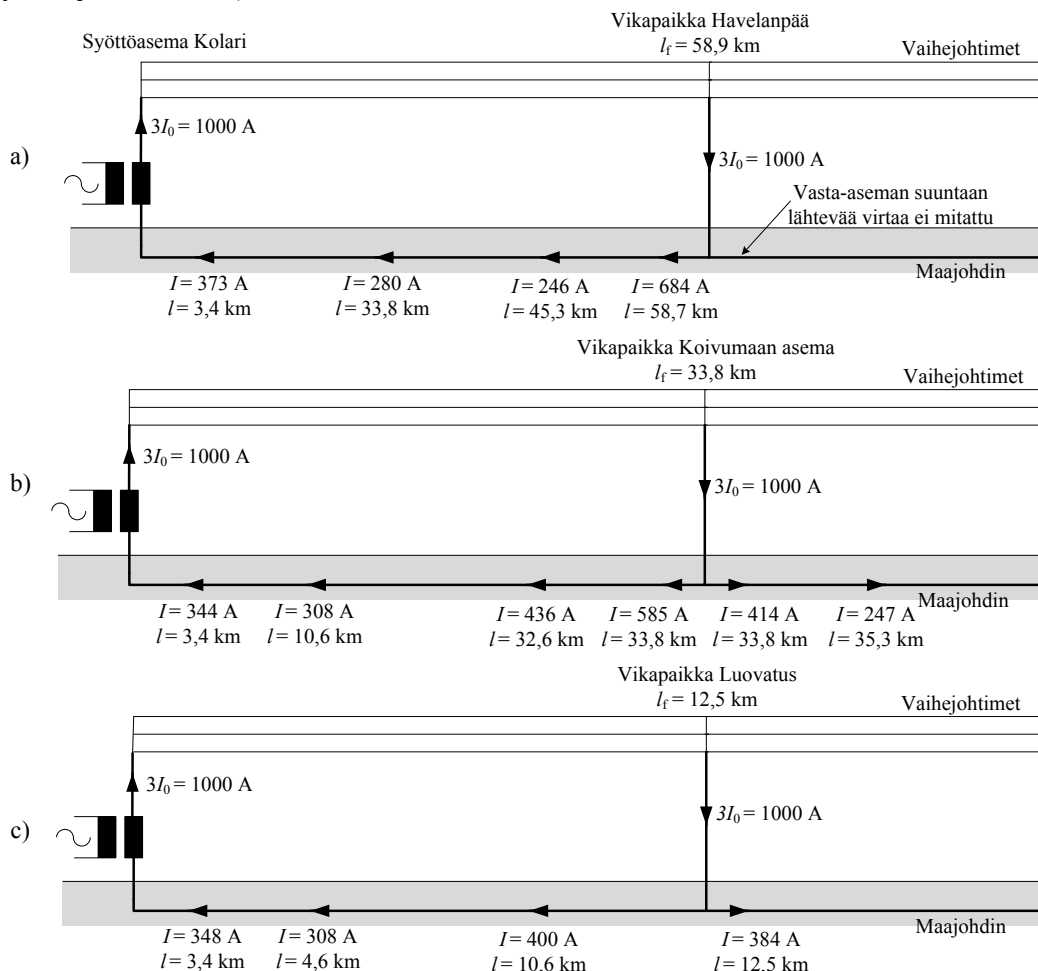
Tässä luvussa esitetään tulokset Kolari–Pello- ja Äkäsjokisuu–Niesa-johdoille tehdyistä mittauksista. Tulokset on skaalattu vastaamaan maasulkuvirtaa 1 kA. Näin ollen johtojen kaikki tulokset ovat vertailukelpoisia keskenään.

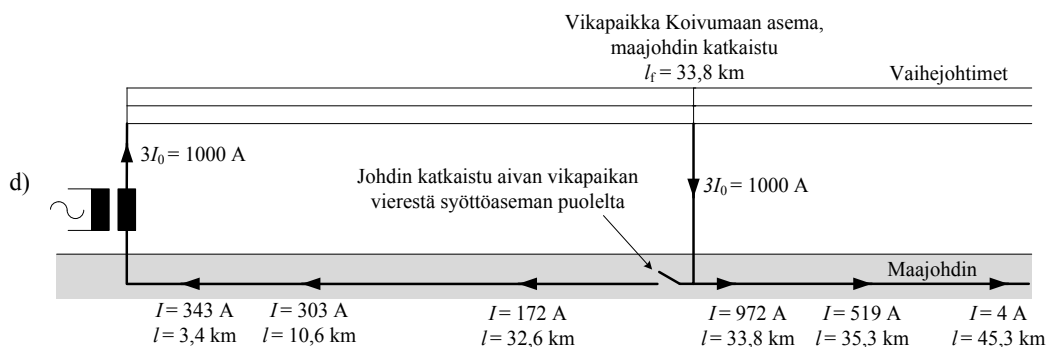
Mittaustuloksia tarkastellessa on syytä huomioida, että todellisuudessa kummankin mitatun johdon maasulkuvirrat ovat pienempiä kuin 1 kA. Kolari–Pello-johdon maasulkuvirta on enimmillään 0,58 kA, kun se on kytketty maadoitettuun kantaverkkoon. Johdon ollessa kytkettynä sammutettuun verkkoon maasulkuvirrat jäivät huomattavasti pienemmiksi. Äkäsjokisuu–Niesa-johto on aina kytkettynä sammutettuun verkkoon, joten sen maasulkuvirta on todellisuudessa hyvin pieni.

### 6.1 Kolari–Pello-johdon skaalatut mittaustulokset

#### 6.1.1 Maajohtimen virtamittausten sekä vikapaikkojen kosketus- ja askeljännitemittausten skaalatut tulokset

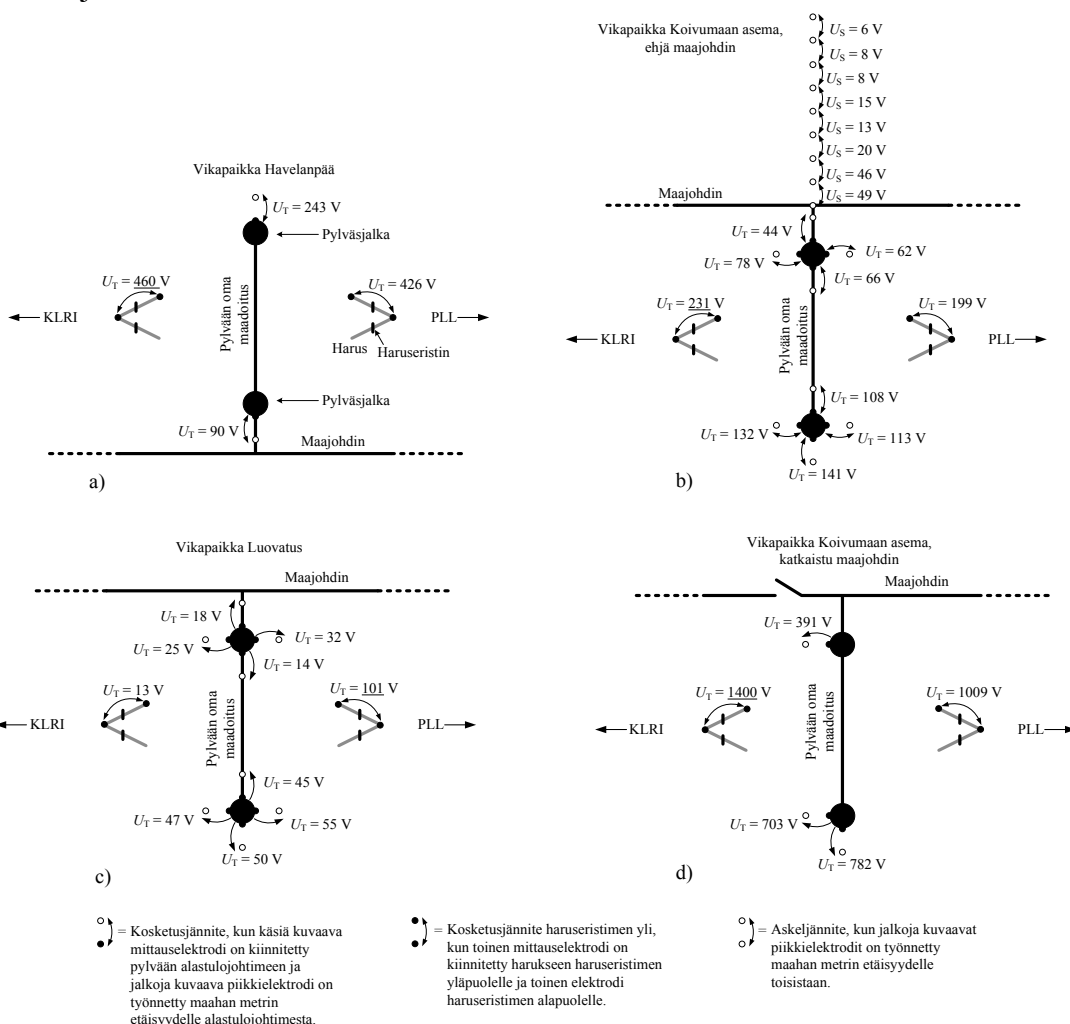
Kuvassa 41 on esitetty maajohtimen virran skaalatut mittaustulokset eri etäisyyksillä Kolarin sähköasemalta, kun vikapaikkoina olivat Havelanpää, Koivumaan asema ja Luovatus maajohtimen ollessa ehjä. Lisäksi kuvassa on esitetty skaalatut mittaustulokset Koivumaan aseman viasta, kun maajohdin oli katkaistu. Kuvat 41 a), b) ja c) on esitetty alla ja kuva 41 d) seuraavalla sivulla.





Kuva 41: Virtamittausten maasulkuvirralla 1 kA skaalatut tulokset, kun vikapaikkana oli a) Havelanpää, b) Koivumaan asema ja c) Luovatus maajohtimen ollessa ehjä sekä d) Koivumaan asema, kun maajohdin oli katkaistu. Kuvassa on esitetty myös mittauspaikkojen etäisyydet syöttöasemalta.

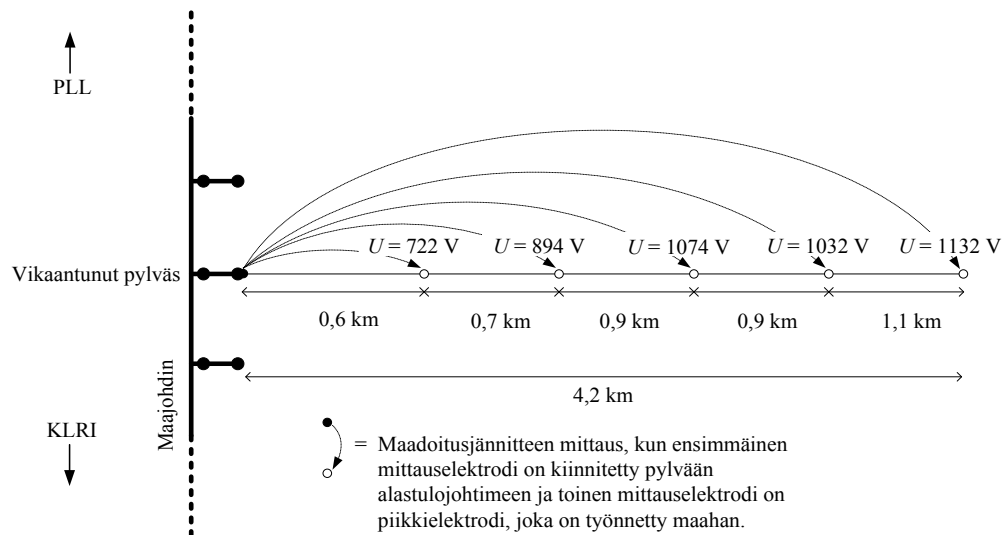
Kuvassa 42 on esitetty kosketus- ja askeljännitemittausten sekä haruseristimien yli olevien kosketusjännitteiden skaalatut mittaustulokset eri vikapaikoissa. Suurimmat kosketusjännitteet on alleviivattu.



Kuva 42: Kosketus- ja askeljännitteiden maasulkuvirralla 1 kA skaalatut mittaustulokset, kun vikapaikkana oli a) Havelanpää, b) Koivumaan asema ja c) Luovatus maajohtimen ollessa ehjä sekä d) Koivumaan asema, kun maajohdin oli katkaistu. Kuva esittää tilannetta ylhäältä päin katsottuna.

### 6.1.2 Maadoitusjännitemittauksen skaalatut tulokset

Vikaantuneen pylvään maadoitusjännite mitattiin Koivumaan aseman ollessa vikapaikana. Maadoitusjännitemittauksessa mitattiin vikaantuneen pylvään ja maanpinnan välistä jännite-eroa pitkän mittajohtimen avulla. Ensimmäinen mittauselektrodi oli kytketty vikaantuneen pylvään alastulojohtimeen ja näin ollen elektrodi oli samassa potentiaalisissa maajohtimen kanssa. Toinen mittauselektrodi oli maahan työnnettävä piikkielektrodi. Maasulkuvirralla 1 kA skaalatut mittaustulokset on esitetty kuvassa 43.



Kuva 43: Maadoitusjännitemittauksen skaalatut tulokset. Maadoitusjännitteen kokonaisarvoksi saatiin 1130 V. Kuva esittää tilannetta ylhäältä päin katsottuna.

Maadoitusjännitemittaus toistettiin samassa vikapaikassa, kun maajohtin oli katkaistu vikaantuneen pylvään vierestä. Tästä mittauksesta saatiin maadoitusjännitteen kokonaisarvoksi 2320 V.

### 6.1.3 Maaperän resistiivisyydsmittauksen tulokset

Maaperän resistiivisyys mitattiin vikapaikoissa Koivumaan asema ja Luovatus. Mittaukset tehtiin neljällä eri piikkivälillä. Mittauksen tulokset on esitetty taulukossa 11.

Taulukko 11: Maaperän resistiivisyydsmittauksen tulokset vikapaikkojen Koivumaan asema ja Luovatus mittauksissa.

Vikapaikka: Koivumaan asema			Vikapaikka: Luovatus		
Piikkiväli $a_p$ [m]	Tulos $R$ [ $\Omega$ ]	Resistiivisyys $\rho$ [ $\Omega\text{m}$ ]	Piikkiväli $a_p$ [m]	Tulos $R$ [ $\Omega$ ]	Resistiivisyys $\rho$ [ $\Omega\text{m}$ ]
1	251	1577	1	144	905
2	179	2249	2	70	880
4	87	2187	4	31	779
8	34	1709	8	26	1307

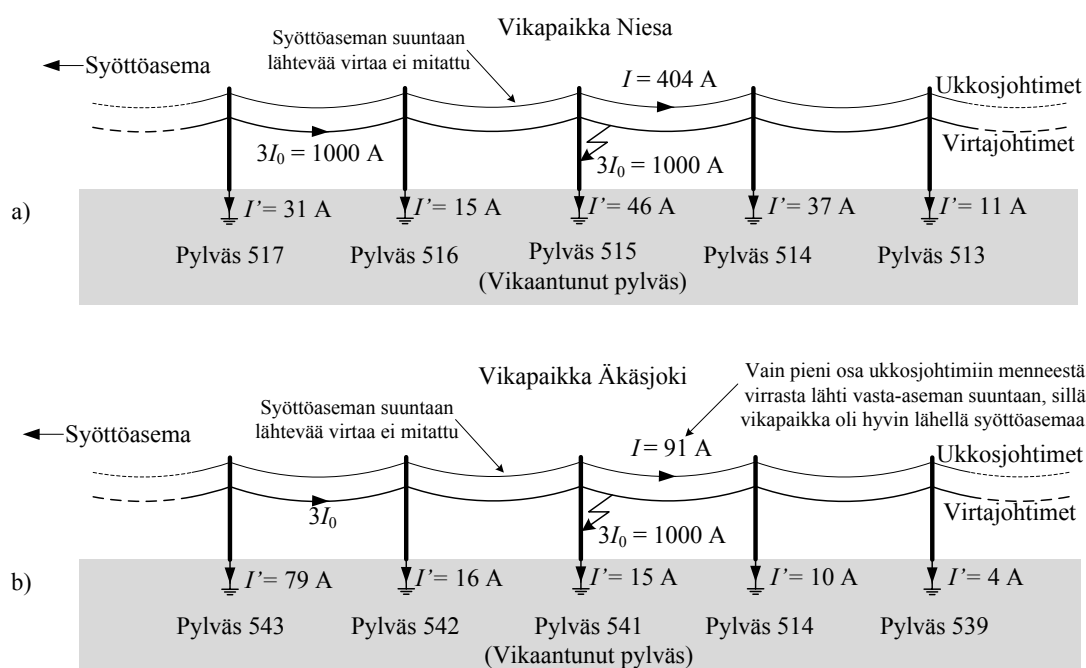
Taulukon 11 mukaisesti eri piikkiväleillä saadut maaperän resistiivisyyden arvot eivät poikkea toisistaan suuresti. Näin ollen voidaan olettaa, että kummankin vikapaikan

ympärillä maaperä on homogeenista. Maaperän resistiivisyys Koivumaan asemalla on noin  $2000 \Omega\text{m}$  ja Luovatuksessa noin  $1000 \Omega\text{m}$ .

## 6.2 Äkäsjoisuus–Niesa-johdon skaalatut mittaustulokset

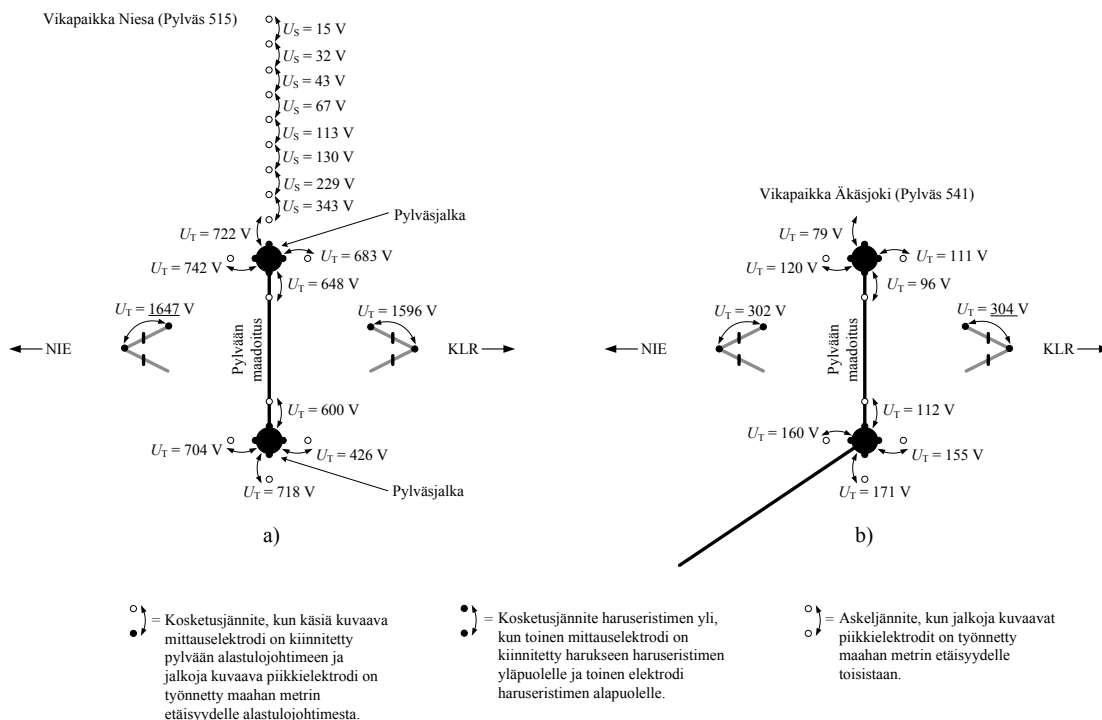
### 6.2.1 Maahan menevien virtojen sekä vikapaikkojen kosketus- ja askeljännitemittausten skaalatut tulokset

Kuvassa 44 on esitetty vikaantuneelta pylvältä maahan ja ukkosjohtimiin menevän virran maasulkuvirralla  $1 \text{ kA}$  skaalatut mittaustulokset vikapaikoissa Niesa ja Äkäsjoki. Kuvassa on esitetty myös vikaantuneen pylvään viereisiltä pylvältä maahan menevän virran skaalatut mittaustulokset.



Kuva 44: Virtamittausten skaalatut tulokset, kun vikapaikkana oli a) Niesa ja b) Äkäsjoki.

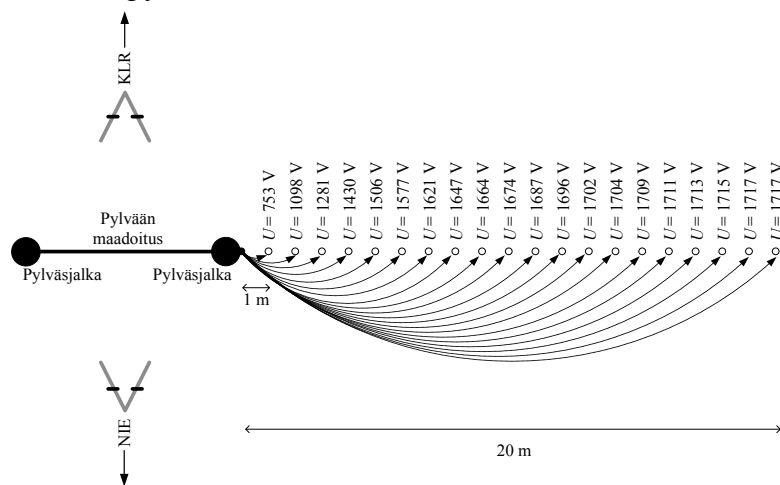
Kuvassa 45 on esitetty kosketus- ja askeljännitemittausten skaalatut tulokset vikapaikoissa Niesa ja Äkäsjoki. Suurimmat kosketusjännitteet on alleviivattu.



Kuva 45: Kosketus- ja askeljännitteiden maasulkuvirralla 1 kA skaalatut mittaustulokset, kun vikapaikkana on a) Niesa ja b) Äkäsjoki. Kuva esittää tilannetta ylhäältä päin katsottuna.

### 6.2.2 Maadoitusjännitemittauksen skaalatut tulokset

Vikaantuneen pylvään maadoitusjännite mitattiin Niesan ollessa vikapaikkana. Maadoitusjännitemittauksessa mitattiin vikaantuneen pylvään ja maanpinnan välistä jänniteeroa. Ensimmäinen mittauselektrodi oli kytketty vikaantuneen pylvään alastulojohtimeen ja näin ollen elektrodi oli samassa potentiaalissa pylväsmaadoituksen kanssa. Toisena mittauselektrodina käytettiin maahan työnnettävää piikkielektroodia. Kuvassa 46 on esitetty mittaustulokset, kun vikaantuneen pylvään ja maanpinnan välistä jänniteeroa mitattiin metrin välein pylvään viereltä.



Kuva 46: Maadoitusjännitemittauksen maasulkuvirralla 1 kA skaalatut tulokset vikapaikassa Niesa ylhäältä päin katsottuna. Maadoitusjännitteen kokonaisarvoksi saatiin 1720 V.



Kuvan 46 tulokset osoittavat, että maanpinnan potentiaali vastasi kaukana olevan referenssimaan potentiaalia jo hyvin lähellä vikaantunutta pylvästä. Mittaustuloksen varmistamiseksi pylvään alastulojohtimen ja maanpinnan välistä jännite-eroa mitattiin usean sadan metrin päässä pylvästä. Maadoitusjännitteen kokonaisarvo pysyi samana myös näissä mittauksissa.

## 7 Tulosten tarkastelu ja pohdinta

Tämän luvun alussa vertaillaan Kolari–Pello- ja Äkäsjokisuu–Niesa-johdon tärkeimpiä mittaustuloksia ja pohditaan mittaustulosten luotettavuutta. Sen jälkeen verrataan mittaustuloksia sekä luvussa 4 esitetyillä laskentamenetelmillä laskettuja tuloksia ja arvioidaan laskentamenetelmien luotettavuutta sekä niiden pätevyysalueita. Lopuksi pohditaan Kolari–Pello-johdon turvallisuutta ja ukkosjohtimettoman 110 kV:n avojohdon yleisiä käyttömahdollisuuksia Suomessa.

### 7.1 Johtojen mittaustulosten vertailu

Vertailemalla ukkosjohtimettoman läpimenevällä maajohtimella varustetun johdon ja ukkosjohtimellisen johdon mittaustuloksia voidaan tarkastella eroja johtorakenteiden maasulkutilanteissa. Taulukossa 12 on esitetty johtojen mittaustuloksista skaalatut suurimmat kosketusjännitteet ja vikaantuneen pylvään maadoitusjännite. Lisäksi taulukossa on kuvattu vikaantuneen pylvään ympäristössä havaitun potentiaalisuppilon ulottuvuutta. Taulukossa mittaustulokset on skaalattu vastaamaan maasulkuvirtaa 1 kA. Todellisuudessa johtojen maasulkuvirrat eivät ole näin suuria, mutta skaalaus mahdollistaa tulosten vertailun.

*Taulukko 12: Johtojen mittaustuloksien vertailu. Tulokset on skaalattu vastaamaan maasulkuvirtaa 1 kA.*

Voimajohto	Kolari–Pello (ukkosjohtimeton johto, ehjä läpimenevä maajohdin)	Äkäsjokisuu–Niesa (ukkosjohtimellinen johto)
Suurin mitattu kosketusjännite <sup>1)</sup>	460 V	1650 V <sup>2)</sup>
Vikaantuneen pylvään maadoitusjännite	1130 V	1720 V <sup>2)</sup>
Potentiaalisuppilo vikaantuneen pylvään ympäristössä	Ulottuvuus useita kilometrejä	Ulottuvuus vain kymmeniä metrejä <sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> Suurimmat mitatut kosketusjännitteet mitattiin vikaantuneiden pylväiden haruseristimien yli. Ne vastaavat maasulkutilanteessa normaalia kosketusjännitettä kädestä jalkoihin, jos ihminen seisoo haruksen vieressä ja koskettaa harusvaijeria haruseristimen yläpuolelta.

<sup>2)</sup> Ukkosjohtimellisella Äkäsjokisuu–Niesa-johdolla suurimmat kosketusjännitteet ja vikaantuneen pylvään maadoitusjännite mitattiin vikapaikassa Niesa, jossa johdolla oli teräsuukkosjohtimet.

<sup>3)</sup> Mitatulla pylvällä oli ainoastaan pylväsjalat yhdistävä perusmaadoitus. Jos yksittäinen pylväsmaadoitus on laajempi, myös potentiaalisuppilo leviää laajemmalle. Käytännössä tällöinkin potentiaalisuppilon ulottuvuus on korkeintaan satoja metrejä. Ukkosjohtimellisella johdolla myös vikapaikan viereisille pylväille syntyy potentiaalisuppilot, koska niidenkin maadoituksista menee virtaa maahan.

Taulukon 12 tulosten mukaisesti suurin kosketusjännite sekä vikaantuneen pylvään maadoitusjännite mitattiin ukkosjohtimellisella voimajohdolla. Suurimmat jännitteet mitattiin vikapaikassa, jossa johdolla oli teräsuukkosjohtimet. Vikapaikassa, jossa johdolla oli teräsalumiiniukkosjohtimet, vaarajännitteet eivät olleet yhtä suuria. Tämä johtuu eroista ukkosjohtimien johtavuuksissa. Koska teräsalumiiniukkosjohtimien johtavuus on parempi, myös niiden reduktiokerroin sekä vikapaikasta näkyvä ketjuimpedanssi ovat pienempiä. Tällöin myös vaarajännitteet jäävät pienemmiksi.

Läpimenevällä maajohtimella varustetulla johdolla vikapaikan ympärille muodostuva potentiaalisuppilo ulottuu huomattavasti laajemmalle alueelle kuin ukkosjohtimellisella johdolla. Potentiaalisuppilo on hyvin laaja, koska virta leviää laajalle alueelle maajohdinta pitkin. Koska maajohtimen maadoitusimpedanssi on pieni, vikaantuneen pylvään maadoitusjännite ja myös kosketusjännitteet pysyvät melko alhaisina.

Potentiaalisuppilon laajuus voi kuitenkin lisätä siirtyvien potentiaalierojen riskiä. Vaarallinen tilanne voi syntyä esimerkiksi sellaisessa tapauksessa, jossa pitkä kaapeli kuljettaa potentiaalia kauaksi vikapaikasta. Sen sijaan vaarallisia potentiaaleja ei voi siirtyä esimerkiksi aitoja tai muita lyhyitä asennuksia pitkin, koska potentiaalisuppilo maajohtimen ympäristössä on hyvin loiva. Näin ollen vaarallisia potentiaalieroja ei synny lyhyillä matkoilla.

## 7.2 Mittaustulosten luotettavuuden arviointi

Ukkosjohtimettoman Kolari–Pello-johdon mittaustuloksiin ei liity suuria epävarmuustekijöitä. Häiriötekijät jäivät mittauksissa hyvin pieniksi, koska johto sijaitsee pääosin erämaassa. Epävarmuudet liittyvät pääosin maaperän epähomogeenisuuteen ja mittaustulosten paikkansapitävyyteen erilaisissa olosuhteissa. Mikäli tässä työssä esitettyjen mittaustulosten perusteella arvioidaan ukkosjohtimettoman läpimenevällä maajohtimella varustetun johdon soveltuvuutta erilaisiin sijoituspaikkoihin, tulee maaperän ominaisuudet kyseisessä sijoituspaikassa huomioida.

Myöskään ukkosjohtimellisen Äkäsjokisuu–Niesa-johdon mittaustuloksissa ei ole suuria epävarmuustekijöitä. Mittausten häiriötekijät jäivät hyvin pieniksi, sillä johto sijaitsee erämaassa. Suurimmat epävarmuudet liittyvät maaperän epähomogeenisuuteen ja mittaustulosten paikkansapitävyyteen erilaisissa olosuhteissa. Lisäksi epävarmuutta mittaustuloksiin voivat aiheuttaa pylväiden ja ukkosjohtimien liitoskohdissa mahdollisesti esiintyvät ylimenoresistanssit. Käyttöjännitettä huomattavasti pienemmällä mittaustuloksella virta voi jakaantua eri tavalla ukkosjohtimien ja pylväiden kesken ylimenoresistanssien vaikutuksesta. Ylimenoresistansseja esiintyy, jos ukkosjohtimia ei ole liitetty pylväisiin ja pylväiden kautta pylväsmaadoitukseen sähköisesti luotettavilla liitoksilla. Mittaustulosten perusteella ei ole kuitenkaan syytä olettaa, että ylimenoresistanssit olisivat vaikuttaneet tuloksiin.

## 7.3 Kolari–Pello-johdon mittaustulosten ja laskentamenetelmillä laskettujen tulosten vertailu

Tässä luvussa tarkastellaan Kolari–Pello-johdon mittaustulosten ja luvussa 4 esitetyillä laskentamenetelmillä laskettujen tulosten vastaavuutta. Tarkasteltavia suureita ovat maajohtimen virta, vikaantuneen pylvään maadoitusjännite, maadoitusimpedanssi, maanpinnan potentiaali ja kosketusjännitteet. Tulokset ovat vertailukelpoisia, sillä ne on skaalattu vastaamaan maasulkuvirtaa 1 kA.

### 7.3.1 Laskentamenetelmien alkuarvot

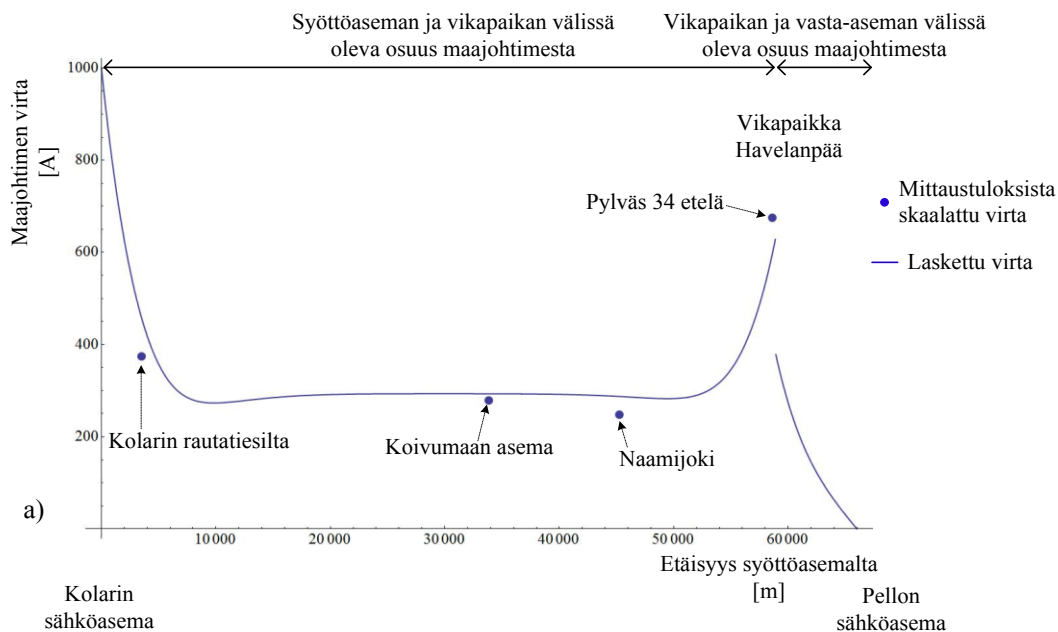
Jotta mittaustuloksia ja laskettuja tuloksia voitiin vertailla toisiinsa, laskennallista tarkastelua varten tuli valita tiettyjä alkuarvoja. Ukkosjohtimettoman läpimenevällä maa-johtimella varustetun johdon osalta laskentamenetelmissä tarvittavat alkuarvot olivat maaperän resistiivisyys ja maa-johtimen reduktiokerroin.

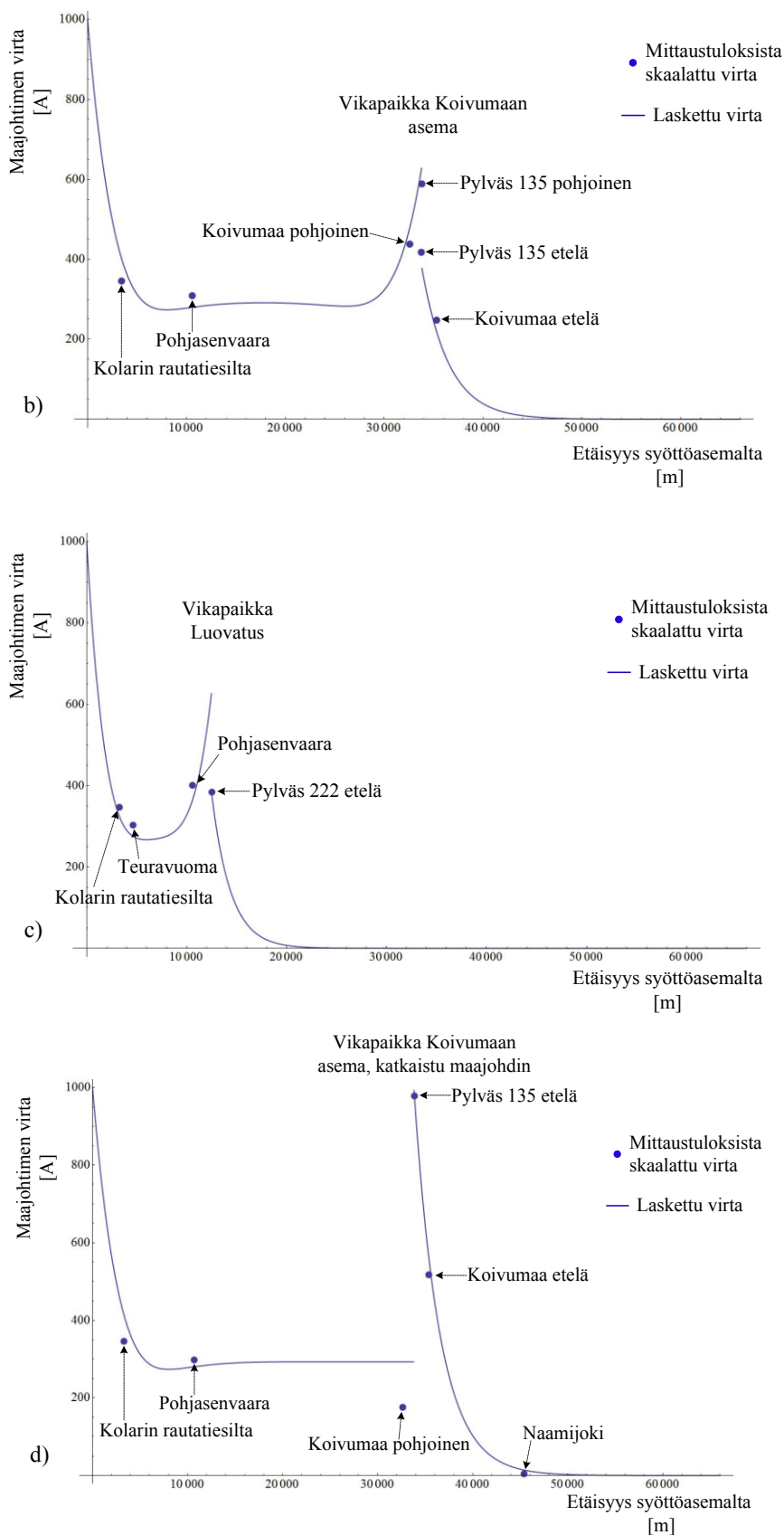
Koivumaan aseman ollessa vikapaikkana valittiin laskelmiin maaperän resistiivisyydeksi  $2000 \Omega\text{m}$ . Vikapaikan ollessa Luovatuksessa käytettiin arvoa  $1000 \Omega\text{m}$ . Arvot valittiin tehtyjen resistiivisyydsmittausten perusteella. Vikapaikassa Havelanpää ei mitattu maaperän resistiivisyyttä. Koska maaperä Havelanpään ympäristössä oli moreenia, valittiin laskelmia varten resistiivisyydelle arvo  $3000 \Omega\text{m}$  perustuen luvun 2.2.4 taulukkoon 1. Laskelmissa ei käytetty kaksikerrosmaan mallia.

Maajohtimen reduktiokertoimenä käytettiin luvun 4.1.5 taulukkoon 7 laskettua arvoa  $0,76 \angle -11^\circ$ . Reduktiokertoimen oletettiin pysyvän vakiona koko johdon matkalla.

### 7.3.2 Maajohtimen virta

Kuva 47 esittää luvun 4.1.2 mukaisella laskentamenetelmällä lasketun maa-johtimen virran sekä mittaustuloksista skaalatut virta-arvot vikapaikan ollessa Havelanpäässä, Koivumaan asemalla ja Luovatuksessa, kun maa-johtimen oli ehjä. Kuva esittää myös vastaavat tulokset vikapaikan ollessa Koivumaan asemalla, kun maa-johtimen oli katkaistu. Kuva 47 a) on esitetty alla ja kuvat 47 b), c) ja d) seuraavalla sivulla.





Kuva 47: Maajohtimen virtamittausten maasulkuvirrälle 1 kA skaalatut tulokset sekä laskettu virta, kun vikapaikkana oli a) Havelanpää, b) Koivumaan asema ja c) Luovatus maajohtimen ollessa ehjä sekä d) Koivumaan asema, kun maajohdin oli katkaistu.

Kuvan 47 mukaisesti lähes kaikki virtamittausten skaalatut tulokset vastaavat hyvin laskettuja virtoja. Lisäksi kuvan perusteella voidaan havaita, että laskettu reduktiokerroin  $0,76\angle - 11^\circ$  vastaa hyvin todellista reduktiokerrointa, koska laskettujen virran kuvaajien vaakasuorien osien kohdalla sijaitsevat mittauspisteet osuvat lähelle laskettuja käyriä. Pienet erot laskettujen ja mittaustuloksista skaalattujen arvojen välillä johtunevat maan epähomogeenisuudesta, jota ei voitu huomioida laskennassa.

Kuvista 47 a), b) ja d) voidaan havaita, että käytetty laskentamenetelmä yliarvioi jonkin verran maajohtimessa kulkevaa virtaa mittauspaikan Kolarin rautatiesilta osalta. Tämä johtunee siitä, että todellisuudessa osa virrasta palasi syöttöpisteeseen Kolarin sähköaseman maadoituksen kautta. Aseman maadoitusta ei huomioitu laskelmissa. Myöskään noin kaksi kilometriä ennen sähköasemaa alkavia ukkosjohtimia ei huomioitu laskennallisessa tarkastelussa.

Kun vikapaikkana oli kuvan 47 a) mukaisesti Havelanpää, mittauspaikassa Pylväs 34 etelä saatiin mittaustuloksista skaalaamalla laskettua arvoa suurempi virta. Syy tähän on luultavasti maaperän epähomogeenisuus. Vikapaikasta katsoen syöttöaseman suunnassa oli suota ja vasta-aseman suunnassa moreenimaata. Koska suo on vesipitoisuutensa takia paremmin johtavaa kuin moreeni, suurempi osa virrasta lähti syöttöpisteen suuntaan. Laskelmissa maaperä oli oletettu homogeeniseksi.

Kun vikapaikkana oli kuvan 47 d) mukaisesti Koivumaan asema ja maajohdin oli katkaistu, mittauspaikassa Koivumaa pohjoinen saatiin mittaustuloksista skaalaamalla laskelmien antamaa arvoa huomattavasti pienempi virta. Tämä johtuu laskentamenetelmää johdettaessa tehdystä alkuoletuksesta. Laskentamenetelmässä oletettiin reduktiovirran suuruisen osan maassa kulkevasta virrasta palaavan maajohtimeen heti katkeamiskohdan vieressä. Todellisuudessa reduktiovirran palaaminen maajohtimeen tapahtuu usean kilometrin matkalla.

### 7.3.3 Maadoitusjännite, maadoitusimpedanssi ja maanpinnan potentiaali

Vikaantuneen pylvään maadoitusjännite mitattiin vian ollessa Koivumaan asemalla. Maadoitusjännitteen mittaustulosten perusteella voidaan laskea maajohtimen maadoitusimpedanssi. Taulukko 13 esittää maadoitusjännitteen skaalatut mittaustulokset sekä luvuissa 4.1.4 ja 4.1.6 kuvatuilla laskentamenetelmillä lasketut arvot. Taulukko esittää myös mittaustuloksista lasketut maadoitusimpedanssit ja vastaavat laskentamenetelmillä lasketut arvot. Mitatut arvot on skaalattu vastaamaan maasulkuvirtaa 1 kA.

Taulukko 13: Vikaantuneen pylvään maadoitusjännite ja maadoitusimpedanssi.

Vikapaikka	Mittaustuloksista skaalattu maadoitusjännite	Laskettu maadoitusjännite	Mittaustuloksista laskettu maadoitusimpedanssi *	Teoreettisesti laskettu maadoitusimpedanssi
Koivumaan asema (ehjä maajohdin)	1130 V	1080 V	1,49 Ω	1,42 Ω
Koivumaan asema (katkaistu maajohdin)	2320 V	2830 V	2,32 Ω	2,83 Ω

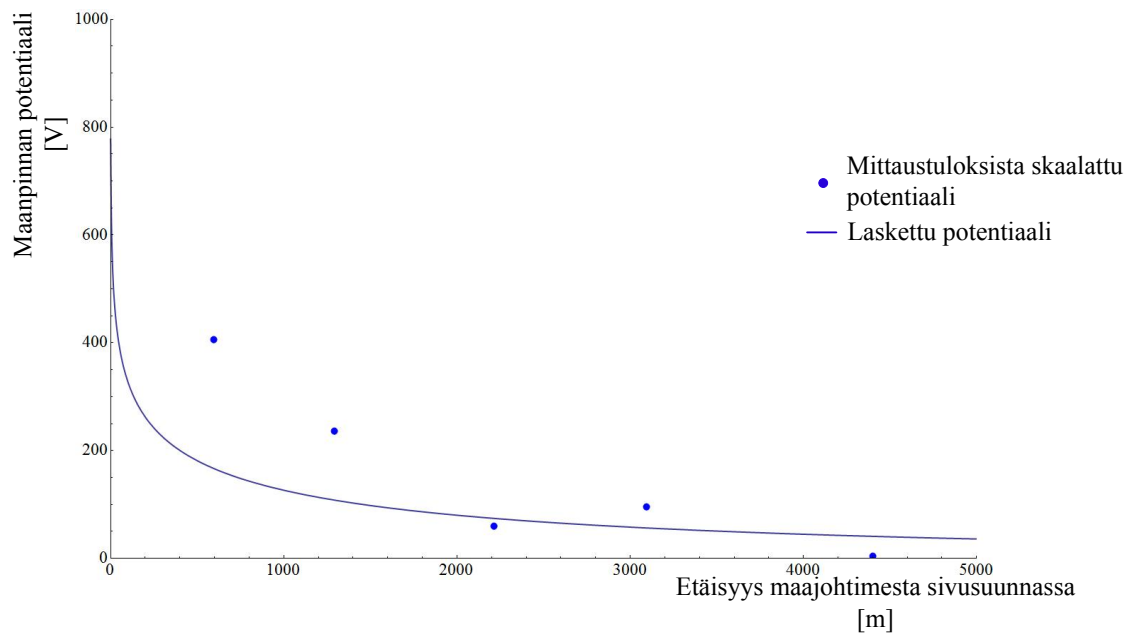
\* Maadoitusimpedanssi ehjälle maajohtimelle saatiin laskettua mittaustuloksista seuraavasti:

$Mitattu\ maadoitusjännite / (k \cdot Maasulkuvirta)$ . Reduktiokertoimena  $k$  käytettiin aiemmin laskettua arvoa 0,76, koska sen havaittiin vastaavan hyvin mitattuja arvoja. Maadoitusimpedanssi poikki menneelle maajohtimelle saatiin laskettua mittaustuloksista seuraavasti:

$Mitattu\ maadoitusjännite / (Maasulkuvirta)$ .

Taulukosta 13 voidaan havaita, että ehjälle maajohtimelle laskentamenetelmillä laskettu maadoitusjännite ja maadoitusimpedanssi vastaavat hyvin skaalattuja mittaustuloksia. Poikki menneelle maajohtimelle laskentamenetelmillä lasketut arvot ovat hieman suurempia kuin skaalatut mittaustulokset. Nämä erot ovat kuitenkin melko pieniä ja ne johtuvat luultavasti maaperän epähomogeenisuudesta.

Maadoitusjännitteen mittaustulosten avulla voidaan tutkia potentiaalisuppiloa vikapaikan ympäristössä. Kuva 48 esittää mittaustuloksista skaalatun maanpinnan potentiaalivivusuunnassa voimajohtoon nähden vikapaikan ollessa Koivumaan asemalla maajohtimen ollessa ehjä. Kuvassa esitetään myös luvussa 4.1.3 esitetyllä laskentamenetelmällä laskettu maanpinnan potentiaali.



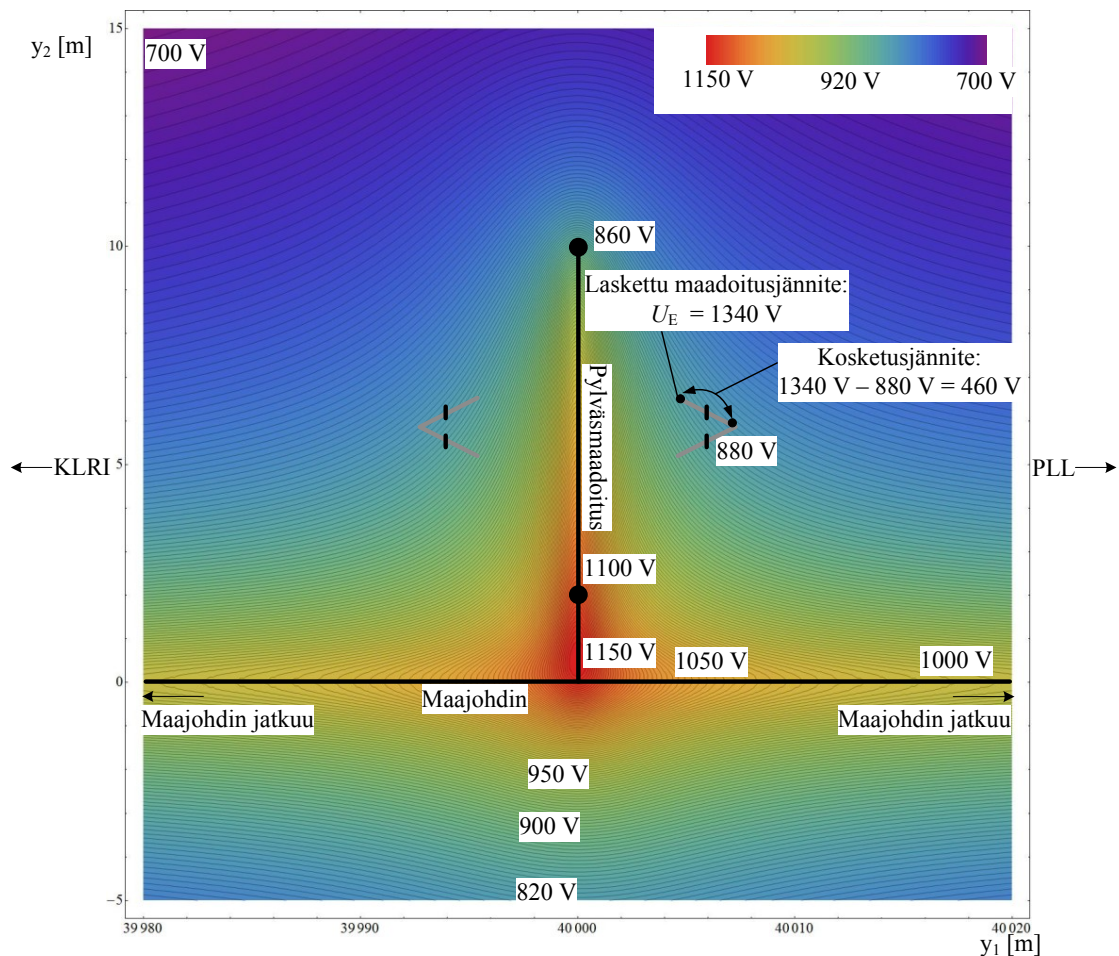
Kuva 48: Mittaustuloksista maasulkuvirralle 1 kA skaalattu ja laskettu maanpinnan potentiaali, kun vikapaikkana on Koivumaan asema ja maajohdin on ehjä. Maanpinnan potentiaalimittauspaikka on esitetty tarkemmin luvun 6.1.2 kuvassa 43.

Kuvan 48 mukaisesti mittaustuloksista skaalattu maanpinnan potentiaali oli kahdessa ensimmäisessä mittauspisteessä huomattavasti korkeampi kuin laskentamenetelmällä lasketut arvot. Sen sijaan kolme viimeistä mittauspistettä osuivat melko hyvin lasketulle käyrälle. Ensimmäisten skaalattujen mittauspisteiden erot laskettuihin arvoihin nähden johtuvat luultavasti siitä, että maaperä koostuu todellisuudessa erilaisista kerroksista, joita ei huomioitu laskelmissa. Potentiaalilämpötilan muotoon voi vaikuttaa esimerkiksi peruskallio, jolla on suuri resistiivisyys.

### 7.3.4 Kosketusjännitteet

Suurimmat mitatut kosketusjännitteet olivat kosketusjännitteitä haruseristimien yli. Kuva 49 esittää luvussa 4.1.3 kuvatulla menetelmällä lasketun maanpinnan potentiaalivikaantuneen pylvään ympäristössä vian ollessa Havelanpäässä. Taulukossa 14 on esitetty mittaustuloksista skaalatut ja lasketut suurimmat kosketusjännitteet, kun vikapaikkana oli Havelanpää, Koivumaan asema ja Luovatus maajohtimen ollessa ehjä sekä Koivumaan asema, kun maajohdin oli katkaistu.





Kuva 49: Laskettu maanpinnan potentiaali vikapaikassa Havelanpää ylhäältä päin katsottuna. Kuvassa on esitetty myös laskettu kosketusjännite haruseristimen yli.

Taulukko 14: Mittaustuloksista maasulkuvirralla 1 kA skaalatut ja lasketut suurimmat kosketusjännitteet Kolari–Pello-johdolla.

Vikapaikka	Mittaustuloksista skaalattu suurin kuormittamaton kosketusjännite	Laskettu suurin kuormittamaton kosketusjännite
Havelanpää	460 V	460 V
Koivumaan asema (ehjä maajohdin)	230 V	370 V
Luovatus	100 V	270 V
Koivumaan asema (katkaistu maajohdin)	1400 V	1670 V

Taulukosta 14 voidaan havaita, että vikapaikan Havelanpää osalta laskemalla saatiin skaalattua mittaustulosta vastaava tulos. Sen sijaan muiden vikapaikkojen osalta käytetty laskentamenetelmä yliarvioi kosketusjännitteiden suuruutta.

Kosketusjännitteiden suuruudet ovat riippuvaisia maaperän paikallisista ominaisuuksista. Näin ollen tuloksiin vaikuttaa esimerkiksi se, minkälaiseen maaperään jalvoja kuvaava piikkielektrodi on työnnetty. Haruseristimien yli mitatuissa kosketusjännitteissä maaperän laatu ja kosteus harusankkurin sijaintipaikassa vaikuttavat tuloksiin. Laskennassa ei ole mahdollista huomioida maaperän erilaisia ominaisuuksia tarkasti.

## 7.4 Äkäsjohtisuus–Niesa-johdon mittaustulosten ja laskentamenetelmällä laskettujen tulosten vertailu

Tässä luvussa tarkastellaan Äkäsjohtisuus–Niesa-johdon mittaustulosten ja luvussa 4 esitetyillä laskentamenetelmillä laskettujen tulosten vastaavuutta. Tarkasteltavia suureita ovat pylväsmaadoituksista maahan menevä virta, ukkosjohtimien virta, vikaantuneen pylvään maadoitusjännite, maanpinnan potentiaali ja kosketusjännitteet. Mittaustulokset on skaalattu vastaamaan maasulkuvirtaa 1 kA.

Luvussa tarkastellaan ainoastaan vikapaikkaan Niesa liittyviä mittaustuloksia ja laskelmia. Vikapaikka Äkäsjohti jätettiin pois tarkasteluista, sillä se on ainoastaan 2,5 km:n etäisyydellä syöttöasemasta. Tällöin suuri osa maasulkuvirrasta palasi syöttöpisteeseen suoraan ukkosjohtimia pitkin käymättä lainkaan maassa.

### 7.4.1 Laskentamenetelmien alkuarvot

Jotta mittaustuloksia ja laskettuja tuloksia voitiin vertailla toisiinsa, laskentamenetelmiä varten tuli valita tietyt alkuarvot. Ukkosjohtimellisella johdolla laskentamenetelmissä tarvittavat alkuarvot olivat maaperän resistiivisyys, pylväiden maadoitusresistanssit sekä ukkosjohtimien reduktiokertoimet ja maapaluuimpedanssit.

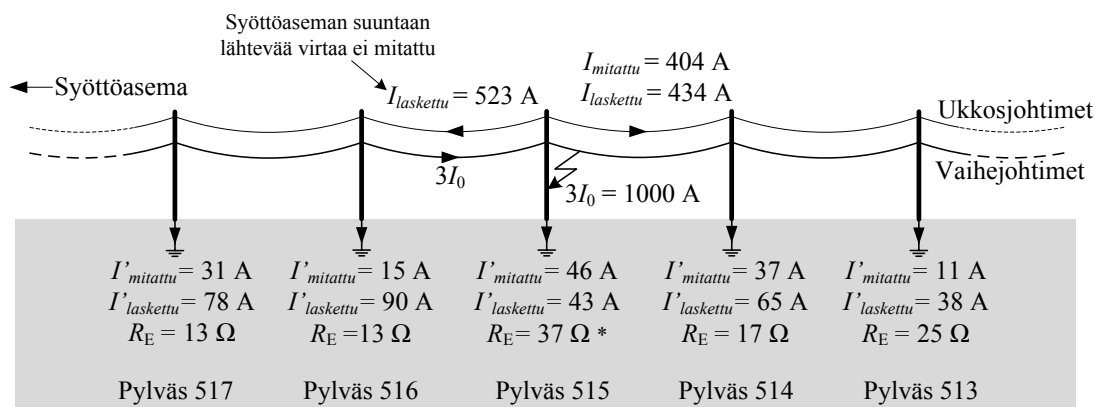
Arvot pylväsmaadoitusten resistansseille ja maaperän resistiivisyydelle valittiin johdon rakennusvaiheessa tehtyjen maadoitusten suunnittelumittausten tulosten perusteella. Näiden mittausten tulokset on esitetty liitteessä C. Maanpinnan potentiaalilaskennassa vikapaikassa Niesa käytettiin maaperän kaksikerrosmallia perustuen liitteessä C esitettyjen resistiivisyysmittausten tuloksiin. Ylemmän maakerroksen oletettiin ulottuvan kahden metrin syvyyteen ja sen resistiivisyydeksi oletettiin 1000  $\Omega$ m. Alapuolella olevan kerroksen resistiivisyydeksi oletettiin 100  $\Omega$ m.

Äkäsjohtisuus–Niesa-johdolla on teräsukkosjohtimet vikapaikan Niesa kohdalla. Teräsukkosjohtimien reduktiokertoimena käytettiin niille tyypillistä arvoa 0,91. Vastaava maapaluuimpedanssi jänneväliä kohden oli 0,44  $\Omega$ . Ukkosjohtimet vaihtuvat teräsaluumiiniukkosjohtimiksi johdon keskivaiheilla. Teräsaluumiiniukkosjohtimien maapaluuimpedanssina jänneväliä kohden käytettiin arvoa 0,134  $\Omega$ . Jännevälien oletettiin pysyvän vakiona koko johdon matkalla. Vikapaikan Niesa oletettiin olevan ukkosjohtimien vaihtumiskohdasta niin kaukana, ettei ukkosjohtimien vaihtumisen vaikutusta vikapaikasta näkyvään reduktiokertoimeen tarvitse huomioida.

### 7.4.2 Ukkosjohtimien virta ja pylväiltä maahan menevä virta

Kuva 50 esittää maasulkuvirralla 1 kA skaalatut mittaustulokset ja luvussa 4.2.1 esitetyllä menetelmällä lasketut arvot ukkosjohtimien virralla ja pylväsmaadoituksista maa-

han menevälle virralle, kun vikapaikkana on Niesa. Laskennassa on huomioitu voimajohdon jokaisen pylvään maadoitusresistanssi ja Äkäsjokisuun sähköaseman maadoitusimpedanssi.



\* Vikaantuneelle pylvälle oli tehty maadoitusjännitemittaus, jonka perusteella sen maadoitusresistanssi  $37 \Omega$  tunnettiin tarkasti. Muiden pylväiden virtojen laskemista varten käytettiin johdon rakennusvaiheessa tehtyjen maadoitusten suunnittelumittausten tulosten mukaisia pylväismaadoitusten maadoitusresistanssiarvoja (Liite C).

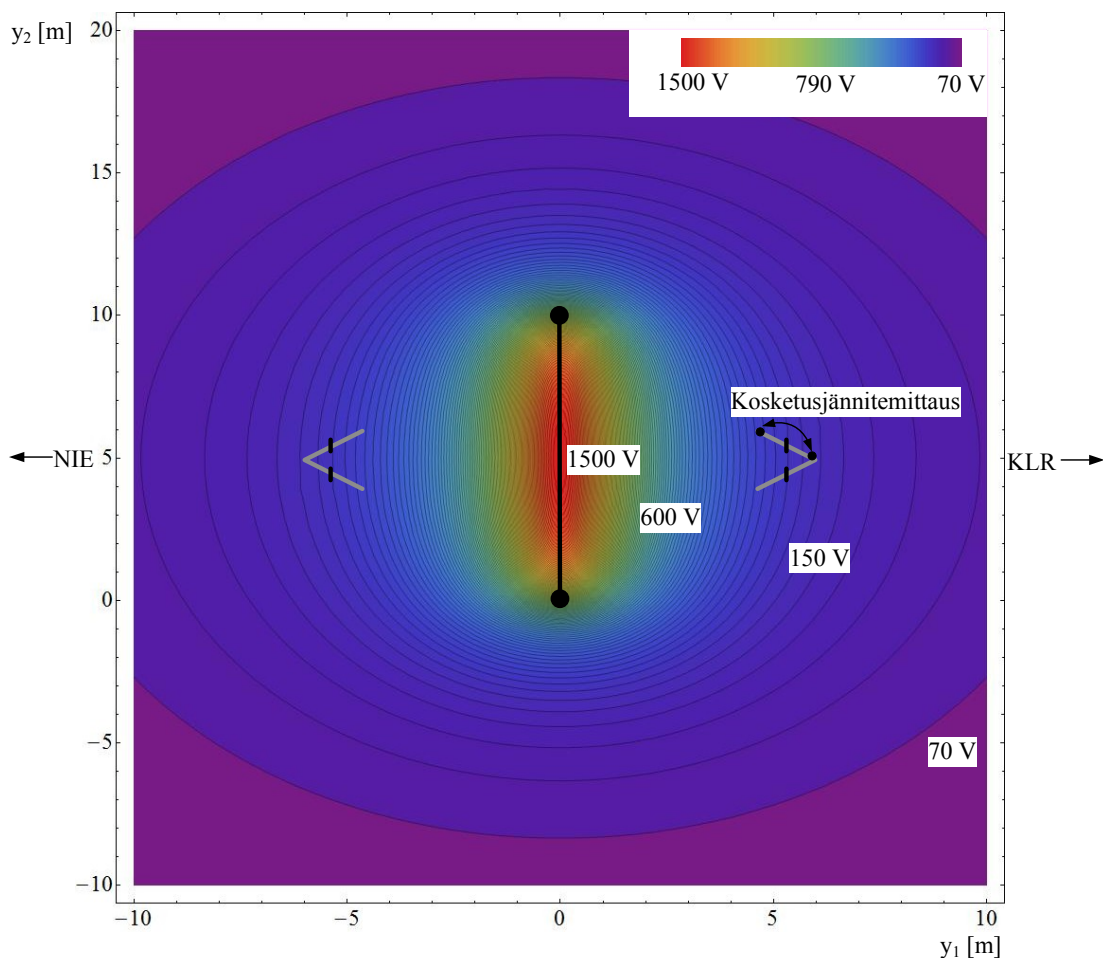
*Kuva 50: Skaalatut mittaustulokset ja lasketut tulokset ukkosjohtimien virroille ja pylvältä maahan meneville virroille. Kuvassa on esitetty myös pylväismaadoitusten suunnittelumittausten tuloksista saadut pylväiden maadoitusresistanssiarvot.*

Kuvasta 50 voidaan havaita, että ukkosjohtimien virtaa sekä vikaantuneen pylvään maadoituksesta maahan menevää virtaa pystyttiin arvioimaan laskentamenetelmillä melko tarkasti. Sen sijaan vikaantuneen pylvään viereisten pylväiden osalta käytetty laskentamenetelmä yliarvioi maahan menevän virran suuruutta.

Virtojen yliarviointi pylväiden 517, 516, 514 ja 513 osalta johtunee siitä, että kyseisten pylväiden maadoitusresistanssien arviointiin jouduttiin käyttämään liitteen C mukaisia voimajohdon rakennusvaiheessa tehtyjen maadoitusten suunnittelumittausten tuloksia. Luultavasti nämä tulokset eivät olleet enää paikkansapitäviä. Pylvään 515 maadoitusresistanssi  $37 \Omega$  tunnettiin työssä tehtyjen mittausten perusteella tarkasti ja näin ollen pylvältä maahan menevälle virralle saatiinkin laskemalla hyvin mittaustuloksia vastaava arvo. Johdon rakennusvaiheessa tehtyjen mittausten mukaan kyseisen pylvään maadoitusresistanssi olisi ollut vain  $25 \Omega$ . Näin ollen on todennäköistä, että myös viereisten pylväiden maadoitusresistanssit olivat todellisuudessa suurempia kuin vanhat suunnittelumittausten tulokset antavat ymmärtää. Pylväismaadoitusten maadoitusresistanssiin johdon käyttöänsä aikana voivat vaikuttaa esimerkiksi maaperän resistiivisyyden vaihtelu sekä mahdolliset korroosio- ja vaurioitumiskysymykset. Myös maaperän kosteuspitoisuus ja lämpötila voivat aiheuttaa maadoitusresistanssien vaihtelua lyhyelläkin aikavälillä.

### 7.4.3 Kosketusjännitteet ja maanpinnan potentiaali

Suurimmat mitatut kosketusjännitteet olivat kosketusjännitteitä haruseristimien yli. Kuva 51 esittää luvussa 4.2.2 esitetyllä menetelmällä lasketun maanpinnan potentiaalivikaantuneen pylvään ympäristössä vikapaikassa Niesa. Taulukko 15 esittää mittaustuloksista skaalatun ja lasketun suurimman kosketusjännitteen.



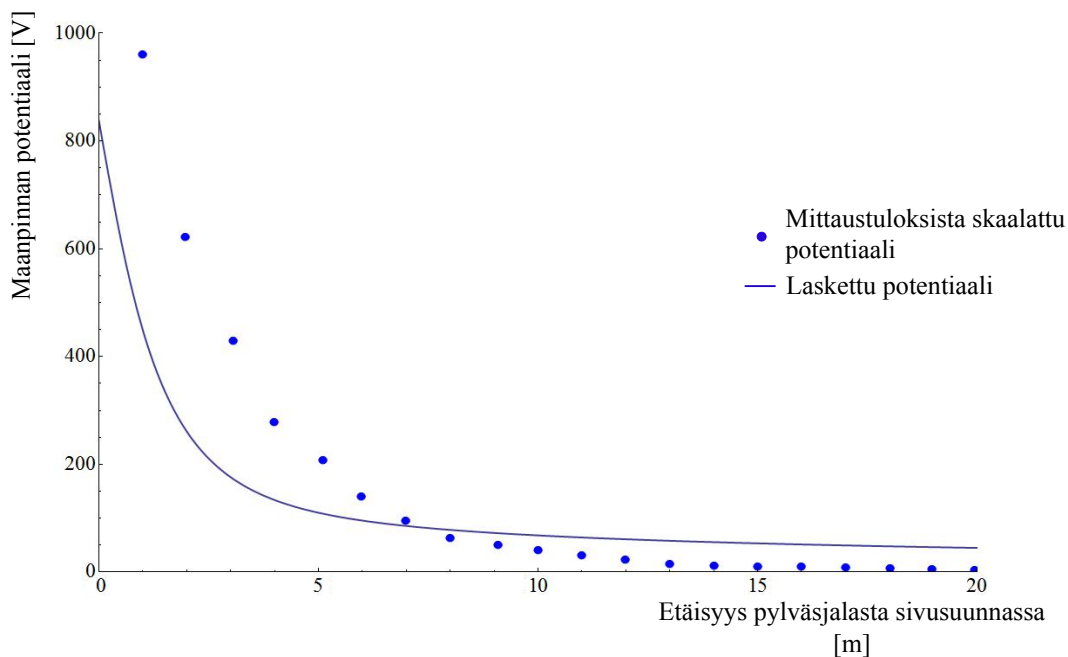
Kuva 51: Laskettu maanpinnan potentiaali vikapaikassa Niesa ylhäältä päin katsottuna.

Taulukko 15: Mittaustuloksista maasulkuvirralle 1 kA skaalattu ja laskettu suurin kosketusjännite vikapaikassa Niesa.

Vikapaikka	Mittaustuloksista skaalattu suurin kuormittamaton kosketusjännite	Laskettu suurin kuormittamaton kosketusjännite
Niesa	1650 V	1440 V

Taulukosta 15 voidaan havaita, että mittaustuloksista skaalattu ja laskettu suurin kosketusjännite vastaavat toisiaan melko hyvin. Kosketusjännitteiden tarkka laskennallinen arvioiminen on kuitenkin hankalaa, jollei maaperän ominaisuuksia tunneta tarkasti. Vikapaikassa Niesa maaperän ominaisuudet tunnettiin riittävän hyvin ja näin ollen kosketusjännitelaskelmissa päästiin hyvään tarkkuuteen.

Vikapaikassa Niesa mitattiin myös vikaantuneen pylvään maadoitusjännite. Maadoitusjännitteen mittaustulosten avulla voidaan tutkia potentiaalisuppiloa vikaantuneen pylvään ympäristössä. Kuva 52 esittää mittaustuloksista skaalatun ja lasketun maanpinnan potentiaalin vikapaikassa Niesa.



Kuva 52: Mittaustuloksista maasulkuvirrälle 1 kA skaalattu ja laskettu maanpinnan potentiaali vikapaikassa Niesa. Maanpinnan potentiaalin mittauspaiikka on esitetty tarkemmin luvun 6.2.2 kuvassa 46.

Kuvasta 52 voidaan havaita, että pylväsjalan lähellä maanpinnan potentiaali on laskentamenetelmän antamia arvoja selvästi suurempi. Syynä tähän voi olla se, että laskennassa ei ole huomioitu esimerkiksi pylväsjalokojen J-lenkkejä. J-lenkeistä maahan menevä virta vaikuttaa maanpinnan potentiaaliin lyhyillä etäisyyksillä pylväsjalasta. Myös maaperän epähomogeenisuus aiheuttaa eroja laskettujen ja mittaustuloksista skaalattujen arvojen välille. Kuitenkin laskemalla ja mittaustuloksista skaalaamalla saatujen potentiaalisuppiloiden muodot ovat samankaltaiset.

## 7.5 Laskentamenetelmien pätevyysalueet ja menetelmien luotettavuuden arviointi

Vertailemalla mittaustuloksia ja laskettuja tuloksia havaittiin, että tässä työssä kehitetyillä laskentamenetelmillä voidaan tutkia ukkosjohtimettoman läpimenevällä maajohtimella varustetun johdon maasulkutilannetta. Erityisesti maajohtimen virtaa, maadoitusjännitettä, maadoitusimpedanssia ja reduktiokerrointa pystyttiin arvioimaan hyvällä tarkkuudella. Laskelmien suurin epävarmuustekijä on maaperän paikallisten ominaisuuksien vaihtelu. Maaperän epähomogeenisuuden huomioiminen teoreettisessa tarkastelussa on työlästä ja pääsääntöisesti maaperän ominaisuuksia ei edes tunneta tarkasti. Maajohtimen virran, maadoitusjännitteen, maadoitusimpedanssin ja reduktiokertoimen osalta maaperän ominaisuuksien paikallisten vaihteluiden aiheuttamat epävarmuudet kuitenkin tasoittuvat, koska maajohtin on hyvin pitkä.

Ukkosjohtimettoman läpimenevällä maajohtimella varustetun johdon maasulkutilanteessa esiintyvien kosketus- ja askeljäännitteiden tarkka arvioiminen työssä kehitetyillä menetelmillä on haastavaa. Tämä johtuu siitä, että kosketus- ja askeljäännitteet ovat riippuvaisia maaperän paikallisista ominaisuuksista seisontakohdassa ja maaperän resistiivisyyden vaihteluista seisontakohdan ympäristössä. Maanpinnan potentiaalin nousua

ja sen avulla kosketus- ja askeljännitteiden suuruusluokkia pystytään kuitenkin arvioimaan.

Tässä työssä kehitetyillä laskentamenetelmillä voidaan tutkia myös ukkosjohtimellisen johdon maasulkutilannetta. Laskentamenetelmillä voidaan arvioida pylväiltä maahan meneviä virtoja ja ukkosjohtimien virtoja hyvällä tarkkuudella, mikäli pylväismaadoitusten maadoitusresistanssit tunnetaan. Laskettujen virtojen avulla voidaan arvioida esimerkiksi pylväiden maadoitusjännitteitä. Virtoja ei pystytä kuitenkaan arvioimaan tarkasti, jos pylväismaadoitusten maadoitusresistansseja ei tunneta. Mikäli tässä työssä kehitettyjä menetelmiä käytetään edellä mainittujen virtojen laskentaan, on syytä huomioda, että pylväismaadoitusten maadoitusresistanssien arvot voivat vaihdella johdon käyttöiän aikana.

Ukkosjohtimellisen johdon pylväiden ympäristössä esiintyvien kosketus- ja askeljännitteiden tarkka laskennallinen arvioiminen on vaikeaa. Maaperän ominaisuuksien paikalliset vaihtelut aiheuttavat epävarmuuksia laskelmiin. Laskentamenetelmillä pystytään kuitenkin arvioimaan kosketus- ja askeljännitteiden suuruusluokkia.

## 7.6 Ukkosjohtimettoman 110 kV:n avojohdon käyttömahdollisuudet ja johtorakenteen käyttöön liittyvät suositukset

Tämän työn tulosten perusteella voidaan todeta, että ukkosjohtimettomia 110 kV:n avojohdota voidaan käyttää Suomessa tietyissä erityisolosuhteissa. Työn tulosten pohjalta voidaan määrittää ehdot, joiden täyttyessä ukkosjohtimien poisjättäminen on sallittua. Nämä ehdot kuvataan ja perustellaan tässä luvussa.

Ukkosjohtimettomille 110 kV:n avojohdoille on aina asennettava pylväismaadoitukseen yhdistetty läpimenevä maajohdin tai useampia maajohtimia. Ukkosjohtimettomia läpimenevällä maajohtimella varustettuja 110 kV:n avojohdota voidaan käyttää, jos alla esitetyt kriteerit täyttyvät.

- Johdon maasulkuvirta on pieni. Johto soveltuu liitettäväksi sammutettuun verkkoon ja myös maadoitettuun verkkoon, mikäli maasulkuvirta on riittävän pieni.
- Johdon sijaintipaikassa esiintyy jääkuormia.
- Johto sijaitsee harvaan asutulla alueella.
- Johtoreitillä ei ole paljon risteäviä kaapeleita.
- Maaperä johdon sijaintipaikassa on sellaista, että maajohdin voidaan upottaa maahan.
- Alueen salamatiheys on pieni.

Edellisten ehtojen lisäksi on oleellista, että maajohtimen kuntoa pystytään valvomaan tai arvioimaan jollain tavalla. Lisäksi on suositeltavaa, että kaikille 110 kV:n avojohdoille asennetaan sähköasemien lähelle ukkosjohtimet vähintään kahden kilometrin etäisyydelle asemista. Ukkosjohtimettomia johtota ei suositella rakennettavaksi syöttöjohdoiksi sellaisille kuormille, jotka voivat kärsiä jännitekuoppien vaikutuksista.

Ukkosjohtimettoman läpimenevällä maajohtimella varustetun avojohdon maasulkuvirran tulee olla pieni, jotta pylväiden kosketusjännitteet ja erityisesti maadoitusjännitteet pysyvät riittävän alhaisina. Mikäli johtoreitin lähellä on kaapeleita tai muita asennuksia, jotka voivat maasulkutilanteen yhteydessä kuljettaa siirtyviä potentiaaleja, johdon pylväiden maadoitusjännitteiden tulee pysyä alhaisempina kuin siirtyville potentiaaleille asetetut vaatimukset. Pahimmassa tapauksessa koko maadoitusjännite voisi siirtyä esimerkiksi viestintäverkon kaapeleita pitkin. Maadoitusjännitteen suuruutta voidaan arvi-

oida tässä työssä luvussa 4.1.4 esitetyllä yhtälöllä (35). Siirtyviin potentiaaleihin liittyvien riskien takia ukkosjohtimettomilla johdoilla suurimmat sallitut maasulkuvirrat ovat suuruusluokaltaan noin 1–2 kA.

Ukkosjohtimettoman avojohdon sijaintipaikassa tulee esiintyä jääkuormia, jolloin ukkosjohtimien poisjättäminen voidaan perustella jääkuormien aiheuttamien haittojen avulla. Lisäksi ukkosjohtimettoman johdon tulee sijaita harvaan asutulla alueella ja johdoreitillä ei saa olla paljon risteäviä kaapeleita. Nämä rajoitukset johtuvat siirtyvien potentiaalien aiheuttamista riskeistä. Lisäksi johdon sijaintipaikassa maaperän tulee olla sellaista, että maajohdin voidaan upottaa maahan helposti. Koska nykyään käytössä olevalla auraustekniikalla maajohdin voidaan upottaa tavalliseen maaperään melko vaivattomasti, ukkosjohtimettoman avojohdon rakennuskustannukset jäävät pienemmiksi kuin normaalin ukkosjohtimellisen avojohdon kustannukset.

Ukkosjohtimettomalla johdolla ukkosvikojen määrä tulee olemaan suurempi kuin ukkosjohtimellisellä johdolla. Näin ollen ukkosjohtimettomia johtoja voidaan käyttää ainoastaan paikoissa, joissa salamatiheys on pieni. Ukkosvikojen lisääntymisen myötä on odotettavissa, että myös monivaiheisten vikojen määrä kasvaa. Myös eristinvaurioiden määrä voi kasvaa. Ukkosviat ovat lähes aina ohimeneviä, eivätkä aiheuta merkittävää haittaa normaaleille yksityisasiakkaille. Sen sijaan erityisesti monivaiheisten vikojen aiheuttamista jännitekuopista voi olla haittaa esimerkiksi prosessiteollisuudelle. Näin ollen ukkosjohtimettomaa avojohdtoa ei ole suositeltavaa käyttää, jos johto syöttää prosessiteollisuutta tai muita jännitekuoppien vaikutuksista kärsiviä kuormia.

Salamaniskujen aiheuttamat syöksyaallot voivat vaurioittaa sähköasemilla olevia laitteita. Näin ollen kaikille 110 kV:n avojohdoille on suositeltavaa asentaa ukkosjohtimet asemien lähelle vähintään kahden kilometrin etäisyydelle. Kauempana asemasta ukkosjohtimet voidaan korvata läpimenevällä maajohtimella, mikäli muut ukkosjohtimien poisjättämiselle määritellyt kriteerit täyttyvät.

Jos ukkosjohtimettomalle johdolle asennettu läpimenevä maajohdin menee poikki ja maasulku tapahtuu katkeamiskohdan lähellä, vaarajännitteiden suuruus vikapaikan ympäristössä kasvaa merkittävästi. Näin ollen maajohtimen kuntoa tulee pystyä valvomaan jollain tavalla. Valvonta voidaan toteuttaa esimerkiksi upottamalla valokaapeli samaan uraan maajohtimen kanssa. Jos valokaapeli menee poikki, voidaan olettaa, että maajohdinkin on mennyt poikki. Jos valokaapelia ei upoteta maajohtimen viereen, tulee johtokadulle asentaa kaksi maajohdinta riittävälle etäisyydelle toisistaan. Tällöin, jos toinen maajohdin menee poikki, galvaaninen yhteys säilyy toisen maajohtimen kautta, eivätkä vaarajännitteet kasva merkittävästi.

Suomessa ukkosjohtimettomien johtojen käyttömahdollisuudet rajoittuvat ensisijaisesti maan pohjoisosiin. Tämä johtuu siitä, että siellä maasulkuvirralla asetetut vaatimukset täyttyvät, salamatiheys on riittävän pieni ja maasto tarpeeksi harvaan asuttua. Lisäksi pahimmat jääkuorma-alueet sijaitsevat Pohjois-Suomessa. Johtorakenne soveltuu käytettäväksi myös muualla Suomessa, mikäli sen käytölle määritellyt ehdot täyttyvät.

## 7.7 Kolari–Pello-johdon turvallisuus

Kolari–Pello-johdon turvallisuusriskit liittyvät kosketusjännitteisiin ja erityisesti siirtyviin potentiaaleihin. Tämän työn mittaustulosten perusteella voidaan laskea johdon ympäristössä maasulkutilanteessa esiintyvät todelliset kosketusjännitteet sekä pylväiden maadoitusjännitteet.

Jos Kolari–Pello-johto on liitetty maadoitettuun kantaverkkoon, johdon suurin maasulkuvirta on 0,58 kA ja laukaisuaika 0,2 s. Skaalaamalla tämän työn mittaustulok-

set maasulkuvirralla 0,58 kA johdon suurimmaksi kosketusjännitteeksi saadaan 270 V ja vikaantuneen pylvään maadoitusjännitteeksi 660 V. Mikäli johto on kytketty sammutettuun verkkoon, maasulkuvirta ja vaarajännitteet jäävät hyvin pieniksi.

Kosketusjännitteisiin liittyvät turvallisuusriskit ovat Kolari–Pello-johdolla vähäisiä, sillä se sijaitsee pääosin asuttamattomilla erämaa-alueilla. Ihmisiä saattaa kuitenkin liikkua esimerkiksi teiden varsilla sijaitsevien pylväspaikkojen lähellä. Tällaisissa paikoissa voidaan kohtuudella otaksua, että ihmiset käyttävät kenkiä. Näin ollen suurin sallittu kosketusjännite voidaan lukea luvussa 3.3 esitetystä kuvasta 17 käyrältä  $U_{T2}$  tai laskea yhtälöllä (19). Suurimmaksi sallituksi kosketusjännitteeksi saadaan noin 1300 V. Koska johdon mittaustuloksista skaalattu suurin kosketusjännite oli 270 V, voidaan todeta, että Kolari–Pello-johto on kosketusjännitevaatimusten suhteen hyväksytty suurella marginaalilla.

Kolari–Pello-johdon suurimmat turvallisuusriskit liittyvät kaapeleita tai muita pitkiä johtimia pitkin siirtyviin potentiaaleihin. Näin ollen johdon suurimmaksi turvallisuusriskiksi muodostuvat viestintäverkkoon siirtyvät potentiaalit. Luvun 3.5 mukaisesti viestintäverkkoon siirtyvän potentiaalin suurimmaksi arvoksi sallitaan 1200 V, kun sen vaikutusaika on enintään 0,2 s. Koska Kolari–Pello-johdolla vikaantuneen pylvään maadoitusjännitteeksi saatiin 660 V, voidaan todeta, että siirtyviin potentiaaleihin liittyvien vaatimusten suhteen johto on hyväksytty.

Kolari–Pello-johdolla ei esiinny suuria vaarajännitteitä. Näin ollen voimajohto on turvallinen. Johto soveltuu käytettäväksi sekä sammutettuun verkkoon että maadoitettuun kantaverkkoon kytkettynä.



## 8 Johtopäätökset

Tässä työssä tutkittiin maasulkutilannetta ukkosjohtimettomalla läpimenevällä maajohtimella varustetulla 110 kV:n avojohdolla. Tavoitteena oli selvittää ukkosjohtimettoman läpimenevällä maajohtimella varustetun Kolari–Pello-johdon turvallisuus maasulkutilanteessa esiintyvien vaarajännitteiden kannalta. Lisäksi tavoitteeksi asetettiin edellä kuvatun johtorakenteen yleisten käyttömahdollisuuksien selvittäminen. Tutkimus toteutettiin mittausten ja teoreettisten laskelmien avulla. Työn tavoitteet saavutettiin.

Työssä suoritettujen teoreettisten tarkasteluiden ja saatujen mittaustulosten perusteella havaittiin, että ukkosjohtimeton läpimenevällä maajohtimella varustettu avojohto käyttäytyy maasulkutilanteessa pääpiirteittäin samalla tavalla kuin tavallinen ukkosjohtimellinen avojohto. Oleellisin ero johtorakenteiden välillä liittyy maanpinnan potentiaalिन nousun leviämiseen vikapaikan ympäristössä. Koska läpimenevä maajohdin on pitkä, se levittää potentiaalisuppilon laajalle alueelle. Näin ollen siirtyvien potentiaalien aiheuttamat riskit ukkosjohtimettomalla läpimenevällä maajohtimella varustetulla johdolla voivat olla suurempia kuin tavallisella ukkosjohtimellisellä johdolla. Kosketusjännitteistä aiheutuvat riskit ovat läpimenevällä maajohtimella varustetulla johdolla normaaleissa maadoitusolosuhteissa pieniä.

Tässä työssä kehitetyt laskentamenetelmät osoitettiin toimiviksi vertailemalla menetelmillä laskettuja tuloksia mittaustuloksiin. Menetelmillä voidaan tutkia maasulkutilannetta ukkosjohtimettomalla läpimenevällä maajohtimella varustetulla johdolla. Laskentamenetelmät perustuvat maajohtimen mallintamiseen differentiaalisen pieninä alkioina ja mallin perusteella muodostettujen differentiaaliyhtälöiden ratkaisemiseen. Työssä kehitetyillä menetelmillä pystytään arvioimaan maajohtimen virtaa, reduktiokerrointa, pylväiden maadoitusimpedanssia ja vikaantuneen pylvään maadoitusjännitettä hyvällä tarkkuudella. Maanpinnan potentiaalिन nousua, kosketusjännitteitä ja askeljäännitteitä pystytään arvioimaan karkeasti.

Työn tulosten pohjalta havaittiin, että ukkosjohtimettomia 110 kV:n avojohtoja voidaan käyttää Suomessa tietyissä erityisolosuhteissa. Ukkosjohtimettomille avojohdoille on aina asennettava pylväsmaadoituksiin yhdistetty läpimenevä maajohdin tai useampia maajohtimia. Ukkosjohtimettomia läpimenevällä maajohtimella varustettuja 110 kV:n avojohtoja voidaan käyttää, jos alla esitetyt kriteerit täyttyvät.

- Johdon maasulkuvirta on pieni. Johto soveltuu liitettäväksi sammutettuun verkkoon ja myös maadoitettuun verkkoon, mikäli maasulkuvirta on riittävän pieni.
- Johdon sijaintipaikassa esiintyy jääkuormia.
- Johto sijaitsee harvaan asutulla alueella.
- Johtoreitillä ei ole paljon risteäviä kaapeleita.
- Maaperä johdon sijaintipaikassa on sellaista, että maajohdin voidaan upottaa maahan.
- Alueen salamatiheys on pieni.

Edellisten ehtojen lisäksi on oleellista, että maajohtimen kuntoa pystytään valvomaan tai arvioimaan jollain tavalla. Lisäksi suositellaan, että kaikille 110 kV:n avojohdoille asennetaan sähköasemien lähelle ukkosjohtimet vähintään kahden kilometrin etäisyydelle asemista. Ukkosjohtimettomia johtoja ei suositella rakennettavaksi syöttöjohdoiksi sellaisille kuormille, jotka voivat kärsiä jännitekuoppien vaikutuksista. Edellä esitetyt vaatimukset ja suositukset on perusteltu tarkemmin luvussa 7.6.

Mittaustulosten perusteella osoitettiin, että ukkosjohtimeton Kolari–Pello-johto on turvallinen. Johdon maasulkutilanteessa esiintyviä vaarajännitteitä tutkittiin mittaustulosten avulla ja havaittiin, että johto täyttää sille asetetut vaatimukset. Kolari–Pello-

johto soveltuu käytettäväksi sekä sammutettuun verkkoon että maadoitettuun kanta-verkkoon kytkettynä. Tarkemmat perustelut johdon turvallisuudesta on esitetty luvussa 7.7.

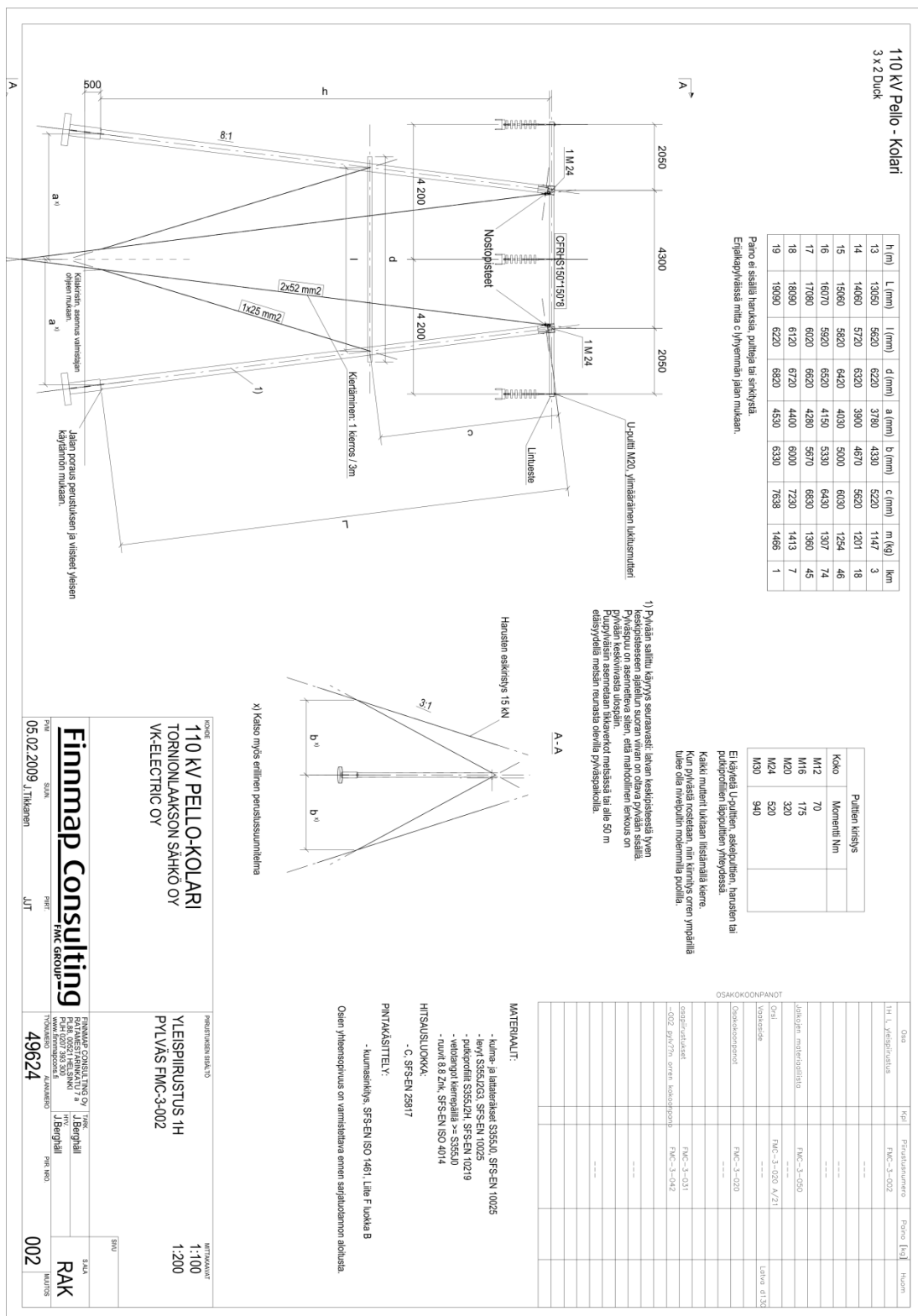
## Viitteet

- [1] SFS 6001 + A1 +A2. Suurjännitesähkösäennukset. 3. painos. Helsinki, Suomen standardoimisliitto, 2009. 118 s.
- [2] Elovaara, J. ja Haarla, L. Sähköverkot I: Järjestelmäteknikka ja sähköverkon laskenta. Helsinki, Gaudeamus, 2011.
- [3] Huhtanen, U. Selvitys sammutettujen 110 kV verkkojen muuttamisesta osittain maadoitetuiksi verkoiksi. Diplomityö, Teknillinen korkeakoulu, Sähkötekniikan osasto, Espoo, 1998.
- [4] Elovaara, J. ja Haarla, L. Sähköverkot II: Verkon suunnittelu, järjestelmät ja laitteet. Helsinki, Gaudeamus, 2011.
- [5] SFS-EN 50341-1. Vaihtosähköilmajohdot yli 45 kV jännitteillä. Osa 1: Yleiset vaatimukset. Yhteiset määrittelyt. Helsinki, Suomen standardoimisliitto, 2002. 404 s.
- [6] ANSI/IEEE Std 81-1983. IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System. New York, The Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 1983. 49 s.
- [7] Valjus, J. et al. Sähköverkkojen maadoitusten suunnittelu, rakentaminen ja mittaaminen. Helsinki, INSKO, 1979.
- [8] Saraoja, E. K. Maa- ja kallioperän ominaisvastus Suomessa ja voimajohtojen vaikutus viestiavojohtoihin. Väitöskirja, Teknillinen korkeakoulu, Helsinki, 1946.
- [9] Leino, K. et al. Sähkölaitosten suojaustekniikka. Helsinki, INSKO, 1969.
- [10] Pesonen, A. et al. 110 kV johtojen suunnittelu, rakentaminen ja kunnossapito. Helsinki, INSKO, 1976.
- [11] Hänninen, K. Voimansiirtojohtojen ukkoshäiriötiheyden tutkiminen. Diplomityö, Teknillinen korkeakoulu, Sähkötekniillinen osasto, Espoo, 1982.
- [12] Fingrid Oyj. Johtoviat Fingridin verkossa. Sisäinen raportti. Helsinki, 2011.
- [13] Mäkelä, A. Salamahavainnot 2010. Verkkodokumentti. Päivitetty 17.11.2010. Viitattu 12.7.2011. Saatavissa: <https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/18419/2010nro5.pdf?sequence=3>.
- [14] Eliasson, A. J. et al. Systems for prediction and monitoring of ice shedding, anti-icing and de-icing for power line conductors and ground wires. CIGRE TECHNICAL BROCHURE, nro.438, Working Group B2.29, 2010.
- [15] Hoppula, P. Tykkylumi ja otolliset säätilanteet sen aiheuttamille puustovaurioille. Pro gradu, Helsingin yliopisto, Fysikaalisten tieteiden laitos, Helsinki, 2005.

- [16] Farzaneh, M. et al. *Atmospheric Icing of Power Networks*. New York, Springer 2008.
- [17] Makkonen, L. Johtava tutkija. Teknologian tutkimuskeskus VTT. Vuorimiehentie 5, 02150 Espoo. Haastattelu 23.5.2011.
- [18] Kari Rohkimainen. Kunnossapitopäällikkö. Eltel Networks Pohjoinen. Kestitie 9, 91430 Leppiniemi. Haastattelu 29.4.2011.
- [19] Sakis Meliopoulos, A. P. *Power System Grounding and Transients*. New York, Marcel Dekker, inc. 1988.
- [20] Tagg, G. F. *Earth Resistances*. London, George Newnes Limited, 1964.
- [21] 43 D/2010 M. Määräys viestintäverkon sähköisestä suojaamisesta. Helsinki, Vies-tintävirasto, 2010. 8 s.
- [22] SFS-EN 50341-3-7. Vaihtosähköilmajohdot yli 45 kV jännitteillä. Osa 3-7: Suo-men kansalliset velvoittavat määrittelyt. 2. painos. Helsinki, Suomen standar-doimisliitto, 2006. 49 s.
- [23] SFS 6000-4-44. Pienjännitesähköasennukset. Osa 4-44: Suojausmenetelmät. Suo-jaus jännitehäiriöiltä ja sähkömagneettisilta häiriöiltä. 2. painos. Helsinki, Suomen standardoimisliitto, 2007. 40 s.
- [24] Pesonen, A., Kattelus, J., Alatalo, P. ja Grand, G. *Earth Potential Rise and Tele-communication Lines*. International Conference on Large High Tension Electric Systems. Paris, 24.8.–2.9.1970. Paris, CIGRE, 1970.
- [25] Karlsson, D., Nordberg, P. *Earthing of 130 kV Power Lines – Effects on Dependa-bility and Line Cost*. Transmission and Distribution Conference and Exposition. At-lanta, 28.10.–2.11.2001. vol. 2. s. 609–614.
- [26] Sebo, S. A. *Zero-Sequence Current Distribution Along Transmission Lines*. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1969, vol. 88, nro 6, s. 910–919.

# Liite A: Kolari–Pello-johdon teknisiä tietoja

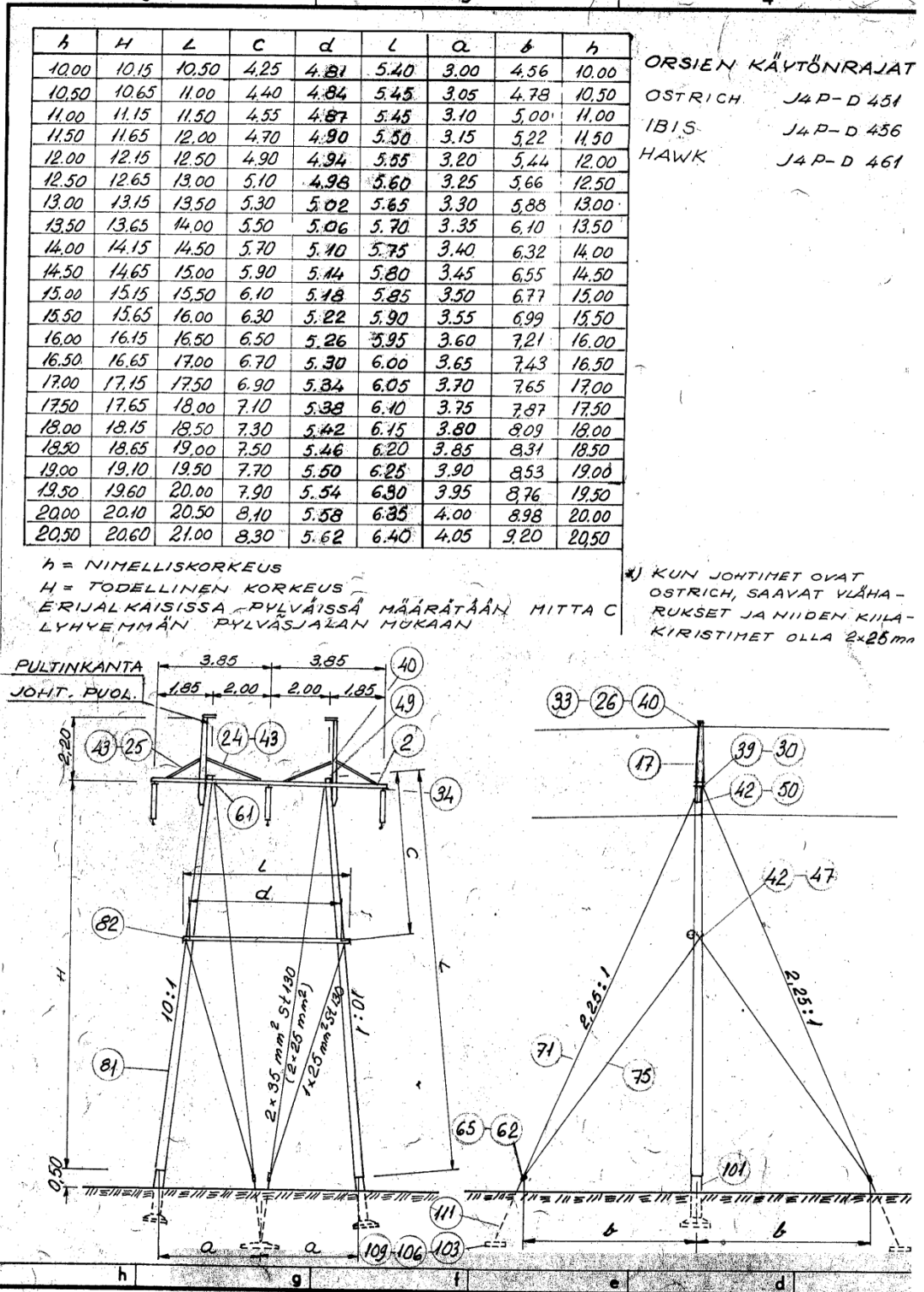
Tässä liitteessä esitetään teknisiä tietoja Kolari–Pello-johdolta. Kuva A1 esittää johdon tyypillisimpien pylväiden mitat ja näiden pylväiden lukumäärät.



Kuva A1: Kolari–Pello-johdon tyypillisimmät pylväät.

## Liite B: Äkäsjokisuus–Niesa-johdon teknisiä tietoja

Tässä liitteessä esitetään teknisiä tietoja Äkäsjokisuus–Niesa-johdolta. Kuva B1 esittää johdon tyypillisempien pylväiden mitat. Kuva on jaettu tälle ja seuraavalle sivulle.

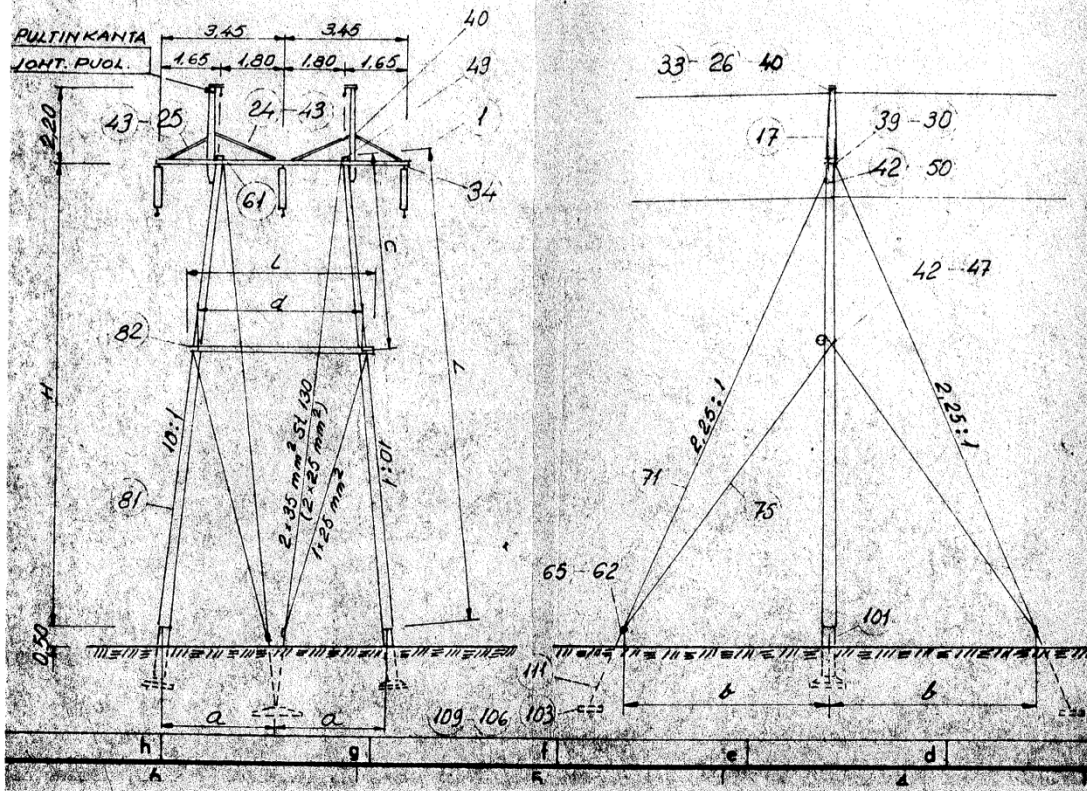


A	H	L	C	d	L	a	b	h
10.00	10.15	10.50	4.25	4.41	5.00	2.80	4.56	10.00
10.50	10.65	11.00	4.40	4.44	5.05	2.85	4.78	10.50
11.00	11.15	11.50	4.55	4.47	5.05	2.90	5.00	11.00
11.50	11.65	12.00	4.70	4.50	5.10	2.95	5.22	11.50
12.00	12.15	12.50	4.90	4.54	5.10	3.00	5.44	12.00
12.50	12.65	13.00	5.10	4.58	5.15	3.05	5.66	12.50
13.00	13.15	13.50	5.30	4.62	5.20	3.10	5.88	13.00
13.50	13.65	14.00	5.50	4.66	5.25	3.15	6.10	13.50
14.00	14.15	14.50	5.70	4.70	5.30	3.20	6.32	14.00
14.50	14.65	15.00	5.90	4.74	5.30	3.25	6.55	14.50
15.00	15.15	15.50	6.10	4.78	5.35	3.30	6.77	15.00
15.50	15.65	16.00	6.30	4.82	5.40	3.35	6.99	15.50
16.00	16.15	16.50	6.50	4.86	5.45	3.40	7.21	16.00
16.50	16.65	17.00	6.70	4.90	5.50	3.45	7.43	16.50
17.00	17.15	17.50	6.90	4.94	5.50	3.50	7.65	17.00
17.50	17.65	18.00	7.10	5.98	5.55	3.55	7.87	17.50
18.00	18.15	18.50	7.30	5.02	5.60	3.60	8.09	18.00
18.50	18.65	19.00	7.50	5.06	5.65	3.65	8.31	18.50
19.00	19.10	19.50	7.70	5.10	5.70	3.70	8.53	19.00
19.50	19.60	20.00	7.90	5.14	5.70	3.75	8.76	19.50
20.00	20.10	20.50	8.10	5.18	5.75	3.80	8.98	20.00
20.50	20.60	21.00	8.30	5.22	5.80	3.85	9.20	20.50

ORSIEN KÄYTTÖRAJAT  
 OSTRICH J4P-D 430  
 IBIS J4P-D 435  
 HAWK J4P-D 460

h = NIMELLISKORKEUS  
 H = TODELLINEN KORKEUS  
 ERIJALKAISISSA Pylväissä MÄÄRÄTÄÄN MITTA C  
 LYHYEMMÄN Pylväsjalan MUKAAN

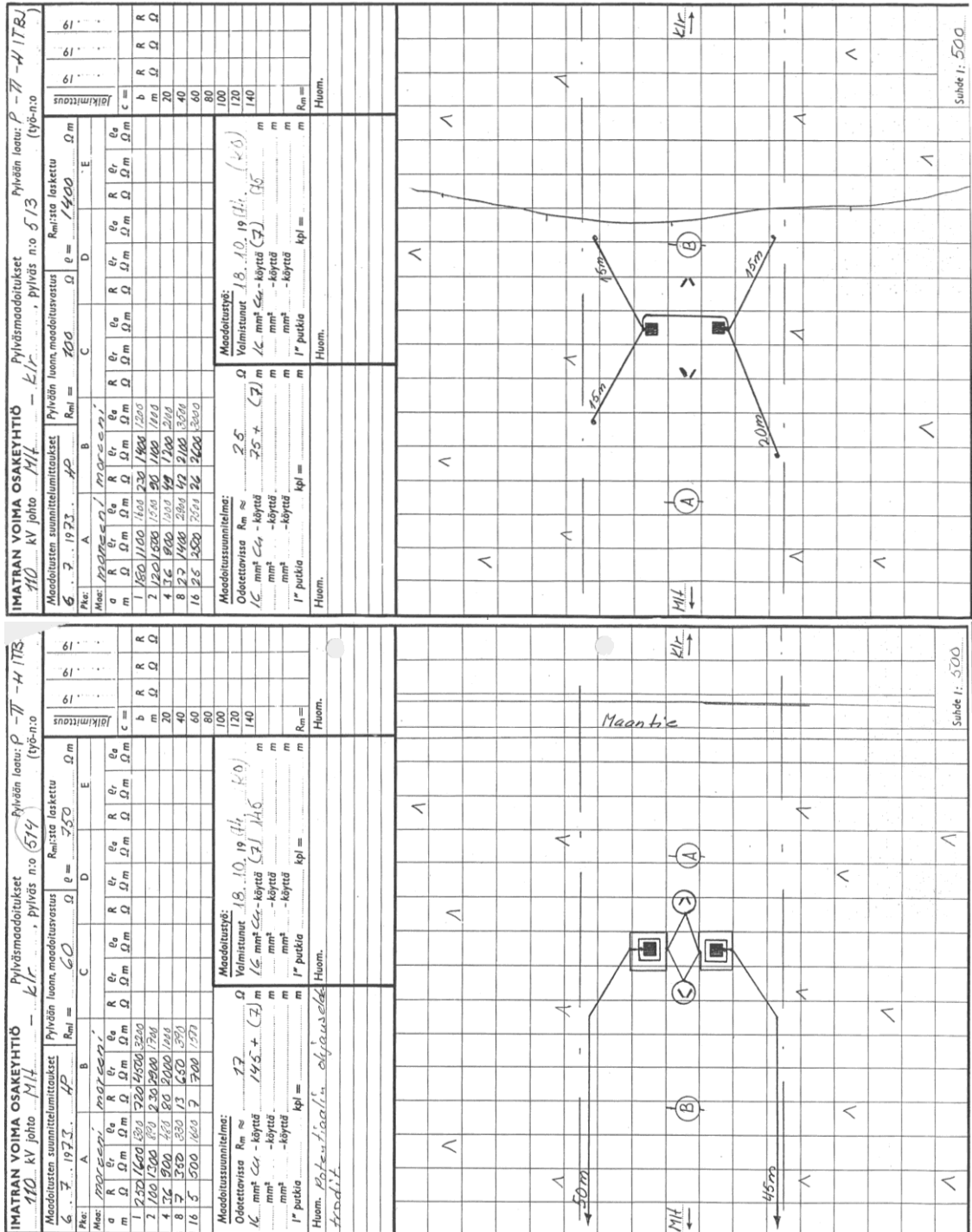
\* KUN JOHTIMET OVAT  
 OSTRICH, SAAVAT VLÄHARUK-  
 SET JA NIIDEN KIILAKIRIS-  
 TÄJÄT OLLA 2x25 mm<sup>2</sup>



Kuva B1: Äkäsjojisuus-Niesajohdon kaksi yleisintä pylvästyppiä.

# Liite C: Äkäsjokisuu–Niesa-johdon maadoitusten suunnittelumittausten tulokset

Tässä liitteessä on esitetty Äkäsjokisuu–Niesa-johdon rakennusvaiheessa tehtyjen maadoitusten suunnittelumittausten tulokset niiltä pylväiltä, joille tässä työssä tehtiin mittauksia. Kuva C1 esittää suunnittelumittausten tulokset pylväiden 513–517 osalta. Näille pylväille tehtiin mittauksia, kun vikapaikkana oli Niesa. Tällöin vika oli tehty pylväälle 515. Kuva C2 esittää suunnittelumittausten tulokset pylväiden 539–543 osalta. Näille pylväille tehtiin mittauksia, kun vikapaikkana oli Äkäsjoki. Tällöin vika oli tehty pylväälle 541. Kuvat C1 ja C2 on jaettu useammalle sivulle.





**IMATRAN VOIMA OSAKEYHTIÖ** Pylväsmadoitukset - *klr* Pylvään laatu: P - *H* (TRJ)  
 110 kV johto *MH* Pylväs n:o *575* (työ-n:o)

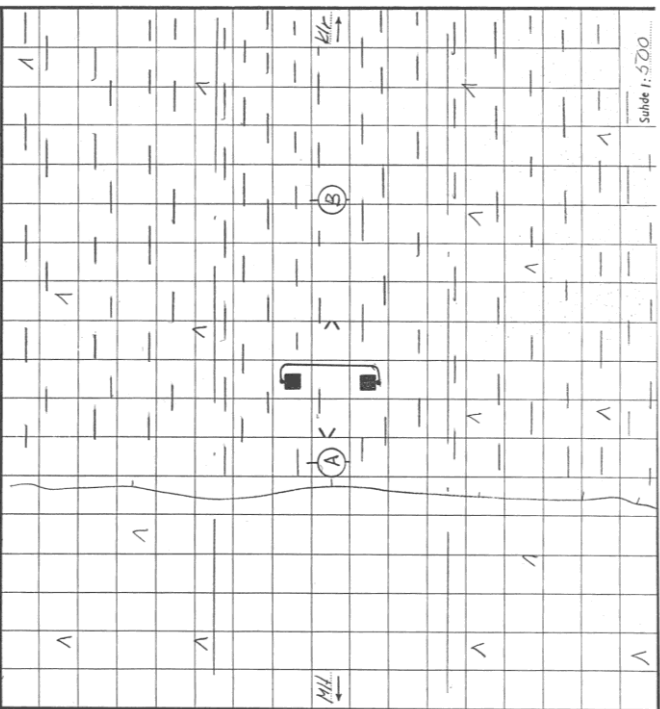
Madoitusten suunnittelumittaukset Pylvään luoma madoitusvastus R<sub>m</sub> = *26* Ω e = *2,20* Ω m

Pks:	A			B			C			D			E		
	R	θ <sub>r</sub>	θ <sub>g</sub>	R	θ <sub>r</sub>	θ <sub>g</sub>	R	θ <sub>r</sub>	θ <sub>g</sub>	R	θ <sub>r</sub>	θ <sub>g</sub>	R	θ <sub>r</sub>	θ <sub>g</sub>
a	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
b	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
c	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
100															
170															
140															
R <sub>m</sub>															

Madoitussummitelma:  
 Odotettavissa R<sub>m</sub> ≈ *25* Ω  
 16 mm<sup>2</sup> Cu - käyttö *10* (7)  
 mm<sup>2</sup> - käyttö  
 mm<sup>2</sup> - käyttö  
 1<sup>o</sup> putkia kpl =

Madoitusyö:  
 Valmistunut *21.10.1994* (40)  
 16 mm<sup>2</sup> Cu - käyttö (7) 10  
 mm<sup>2</sup> - käyttö  
 mm<sup>2</sup> - käyttö  
 1<sup>o</sup> putkia kpl =

Huom.



**IMATRAN VOIMA OSAKEYHTIÖ** Pylväsmadoitukset - *klr* Pylvään laatu: P - *H* (TRJ)  
 110 kV johto *MH* Pylväs n:o *576* (työ-n:o)

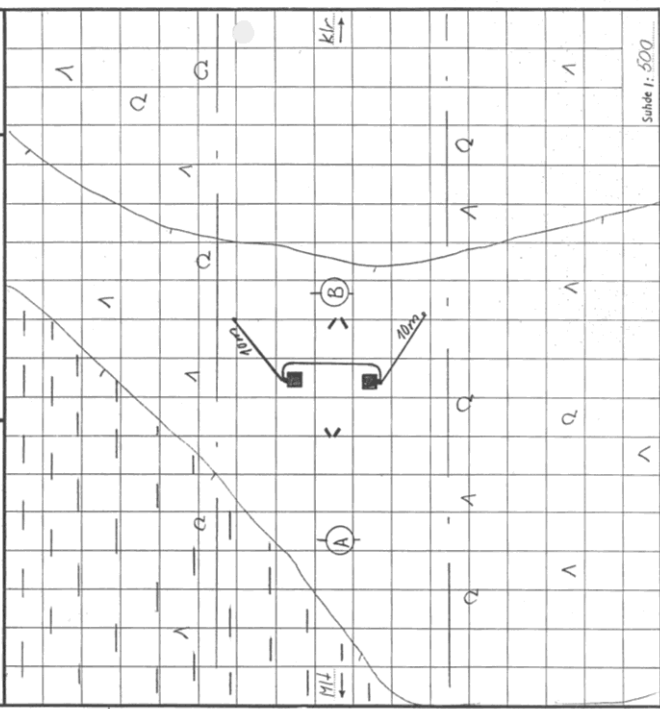
Madoitusten suunnittelumittaukset Pylvään luoma madoitusvastus R<sub>m</sub> = *34* Ω e = *3,80* Ω m

Pks:	A			B			C			D			E		
	R	θ <sub>r</sub>	θ <sub>g</sub>	R	θ <sub>r</sub>	θ <sub>g</sub>	R	θ <sub>r</sub>	θ <sub>g</sub>	R	θ <sub>r</sub>	θ <sub>g</sub>	R	θ <sub>r</sub>	θ <sub>g</sub>
a	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
b	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
c	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
100															
170															
140															
R <sub>m</sub>															

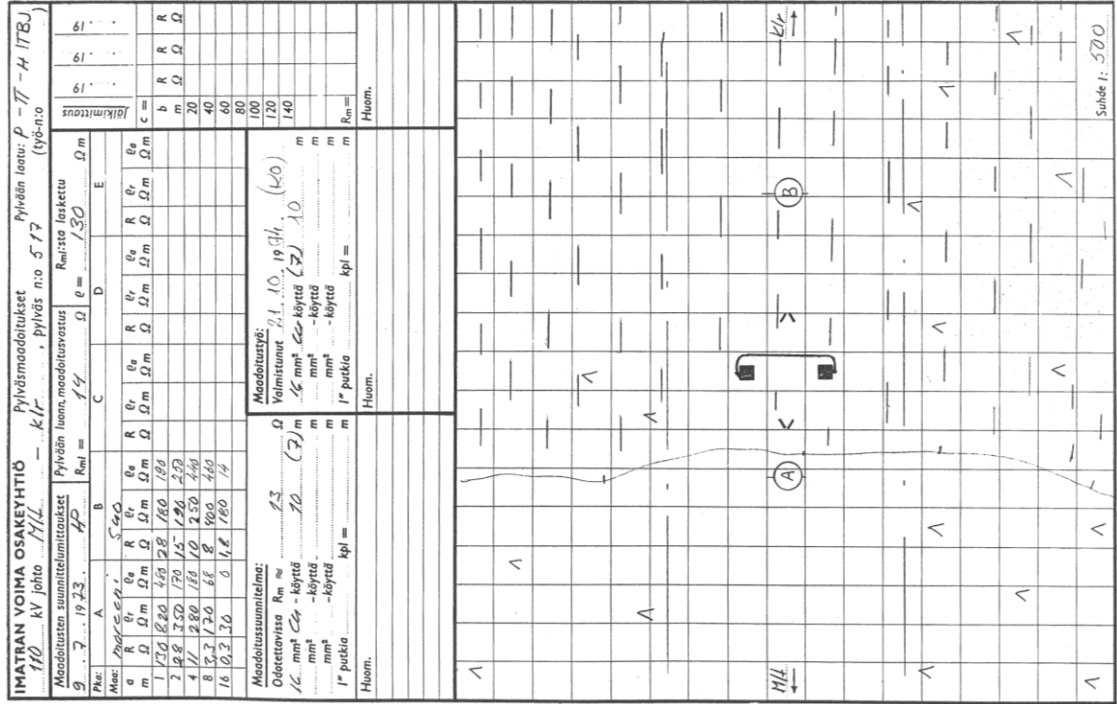
Madoitussummitelma:  
 Odotettavissa R<sub>m</sub> ≈ *33* Ω  
 16 mm<sup>2</sup> Cu - käyttö *30* (7)  
 mm<sup>2</sup> - käyttö  
 mm<sup>2</sup> - käyttö  
 1<sup>o</sup> putkia kpl =

Madoitusyö:  
 Valmistunut *21.10.1994* (40)  
 16 mm<sup>2</sup> Cu - käyttö (7) 30  
 mm<sup>2</sup> - käyttö  
 mm<sup>2</sup> - käyttö  
 1<sup>o</sup> putkia kpl =

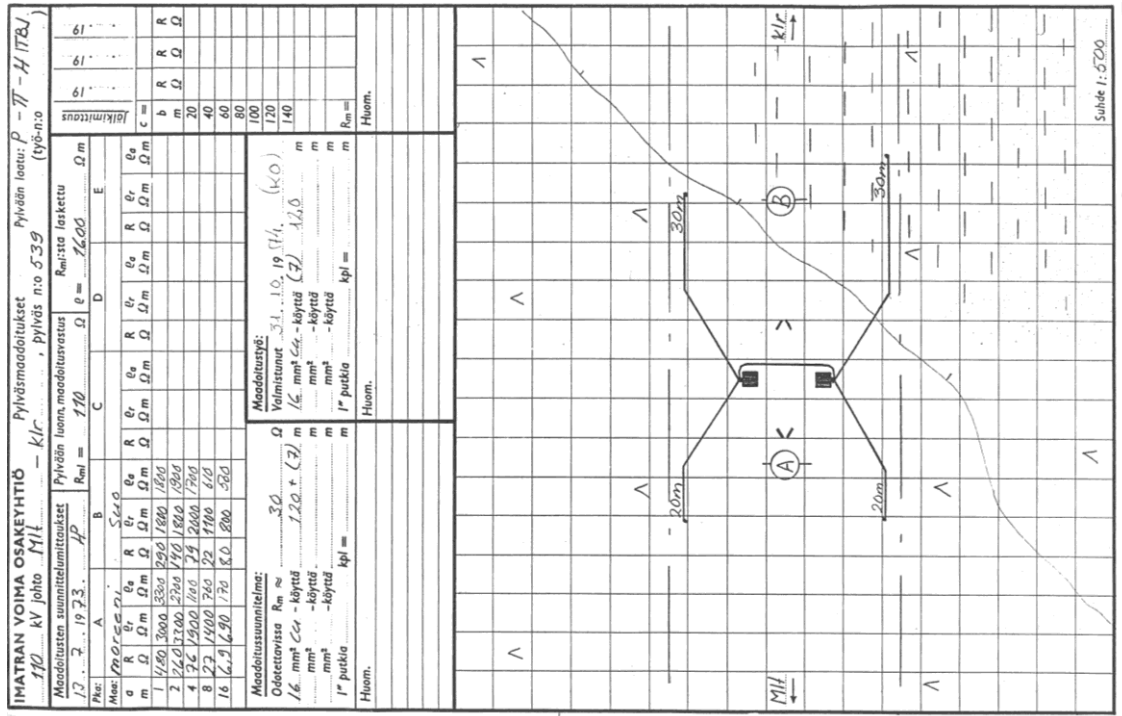
Huom.



100-010



Kuva C1: Äkäsjoisuus-Niesajohdon maadoitusten suunnittelumittausten tulokset pylväiltä 513-517.



**IMATRAN VOIMA OSAKEYHTIÖ** Pylväsmadoitukset Pylvään laatu: P-TT (ytb-n:o 110 kv johto Hill, pylväs n:o 549)

12	13	14	15	16	17	18	19	20
Madoitusten suunnittelumittaukset			Pylvään laatu, madoitusväestys			Rakenteiden laskettu		
Rei = 19,33			Rei = 22			Rei = 160		
A			B			C		
a	R	er	er	R	er	er	R	er
1	22	190	270	26	126	270	26	126
2	19	240	220	10	120	240	10	120
4	7	330	120	7	120	330	7	120
8	7	330	120	7	120	330	7	120
16	5,5	350	140	140	150	350	140	150

Madoitusmitta: Odotettavissa Re m  $\approx$  14, Valmistunut 1.11.1964. (40)

$1/2$  mm<sup>2</sup> Ca-köytät 25 x (2) m  $1/2$  mm<sup>2</sup> Ca-köytät (2) m

mm<sup>2</sup> -köytät mm<sup>2</sup> -köytät

1<sup>o</sup> putkia kpl = m

Huom. 80 kv ajoitin

Suhte 1: 500

**IMATRAN VOIMA OSAKEYHTIÖ** Pylväsmadoitukset Pylvään laatu: P-TT (ytb-n:o 110 kv johto Hill, pylväs n:o 549)

12	13	14	15	16	17	18	19	20
Madoitusten suunnittelumittaukset			Pylvään laatu, madoitusväestys			Rakenteiden laskettu		
Rei = 19,33			Rei = 17			Rei = 160		
A			B			C		
a	R	er	er	R	er	er	R	er
1	24	140	370	24	140	370	24	140
2	26	320	210	14	140	320	14	140
4	12	330	150	15	150	330	15	150
8	7,7	340	160	16,3	160	340	16,3	160
16	4,6	140	380	18	180	140	18	180

Madoitusmitta: Odotettavissa Re m  $\approx$  13, Valmistunut 1.11.1964. (40)

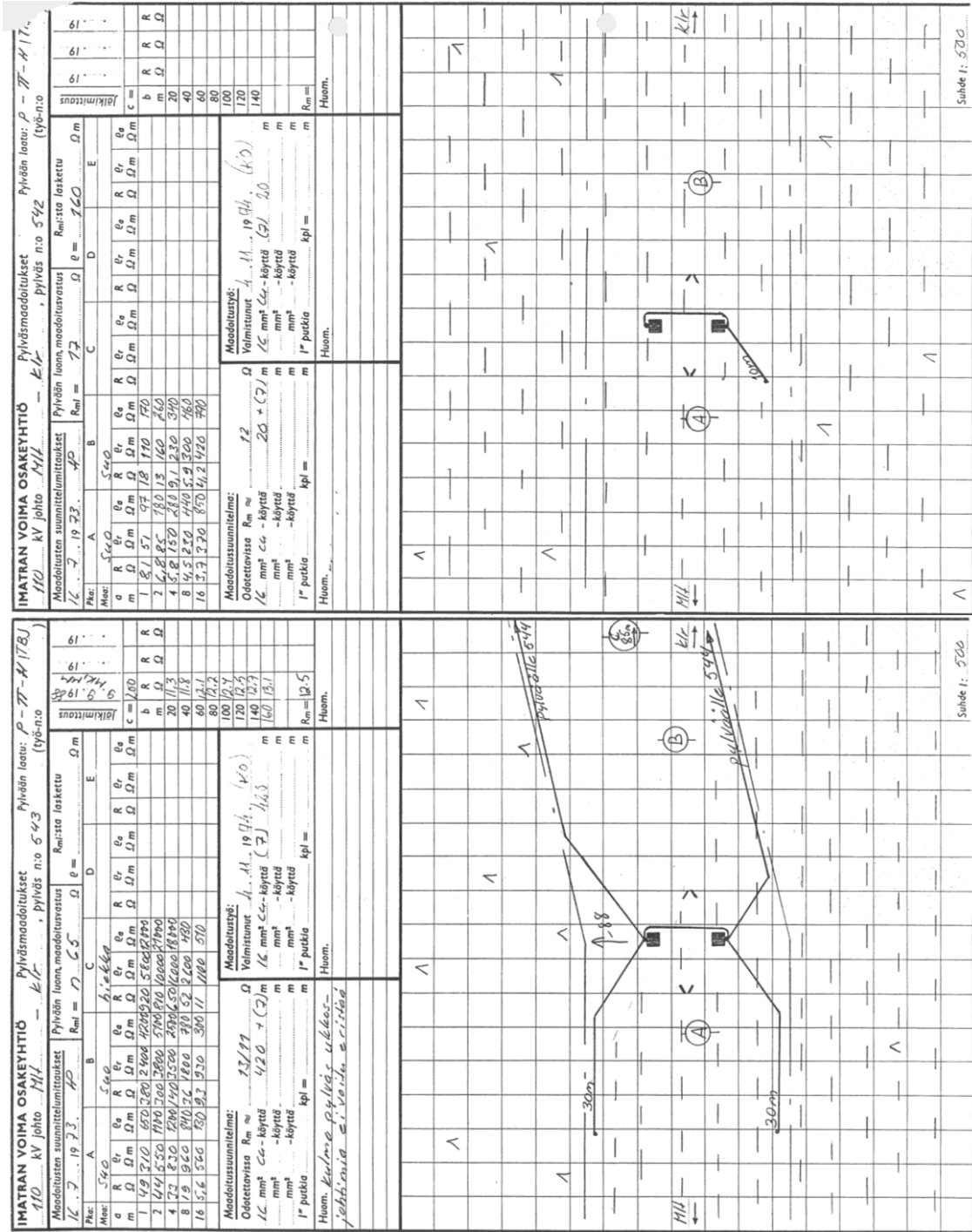
$1/2$  mm<sup>2</sup> Ca-köytät 50 x (2) m  $1/2$  mm<sup>2</sup> Ca-köytät (2) m

mm<sup>2</sup> -köytät mm<sup>2</sup> -köytät

1<sup>o</sup> putkia kpl = m

Huom. Potentiaaliohjelmia

Suhte 1: 500



Kuva C2: Äkäsjokisuus-Niesa-johdon maadoitusten suunnittelumittausten tulokset pylväiltä 539-543.