



# **110 kV:N SUURJÄNNITELINJAN PYLVÄS- MAADOITUKSET JA VAARAJÄNNITTEET**

Ari Lapinkorpi

Opinnäytetyö  
Kesäkuu 2011  
Sähkötekniikka  
Sähkövoimatekniikka  
Tampereen ammattikorkeakoulu

**TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU**  
**Tampere University of Applied Sciences**

## TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Sähkötekniikan koulutusohjelma  
Sähkövoimatekniikan suuntautumisvaihtoehto

ARI LAPINKORPI: 110 kV:n suurjännitelinjan pylväasmaadoitukset ja maadoitusjännitteet

Opinnäytetyö 71 s, liitteet 6 s.  
Toukokuu 2011

Työn valvoja: DI Ilkka Tervaoja

Työn tilaaja: VK- Electric Oy, ohjaaja Jouni Lapinkorpi, sähkötoiden johtaja

---

Tämä opinnäytetyö on tehty VK- Electric Oy:lle. Yrityksen tarkoituksena oli saada ohjeheidän toimialaansa kuuluvien vähintään 110 kV:n suurjännitelinjan pylväasmaadoitusten suunnitteluun. Työn esimerkki mitoituksessa laskenta-arvoina käytettiin Ylitornio – Liakka välisen 110 kV:n suurjännitelinjan maan ominaisresistanssimittauksia. Kyseisen johdon maan ominaisresistanssimittaukset suoritettiin kesällä 2010.

Työn laajuus rajattiin yhdessä ohjaajan kanssa niin, että työssä tulitaisiin käsittelemään yleisesti pylväsympäristössä esiintyviä maapotentiaalilin noususta johtuvia vaarajännitteitä, määräysten antamia ehtoja vaarajännitteille, pylväiden maadoitustapoja, maadoitusten mitoitusta ja suunnittelua, ukkosjohtimien vaikutusta maadoitukseen sekä tarkastelua potentiaalilin leviämisestä ympäristöön. Työn laajuuden kannalta maadoitusjärjestelmää käsitellään työssä suppeahkona järjestelmänä, koska aihealueena maadoittaminen on hyvin laaja käsiteltäväksi. Työssä ei myöskään oteta kantaa sähköaseman maadoittamiseen tai rinnakkaisten- ja risteävien johtojen maadoitusten yhdistämiseen.

Aluksi työssä käsitellään yleistä teoriaa suurjännitelinjan maadoitukseen liittyvistä vaarajännitteistä ja niitä aiheuttavista vikatiloista. Tämän jälkeen esitetään määräysten asettamia vaatimuksia maadoituksille, josta jatketaan maadoitusten tarkoituksella yleisesti ja suurjännitelinjan kannalta. Loppuosassa käydään läpi pylväiden erilaisia maadoitustapoja, suunnittelun kannalta olennaisia maadoitusmittauksia, maadoitusten suunnittelua käyttäen todellisia Ylitornio – Liakka johdolta mitattuja maan ominaisresistanssin arvoja, ukkosjohtimien vaikutusta maadoitukseen sekä tarkastellaan potentiaalilin leviämistä pylväsympäristöön.

Maadoitusten suunnittelu ja mitoitus osuus perustuu SFS 6001+A1 standardiin, sähköverkkoyhtiöiden omiin ohjeisiin maadoitusten suunnittelusta ja VHV- ohjeisiin. Aineistona on käytetty SFS 6000 standardisarjan käsikirjoja, sähköverkkoyhtiöiden yksityiskohtaisia ohjeita maadoituksista, entisen Imatran Voima Oy:n maadoitussuunnittelijan pitämää koulutusta ja sieltä saatuja materiaaleja, muuta alan kirjallisuutta sekä vaara- ja häiriöjännitevaliokunnan ohjeita 2 ja 5.

Työn tarkoituksena on toimia yleisohjeena VK- Electric Oy:n maadoitussuunnittelijalle. Työssä käytetyt mitoitusperiaatteet ovat kuitenkin vain yleisiä periaatteita, jonka vuoksi maadoitusten suunnittelussa on aina käytettävä sähköverkonhaltijan antamia ohjeita ja vaatimuksia.

---

Avainsanat: Maadoitukset, maadoitusjännitteet, maadoitusresistanssi, maadoituselektrodi

## ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Tampere University of Applied Sciences  
Degree Programme in Electric Engineering  
Option of Electric Power Engineering

ARI LAPINKORPI: 110 kV high voltage line tower earthing's and tower potential

Bachelor's thesis 71 pages, appendices 6 pages  
May 2011

Thesis supervisor: DI Ilkka Tervaoja

Co-operating Company: VK- Electric Oy, Jouni Lapinkorpi, Electrical Manager

---

This thesis was carried out with the Co-operating company VK- Electric Oy. The objective of Co- operating company was to create guidelines of making tower earthings at least 110 kV's high voltage line. The base of this work was the soil resistivity measurements from Ylitornio- Liakka high voltage line. Measurements were made at the summer of 2010.

The size of this work was confined with the VK- Electric's tutor. We confined the work so that it's going to introduce some risk voltages of high voltage line, term's for risk voltages, different kind of tower earthings, tower earthings desinging, lightning conductors and potential's spreading to environment. Earthing system is handled from concise point of view.

The risk voltages are handled at the beginnig of the work. After that comes the terms for earthings. The following article's handel's the meaning of earthing, different kind of earthing habit's, desinging of earthings, lightning conductors and at last is potential spreading to environment.

The desinging of earthings is based on SFS 6001+A1 standard, the instruction's of the grid owner and VHV-guidelines. The material to this thesis has been purchased from SFS 6000 standard handbook's, the grid company's instruction's, earthingcourse which was arranged by former Imatran Voima Oy's earthing engineer and other literature of the field.

The purpose of this thesis is to be general guideline to VK- Electric's earthing designer. The designing principal's are just common used principal's, which for designing of the powerline earthings should be done with the instructions of the grid owner.

---

Keywords: Earthings, tower potential, soil resistivity, tower earthing

# SISÄLLYS

ABSTRACT .....	3
SISÄLLYS .....	4
LYHENTEET JA TERMIT .....	6
1 JOHDANTO .....	7
2 VAARA- JA HÄIRIÖJÄNNITTEET .....	9
2.1 Vaara- ja häiriöjännitteistä yleensä .....	9
2.2 Vaarajännitteiden synty .....	9
2.2.1 Maadoitus- ja kosketusjännite .....	10
2.2.2 Takaperoinen kosketusjännite .....	12
2.2.3 Siirtyvät jännitteet .....	14
3 SÄHKÖTURVALLISUUSMÄÄRÄYSTEN SALLIMAT JÄNNITTEET .....	16
3.1 Kosketusjännitteen kannalta sallittu maadoitusjännite .....	16
3.2 Määräys viestintäverkkojen sähköisestä suojaamisesta .....	17
4 MAADOITTAMINEN .....	18
4.1 Yleistä maadoittamisesta .....	18
4.2 Tarkoitus .....	18
4.3 Johtolähdön suojalaitteiden vaikutus .....	19
4.4 Pylväismaadoitusten tarkoitus ja tehtävä .....	20
5 MAADOITUSMITTAUKSET JA RESISTANSSI .....	21
5.1 Suunnittelumittaukset .....	21
5.1.1 Maadoituspöytäkirja .....	21
5.1.2 Pylvään luonnollinen maadoitusresistanssi .....	22
5.1.3 Maan ominaisresistanssi .....	23
5.1.3.1 Maaperän resistiivisyyden mittaus .....	24
5.2 Maadoitusresistanssi .....	25
6 PYLVÄIDEN MAADOITUSTAVAT .....	28
6.1 Perusmaadoitus .....	28
6.2 Pystymaadoitus .....	28
6.3 Säteismaadoitus .....	29
6.4 Ylipitkä maadoitus .....	30
6.5 Läpimenevä maadoitus .....	30
6.6 Potentiaaliohjauselektrodi .....	31
7 UKKOSJOHTIMET .....	33
7.1 Ukkosjohtimien tarkoitus .....	33
7.2 Ukkosjohtimien vaikutus relesuojaukseen .....	33
7.3 Ukkosjohtimet maasulun aikana .....	34
7.3.1 Reduktiokerroin .....	34
7.3.2 Ukkosjohtimien yhdistämät pylväismaadoitukset .....	36
8 PYLVÄSPOTENTIAALIT .....	38
8.1 Ukkosjohtimellisen johdon maadoitusimpedanssi .....	38
8.2 Pylväspotentiaaliohjauslaskeminen .....	39
9 POTENTIAALIN LEVIÄMINEN PYLVÄSYMPÄRISTÖÖN .....	41
9.1 Ukkosjohtimeton johto .....	41
9.2 Ukkosjohtimellinen johto .....	43
10 MAADOITUKSIEN MITOITUS .....	45

10.1 Mitoituskriteerit.....	45
10.1.2 Korroosion kestävyys ja mekaaninen lujuus.....	46
10.1.3 Tarkastelu termisen lujuuden kannalta.....	47
10.2 Sallitun kosketusjännitteen huomioiminen suunnittelussa.....	49
10.3 Yleinen lähestymistapa pylväsmaadoitusten suunnitteluun kosketusjännite huomioon ottaen.....	51
<b>11 PYLVÄÄN MAADOITUSELEKTRODIN MITOITTAMINEN JA KOSKETUSJÄNNITE TARKASTELU.....</b>	<b>56</b>
11.1 Tavoitearvo.....	57
11.1.2 Säteismaadoitus.....	59
11.1.3 Läpimenevämaadoitus.....	60
11.1.4 Ylipitkämaadoitus.....	61
11.1.5 Potentiaaliohjauselektrodi.....	61
11.1.6 Pystymaadoitus.....	61
11.2 Ylitornio – Liakka 110 kV pylvään 20 maadoitus.....	63
11.2.1 Perussuunnitelma.....	63
11.2.2 Maadoituselektrodin pituus.....	63
11.2.3 Maadoitustavan valinta.....	64
11.2.4 Pylvään potentiaali.....	65
11.2.5 Pylvään potentiaalini leviäminen ympäristöön.....	67
<b>12 YHTEENVETO.....</b>	<b>69</b>
<b>LÄHTEET.....</b>	<b>70</b>
<b>LIITE 1.....</b>	<b>72</b>
<b>LIITE 2.....</b>	<b>73</b>
<b>LIITE 3.....</b>	<b>74</b>
<b>LIITE 4.....</b>	<b>75</b>
<b>LIITE 5.....</b>	<b>76</b>
<b>LIITE 6.....</b>	<b>77</b>

## LYHENTEET JA TERMIT

a	Neljänpiikin mittauksessa käytetty piikkiväli
d	Maadoituselektrodin halkaisija
h	Maadoituselektrodin upotussyvyys
$I_e$	Maasulkuvirta
$I_m$	Kokonaismaasulkuvirta
$k_r$	Reduktiokerroin
L	Maadoituselektrodin pituus
$l_j$	Keskimääräinen jänteen pituus
n	Pylvään indeksi
R	Resistanssi
$R_E$	Maadoitusresistanssi
$R_p$	Pylväiden vakioksi oletettu maadoitusresistanssi
$R_{ml}$	Pylvään luonnollinen maadoitusresistanssi
$\rho_r$	Maan ominaisresistanssi
$U_A$	Askeljännite
$U_E$	Maadoitusjännite
$U_T$	Kosketusjännite
$U_{TP}$	Sallittu kosketusjännite
$U_{mo}$	Kauempana olevan maadoituksen potentiaali
$V_p$	Potentiaali etäisyydellä x
$Z_k$	Resultoiva maadoitusimpedanssi
$Z_m$	Pylvään maadoitusimpedanssi
$Z_u$	Ukkosjohtimen pitkittäisimpedanssi

## 1 JOHDANTO

Tämän työn tavoitteena oli tehdä VK- Electric Oy:lle toimiva yleisohje vähintään 110 kV:n pylväsmaadoitusten suunnittelusta. Työssä oli tarkoituksena käsitellä maadoitusten perustana olevia vaara- ja häiriöjännitteitä, erilaisia maadoitustapoja, maadoitusten mitoituksia ja suunnittelua sekä ukkosjohtimien vaikutusta maadoituksiin. Työ on kuitenkin vain yleisohje, jonka vuoksi maadoitusten suunnittelussa tuleekin käyttää sähköverkonhaltijan antamia ohjeita ja vaatimuksia.

Työssä ei perehdytä erikseen sähköaseman maadoittamiseen, eikä myöskään oteta kantaa eri jännitetasojen yhteisen maadoitusjärjestelmän toteuttamiseen. Maadoitusten mitoituksen ja suunnittelun pohjana oleva laskenta ja mitoituksen perusperiaatteet pohjautuvat SFS – 6001+A1 standardissa esitettyihin määräyksiin sekä sähköverkkoyhtiöiltä saatuihin maadoitusohjeisiin ja dokumentteihin.

Vähintään 110 kV:n suurjänniteverkkojen maadoitusten suunnittelun yhteydessä esiintyvälle kosketusjännitekysymykselle ominaisia piirteitä ovat hyvin suuret yksivaiheiset maasulkuvirrat, johdonsuojien lyhyet laukaisuaajat, pieni vikatiheys, hyvin varmistettu relesuojaus ja tavallisesti johtavat metallipylväät, sekä pienemmällä jännitetasolla harustetut johtamattomat puupylväät. Suurten maasulkuvirtojen pienentämiseksi johdolla on yleensä yritetty tehdä kaikki mitä on mahdollista jo suunnitteluvaiheessa. Maasulkuvirtoja on pienennetty mm. maadoittamalla minimimäärä nollaimpedanssiltaan mahdollisimman suuria muuntajia sekä maadoituskuristimia käyttämällä. Maasulun sattuessa johdolla, suurten virtojen vuoksi vikapaikan läheisyydessä olevien pylväiden ja pylvästä ympäröivän maan potentiaalit nousevat suureksi. Pylvään potentiaalinen nousu ja pylväsympäristön maan potentiaalinen nousu saattavat aiheuttaa vaaraa ihmisille tai eläimille.

Työn perustana ovat kesällä 2010 Ylitornio – Liakka väliseltä 110 kV:n suurjännitelinjalta tehdyt maanominaisresistanssimittaukset. Mitatut maanominaisresistanssin arvot ovat pylväille tulevien maadoitusten mitoituksen lähtökohta ja niiden perusteella tehdään alustavat maadoitussuunnitelmat.

Maapotentiaalien kannalta tilanne kaikissa Pohjoismaissa onkin vaikea sen vuoksi, että täällä maan ominaisresistanssi on hyvin suuri verrattuna Keski – Euroopan vastaaviin arvoihin. Ominaisresistanssi saattaa olla Suomessa jopa kymmenkertainen Keski – Eurooppaan verrattuna. Suuret resistanssiarvot johtuvat siitä, että täällä kallioperä on huonosti johtavaa graniittia tai gneissia ja lisäksi se ulottuu usein hyvin lähelle maan pintaa. Maaperän ominaisresistanssia suurentaa vielä se, että kallioperän pinnalla oleva maakerros on myös yleensä huonosti johtavaa maalajia, kuten hiekkaa, soraa tai moreenia. (J. Elovaara, Y. Laiho 1988, 416.)



## 2 VAARA- JA HÄIRIÖJÄNNITTEET

### 2.1 Vaara- ja häiriöjännitteistä yleensä

Vaara- ja häiriöjännitteillä tarkoitetaan voimajohdon ympäristöönsä aiheuttamia haitallisia jännitteitä. Vaarajännitteet ovat ylijännitteitä, jotka voivat aiheuttaa vaurioita kojeisiin, tai voivat olla vaaraksi ihmisille ja eläimille. Tyypillinen esimerkki vaarajännitteestä on kosketusjännite, joka esiintyy pylväällä maasulun aikana. Häiriöjännitteillä tarkoitetaan jännitteitä, jotka häiritsevät muita sähkölaitteita tai järjestelmiä. Häiriöjännitteet saattavat vaikuttaa esimerkiksi viestintäverkkojen signaaleihin niin, että ne joko muuttavat välitettävän informaation tai aiheuttavat sen katoamisen kokonaan.

Määräyksiä vaarajännitteiden huomioon ottamisesta maadoitusten mitoittamisessa löytyy SFS 6001+A1 standardista, joka perustuu Cenelecin julkaisuun HD 637. Häiriöjännitteiden huomioiminen perustuu viestintäviraston määräykseen viestintäverkkojen sähköisestä suojaamisesta.

### 2.2 Vaarajännitteiden synty

Vaarajännitetarkastelun kohteena on käytännössä vain suurjännitejärjestelmän yksivaiheinen maasulku ja sen aiheuttama maapotentiaalinen nousu. Suoraa galvaanista kosketusta suurjännitejohdon johtimen putoamisen tai koko johdon kaatumisen aiheuttamana pidetään erittäin epätodennäköisenä, eli varmennetun suurjännitejohdon johtimen ei katsota voivan pudota, jolloin sitä vastaan ei myöskään tarvitse varautua. Kaksoismaasulussa virran aiheuttamat ylijännitteet ovat erittäin suuria ja voivat aiheuttaa suuria vaurioita. Näiden vaurioiden torjuminen ennalta on käytännössä yleensä hyvin vaikeaa, eikä niitä kaksoismaasulkujen harvinaisuuden vuoksi varauduta ottamaan huomioon. ( VHV- ohje 05 2001, 4. )

Maasulun aikana ainakin osa maasulkuvirrasta johtuu pylvään tai sähköaseman maadoituselektrodin kautta maahan. Maahan johtuva maasulkuvirta aiheuttaa maadoituselektrodin äärellisen resistanssin takia elektrodin ja myös läheisen maan potentiaalisen nousun

verrattuna kaukana maadoituskohdasta olevaan referenssipisteeseen, jonka potentiaali on nolla. (Dipl. Ins. Ilmo Nousmaa 1979, 1.)

Maan potentiaalın nousu aiheuttaa maadoituselektrodin yhteydessä olevan metalliosan, esimerkiksi pylvään ja maan välille vaarallisen kosketusjännitteen ja lisäksi elektrodin läheisyydessä askeljännitteitä. Vikatilanteessa noussut maan potentiaali voi esiintyä myös lähes kokonaisuudessaan kosketusjännitteenä vikapaikasta kaukana olevassa maadoitetun järjestelmän laitteen ulkokuoressa jos järjestelmän maadoitusjohdin ulottuu vikapaikan potentiaalikentän alueelle. Potentiaali voi siirtyä galvaanisesti kaapelivaippoja, metallisia vesijohtoputkia tms. pitkin, aiheuttaen vaarallisia kosketusjännitteitä kaukana vikapaikasta. (VHV- ohje 05 2001, 3,6.)

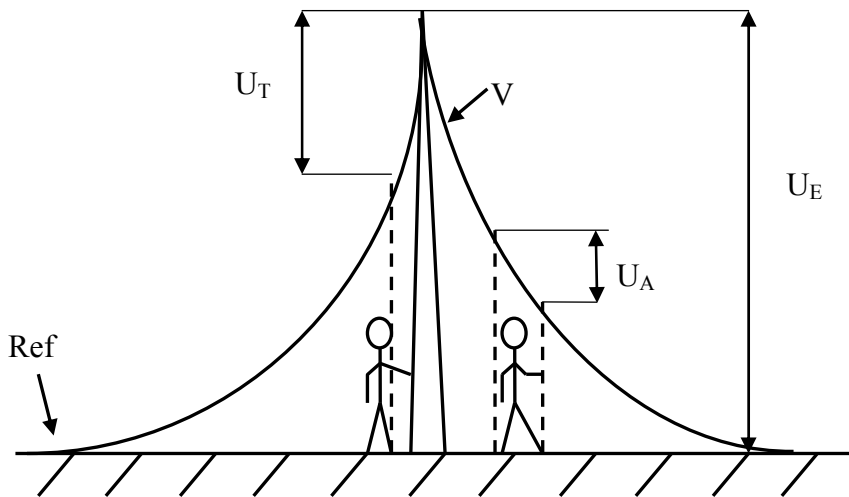
### **2.2.1 Maadoitus- ja kosketusjännite**

Maasulussa maahan johtuva maasulkuvirta aiheuttaa maahan potentiaal kentän, jota kutsutaan muotonsa perusteella potentiaalisuppiloksi. Maadoitusjännitteeksi kutsutaan riittävän etäällä olevan referenssipisteen ja suurimman vian aikana esiintyvän jännitteen potentiaalieroa. Kosketusjännitteellä tarkoitetaan ihmisen jalan ja vikapylvään välille syntyvää potentiaalieroa, kun ihminen koskettaa pylvästä vian, esimerkiksi maasulun aikana. Kosketusjännite on osa maasulusta johtuvaa maadoitusjännitettä, jonka ihminen saa virran kulkiessa kehon kautta kädestä jalkoihin. (VHV- ohje 05 2001, 6.) (SFS 6001 2009, 24.)

Kuviossa 1 on esitetty maadoitus- ja kosketusjännitteen muodostuminen vikapylväällä. Samassa kuviossa on myös esitetty askeljännitteen syntyminen ihmisen kävellessä vikapylvään potentiaal kentän alueella. Askeljänniteellä tarkoitetaan sitä osaa maadoitusjännitteestä, jonka ihminen saa 1 metrin askelväällä virran kulkiessa kehon kautta jalasta toiseen. (SFS 6001 2009, 24.)

Ihmiskehon kautta kulkeva virta aiheuttaa vaaran, jonka vaikutukset riippuvat virran suuruudesta ja kestoajasta. Kuviossa 2 on esitetty raja – arvot maasuluista johtuville kosketusjännitteille vikavirran kestoajan funktiona. Kuvion jännitekäyrä ei ota huomi-

oon lisäresistansseja, vaan käyrä esittää jännitteen arvoa, joka voi esiintyä paljaasta kädestä paljaisiin jalkoihin. Lisäresistansseilla tarkoitetaan, esimerkiksi jalkineita tai hansikkaita, jotka ovat suuri resistanssisia ja vaikuttavat näin myös osaltaan kosketusjännitteen arvoon. Lisäresistanssit voidaan ottaa kosketusjännitetarkastelussa huomioon kapaleessa 10.3 esitetyllä tavalla. Maadoitusjärjestelmän kosketusjännitevaatimusten täytyessä voidaan olettaa, että vaarallisia askeljännitteitä ei yleensä esiinny. Teknisessä raportissa IEC 60479-1 on esitetty tietoja ihmiskehon kautta kulkevan virran vaikutuksista. (SFS 6001 2009, 24, 80–81.)



Kuvio 1 Maanpinnan potentiaalijakautuma maadoituselektrodin läheisyydessä

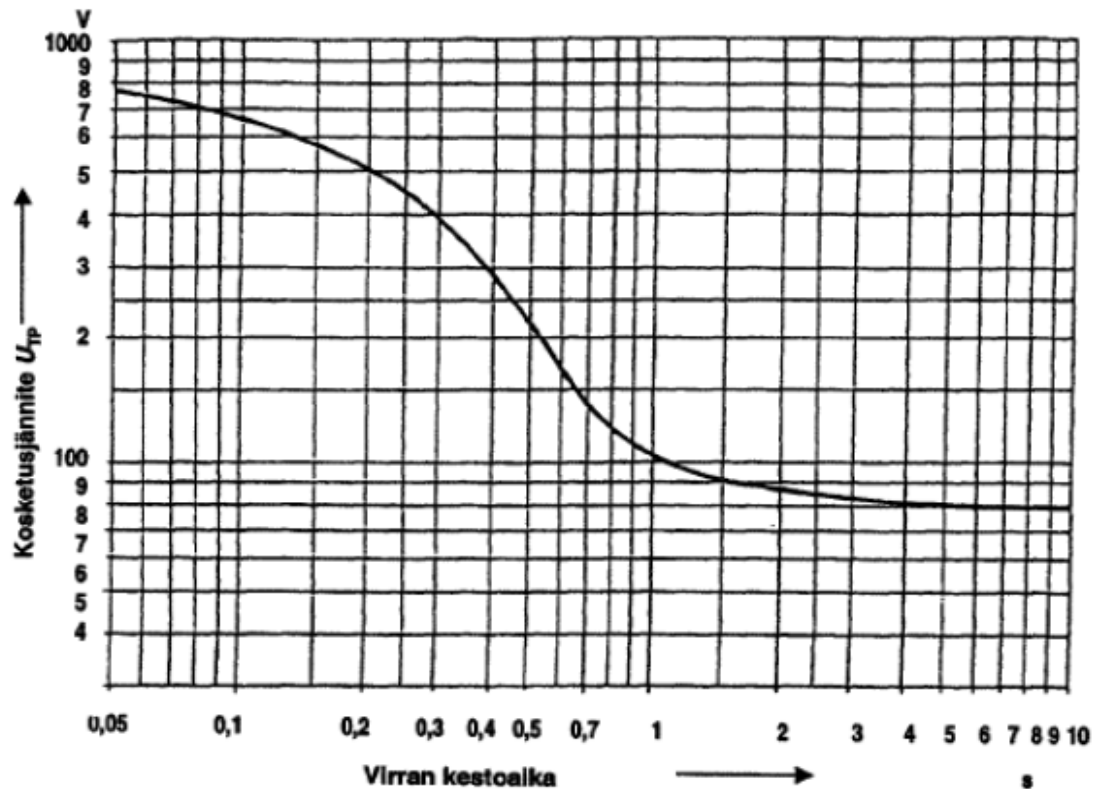
$U_E$  = maadoitusjännite

$U_T$  = kosketusjännite

$U_A$  = askeljännite

$V$  = maan pinnan potentiaali

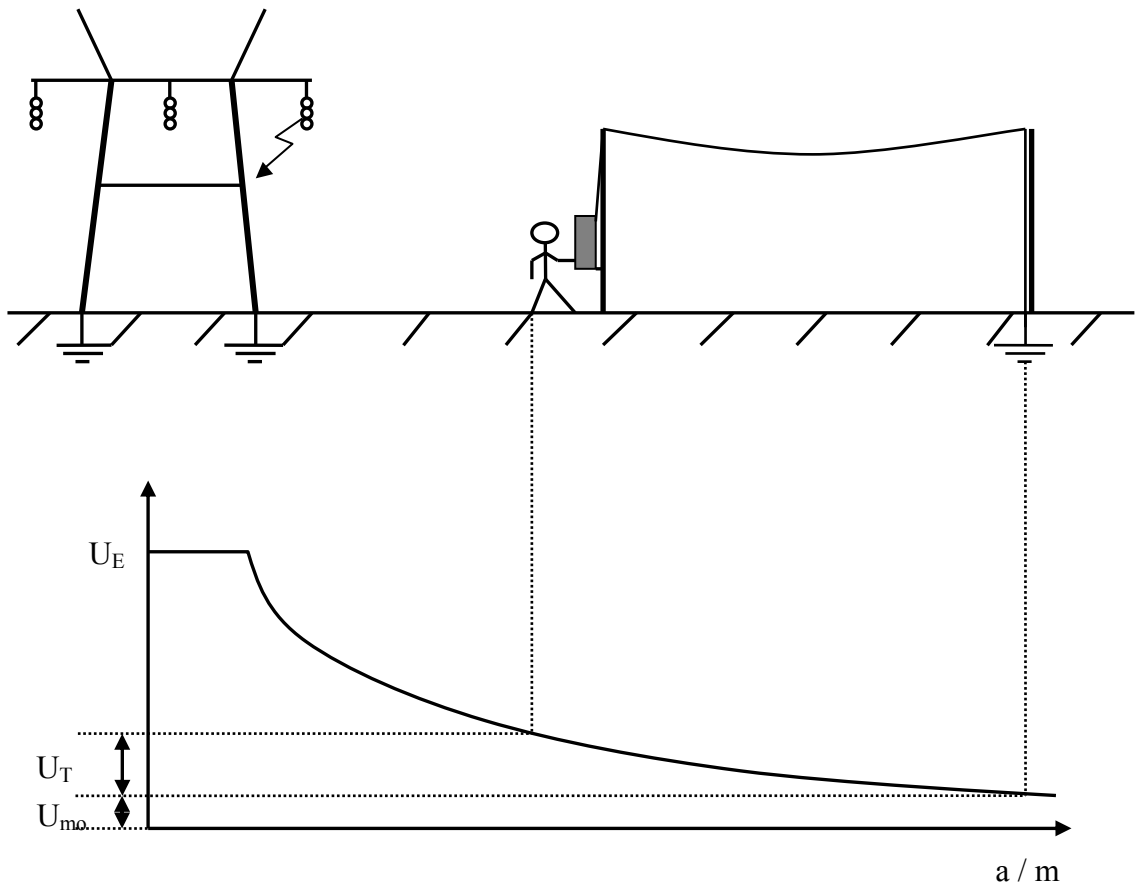
Ref = referenssimaa



Kuvio 2 Suurjännitejärjestelmässä tapahtuvan maasulun aikana sallittu kosketusjännite  $U_{TP}$  vikavirran kestoajan funktiona (SFS 6001, 86)

### 2.2.2 Takaperoinen kosketusjännite

Maasulusta johtuva maadoituselektrodin ympäristöön muodostuva potentiaalienttä saattaa aiheuttaa vaarallisen kosketusjännitteen myös kentän alueella olevaan metalliseen osaan, jos tämän osan maadoitus on toteutettu korkeapotentiaalisen maa-alueen ulkopuolella. Kuviossa 3 on esitetty periaatekuva tällaisesta tilanteesta. Syntyvän kosketusjännitteen suunta on nyt maasta kosketettavaan metalliosaan, eli takaperoinen. Jos kyseinen metalliosa on maasta kosketeltavissa ja paikassa missä saattaa liikkua ihmisiä tai eläimiä, on syntyvä kosketusjännite rajoitettava kappaleessa 7.2 esitetyn kosketusjännitetarkastelun mukaan. Kosketusjännitettä voidaan pienentää eristämällä metalliosan kosketeltavat kohdat tai peittämällä maan pinta eristävällä aineella, esimerkiksi soralla. (SFS 6001 2009, 126.)



Kuvio 3 Takaperoinen kosketusjännite

Kuviossa esitetyt suureet tarkoittavat:

$U_E$  = maadoitusjännite

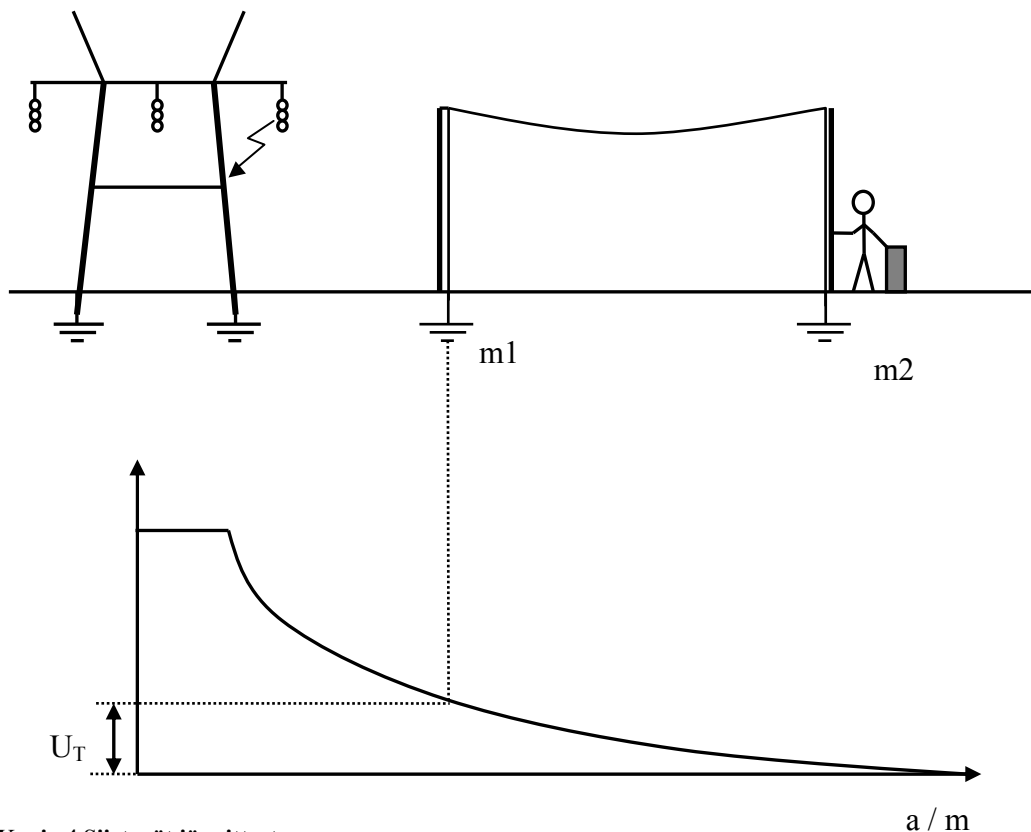
$U_T$  = kosketusjännite

$U_{m0}$  = kauempana olevan maadoituksen potentiaali

### 2.2.3 Siirtyvät jännitteet

Maasulun aikana korkeapotentiaalisen maaperän alueella olevan pienjännitejohdon maadoituselektrodi saattaa aiheuttaa kauempana kosketusjännitteen. Tällöin potentiaali pääsee siirtymään maadoituselektrodin kautta kauemmaksi pienjänniteverkkoon aiheuttaen verkon muissa maadoituksissa maadoitusjännitteen. Jos siirtyvä potentiaali aiheuttaa pienjänniteverkon laitteisiin vaarallisen kosketusjännitteen, on se rajoitettava kappalessa 7.2 esitettyjen kosketusjännitetarkastelujen mukaan. Siirtyvä potentiaali on tarkistettava, jos pylväs tai sen maadoituselektrodit ovat alle 100 metrin päässä pienjännitejohdon maadoituselektrodista. Siirtyvä potentiaali ei saa ylittää arvoa  $1500 \text{ V}/\sqrt{t}$ , missä  $t$  on pisin jatkuvan maasulun aika. (SFS 6001 2009, 124–126, 215)

Kuviossa 4 on havainnollistettu tilannetta, jossa potentiaali siirtyy maasulun aikana pienjänniteverkon maadoituksiin. Kuvioon on otettu tarkasteltavaksi vain kaksi PJ – verkon maadoitusta, koska yleisessä tapauksessa ei tiedetä mitä kauempana on, ja tällöin kuvan tilanne on pahin mahdollinen



Kuvio 4 Siirtyvät jännitteet

Kuviossa 4 esitettyyn maadoitukseen 2 siirtynyt jännite voi esiintyä lähes kokonaisuudessaan kosketusjännitteenä, etenkin jos sen läheisyydessä on maahan kauempana yhteydessä oleva metalliosa, jolloin kosketusjännite esiintyy tämän nollapotentiaalissa olevan ja maadoituksen välillä.

### 3 SÄHKÖTURVALLISUUSMÄÄRÄYSTEN SALLIMAT JÄNNITTEET

#### 3.1 Kosketusjännitteen kannalta sallittu maadoitusjännite

Sähköturvallisuusmääräysten 10 § 1 mukaan sellainen jännitteelle altis osa, jonka maadoittaminen lisää turvallisuutta, on suojamaadoitettava. Suojamaadoittaminen lisää turvallisuutta jos sillä pienennetään kosketusjännitteen esiintymismahdollisuutta tai vaaraa aiheuttavan jännitteen pääsemisen mahdollisuutta kytkinlaitteen tms. avausvälin ohi tai järjestelmästä toiseen. (sähköturvallisuusmääräykset 1989, 59)

Sähköturvallisuusmääräysten mukaan on metalli- ja betonipylväiden jännitteelle alttiit osat suojamaadoitettava. Puupylvään metalliorsi on myös suojamaadoitettava jos pylväessä on puuta vaarallisessa määrin ohikytkevä metalliosa, kuten harukset tai tikka-verkko. Suomessa käytetyt yli 110 kV:n suurjännitelinjan puupylväät ovat yleensä harustettuja, joten ne on maadoitettava. Relesuojauksen toiminnan varmistamiseksi maadoitusten tulee olla riittävän hyviä. (Dipl. Ins. Ilmo Nousmaa 1979, 1.)

Sähköturvallisuusmääräysten 8 § 3.A mukaan maasulun hälytys- tai erotuslaitteen on toimittava äärijohtimesta suojamaadoitettuun osaan tapahtuvassa maasulussa, jossa vikaresistanssi on enintään 500  $\Omega$ . Yleisesti kuitenkin maasulun hälytys- ja erotuslaite yritetään saada toimimaan niin suureen vikaresistanssiin asti kuin teknillisesti on mahdollista ja järkevää. (sähköturvallisuusmääräykset, 1989, 33)

Sähköturvallisuusmääräysten 10 § 2 on eritelty maadoitetussa tai maadoitukseen muuten yhteydessä olevissa osissa esiintyvistä maadoitusjännitteestä aiheutuvan kosketusjännitteen (askeljännite mukaan luettuna) vaarallisuuden kannalta ryhmät a - e. Vähintään 110 kV:n suurjännitelinjan pylväsmaadoitusten tarkastelu kosketusjännitteen kannalta kuuluu ryhmään a ja siirtyvien jännitteiden kannalta ryhmään d. (SFS 6001 2009, 124–125.)

Alla olevassa taulukossa 1 on esitetty vähintään 110 kV:n johdoille suurimmat sallitut maadoitusjännitteet kosketus- ja siirtyvänjännitteen kannalta. Suomen kantaverkossa käytetyt laukaisuajat ovat yleensä 0,2 tai 0,5 sekuntia.



**Taulukko 1 Vähintään 110 kV johtojen maadoitusjännitteiden suurimmat sallitut arvot**

Suurin sallittu maadoitusjännite	Laukaisuaika t/s	
	0,2	0,5
Kosketusjännitteen kannalta (ryhmä a)	5030 V	3180 V
Siirtyvän potentiaalin kannalta (ryhmä d)	3350 V	2120 V

### 3.2 Määräys viestintäverkkojen sähköisestä suojaamisesta

Viestintäviraston määräyksessä 43 C/2010M annetaan raja – arvot sallituille telejohtojen johtimiin indusoituneille jännitteille, jotka aiheutuvat joko suurjännitejohdon kuormitusvirrasta tai maasulkuvirrasta. Määräys perustuu Cenelec - standardin EN 50341-1 lukuun 5.6.3 “Häiriövaikutus telepiireihin“ ja sen osaan EN 50341-3-7 “Suomen kansalliset määrittelyt“.

Viestintäviraston määräyksen 9 § mukaan vähintään 110 kV:n suurjännitelaitteiston yksivaiheisessa maasulussa indusoitunut sähkömotorinen voima (smv) saa nousta arvoon:

- 1200 V, kun vaikutusaika on enintään 0,2 sekuntia,
- 900 V, kun vaikutusaika on enintään 0,35 sekuntia ja
- 650 V, kun vaikutusaika on enintään 0,5 sekuntia

Mahdollisista indusoituvista jännitteistä tehtävän induktiovaarajänniteselvityksen tarkoituksena on arvioida, aiheuttaako voimajohdon maasulussa televerkkoon indusoituva pitkittäinen sähkömotorinen voima ongelmia sen läheisyydessä sijaitsevassa televerkossa. Mikäli sähkömotorinen voima ei ylitä sallittuja rajajännitteitä, ei lisätoimenpiteitä tarvita. Jos smv ylittää sallitun rajajännitteen on määritettävä lisäylijännitesuojien tarve yli televerkon perussuojauksen, sekä laskennallisesti määrittää telejohdon johtimien jännite ja maata vasten. Mikäli laskettu johtimen jännite maata vasten vieläkin ylittää sallitun raja-arvon, tulee määrittää riittävä maadoituksen taso. (Viestintäviraston määräys 43 C/2010M 2010, 6.),(Induktiovaarajänniteselvitys Vihtamo- Vuokatti 2010, 2.)

## 4 MAADOITTAMINEN

### 4.1 Yleistä maadoittamisesta

Maadoituksella tarkoitetaan kaikkia maadoituselektrodin kautta maahan yhdistettyjä virtapiirin osia tai sähkölaitteen johtavia osia. Sähköturvallisuusmääräysten 7, 8, 9, 10, ja 11 luvuissa annetaan maadoituksesta tarkat määräykset ja ohjeet. Maadoitukset jaetaan käyttömaadoitukseen ja suojamaadoitukseen. Jos sähkövirtapiirin jännite on suurempi kuin 70 V, voi se olla hengenvaarallinen tai virtapiiri voi häiritä muita viesti- tai mittauslaitteita, on se maadoitettava. Oikein mitoitettu ja toteutettu maadoitus on tärkein suojaustoimenpide, jolla sähkönjakelujärjestelmästä saadaan turvallinen käyttäjälleen. Toisaalta, jos maadoituksien suunnittelussa tai toteutuksessa tapahtuu jokin virhe tai määräysten laiminlyönti, esimerkiksi suojamaadoituksen tekemättä jättäminen, on sähköjärjestelmä hengenvaarallinen.

Maadoitukset jaetaan käyttömaadoitukseen ja suojamaadoitukseen. Käyttömaadoituksessa virtapiirin jokin osa yhdistetään maahan pieniohmisen impedanssin välityksellä. Suojamaadoituksella tarkoitetaan käyttömaadoitettuun sähköjärjestelmään kuuluvan laitteen johtavan jännitteettömän osan yhdistämistä maahan. Suojamaadoituksella estetään vaarallisten kosketusjännitteiden syntyminen kosketeltavissa olevan sähkölaitteen runkoon vikatapauksessa. (Lauri Aura, Antti J. Tonteri 1993, 186.)

### 4.2 Tarkoitus

Maadoituksien tarkoituksena on lisätä sähköturvallisuutta kaikissa kyseisen sähköjärjestelmän vaikutusalueella olevissa järjestelmissä. Maadoituksilla lisätään turvallisuutta rajoittamalla vikatapauksissa syntyviä vaarallisia kosketus- ja askeljäänniteitä. Mahdolliset vikatilanteet voivat esiintyä periaatteessa jokaisessa sähköjärjestelmän toimintaan vaikuttavassa osassa, kuten itse sähköasennuksissa tai syöttävässä verkossa. Vikatilanteita ovat myös ilmastollisista syistä, kuten ukkosesta aiheutuvat ylijännitteet.

Vikatilanteet eivät saa aiheuttaa vaaraa ihmisille tai eläimille, eivätkä ne saa vaurioittaa sähköjärjestelmään kuuluvia laitteita. Maadoitusten tarkoituksena on myös luoda vikavirralla hallittu, mahdollisimman lyhyt reitti maahan.

Sähköturvallisuuden kannalta maadoitusten tarkoituksena on estää vaarallisten jännitteiden siirtyminen järjestelmästä toiseen. Maadoituksilla luodaan toimintaedellytykset maasulku- ja vikasuojaukselle, joiden avulla voidaan lyhentää vikojen kestoaikaa ja sitä kautta estää laitteille ja ihmisille aiheutuvia vaaroja. (Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto STUL 2007, 53.)

### **4.3 Johtolähdön suojalaitteiden vaikutus**

Kasvavat sähkönlaadun vaatimukset ja energian saannin häiriötön jatkuvuus asettavat sähköenergiaa tuottavan ja jakavan järjestelmän suojaukselle sekä häiriövalvonnalle suuria vaatimuksia. Häiriöt ja johdolla tapahtuvat viat saattavat aiheuttaa vaaratilanteita, joita voidaan vähentää hyvin toteutetun suojauksen avulla. Maadoituksien mitoitus liittyy ratkaisevasti suojauksien avulla saavutettavaan sähköturvallisuuteen. Mitoitukseen vaikuttavat johdon suojalaitteiden kannalta katsottuna suunnitellut suojalaitteiden toiminta – ajat ja asetellut pikalaukaisun vikavirranarvot. (Lauri Aura, Antti J. Tonteri 1993, 167.)

Suojattava järjestelmä jaetaan suoja-alueisiin, joihin suojalaitteiden vaikutus rajataan. Suoja – alueita voivat olla esim. johdot, muuntajat, generaattorit jne. Suojalaitteen tehtävänä on torjua häiriötilanteiden aiheuttamat haittavaikutukset ja vaaratilanteet, joihin myös maadoituksiin liittyvät vaaralliset kosketusjännitteet kuuluvat. Kosketusjännitesuojaukseen liittyviä ohjeita ja määräyksiä on annettu sähköturvallisuusmääräysten luvuissa 9 ja 10. Erityisesti yli 1000 V järjestelmien maasulkusuojausta koskevissa määräyksissä on otettu huomioon Suomen maaperän suuren ominaisresistanssin aiheuttamat teknistaloudelliset vaikeudet. (Lauri Aura, Antti J. Tonteri 1993 167–168.)

Sähköverkko varustetaan yleensä pika- ja aikajälleenkytkentälaitteistolla, sillä yli 90 % verkon vioista on ohimeneviä. Pika- ja aikajälleenkytkentälaitteiston avulla verkkoon saadaan palautettua jännite mahdollisimman nopeasti häiriön jälkeen. Verkon häiriöistä

noin 75 % selviää pikajälleenkytkennällä ja aikajälleenkytkennällä yli 15 % kaikista häiriöistä. (Lauri Aura, Antti J. Tonteri 1993, 175.)

#### **4.4 Pylväsmaadoitusten tarkoitus ja tehtävä**

Pylväsmaadoitusten tarkoituksena on yhdistää jännitteelle alttiit metalliosat maadoituselektrodin kautta maahan. Hyvin suunniteltu ja rakennettu pylväsmaadoitusjärjestelmä pienentää maasulun aikana pylvään 50 Hz:n maadoitusvastusta siten, että maasulkuvirran aiheuttama pylvään potentiaali ei nousisi liian suureksi, ja että potentiaali pienenesi pylvään lähistöllä loivasti niin, että vaarallisia kosketus- ja askeljännitteitä ei pääsisi esiintymään.

Maadoituksilla pienennetään myös pylvään syöksyvirtavastusta siten, että salaman iskiessä pylvääseen tai ukkosjohtimeen, pylvään potentiaali ei pääsisi nousemaan niin korkealle, että se aiheuttaisi ylilyöntiä pylväästä vaihejohtimiin. Lisäksi maadoituksilla varmistetaan maasulkusuojauksen toiminta. (Dipl. Ins. Ilmo Nousmaa 1979, 2.)

## **5 MAADOITUSMITTAUKSET JA RESISTANSSI**

### **5.1 Suunnittelumittaukset**

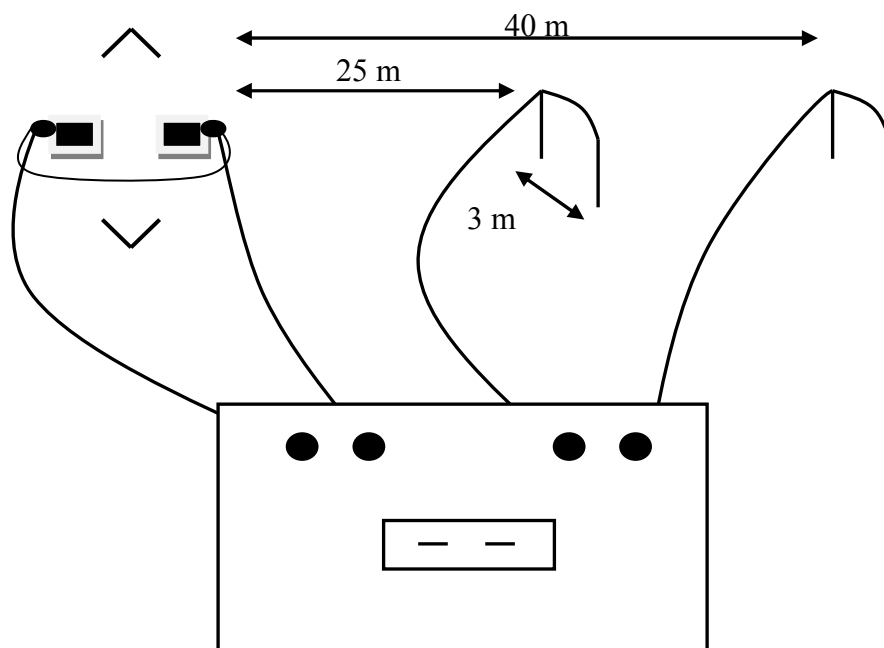
Tässä luvussa esitetään maadoitusmittauksiin liittyvät maadoituspöytäkirjan täyttöohjeet, pylvään luonnollisen maadoitusresistanssin mittaus ja maaperän ominaisresistanssin mittaus. Maadoitusresistanssin määrittämistä käsitellään vain laskennalliselta kannalta, vaikka siihen on käytössä myös kolme erilaista mittausmenetelmää. Maadoitusresistanssin mittausmenetelmiä ovat käännepistemenetelmä, suurtaajuusmenetelmä ja voltiampeerimittarimenetelmä.

#### **5.1.1 Maadoituspöytäkirja**

Maadoitusten suunnittelun perustana voidaan pitää jokaisesta pylväsympäristöstä mitattavia maan ominaisresistansseja. Jos pylväsvälillä on tarkoitus käyttää läpimenevää maadoitusta, on maan ominaisresistanssi tunnettava koko pylväsväliltä. Maan ominaisresistanssit mitataan kappaleen 5.1.3.1 mukaan ja jokaisesta pylväästä täytetään erillinen maadoituspöytäkirja (liite 1). Maadoituspöytäkirjaan merkitään johtimen nimilyhenne, käytettävä jännitetaso, pylvään järjestysnumero linjalla ja materiaali, sekä mittauksen suorittajien nimikirjaimet ja mittausajankohta. Lisäksi pöytäkirjaan piirretään karttaluonnos pylväspaikasta ja sen ympäristöstä mittakaavassa 1:500 tai 1:1000. Karttaluonnokseen pitää merkitä pylväspaikka, johtoaukea, maastolaji, lähellä sijaitsevat rakennukset ja tiet, sekä mahdolliset sähköjohdot, erottimet ja muuntamot maadoituksineen. Mittauksien yhteydessä maastossa piirretyt karttaluonnokset piirretään yleensä puhtaaksi myöhemmin koneella. Maadoituspöytäkirjaan merkitään myös myöhemmin suoritettujen jälkimittausten tulokset. (Finngriid Oy 2008, 34.)

### 5.1.2 Pylvään luonnollinen maadoitusresistanssi

Pylvään luonnollisella maadoitusresistanssilla ( $R_{ml}$ ) tarkoitetaan puupylväällä J- lenkki- en muodostamaa resistanssia. Teräspylväällä luonnollinen resistanssi muodostuu pylvään omasta resistanssista, J- lenkeistä ja pylvääseen perustusten kautta johtavasti yhdistettyjen betoniraidoitusten resistanssista. Jos pylvään perustustöiden yhteydessä on maahan viety kupariköysiä, mitataan nämä yhdessä luonnollisen maadoitusresistanssin kanssa ja tehdään merkintä maadoituspöytäkirjaan. Mittausten yhteydessä on teräspylväällä huomioitava, että J- lenkkien lisäksi myös perustus on kytkettävä mukaan mittaukseen. Mittaustulokset merkitään maadoituspöytäkirjaan niille varattuun kohtaan. Luonnollista maadoitusresistanssia ei kuitenkaan ole tarpeen mitata, jos pylvään perustuksia ei ole tehty tai pylväällä on vanhat maadoitukset, joita on vaikea irrottaa. Maadoitussuunnitelmia tehtäessä luonnollisen maadoitusresistanssin huomioon ottaminen sovi- taan rakennuttajan kanssa kunkin johdon kohdalta erikseen. Luonnollisen maadoitus- resistanssin arvo vaihtelee välillä 2 – 5000  $\Omega$  maaperän koostumuksesta riippuen, kes- kimäärin sen arvo on noin 200  $\Omega$  portaalipylväällä. Periaatekuva pylvään luonnollisen maadoitusresistanssin mittauksesta on esitetty kuviossa 5. (Punkka K 1984, 7.)



Kuvio 5 Pylvään luonnollisen maadoitusresistanssin mittaus

### 5.1.3 Maan ominaisresistanssi

Suurjännitelinjalle tulevien pylväsmaadoitusten suunnittelussa on tunnettava pylväsympäristössä esiintyvä maan ominaisresistanssi, eli maaperän resistiivisyys  $\rho_r$ . Maaperän resistiivisyys vaihtelee huomattavasti maalajin tyyppin mukaan. Resisttiivisyyteen vaikuttaa erityisesti maaperän raekoko, tiheys, sekä vuoden ajoista ja paikallisista ilmastolosuhteista riippuva maaperän lämpötila ja kosteus. Maaperän resistiivisyys voi vaihdella huomattavasti myös syvyyden mukaan, sillä tavallisesti maassa on useita eri maalajien kerroksia.

Suomen olosuhteissa talvella maaperän sisältämän kosteuden jäätyessä resistiivisyys kasvaa nopeasti, jonka takia maadoituselektrodi suositellaankin kaivettavaksi routarajan alapuolelle. Routarajan alapuolella resistiivisyyden vaihtelu ei ole läheskään niin suurta kuin lähellä pintaa. Taulukossa 2 on esitetty eri maalajien tyypilliset resistiivisyyden vaihteluvälit. Resisttiivisyys ilmoitetaan yksikköpinta-alaisen maakuution resistanssi pituusyksikköä kohti  $\Omega\text{m}$ . (SFS 6001 2009, 82,109.) (Sähköverkkojen maadoitusten suunnittelu, rakentaminen ja mittaaminen, insinöörijärjestöjen koulutuskeskus 1979)

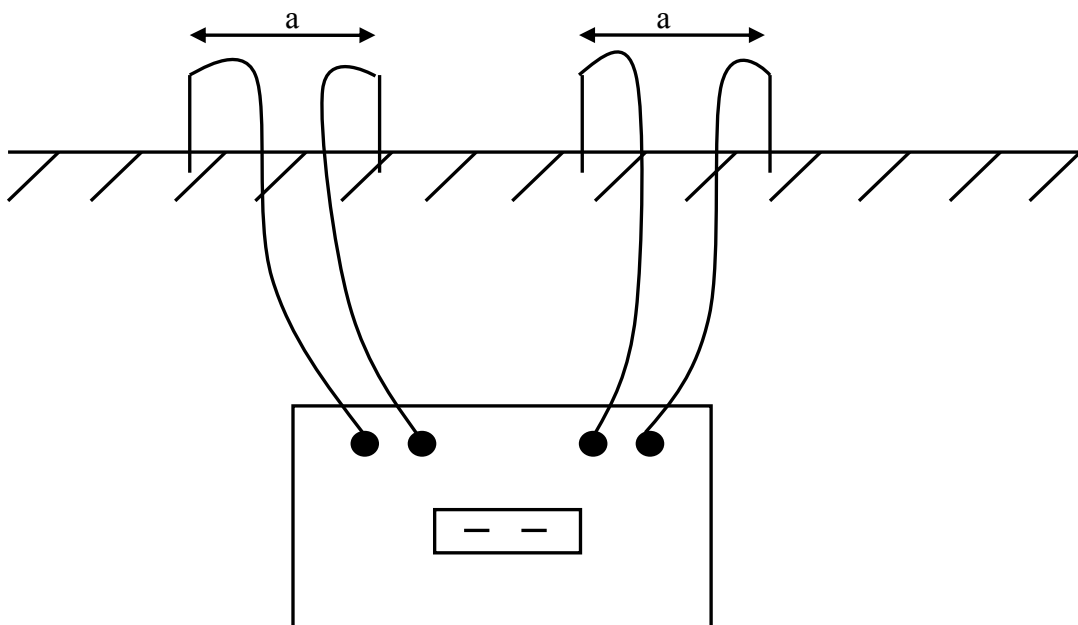
Taulukko 2 Maaperän, betonin ja veden ominaisresistansseja (SFS 6001, 2009, 109)

Aine	Keskimäärin	Tavallisimmat vaihteluvälit
	$\Omega\text{m}$	$\Omega\text{m}$
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

### 5.1.3.1 Maaperän resistiivisyyden mittaus

Maaperän ominaisresistanssimittaukset suoritetaan yleensä käyttämällä Wenner- menetelmää, eli ns. neljän piikin menetelmää. Wenner- menetelmällä saadaan määritettyä maaperän ominaisresistanssi eri syvyyksillä. Mittauksia tehdään vähintään kaksi jokaiselta pylväspaikalta. Poikkeuksena on pylväspaikka, jonka ominaisresistanssi on alle  $200 \Omega\text{m}$ . Yleensä mittauksia joudutaan tekemään useampia, riippuen siitä kuinka huonosti johtavaa maaperä kyseisellä paikalla on.

Wenner – menetelmässä mittauselektrodit asetetaan maahan samaan linjaan, siten että elektrodit ovat tietyllä etäisyydellä toisistaan. Piikkivälinä  $a$  käytetään 1, 2, 4, 8 ja 16 metriä. Elektrodit upotetaan maahan noin 20 cm:n syvyyteen. Mittauskytkentä on esitetty kuviossa 6. Kuvion mukaisesti ulommat elektrodit syöttävät maahan heikon sähkövirran ja sisemmät elektrodit mittaavat potentiaalieron. Tällöin elektrodiparien välinen jännite-ero on suoraan verrannollinen maan ominaisresistanssiin yhden, kahden ja kolmen metrin syvyydellä maakerroksissa.



Kuvio 6 Maaperän ominaisresistanssin mittauskytkentä



Viidellä eri piikkivälillä mitatut tulokset merkitään maadoituspöytäkirjaan niille tarkoitettuun kohtaan pyöristämättöminä. Mitatuista tuloksista saadaan laskettua maan ominaisresistanssi yhtälöllä 1.

$$\rho_r = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot a \quad (1)$$

$\rho_r$  on maan keskimääräinen ominaisresistanssi syvyyteen  $a$  saakka. Ominaisresistanssit lasketaan jokaiselle piikkivälille erikseen. Edellä esitetyn yhtälön sijasta voidaan käyttää alla esitettyjä kertoimia. Kertoimien avulla saadaan laskettua maan ominaisresistanssi riittävällä tarkkuudella. Lasketut resistanssi arvot pyöristetään kahden merkitsevän numeron tarkkuudella ja merkitään pöytäkirjaan. Maan ominaisresistanssit on syytä laskea heti mittauksista suoritettaessa, jotta tiedetään onko tarpeellista suorittaa lisämittauksia. (J. Elovaara, Y. Laiho 1988, 427–428.)

$$\rho_{r1} = R_1 \cdot 6,3$$

$$\rho_{r2} = R_2 \cdot 12,5$$

$$\rho_{r4} = R_4 \cdot 25$$

$$\rho_{r8} = R_8 \cdot 50$$

$$\rho_{r16} = R_{16} \cdot 100$$

## 5.2 Maadoitusresistanssi

Maadoitusresistanssilla  $R_E$  kuvataan maadoituksen hyvyttä. Resistanssi on maahan upotetun maadoituselektrodin resistanssin arvo. Maadoitusten perusteena suunnittelussa käytetään maan ominaisresistanssin arvoja, jolloin maan oletetaan olevan homogeenista maadoituselektrodin läheisyydessä. Maadoitusresistanssin arvo on suoraan verrannollinen maan ominaisresistanssiin, mutta siihen vaikuttaa myös maadoituselektrodin mitat ja elektrodin sijoittelu maaperään. (J. Elovaara, Y. Laiho 1988, 416.)

Suomessa olosuhteissa maadoitusresistanssi jää yleensä suureksi, koska maan ominaisresistanssikin on yleensä hyvin suuri. Taulukon 2 arvoja voidaan käyttää maadoituselektrodien alustavissa laskelmissa, mutta varsinaiset maadoitukset mitoitetaan mitaustulosten perusteella.

Suurilla maasulkuvirroilla suuri maan ominaisresistanssi aiheuttaa suuren maadoitusresistanssin joka voi olla ongelmallinen sallittujen kosketusjännitteiden kannalta. Tällöin myös viestijohtoihin voi indusoitua tai siirtyä galvaanisesti liian suuria häiriöjännitteitä. Pienen maadoitusresistanssin aikaansaaminen voi joissakin tapauksissa olla erittäin hankalaa ja vaatia suuria kustannuksia. (Lauri Aura, Antti J. Tonteri 1993, 190.)

Ympäröivän maan olettaessa olevan homogeenista voidaan maadoituselektrodien resistanssiarvoja laskea matemaattisesti tyydyttävällä tarkkuudella taulukossa 3 esitettyjen laskentayhtälöiden avulla. (Lauri Aura, Antti J. Tonteri 1993, 191.)

**Taulukko 3 Maadoitusresistanssin laskemiseen tarvittavia yhtälöitä (SFS 6001, 110.)**

Elektrodin laatu	Kaava	Huomautukset
Pallo pinnassa	$R_E = \frac{\rho_E}{\pi D}$	
Levy pinnassa	$R_E = \frac{\rho_E}{2D}$	$s \ll D$
Pystysuora tanko tai putki pinnassa	$R_E = \frac{\rho_E}{2\pi L} \ln \frac{4L}{1,36 \times d}$	$d \ll L$
Pystysuora tanko tai putki upotettuna	$R_E = \frac{\rho_E}{2\pi L} \ln \frac{4L}{1,36 \times d} \times \frac{2h+L}{4h+L}$	$d \ll L$
Vaakasuora johdin pinnassa	$R_E = \frac{\rho_E}{\pi L} \ln \frac{2L}{1,36 \times d}$	$d \ll L$
Vaakasuora johdin upotettuna	$R_E = \frac{\rho_E}{2\pi L} \ln \frac{L^2}{1,85 \times h \times d}$	$d \ll 4h$
Verkko	$R_E = \frac{\rho_E}{2D} + \frac{\rho_E}{L}$	

Taulukossa esitetyt suureet tarkoittavat:

$L$  = elektrodin pituus (m)

$D$  = pallon, levyn tai verkon halkaisija (m)

$d$  = köysimaadoituselektrodin halkaisija tai puolet nauhaelektrodin leveydestä (m)

$s$  = levyelektrodin paksuus


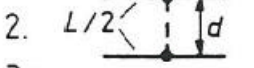
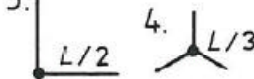
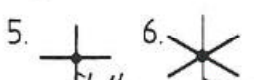
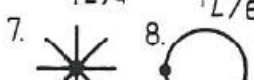
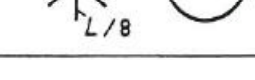

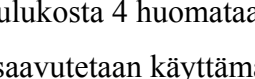
$\rho_r$  = maaperän ominaisresistanssi

Taulukossa 3 esitettyjen yhtälöiden perusteella voidaan todeta, että maadoitusresistanssin suuruuteen vaikuttavat lähinnä maan ominaisresistanssi, elektrodin pituus ja pallon, levyn tai verkon halkaisija.

Maadoitusresistanssia laskettaessa yhtälöillä pinnassa ja upotettuna on otettava huomioon lisäksi sähkötekniset näkökulmat. Esimerkiksi jos maa on kuivaa tai roudassa, on laskuissa maan pintakerroksen alapinta tulkittava pinnaksi kaavoja sovellettaessa.

Taulukossa 4 on esitetty samalla maadoituselektrodin pituudella saavutettavan maadoitusresistanssin suhde suoran johtimen maadoitusresistanssiin. Taulukon avulla voidaan arvioida erilaisten elektrodimuotojen vaikutusta maadoitusresistanssiin jos maadoituksen toteutuksessa ei pystytä käyttämään suoraa maadoituselektrodia.

**Taulukko 4** Erilaisten maadoituselektrodien resistanssin suhde verrattuna suoran elektrodin resistanssiin (Sähkölaitostekniikan perusteet, 418.)

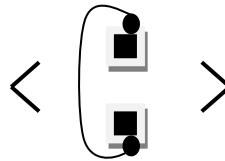
$L/m$		20	60	200	600
Maadoituksen muoto		Maadoitusresistanssin suhde suoran johtimen maadoitusresistanssiin, %			
1.		100	100	100	100
2.		$d = 0,2 \text{ m}$ 133 $d = 2 \text{ m}$ 109 $d = 20 \text{ m}$ 92	144 123 98	155 135 109	159 143 119
3.		103	103	102	102
4.		107	106	106	105
5.		116	115	114	112
6.		136	135	132	129
7.		159	158	154	148
8.		109	108	107	106

Taulukosta 4 huomataan, että pienin maadoitusresistanssi lähes kaikilla johdin pituuksilla saavutetaan käyttämällä suoraa johdinta, lukuunottamatta kahden rinnakkaisen johtimen tapausta, jos niiden pituutena käytetään korkeintaan 60 metriä ja etäisyytenä 20 metriä. (J. Elovaara, Y. Laiho 1988, 416–418.)

## 6 PYLVÄIDEN MAADOITUSTAVAT

### 6.1 Perusmaadoitus

Pylväsympäristön maadoitusolosuhteista riippumatta on jokaiselle suurjännitelinjalla olevalle pylväällä tehtävä vähintään perusmaadoitus. Jos mahdollista voidaan perusmaadoitus kuitenkin korvata molemmilta pylväsjaloilta tehtävillä pystymaadoituksilla. Yleisesti ottaen, jos pylväsympäristössä esiintyvän maan ominaisresistanssin on mitattu olevan alle  $100 \Omega\text{m:n}$ , riittää perusmaadoitus pylväälle ainoaksi maadoitukseksi. Perusmaadoituksessa yhdistetään perustusten asennusvaiheessa pilareiden alle viedyt J-lenkit vähintään  $16\text{mm}^2$  kupariköydellä toisiinsa kuvion 7 mukaisesti. J-lenkit ovat perustusten asennusvaiheessa perustuspilareiden alle vietyjä kuparisia maadoituselektrodeja. (Punkka K 1984, 8.)



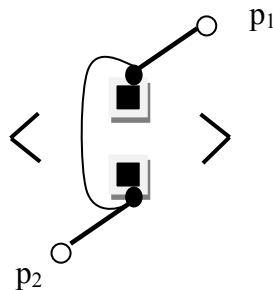
Kuvio 7 Perusmaadoitus

### 6.2 Pystymaadoitus

Pystymaadoitus on joskus ainoa maadoitusvaihtoehto taajamissa ja peltopaikoilla, joissa säteismaadoitusta on vaikea saada sopimaan erilaisten esteiden takia ja maadoituselektrodien vaurioituminen on hyvin todennäköistä. Pystymaadoitusta tulisi käyttää myös sellaisessa pylväsympäristöissä, joissa maan pintakerros on huonosti johtavaa maalajia, mutta pintakerroksen alla on paremmin johtavaa maata. Tällaisia paikkoja ovat esimerkiksi hiekka- ja moreeniharjut. Pystymaadoitukset sijoitetaan perustusten läheisyyteen, eikä niitä yleensä kannata tehdä pylväälle kahta enempää, sillä seuraavat elektrodit jouduttaisiin viemään jo kohtuuttoman kauas pylväältä etteivät ne peittäisi toisiaan, ja tällöin vaakamaadoitus tulisi jo edullisemmaksi. Jos maadoituksia kuitenkin tehdään use-

ampi kuin kaksi, tulisi niiden etäisyyden olla vähintään kaksi kertaa elektrodin pituus, etteivät ne peittäisi toisiaan.

Pystymaadoituksen mitoituksessa ei perusmaadoitusta oteta lainkaan huomioon. Jos tehdyn pystymaadoituksen maadoitusresistanssi jää alle halutun tavoitearvon, joudutaan pylväälle tekemään vaakamaadoitus. Tulevan vaakamaadoituksen mitoituksessa ei oteta huomioon jo rakennettujen pystymaadoituksen maadoitusresistanssin arvoja. Yleensä kannattaakin valita aina vaakamaadoitus jos pystymaadoituksen onnistuminen epäilyttää. Vaaka- ja pystymaadoitusten yhdistelmiä ei yleensä käytetä. Kuviossa 8 on esitetty periaatekuva pystymaadoituksesta. (Punkka K 1984, 10.)

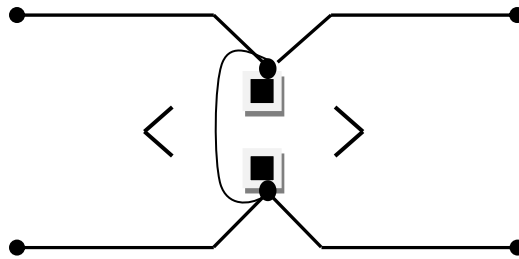


Kuvio 8 Pystymaadoitus

### 6.3 Säteismaadoitus

Maan ominaisresistanssin ollessa  $100 - 4000 \Omega\text{m}$ , käytetään pylväällä yleensä lisämaadoituksena säteismaadoitusta, jos pelkällä perusmaadoituksella ei päästä haluttuun maadoitusresistanssin arvoon. Säteismaadoituksia suunnitellaan 1 – 4 kappaletta. Säteismaadoitus kannattaa kuitenkin suunnitella aina useampi säteisenä, koska tällöin pylväaseen tai ukkosjohtimeen osuneella salamavirralla on useampi purkaustie säteiselektrodien kautta maahan. Säteet kaivetaan maahan johtoaukean reunoille kuvion 9 mukaisesti, ellei johtoaukean keskellä olevan maan ominaisresistanssi ole huomattavasti pienempi kuin reunoilla. Säteiden pituus vaihtelee 15 – 50 metriin ja ne suunnitellaan viiden metrin portain. Kaksi samaan suuntaan ja yli 35 metrin pituista sädettä yhdistetään päistään toisiinsa, jotta välttyään maadoitusresistanssin nousulta jos maadoituselektrodi katkeaa yhdestä paikkaa. Yhdistyksessä käytettyä johdinta ei kuitenkaan oteta mitoituksessa

huomioon. Samaan suuntaan asennetut elektrodit sijoitetaan mahdollisimman etäälle toisistaan, jotta ne eivät vikatilanteessa peittäisi toisiaan. (Punkka K 1984, 12.)



Kuvio 9 Säteismaadoitus

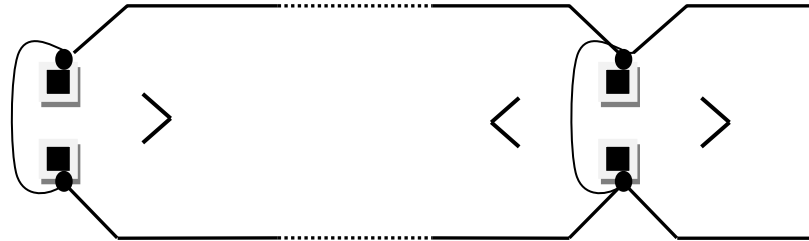
#### 6.4 Ylipitkä maadoitus

Jos 50 metrin säteismaadoituksella ei päästä haluttuun maadoitusresistanssin tavoitearvoon tai maastoesteiden vuoksi ei voida käyttää läpimenevää maadoitusta, joudutaan turvautumaan ylipitkään maadoitukseen, eli säteismaadoitukseen, jossa yksittäisten säteiden pituus on yli 50 metriä. Edellytyksenä ylipitkän maadoituksen käyttöön on kuitenkin se, että yli 50 metrin päässä pylvältä on huomattavasti paremmin johtavaa maata kuin pylvään lähistöllä. Yli 50 metrin päässä olevan säteen osan maadoitusresistanssi tulee olla maadoituselektrodin aaltovastusta pienempi. Yli 100 metrin maadoituksia ei kuitenkaan tehdä. (Punkka K 1984, 13.)

#### 6.5 Läpimenevä maadoitus

Läpimenevä maadoitus tarkoittaa, että pylväiden maadoitukset yhdistetään toin toisiinsa kaivamalla kupariköysi koko linjalle kuvion 10 mukaisesti. Maadoituselektrodeja suunnitellaan pylväiden välille 1 – 4 kappaletta riippuen halutusta maadoitustarpeesta ja pylväsvälin maaperästä. Läpimenevä maadoitus suunnitellaan yleensä pylväille, joilla ei maaperän ominaisuuksien takia päästä säteismaadoituksella haluttuun maadoitusresistanssinarvoon eikä pystymaadoitusta voida toteuttaa. Yksittäisille pylväille, joiden maadoitusresistanssi jää huonoksi huonon maaperän takia, ei kuitenkaan yleensä suunnitella läpimenevää maadoitusta. Tulevaisuudessa tehtävien maadoitusten tarkistusmittausten

takia suuremmalla järjestysnumerolla varustettujen pylväiden päässä suunnitellaan jollekin pylväälle maadoitus niin, että se on mahdollista irrottaa mittauksia varten. (Punkka K 1984, 14.)



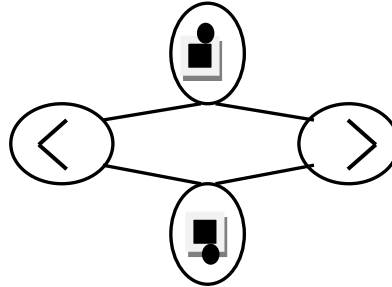
Kuvio 10 Läpimenevä maadoitus

## 6.6 Potentiaaliohjaus elektrodi

Paikoissa, joissa ihmisiä oleskelee tai liikkuu usein ja pylväällä esiintyvä maadoitusjännite voi ylittää Stm:n 10 § 2A mukaisen rajan, on pylväälle rakennettava potentiaaliohjaus elektrodi. Tällaisina paikkoina pidetään yleisesti talojen ja rakennusten piha-alueita, urheilukenttiä, kulkuväylien lähialueita jne. Paikoissa, joissa kosketusjännitteestä voi aiheutua erityistä vaaraa on aina rakennettava potentiaaliohjaus elektrodi. Tällaisia paikkoja ovat yleiset uimarannat, koulujen piha-alueet ja urheilukentät. Maadoitusjännitteen ylittäessä näissä tapauksissa Stm:n 10 § 2A mukaisen rajan on pylväs lisäksi aidattava eristävällä aidalla.

Potentiaaliohjaus elektrodit kaivetaan maahan 0,5 metrin syvyyteen 1,00–1,25 metrin etäisyydelle siihen yhdistetyistä metallisista osista. (SFS 6001 2009, 214–215.)

Potentiaaliohjauselektrodi piirretään maadoituspöytäkirjaan ja siitä tehdään merkintä huomautussarakkeeseen. Portaalipylväälle suunnitellusta ohjauselektrodista otetaan huomioon vain puolet käytetystä kuparista. Potentiaaliohjauselektrodissa on ulommat ja sisemmät tasausrenkaat sekä yhdysjohtimet kuvion 11 mukaisesti. (P-n 1974, 2.)



**Kuvio 11** Potentiaaliohjauselektrodi



## 7 UKKOSJOHTIMET

### 7.1 Ukkosjohtimien tarkoitus

Ukkosjohtimien tarkoituksena on estää sellaisten salamaniskujen osuminen vaihejohtiin, joiden virta riittää saamaan aikaan ylilyöntiin tarvittavan jännitteen, sekä pienentää maan kautta asemalle palaavan virran osuutta, jolloin sen aiheuttamat maadoitusjännite, maapotentiaali ja myös induktiovaikutukset pienenevät. Lisäksi ukkosjohtimien avulla kytketään vikapaikka rinnan läheisten pylväiden tai asemien maadoitusten kanssa jolloin saavutetaan pienempi maadoitusimpedanssi, jonka ansiosta myös maadoitusjännite pienenee.

Imatran Voimassa suoritettiin tutkimus vuonna 1975, jossa tutkittiin 110 kV:n johtojen ukkosjohtimien ja pylväismaadoitusten vaikutusta ukkoshäiriöihin käyttöhäiriötilastojen avulla. Tulokseksi tutkimuksesta saatiin, että ukkosjohtimellisten, mutta maadoittamattomien 110 kV:n johtojen ukkoshäiriöiden määrä on 2- kertainen verrattuna Imatran Voiman käytännön mukaisesti maadoitettujen ukkosjohtimellisten johtojen ukkoshäiriömäärään. Tutkimuksesta selvisi myös, että ukkosjohtimettomien 110 kV:n johtojen ukkoshäiriömäärä on 7- kertainen verrattuna käytännön mukaisesti maadoitettujen ukkosjohtimellisten johtojen ukkoshäiriömäärään. Mainittavaa tutkimuksesta kuitenkin on, että tehdystä tutkimuksesta saadut tulokset ovat suppeahkosta tilastopohjasta ym. seikoista johtuen epätarkkoja. (Dipl. Ins. Ilmo Nousmaa 1979, 4.)

### 7.2 Ukkosjohtimien vaikutus relesuojaukseen

Ukkosjohtimilla on myös vaikutuksensa johdon relesuojaukseen. Johdon pääsuojauksessa käytetyn distanssireleen toiminta perustuu johdon myötäimpedanssiin. Suojauksen selektiivisyyden kannalta distanssirele pystyy toimimaan oikein ukkosjohtimellisella johdolla, lukuunottamatta lyhyitä johtopätkiä ja huonosti johtavassa maaperässä olevia johtoja. Tällaisissa olosuhteissa johdoille joudutaan rakentamaan lisämaadoituksia. Ukkosjohtimettomalla johdolla pylväiden maadoitusresistanssit jäävät Suomen olosuhteissa niin suuriksi, että distanssireleen selektiivinen toiminta tai edes havahtuminen on

käytännössä harvinaista. Laukaisu jää tällöin nollavirtareleisiin perustuvan varasuojauksen varaan. Nollavirtareleet ovat hitaita ja rengasjohdoilla puoliselektiivisiä, jolloin pikajälleenkytkennälle ei ole edellytyksiä. Kuitenkin suuret salamavirrat aiheuttavat yleensä maaoskulosulun, jolloin distanssireleetkin voivat toimia. Yhdestä päästä syötetyllä johdolla voidaan selektiivinen maasulkusuojaus toteuttaa herkällä nollavirtareleellä jos kaikkien pylväiden maadoitusresistanssi on alle 500  $\Omega$ . Tällaisia johtopätkiä on Suomen olosuhteissa kuitenkin vain vähän, ja huonoissa maadoitusolosuhteissa sijaitsevat pylväävät tarvitsevat tällöin tavallisesti ukkosjohtimet jonkin matkaa tai puupylväiden tapauksessa haruseristimet. Käytännössä kuitenkin säteittäisestä johdosta saattaa tulla renkaan osa ja ukkosjohtimien asentaminen jälkeinpäin on huomattavasti kalliimpaa kuin jo johdon rakennusvaiheessa. (Dipl. Ins. Ilmo Nousmaa 1979, 6.)

### **7.3 Ukkosjohtimet maasulun aikana**

#### **7.3.1 Reduktiokerroin**

Ukkosjohtimettomalla johdolla pylväällä tapahtuvassa maasulussa koko maasulkuvirta menee maahan vikapylvään kautta. Vikapylvään maadoitusresistanssi pienentää virran suuruutta, mutta tällöin maadoitusjännite on hyvin suuri, jopa vaihejännitteen suuruinen. (VHV- ohje 05 2001, 8.)

Ukkosjohtimellisella johdolla reduktiovaikutuksen seurauksena maasulkuvirta ei palaa kokonaisuudessaan maan kautta asemalle, vaan osa maasulkuvirrasta palaa ukkosjohtimia pitkin aiheuttamatta maapotentiaalimuuutoksia. Tämä johtuu siitä, että voimajohdon lähellä oleviin maadoitettuihin johtimiin, kuten ukkosjohtimiin ja läpimeneviin maadoitusjohtimiin, indusoituu epäsymmetriavirralla vastakkainen virta, joten rezultoiva maahan menevä virta pienenee. Epäsymmetriavirralla tarkoitetaan maasulkukohtaan johdon eri suunnista tulevia nettovirtoja. Maahan menevän virran suhdetta koko maasulkuvirtaan kutsutaan reduktiokertoimeksi (kr). (VHV- ohje 05 2001, 9.)

Reduktiokertoimen suuruuteen vaikuttavat ukkosjohtimien lukumäärä, materiaali sekä niiden sijainti vaihejohtimiin nähden. Merkittävin vaikutus kertoimen suuruuteen on

ukkosjohtimien lukumäärällä ja materiaalilla. Taulukossa 5 on esitetty reduktiokertoimen arvoja ja impedansseja eri ukkosjohtimille.

**Taulukko 5 110 kV portaaliportojohtojen eri ukkosjohdintyyppien reduktiokertoimia ja impedansseja (Fingrid Oyj, 7)**

Johtolaji	lukumäärä	Ukkosjohtimet tunnus	nimitys	Reduktiokerroin k	Impedanssi $Z_u$ ( $\Omega$ / km)
1 portaali	2	35 mm <sup>2</sup> Fe	35 St	0,95	3,3
1 portaali	2	50 mm <sup>2</sup> Fe	50 St	0,91	2,2
1 portaali	2	70 mm <sup>2</sup> Fe	70 St	0,87	1,8
1 portaali	2	42/25 Al/Fe	Savo	0,53	0,76
1 portaali	2	70/33 Al/Fe	Rauma	0,45	0,69
1 portaali	2	93/39 Al/Fe	Imatra	0,39	0,67
1 portaali	2	106/25 Al/Fe	Suursavo	0,38	0,66
2 portaalia	4	35 mm <sup>2</sup> Fe	35 St	0,9	1,7
2 portaalia	4	50 mm <sup>2</sup> Fe	50 St	0,82	1,2
2 portaalia	4	42/25 Al/Fe	Savo	0,37	0,55
2 portaalia	4	93/39 Al/Fe	Imatra	0,25	0,51

Se osa maasulkuvirrasta, joka palaa asemalle ukkosjohtia pitkin ei aiheuta potentiaalinnousua vikapylväällä. Tästä johtuen ukkosjohtimet alentavat pylväällä esiintyvää maadoitusjännitettä käytännössä kertoimella  $(1 - k_r)$ , joka taas on tärkeää pylväällä esiintyvien kosketusjännitteiden ja maadoitusten kautta siirtyvien jännitteiden kannalta.

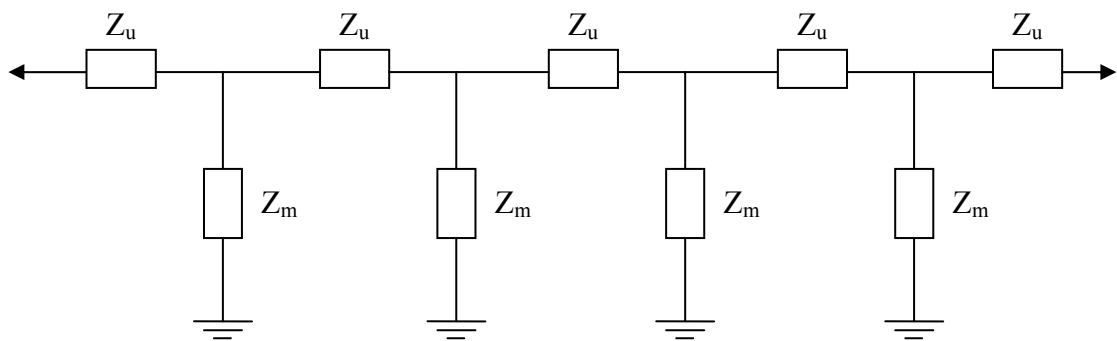
Teräksen ja alumiinin yhdistelmä ukkosjohdinta kutsutaan yleisesti feral- johtimeksi. Feral- ukkosjohtimella varustetun johdon reduktiokerroin on huomattavasti pienempi kuin vastaavanlaisen johdon, joka on varustettu vain teräksisin ukkosjohtimin. Tiheään asutuilla alueilla, joissa suuren maasulkuvirran aiheuttamasta kosketusjännitteestä katsotaan aiheutuvan erityistä vaaraa, tulisi käyttää feral- ukkosjohtimia.

Maan kautta syöttävälle asemalle palaavan maasulkuvirran osa saattaa kulkea jopa usean kilometrin syvyydessä muodostaen näin suuren induktiosilmukan, joka taas saattaa aiheuttaa häiriöitä lähistöllä oleviin viestintäverkkoihin. Ukkosjohtimia käyttämällä saadaan pienennettyä tätä suurta induktiosilmukkaa ja myös viestintäverkkoihin induoituneiden häiriöiden mahdollisuus jää huomattavasti pienemmäksi. Tätä kautta hyvin johtavat ukkosjohtimet vähentävät myös viestiyhteyksille aiheutettuja häiriöitä.

Normaalissa johdon käyttötilanteessa ukkosjohtimiin indusoituu virta vaihejohtimista. Virran suuruus on riippuvainen vaihe- ja ukkosjohtimien etäisyydestä, sekä ukkosjohtimien materiaalista. Ukkosjohtimiin indusoitunut virta aiheuttaa johtimissa ja maassa tehohäviöitä. Lisäksi se saattaa aiheuttaa häiriöitä lähellä sijaitseviin viestintäverkkoihin. Tästä syystä, käytännössä tulisikin käyttää huonommin johtavia teräksisiä ukkosjohtimia paikoissa, joissa maan potentiaalinen noususta ei ole niin suurta vaaraa tai haittaa. (Dipl. Ins. A. J. Pesonen. 1976, 29–31.)

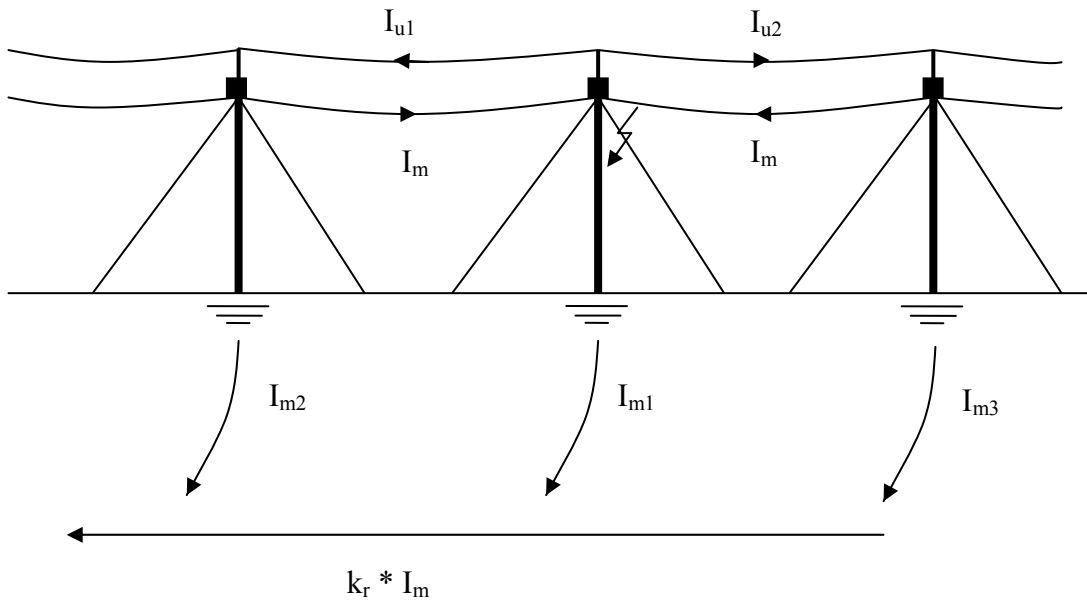
### 7.3.2 Ukkosjohtimien yhdistämät pylväismaadoitukset

Ukkosjohtimet yhdistävät lähellä olevat pylväät toisiinsa. Toisiinsa yhdistetyt pylväät ovat lisäksi pylväismaadoitusten kautta maahan yhteydessä. Näin muodostuu kuvion 12 mukainen impedanssiketju, jonka vian aikana syntyvä maasulkuvirta kohtaa. Kuvion impedanssilla  $Z_u$  tarkoitetaan ukkosjohtimen impedanssia jänneväliä kohti ja impedanssilla  $Z_m$  pylvään maadoitusimpedanssia. Maadoitusimpedanssi on likimain sama kuin maadoitusresistanssi.



Kuvio 12 Maasulkuvirran kohtaama impedanssiketju

Teräksisten ukkosjohtimien impedanssi on 3...5 kertaa suurempi kuin feral- ukkosjohtimen. Tästä syystä, feral- ukkosjohtimellisella johdolla maasulkuvirta jakaantuu useammalle pylvälle kuin teräsukkosjohtimellisella. Tällöin yksittäisen pylvään läpi menevä virta jää pienemmäksi joka taas pienentää maadoitusjännitettä. Kuviossa 13 on esitetty periaatteellinen kuva maasulkuvirran jakautumisesta ukkosjohtimellisellä pylvällä.



**Kuvio 13** Maasulkuvirran jakautuminen

Ukkosjohtimien käyttöä, materiaalia ja niistä aiheutuvia kustannuksia on syytä pohdiskella aina tapauskohtaisesti. On myös syytä muistaa, että ukkosjohtimista saatavaa optimaalista hyötyä ei voida saavuttaa ilman oikein mitoitettuja ja toteutettuja pylväsmadoituksia. (Dipl. Ins. A. J. Pesonen. 1976, 33.)

## 8 PYLVÄSPOTENTIALIT

### 8.1 Ukkosjohtimellisen johdon maadoitusimpedanssi

Ukkosjohtimien ja suppeahkojen pylväsmaadoitusten muodostaman impedanssiketjun arvo ketjun päästä katsottuna saadaan laskettua yhtälöllä 2.

$$Z_k = \sqrt{R_p \cdot I_j \cdot Z_u} \quad (2)$$

jossa

$Z_k$  = resultoiva maadoitusimpedanssi

$R_p$  = pylväiden vakioksi oletettu maadoitusresistanssi

$I_j$  = keskimääräinen jänteen pituus

$Z_u$  = ukkosjohtimien impedanssi pituutta kohti maan ollessa paluupiirinä

Ukkosjohtimien ja pylväsmaadoitusten muodostama impedanssiketjun esitettiin edellisen kappaleen kuviossa 12. Kaukana sähköasemalta johdolla sattuvassa maasulussa maasulkuvirta pääsee leviämään kahteen suuntaan jolloin resultoivaksi maadoitusimpedanssiksi voidaan laskea puolet ketjunimpedanssista, eli

$$Z_m = 0,5 \cdot Z_k$$

Ukkosjohtimien impedanssi pylväsväliä kohti kahta teräsukkosjohdinta käytettäessä on 0,5...0,7  $\Omega$  / jänne. Teräksen ja alumiinin yhdistelmä ukkosjohtimia käytettäessä vastaava arvo on 0,1...0,3  $\Omega$  / jänne. Käytännössä  $Z_m$  on yleensä muutamien ohmien luokkaa, eikä näin ollen vaikuta merkittävästi maasulkuvirran suuruuteen. Pylväsmaadoitusten parantaminen vaikuttaa maasulkuvirran suuruuteen melko vähän. Vertailtaessa teräsalumiiniukkosjohtimia ja pelkästään teräksestä valmistettuja ukkosjohtimia huomataan, että teräsalumiiniukkosjohtimilla  $Z_m$  jää huomattavasti pienemmäksi ja näin ollen myös maan kautta palaavan virran osuus on pienempi kuin teräsukkosjohtimia käytettäessä. Tällöin jos oletetaan, että maasulkuvirta pysyy samana, pienenee maadoitusjännite

normaalisti noin  $1/4 \dots 1/3$  osaan arvosta, joka saataisiin teräsukkosjohtimia käytettäessä. (J. Elovaara, Y. Laiho 1988, 419–420.)

Maasulku ukkosjohtimellisella johdolla aiheuttaa maadoitusjännitteen usealle pylvälle, mutta suurin arvo esiintyy vikapylväällä.  $R_p$ :n kasvaessa ja  $Z_u$ :n pienentyessä maadoitusjännitteen leviäminen vikapylvään viereisille pylvälle ulottuu kauemmaksi. Mitä pienempi  $R_p$  on ja mitä suurempi  $Z_u$  on, sitä suurempi osa virrasta menee maahan vikapylväällä ja sen lähimmillä pylväillä. Eli hyvin toteutetuilla maadoituksilla ja huonosti johtavilla ukkosjohtimilla maasulkuvirta aiheuttaa suuremman potentiaalin nousun vikapylväällä ja sen lähistöllä, eikä potentiaali jakaannu niin laajalle alueelle johdolla. Pylväsmaadoitusten parantaminen siis huonontaa tilannetta tältä kannalta.

## 8.2 Pylväspotentiaalin laskeminen

Maasulun sattuessa ukkosjohtimilla varustetulla johdolla ainoastaan osa verkon kokonaismaasulkuvirrasta menee ukkosjohtimien ja pylväsmaadoitusten muodostaman järjestelmän kautta maahan. Se osa joka maasulkuvirrasta menee vikapaikan maadoitusten kautta maahan aiheuttaa pylvälle yhtälön 3 mukaisen maadoitusjännitteen.

$$U_e = k_r \cdot Z_m \cdot I_m \quad (3)$$

jossa

$k_r$  = reduktiokerroin

$Z_m$  = vikapaikan maadoitusimpedanssi

$I_m$  = kokonaismaasulkuvirta

Läpimeneviä maadoitusjohtimia käytettäessä koko johdolla tulee potentiaalin tarkka laskeminen erittäin hankalaksi, sillä ukkosjohtimien ja läpimenevien maadoitusjohtimien vaimennukset ovat erityyppisiä. Lisäksi maaperän suuri ominaisresistanssin vaihtelu aiheuttaa vaihtelevan maadoitusjohtimen konduktanssin, jota vielä sekoittaa pylväsperustusten konduktanssi, tekee tarkan matemaattisen ratkaisun käytännössä mahdottomaksi. Verrattaessa läpimenevää maadoitusta ja säteittäistä maadoitusta, jäävät pylväs-

potentiaalit pienemmäksi läpimenevällä kuin säteittäisesti maadoitetulla johdolla. Läpimenevillä maadoitusjohtimilla saavutettava pienempi pylväspotentiaali johtuu kolmesta syystä:

- Reduktiokerroin on verrattaen pienempi, jolloin myös maahan tunkeutuva maasulkuvirta jää pienemmäksi
  - Läpimenevät maadoitusjohtimet pienentävät ukkosjohdinten pitkittäisimpedanssia, jolloin myös resuloiva maadoitusimpedanssi pienenee
  - Myös pylväiden maadoitusresistanssit pienenevät, joka vaikuttaa myös resuloivaan maadoitusimpedanssiin pienentäen sitä
- (Dipl. Ins. A. J. Pesonen. 1976, 35.)



## 9 POTENTIAALIN LEVIÄMINEN PYLVÄSYMPÄRISTÖÖN

### 9.1 Ukkosjohtimeton johto

Ukkosjohtimettomalla johdolla pylväällä tapahtuvassa maasulussa koko maasulkuvirta tunkeutuu maahan vikapylvään kautta. Vikapylvään maadoitusresistanssi rajoittaa merkittävästi maahan tunkeutuvan virran suuruutta, mutta tällöin pylväspotentiaalin nousu, eli maadoitusjännite nousee hyvin suureksi, jopa lähelle vaihejännitteen arvoa. Pylväsmaadoituksilla on maadoitusjännitteen ohella erittäin suuri vaikutus maasulun aiheuttaman potentiaalin nousun leviämiseen maadoituselektrodin ulkopuolelle. Vaikein ongelma on yleensä pylväsympäristössä olevien pienjännite- ja viestintäverkkojen maadoitukset, joihin saattaa siirtyä hyvinkin suuria jännitteitä, riippuen maadoitusten etäisyyksistä, maaperästä jne. Siirtyvien jännitteiden teoria on esitetty kappaleessa 2.2.3.

Suunniteltaessa maadoituselektrodeja pylväälle täytyy ottaa huomioon alueella olevien muiden järjestelmien maadoitukset, sillä maadoitusten parantaminen saattaa huonontaa tilannetta ympäristöön siirtyvän jännitteen kannalta. Jos pylväsympäristön maaperän oletetaan olevan homogeenista ja pylväsmaadoitus pistemäiseksi tai puolipalloksi, saadaan maan pinnan potentiaali etäisyydellä  $x$ , lukuunottamatta maadoituselektrodin käsittämää aluetta, laskettua yhtälöllä 4.

$$V_p = \frac{\rho \cdot I_e}{2 \cdot \pi \cdot x} \quad (4)$$

jossa

$\rho$  = maaperän resistiivisyys

$I_e = R_p$ :n rajoittama maasulkuvirta

$x$  = etäisyys vikapylvään maadoituksen keskipisteestä

Yhtälöstä voidaan nähdä, että mitä suurempi  $R_p$ :n rajoittama maasulkuvirta  $I_e$  on, sitä suurempi on myös maan potentiaali. Eli potentiaalin leviämisen kannalta tilanne vikapylvään ympäristössä on sitä pahempi, mitä laajempi ja parempi pylvään maadoitus on. Ukkosjohtimettomalla johdolla paras tilanne pylväsympäristöön leviävän potentiaalin

kannalta saavutetaankin, kun maadoitusresistanssi mitoitetaan niin korkeaksi kuin vain maasulkusuojat sallivat.

Ukkosjohtimettomalla johdolla pylväspaikan, jossa ihmisiä oleskelee ja liikkuu, saaminen määräysten mukaiseksi maadoitusten kannalta onkin lähes mahdotonta jos pylvästä ei saada eristettyä täysin maasta. Ukkosjohtimettomia johtoja voidaan mahdollisesti rakentaa täysin asumattomille alueille, missä ukkosen mahdollisuus on varsin pieni, ja missä verkko on sammutettu, eli johdolla on pienet maasulkuvirrat. (Dipl. Ins. A. J. Pesonen. 1976, 38–39.)

## 9.2 Ukkosjohtimellinen johto

Ukkosjohtimellisella johdolla reduktiovaikutuksen seurauksena osa maasulkuvirrasta palaa ukkosjohtimia pitkin asemalle maapotentiaalin nousua aiheuttamatta. Maasulkuvirta vikapylväältä jakaantuu lisäksi lähipylväille, mikä taas lieventää osaltaan maapotentiaalin nousua vikapylväällä. Ukkosjohtimellisen johdon ympäristössä olevan pisteen  $x$  potentiaali saadaan selville, kun se lasketaan niiden pylväiden joille maasulkuvirta jakaantuu, aiheuttamien potentiaalain summana. Pisteen  $x$  potentiaali saadaan laskettua alla esitetyllä yhtälöllä 5. (VHV- ohje 05 2001, 9.)

$$V_x = \sum_{n=-N_a}^{N_b} \frac{\rho I_{en}}{2\pi x_n}$$

jossa

$n$  = pylvään indeksi, vikapylvään  $n = 0$

$x_n$  = etäisyys pylvään  $n$  maadoituksen keskipisteestä

$I_{en}$  = pylvään  $n$  kautta maahan menevä virta

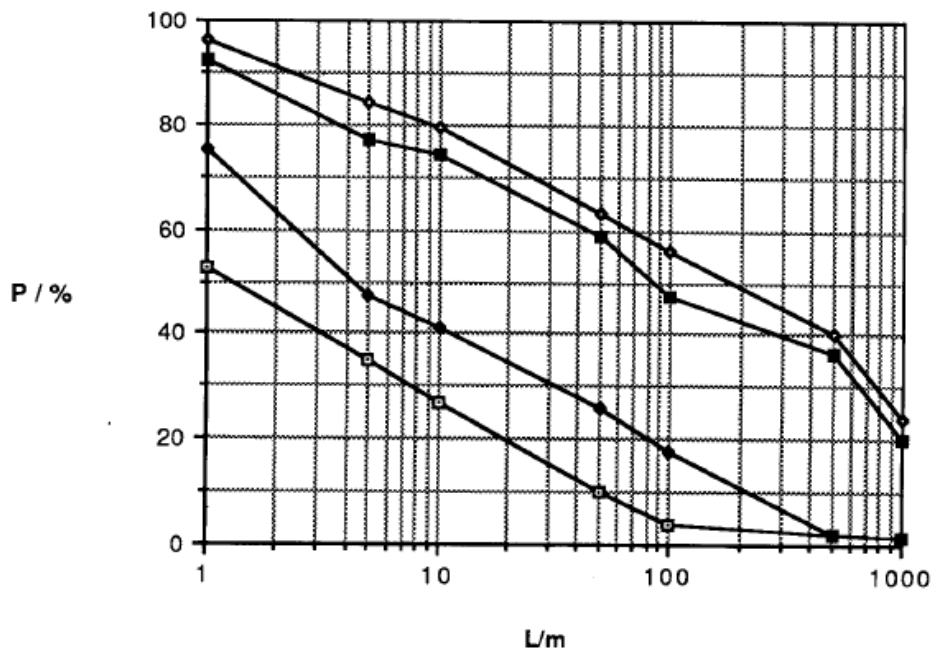
$N_a, N_b$  = vaikuttavien pylväiden määrä vikapylvään molemmin puolin

$\rho$  = maan resistiivisyys

Maapotentiaalin leviämisen laskennallinen tarkastelu on kuitenkin suhteellisen epätarkka, joten käytännössä tarkka virran jakautumisen laskeminen täytyy suorittaa tietokoneohjelmalla. Luotettavin, mutta samalla myös työläin vaihtoehto potentiaalain leviämisen tarkasteluun olisi vaarajännitemittausten suorittaminen. (VHV- ohje 05 2001, 12.)

Ukkosjohtimellisella johdolla lähimmän pylvään virta on määräävin ympäristön potentiaalain kannalta. Tästä syystä, jos johdolla on jokin ongelmallinen pylväspaikka maadoitusten suhteen, esimerkiksi rakennus lähellä pylvästä, olisi sitä parempi mitä huonommin ongelmallista paikkaa lähimmät pylväät ovat maadoitettuja, ja mitä paremmin kauempana olevat pylväät ovat maadoitettu. Eli maasulun sattuessa ongelmapaikalla, vikavirrasta suurin osa jakaantuu ukkosjohtimia pitkin kauemmas vikapaikasta, eikä näin ollen vikapylvään ympäristössä aiheudu niin suurta potentiaalain nousua.

Potentiaalin ympäristöön leviämiseen vaikuttaa suuresti maan ominaisresistanssi, joka saattaa vaihdella lyhyellä matkalla hyvinkin paljon. Hyvin johtavassa maassa potentiaali ei leviä kovinkaan kauaksi johdon ympäristöön, mutta huonosti johtavassa potentiaali saattaa olla vaarallinen vielä kymmenien, jopa satojen metrien päässä vikapylväältä. Jännitteen leviämisen arvioinnissa voidaan käyttää apuna ns. potentiaalisuppiloa, joka perustuu Imatran voimassa mittaamalla saatuihin tuloksiin. Potentiaalisuppilo on esitetty kuviossa 14.



Kuvio 14 Potentiaalisuppilo (Y. Ojala, Maadoituskoulutus materiaali, 2011)

Potentiaalisuppilon kuvaajasta pystyakselilta saadaan pisteen potentiaali prosentteina pylvään maadoitusjännitteestä etäisyydellä  $x$  pylvästä. Potentiaalisuppilon kahden keskimäisen käyrän väliin jää 80 % tapauksista. Kummallekkin ulommista vyöhykkeistä jää 10 % tutkituista tapauksista. Kuten kuvaajasta voidaan huomata, potentiaalin leviämisen arviointi potentiaalisuppilon avulla on melko hankalaa mahdollisen vaihtelualan vuoksi. (Dipl. Ins. A. J. Pesonen. 1976, 39–41.)

## 10 MAADOITUKSIEN MITOITUS

Tässä luvussa esitetään pylväismaadoitusten suunnittelun keskeiset kriteerit ja periaatteellinen rakenne. Maadoituksen tarpeellisuuteen vaikuttaa johtorakenne, pylvästyypit ja erityisesti paikalliset maadoitusolosuhteet.

### 10.1 Mitoituskriteerit

Seuraavaksi esitettävät maadoitusten mitoittamiseen liittyvät keskeisimmät seikat perustuvat SFS – 6001 + A1 standardiin.

Maadoitusten rakenteen on täytettävä seuraavat viisi vaatimusta:

- a) Maadoitusten on oltava mekaaniselta lujuudeltaan ja korroosionkestävyydeltä riittäviä
- b) Maadoituksen on kestävä laskemalla määritetty suurin vikavirta termiseltä kannalta katsottuna
- c) Mahdolliset vahingot omaisuudelle ja laitteille on estettävä
- d) Taata henkilöturvallisuus ottaen huomioon maasulun aikana esiintyvät jännitteet
- e) Varmistaa johdolle suunnitelmien mukainen luotettavuustaso

Maadoitusten mitoittamiseen liittyvät parametrit ovat:

- Vikavirran arvo
- Vian kestoaika
- Maaperän ominaisuudet

Huom. Järjestelmän tähtipisteen maadoitustapa vaikuttaa olennaisesti vikavirran suuruuteen ja vian kestoajaan. 110 kV:n verkossa suurten maasulkuvirtojen ja vaarajännitteiden takia vain osa verkon muuntajien tähtipisteistä on maadoitettu, kuitenkin normaalisti jokapaikasta on yhteys johonkin maadoitettuun muuntajaan. Jos suurjännitejärjestelmässä on useita eri jännitetasoja, tulee kunkin jännitetason maadoitusten täyttää edellä

mainitut viisi maadoitusten vaatimusta. Eri jännitetasojen samanaikaisia vikatilanteita ei tarvitse ottaa mitoituksessa huomioon. (Finngrid Oyj 2005, 5.)

### **10.1.2 Korroosion kestävyys ja mekaaninen lujuus**

Maadoituselektrodit, jotka ovat maaperän kanssa suorassa kosketuksessa, on valmistettava korroosion kestävästä materiaalista niin, että ne kestävät kemiallisen ja biologisen syöpmisen, hapettumisen, elektrolyyttiparin muodostumisen toisen materiaalin kanssa ja elektrolyysin. Pylväiden rakenteeseen liittyviä luonnollisia maadoituselektrodeja, kuten betoniperustuksiin upotettuja teräksiä ja teräspaaluja voidaan käyttää osana maadoitusjärjestelmää.

Maadoituksien on kestettävä asennuksessa ja normaalin käytön aikana syntyvät mekaaniset rasitukset. Jos maadoittamiseen käytetään jotain muuta materiaalia, esimerkiksi ruostumatonta terästä, on materiaalin ja sen mittojen täytettävä kappaleessa 10.1. mainittujen rakennevaatimusten kohdat a) ja b). Maadoituksien mekaaninen lujuus ja korrosiovaatimukset määräävät seuraavalla sivulla esitettyjen maadoituselektrodien vähimmäismitat. (SFS 6001 2009, 79, 211–212.)

Maadoitus- ja potentiaalintasausjohtimien vähimmäispoikkipinta-alat ovat:

- Kupari: 16 mm<sup>2</sup>
- Alumiini: 35 mm<sup>2</sup>
- Teräs: 50 mm<sup>2</sup>

### 10.1.3 Tarkastelu termisen lujuuden kannalta

Maadoitusjohtimien termiseen lujuuteen vaikuttavat vikavirran suuruus ja vian kestoai-  
ka. Vikavirran suuruus määräytyy sähköjärjestelmän tähtipisteen maadoitustavan mu-  
kaan ja viankestoajaan vaikuttaa taas järjestelmän suojauksiin aseteltavat toiminta-ajat.

Maadoituselektrodin poikkipinta-ala lasketaan alle 5 sekuntia kestäville vioilla yhtälön  
2 mukaisesti. Laskentatuloksen kannalta on kuitenkin otettava huomioon kappaleessa  
7.1.2 mainitut johtimien vähimmäispoikkipinnat.

$$A = \frac{I}{K} \sqrt{\frac{t}{\ln \frac{\theta_f - \beta}{\theta_i + \beta}}} \quad (6)$$

jossa

$A$  = poikkipinta-ala (mm<sup>2</sup>)

$I$  = johtimen virran tehollisarvo (A)

$K$  = virrallisen osan materiaalista riippuva vakio, taulukossa 5 on esitetty arvot ylei-  
simmille maadoitusmateriaaleille olettaen alkulämpötilan olevan 20 °C

$t$  = vian kesto aika (s)

$\beta$  = virrallisen osan resistanssin lämpötilakertoimen käänteisarvo lämpötilassa 0 °C,

arvot eri materiaaleille esitetty taulukossa 5

$\theta_f$  = loppulämpötila (°C)

$\theta_i$  = alkulämpötila (°C).

**Taulukko 5** Materiaalista riippuvien vakioiden arvot [SFS – 6001, s. 90]

Materiaali	$\beta$ (°C)	$K$ (A x vs / mm <sup>2</sup> )
Kupari	234,5	226
Alumiini	228	148
Teräs	202	78

Normaaleissa olosuhteissa, maadoitusjohtimen ollessa ilmassa ja maadoituselektrodin maassa, oikosulkuvirran tiheytenä voidaan käyttää liitteen 2 mukaisia arvoja alkulämpötilan ollessa 20 °C ja loppulämpötilan 300 °C. Liitteen 2 kuvassa on esitetty sallittu vikavirrantiheys vian kestoajan funktiona. Kuvaa voidaan käyttää jos maadoituselektrodin poikkipinta on jo ennalta määritetty. Standardin IEC 60287 – 3 – 1 mukaan voidaan Suomen olosuhteissa käyttää alkulämpötilan arvona myös 15 °C.

Yhtälön 6 mukaisesti lasketut maadoituselektrodien poikkipinta – alat pätevät vain alle 5 sekuntia kestäville vikavirroille. Alle 5 sekuntia kestäväällä vikavirralla elektrodin lämpötilan nousu on adiabaattista, eli lämpöenergian määrä johtimessa on vakio, eikä lämpöä siirry kunnolla johtimesta pois. Jos mitoituksessa johtimen loppulämpötilana käytetään muuta arvoa kuin 300 °C, lasketaan virrat taulukossa 6 esitettyjen muunnoskerroimien avulla. Eristetyille ja betoniin upotetuille johtimille suositellaan käytettäväksi alempia loppulämpötilan arvoja.



Taulukko 6 Muunnoskerroimet jatkuvan virran loppulämpötilan ollessa muu kuin 300 °C

Loppulämpötila (°C)	Muunnoskerroin
400	1,2
350	1,1
300	1
250	0,9
200	0,8
150	0,7
100	0,6

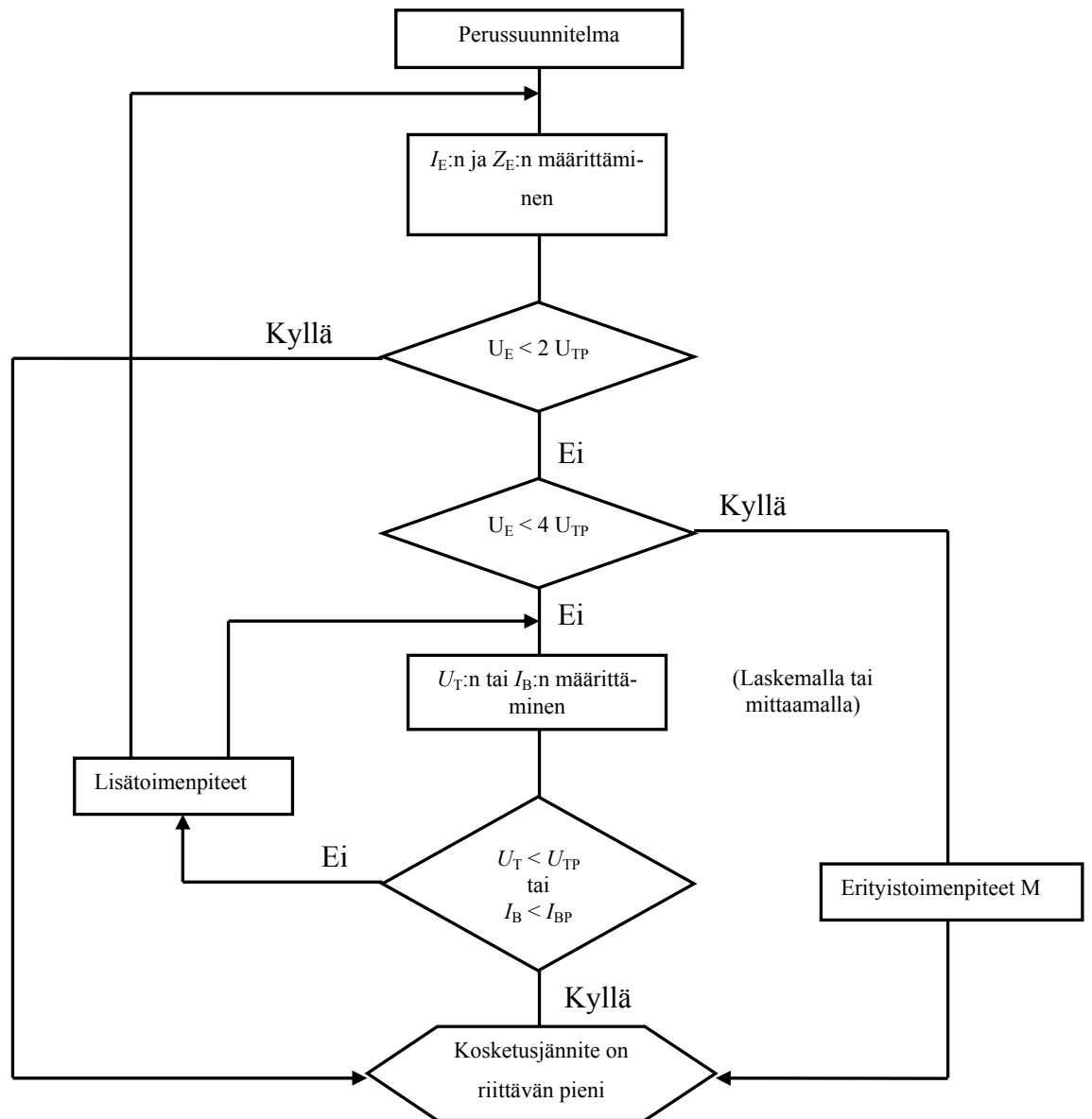
Maasta erotetuissa ja sammutetuissa järjestelmissä vikavirran kesto aika saattaa olla yli 5 sekuntia. Yli 5 sekuntia kestäville vikavirroille sallitut poikkipinnat pyöreälle maadoitusjohtimille on esitetty liitteessä 3 ja suorakulmaisille maadoitusjohtimille liitteessä 4. (SFS 6001 2009, 90–93.)

## 10.2 Sallitun kosketusjännitteen huomioiminen suunnittelussa

Kuviossa 12 on esitetty yleisesti maadoitusjärjestelmän suunnittelun kulku kosketusjännitteiden kannalta. Kyseinen kosketusjännitteiden tarkastelutapa pätee vain jos asennus ei ole osana laajaa maadoitusjärjestelmää. Suunnittelussa verrataan maadoitusjännitettä  $U_E$  tai kosketusjännitettä  $U_T$  sallittuun kosketusjännitteeseen  $U_{TP}$ . (SFS 6001 2009, 87.)

Erityistoimenpiteillä M 110 kV:n pylvään maadoituksissa tarkoitetaan seuraavia asioita:

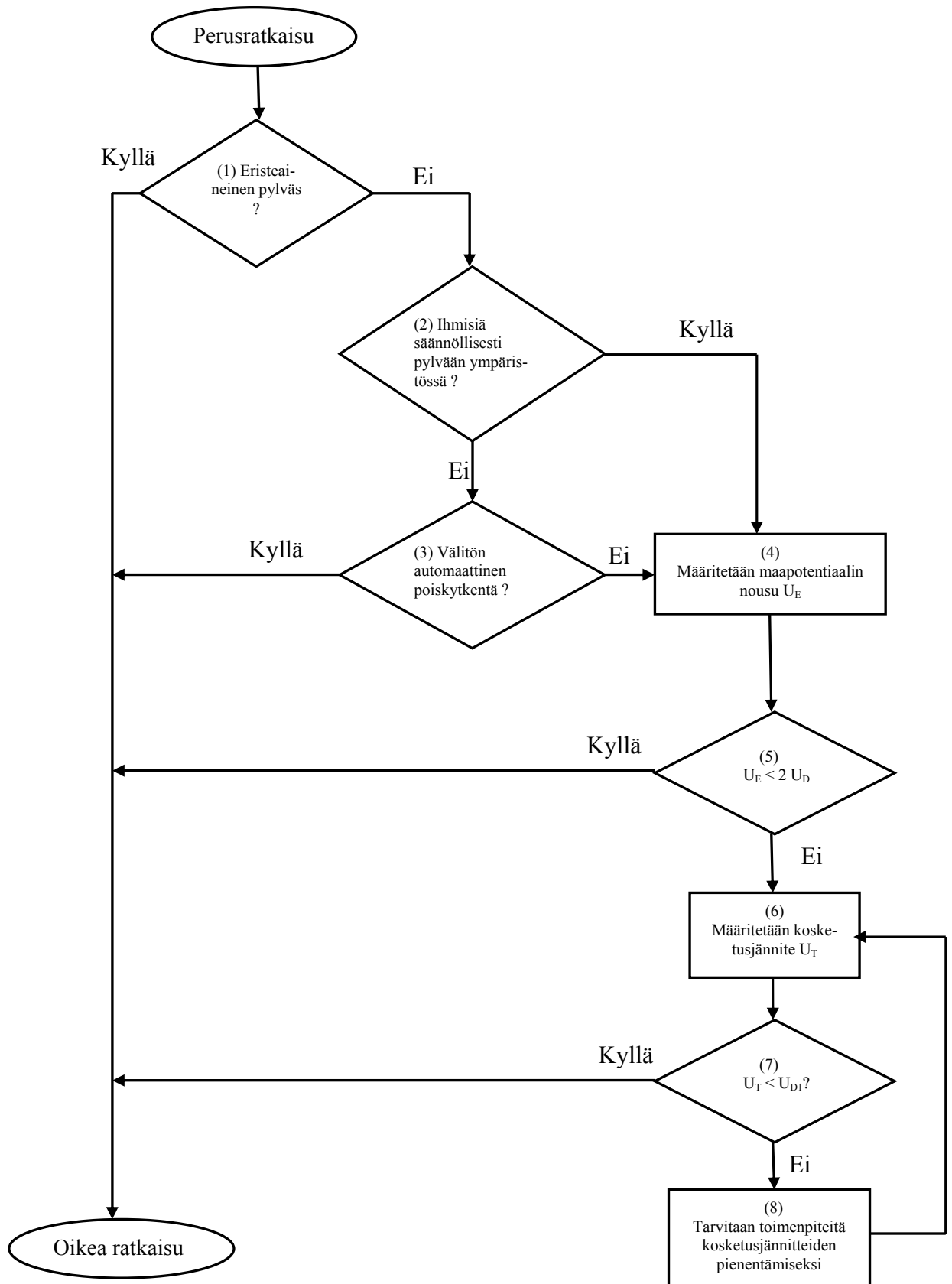
- Pylvään erottaminen eristysaineisella aidalla, joka sijoitetaan riittävän kauaksi pylväsrakenteesta estämään pylvään tahattoman metalliosien kosketuksen.
- Maan pintakerroksen korvaaminen eristävällä aineella, esimerkiksi soralla.
- Tehdään pylväsjalkojen ja harusvartaiden ympärille noin 1 m etäisyydelle ja korkeintaan 0,5 m syvyydelle potentiaaliohjausrenkaat (SFS 6001 2009, 98–99.)



Kuvio 12 Maadoitusjärjestelmän kosketusjännite tarkastelu, kun asennus ei ole osana laajaa maadoitusjärjestelmää (SFS 6001, 87)

### **10.3 Yleinen lähestymistapa pylväsmaadoitusten suunnitteluun kosketusjännite huomioon ottaen**

Seuraavalla sivulla olevassa (kuvio 13) vuokaaviossa on esitetty yleinen lähestymistapa pylväsmaadoitusten suunnitteluun ottaen huomioon sallittu kosketusjännite. Suluissa olevat numerot on selitetty seuraavalla sivulla. Kohdassa 10.1 esitetyt vaatimukset a), b) ja c) luovat maadoitusten perussuunnitelman. Mitoitus on kuitenkin vielä tarkistettava liian suurien kosketusjännitteiden kannalta kuvion 14 mukaisesti. (SFS 6001 2009, 213)

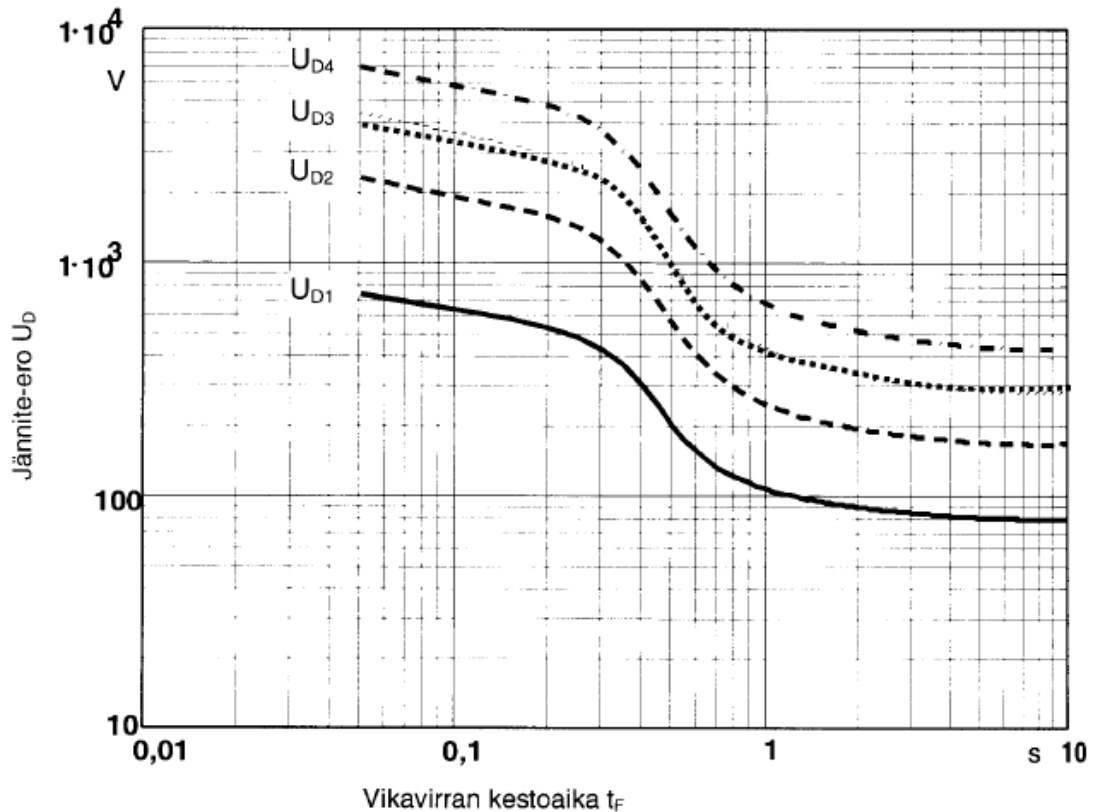


Kuvio 13 Pylvään maadoituksen suunnittelukulku kosketusjännite huomioon ottaen (SFS 6001, 214)

- 1) Maadoitukselle ei ole vaatimuksia sellaisilla pylväillä, jotka eivät johda sähköä, eikä niillä ole johtavia osia yhteydessä maahan. Tällöin voidaan katsoa, että maasulku on kyseisellä pylväällä käytännössä mahdoton.
- 2) Pylväspaikat, joilla voidaan olettaa, että ihmiset oleskelevat niillä muutamia tunteja päivässä muutamien viikkojen ajan tai, että ihmiset oleskelevat niillä lyhyitä aikoja, mutta säännöllisesti useita kertoja päivässä, on otettava huomioon tarkemmin maadoitusten suunnittelun kannalta. Tällaiset paikat sijaitsevat yleensä lähellä asuntoalueita, pelikenttiä tai koulunpiha – alueita. Paikat, joissa ihminen liikkuu satunnaisesti kuten metsät ja pellot maaseudulla, eivät kuulu näihin.
- 3) Pylväspaikat, joihin ulkopuoliselta ihmiseltä on pääsy estetty tai ihmisiä liikkuu harvoin, ja johto on suojattu automaattisella poiskytkennällä, ei tarvitse ottaa suunnittelussa huomioon kosketusjännitteen aiheuttamia mahdollisia vaaroja. Tällöin on voitava olettaa, että todennäköisyys ihmisen liikkumiselle pylväspaikalla ja samanaikaisesti esiintyvälle vialle on niin pieni, että se voidaan otaksua merkityksettömäksi ja siten myös maadoitusratkaisu voidaan katsoa riittäväksi.
- 4) Lasketaan mahdollisesta maasulusta aiheutuva maapotentiaalin nousu kappa-leessa 8.2 esitetyllä tavalla
- 5) Tarkastetaan kuviosta 14 onko maadoitusjännite pienempi kuin  $2 \cdot U_D$  verrattuna tilanteisiin 1,2,3 ja 4, jos jännite on pienempi voidaan maadoitusratkaisua pitää hyväksyttävänä.
- 6) Määritetään kosketusjännite  $U_T$
- 7) Tarkastetaan kuviosta 14 onko laskettu kosketusjännite pienempi kuin kuviossa näkyvä kosketusjännite  $U_{D1}$ , joka on sama kuin  $U_{TP}$
- 8) Jos laskettu kosketusjännite  $U_T$  ei ole pienempi kuin sallittu  $U_{D1}$  on tehtävä toimenpiteitä kosketusjännitteen pienentämiseksi niin paljon, että vaatimukset täytetään. Toimenpiteet on esitettävä kansallisissa liitteissä (NNA).

Mikäli sallittuja kosketusjännitetasoja ei saavuteta pylvään läheisyydessä, on pylväs eristettävä eristysaineisella aidalla, joka on sijoitettu riittävän kauas niin, että se estää pylvään metalliosien tahattoman kosketuksen. Toisena vaihtoehtona on, että pylvään läheisyydessä oleva maan pintakerros korvataan eristävällä aineella, esim. soralla.

(SFS 6001 2009, 214)



Kuvio 14 Esimerkkejä kosketusjänniterajoista vikavirran  $t_f$  kestoajan funktiona (SFS 6001, 216)

SFS 6001 suurjännitestandardissa esitetyn kappaleen 6. Maadoitukset mukaan:

Jännite-ero  $U_D$  toimii kosketusvirtapiirissä arvolla, joka varmistaa henkilöturvallisuuden, kun käytetään lisäresistansseja  $R_a$ . Käyrät kuvassa 14 ovat:

Käyrä  $U_{D1}$  :  $R_a = 0 \Omega$  (esimerkki 1)

Käyrä  $U_{D2}$  :  $R_a = 1750 \Omega$  ,  $R_{a1} = 1000 \Omega$  ,  $\rho_r = 500 \Omega.m$  (esimerkki 2)

Käyrä  $U_{D3}$  :  $R_a = 4000 \Omega$  ,  $R_{a1} = 1000 \Omega$  ,  $\rho_r = 2000 \Omega.m$  (esimerkki 3)

Käyrä  $U_{D4}$  :  $R_a = 7000 \Omega$  ,  $R_{a1} = 1000 \Omega$  ,  $\rho_r = 4000 \Omega.m$  (esimerkki 4)

Kuvaus tyypillisistä sijaintipaikoista, jotka vastaavat yllä mainittuja esimerkkejä 1- 4sekä käyriä  $U_{D1}$  -  $U_{D4}$ , kuvassa 14:

Esimerkki 1. Käyrä  $U_{D1}$

Sijaintipaikat, joilla ihmiset voivat oleskella paljain jaloin, kuten leikkikentät, uima-altaat, leirintäalueet, virkistyslaueet ja niiden kaltaiset alueet. Huomioon ei oteta lisäresistansseja ihmiskehon lisäksi.

#### Esimerkki 2. Käyrä $U_{D2}$

Sijaintipaikat, joilla voidaan kohtuudella otaksua, että ihmiset käyttävät kenkiä. Näitä ovat yleisten teiden jalkakäytävät, pysäköintialueet jne. Lisäresistanssina käytetään 1750 ohmia.

#### Esimerkki 3. Käyrä $U_{D3}$

Sijaintipaikat, joilla voidaan kohtuudella otaksua, että ihmiset käyttävät kenkiä ja että maan resistiivisyys on korkea, esim. 2000  $\Omega\text{m}$ . Lisäresistanssina otetaan huomioon 4000 ohmia.

#### Esimerkki 4. Käyrä $U_{D4}$

Sijaintipaikat, joilla voidaan kohtuudella otaksua, että ihmiset käyttävät kenkiä ja että maan resistiivisyys on hyvin korkea, esim. 4000  $\Omega\text{m}$ . Lisäresistanssina otetaan huomioon 7000 ohmia.

## 11 PYLVÄÄN MAADOITUSELEKTRODIN MITOITTAMINEN JA KOSKETUSJÄNNITE TARKASTELU

Tässä luvussa esitettyjen mitoituskriteerien ja tehtyjen laskujen perusteella toteutetut maadoitukset takaavat, että maadoitus toimii kaikissa olosuhteissa ja pitää askel- ja kosketusjännitteen sallituissa rajoissa. Mitoitus perustuu SFS 6001+A1 standardikirjassa esitettyihin määräyksiin ja suorittamaan 110 kV:n suurjännitelinjan maadoituskoulutukseen. Esimerkki mitoituksessa on käytetty Ylitornio – Liakka väliseltä johdolta mitattuja maan ominaisresistanssin arvoja.

Maadoitusten perussuunnitelma muodostuu kappaleessa 10.1. mainituista a), b) ja c) vaatimuksista. Kaksi ensimmäistä ehtoa täytetään tekemällä kappaleessa 10.1.3 esitetyt laskelmat. Viimeisellä ehdolla tarkoitetaan oikeiden suojalaitteiden ja niiden asetusten valintaa. Verkonhaltija määrittelee ennalta suojalaitteet ja niiden asetukset.

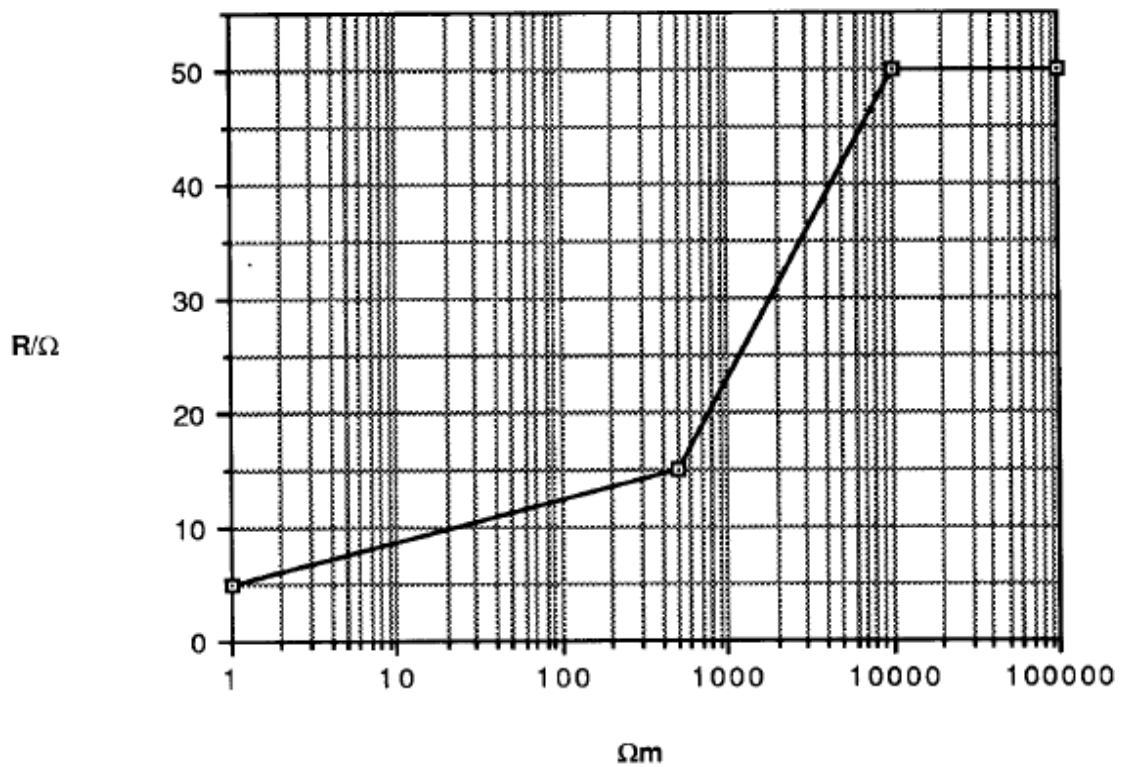
Maadoitusten mitoituksen perustana ovat pylvään luonnollinen maadoitusresistanssi ( $R_{mj}$ ), maadoitusresistanssin tavoitearvo ja maan ominaisresistanssit pylvään lähiympäristössä.

Käytännössä 110 kV:n pylväsmaadoitukset toteutetaan lähes poikkeuksetta kuparilla. Kuparilla on erinomainen johtavuus hintaansa nähden, lisäksi sillä on hyvä mekaaninen lujuus ja korroosionkestävyys. (Y. Ojala, Maadoituskoulutus, 2011)



## 11.1 Tavoitearvo

Maadoitusresistanssin tavoitearvo määräytyy pylväältä mitattujen, piikkivälien 2, 4 ja 16, maan ominaisresistanssin keskiarvon mukaan. Tavoitearvokäyrä on esitetty kuviossa 15. Käyrä on Imatran voiman tekemä ja se on laadittu ottaen huomioon maadoituksista aiheutuvat kulut sekä niistä aiheutuva kansantaloudellinen hyöty.



Kuvio 15 Tavoitearvokäyrä (Y. Ojala, Maadoituskoulutus materiaali, 2011)

Poikkeukset tavoitearvon määrittämisessä:

- 10:llä lähinnä asemaa olevalla pylväällä tavoitearvoksi otetaan 50 % käyrältä saatavasta arvosta. Näin pyritään pienentämään asemilla esiintyviä ylijännitteitä ja maasulkupotentiaaleja
- Risteävillä tai rinnakkaisilla johdoilla pylväiden yhteisen maadoitusresistanssin tavoitearvo on 75 % käyrältä saavasta arvosta. Näin vähennetään mahdollisuutta, että toiseen johtoon osunut salamanisku aiheuttaisi takaiskun myös toisen johdon pylväällä. Jos tähän alennettuun arvoon ei päästä, ei johtojen maadoituksia yhdistetä. Rinnakkaisilla johdoilla maadoitusten yhdistäminen tulee tehdä joka kolmannella pylväällä.
- Ukkosalttiilla seuduilla sijaitsevien pylväiden tai johtojen tavoitearvoa voidaan tapauskohtaisesti pienentää
- Mikäli jollain pylväällä ei päästä tavoitearvoon, suunnitellaan viereisten pylväiden maadoitukset mahdollisuuksien mukaan tavoitearvoa paremmiksi.  
(Y. Ojala, Maadoituskoulutus, 2011)

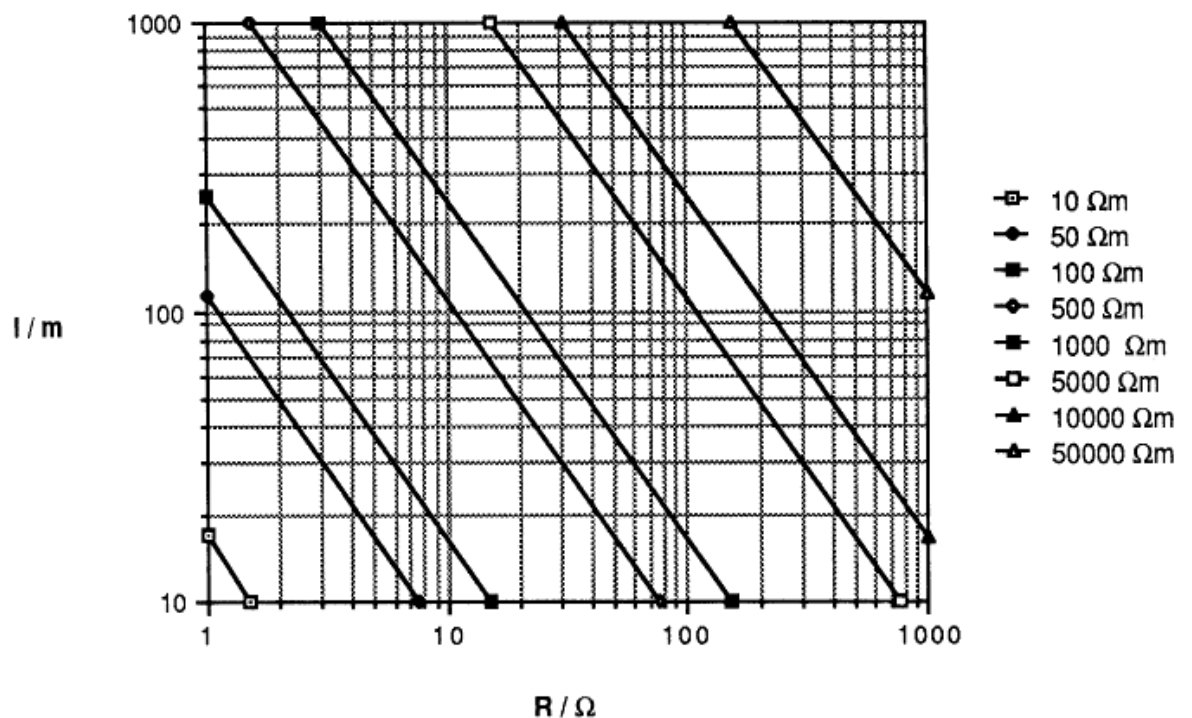
Esim. jos  $\rho_2 = 650 \Omega\text{m}$ ,  $\rho_4 = 800 \Omega\text{m}$  ja  $\rho_{16} = 1000 \Omega\text{m}$

- keskiarvoksi saadaan  $815 \Omega\text{m}$
- käyrältä tavoitearvoksi saadaan  $R_T = 21 \Omega$

### 11.1.2 Säteismaadoitus

Pylvään maadoituselektrodit pyritään sijoittamaan mahdollisimman hyvin johtavaan maahan. Säteismaadoituksen suunnittelussa täytyy ottaa huomioon mahdolliset maan ominaisresistanssin vaihtelut sekä ympäristön asettamat vaatimukset, kuten tiet, talot, muut kaapelit, vesijohdot jne.

Maadoituksen mitoituksessa arvioidaan kokemuksen perusteella pylväälle tarvittava lisämaadoituksen määrä. Kuvion 16 mukaisesta käyrästä saadaan tätä lisäystä vastaava maadoitusresistanssin arvo. Jos pylväsympäristössä on johtavuudeltaan erityyppisiä alueita, saadaan pylvään maadoitusvastus muuntamalla kutakin maalajia vastaava maadoituselektrodin pituus erikseen maadoitusvastuiksi ja laskemalla nämä arvot rinnakkain  $1,3 \cdot R_{ml}$ :n kanssa. (Y. Ojala, Maadoituskoulutus, 2011)



Kuvio 16 Maadoitusresistanssi elektrodipituuden ja maan resistiivisyyden funktiona (maadoituselektrodina 16 mm<sup>2</sup> kupariköysi). (Maadoituskoulutus materiaali, 2010)

Liitteessä 6 on selkeämpi käyrästä kuvioista 6, jossa on maadoitusresistanssi elektrodipituuden ja maan resistiivisyyden funktiona.

Esim. Maan ominaisresistanssi  $\rho = 1000 \Omega\text{m}$  ja haluttu maadoitusresistanssi  $R_T = 30$

→ Käyrästä elektrodin pituudeksi  $l = 70 \text{ m}$

Tietyn mittaisen vaakamaadoituselektrodin antama maadoitusresistanssi voidaan laskea taulukossa 3 esitetyllä yhtälöllä: vaakasuora johdin upotettuna.

### 11.1.3 Läpimenevämaadoitus

Läpimenevälle maadoitukselle joudutaan laskemaan ekvivalenttiresistanssi  $R_{ekv}$  ja 50 Hz:n maadoitusresistanssi  $R_{50\text{Hz}}$ . Mitoitus tapahtuu ekvivalenttiresistanssin avulla. Ekvivalenttiresistanssilla tarkoitetaan lähinnä salamavirran näkemää maadoitusresistanssia, kun taas 50 Hz:n resistanssi on maasulkuvirran näkemä maadoitusresistanssi. Kumpatkin resistanssi lasketaan ja merkitään pöytäkirjaan ”odotettavissa oleva  $R_m$ ” – kohtaan kauttaviivalla erotettuina ( $R_{50\text{Hz}} / R_{ekv}$ ).

Ekvivalenttiresistanssiin lasketaan mukaan kaikki maadoituselektrodit, jotka ovat alle 50 m:n etäisyydellä pylvästä. Näiden rinnalle lasketaan yli 50 m:n etäisyydellä olevien elektrodien aaltoimpedanssi, joka on riippuu elektrodien lukumäärästä. Aaltoimpedanssit ovat seuraavat:

1 läpimenevä	170 $\Omega$
2 läpimenevä	100 $\Omega$
3 läpimenevä	63 $\Omega$
4 läpimenevä	50 $\Omega$

$R_{50\text{Hz}}$  sisältää kaikki kyseiselle pylvälle suunnitellut maadoituselektrodit. Tähän ei kuitenkaan sisälly alenevien pylväsnumeroiden suunnasta tulevat läpimenevät elektrodit, koska ne lasketaan kuuluvaksi edelliselle pylvälle.  $R_{50\text{Hz}}$  arvoa laskettaessa aaltoimpedansseja ei oteta huomioon, vaan mitoitus tapahtuu, kuten säteismaadoituksella myös yli 50 metriä ylittävältä osalta. (Y. Ojala, Maadoituskoulutus, 2011)

#### 11.1.4 Ylipitkämaadoitus

Ylipitkämaadoitus mitoitetaan samalla tavalla kuin läpimeneväkin. Pylväälle siis laskeetaan myös  $R_{ekv}$  ja  $R_{50Hz}$ . Kuitenkin täytyy huomioida, että 50 metrin takaisen elektrodin maadoitusresistanssin on oltava pienempi kuin elektrodin aaltoimpedanssi. (Y. Ojala, Maadoituskoulutus, 2011)

#### 11.1.5 Potentiaaliohjauselektrodi

Potentiaaliohjauselektrodin mitoituksessa otetaan huomioon vain puolet siihen käytetystä materiaalista. Tavallisesti portaalipylväälle käytetään kupariköyttä 80...100 m, josta huomioidaan mitoituksessa 40...50 metriä. (Y. Ojala, Maadoituskoulutus, 2011)

#### 11.1.6 Pystymaadoitus

Pystymaadoituksen mitoitusta on muihin maadoitustapoihin nähden yleensä helpompaa ja tarkempaa, sillä se perustuu yleensä maadoituselektrodista mitattuun maadoitusresistanssin arvoon. Pystymaadoitukseen soveltuvan paikan arvionti tehdään johdolla suoritettavien maan ominaisresistanssimittausten aikana. Paikan arvioinnissa voidaan käyttää apuna myös pohjatutkimuksia mittausten lisäksi. Nyrkkisääntönä on, että jos maan resistiivisyys pienenee syvemmälle mentäessä, voidaan paikalla todennäköisesti käyttää pystymaadoitusta. (Y. Ojala, Maadoituskoulutus, 2011)

Ominaisresistanssimittauksista kertoimien avulla saadaan maan suhteellinen ominaisresistanssi  $\rho_r$ , joka tarkoittaa ominaisresistanssia maan pinnasta piikkivälin osoittamaan syvyyteen asti. Pystymaadoituksen mitoituksessa on laskettava likimääräiset ominaisresistanssit eri syvyyksillä, jotta voidaan arvioida kuinka syvälle maadoituselektrodi on mahdollista upottaa. Likimääräiset ominaisresistanssit eri syvyyksillä lasketaan seuraavasti:

$$\rho_a (0,5 \text{ m}) = \rho_{r1}$$

$$\rho_a (1,5 \text{ m}) = (\rho_{r2})^2 / \rho_{r1}$$

$$\rho_a (3,0 \text{ m}) = (\rho_{r4})^2 / \rho_{r2}$$

$$\rho_a (6,0 \text{ m}) = (\rho_{r8})^2 / \rho_{r4}$$

$$\rho_a (12,0 \text{ m}) = (\rho_{r16})^2 / \rho_{r8}$$

Saatujen  $\rho_a$  arvojen perusteella arvioidaan elektrodin upotussyvyyttä siten, että voidaan olettaa elektrodin uppoavan vähintäänkin siihen syvyyteen asti, jossa  $\rho_a$  arvot alkavat nousta. Elektrodipituuden lisäksi on myös arvioitava saavutettava maadoitusresistanssi edellä määritetyllä elektrodipituudella. Arviointi voidaan laskea seuraavasti:

$$R_p = (\text{ominaisresistanssi } \rho_r \text{ elektrodisyvyyteen asti}) / (\text{elektrodin pituus } l_p)$$

Lasketun maadoitusresistanssin perusteella voidaan arvioida, kuinka monta pystyelektrodiä tarvitaan tavoitteeseen pääsemiseksi. Pystyelektrodeilla saavutetut resistanssiarvot lasketaan samoin yhteen rinnankytkentänä kuin vaakaelektrodeillakin. Pylvästä kohden pystymaadoituksia ei saisi tehdä kolmea enempää, koska elektrodien ollessa liian lähellä toisiaan, elektrodit peittävät toisiaan ja todellinen maadoitusresistanssi jää huomattavasti arvioitua huonommaksi. (Y. Ojala, Maadoituskoulutus, 2011)

## 11.2 Ylitornio – Liakka 110 kV pylvään 20 maadoitus

### 11.2.1 Perussuunnitelma

Poikkipinnan laskennassa vikavirtana kannattaa käyttää suurinta mahdollista vikavirtaa, jolloin tilanne on pahin mahdollinen. Suurin mahdollinen vikavirta ja laukaisujat saadaan selville Suomen kantaverkkoa hallinnoivalta Finngrid Oy:ltä. Finngrid ilmoittaa Ylitornio- Liakka välisen suurjännitelinjan suurimmaksi vikavirraksi 1,75 kA ja laukaisujaksi 0,2 sekuntia. Lasketaan yhtälön 6 avulla vaadittu johtimen poikkipinta-ala:

$$A = \frac{I}{K} \sqrt{\frac{t}{\ln \frac{\theta_f - \beta}{\theta_i + \beta}}} = \frac{1750 \text{ A}}{226} \cdot \sqrt{\frac{0,2}{\ln \frac{300 \text{ }^\circ\text{C} + 234,5 \text{ }^\circ\text{C}}{20 \text{ }^\circ\text{C} + 234,5 \text{ }^\circ\text{C}}} = 4,0 \text{ mm}^2$$

Laskettu johtimen poikkipinta- ala ei täytä standardin asettamia määräyksiä. Liitteessä 5 on esitetty maadoituselektrodien vähimmäispoikkipinnat, joten valitaan elektrodi sen mukaan. Pylväs sijaitsee kuivalla kankaalla, jossa korroosioriski ja mekaanisen vaurion riski on alhainen, joten valitaan poikkipinnaksi 16 mm<sup>2</sup> kupari.

### 11.2.2 Maadoituselektrodin pituus

Katsotaan liitteessä 6 olevasta maadoituspöytäkirjasta maan ominaisresistanssit  $\rho_{r2}$ ,  $\rho_{r4}$  sekä  $\rho_{r16}$  ja lasketaan näistä maan ominaisresistanssin keskiarvo pylväspaikalla.

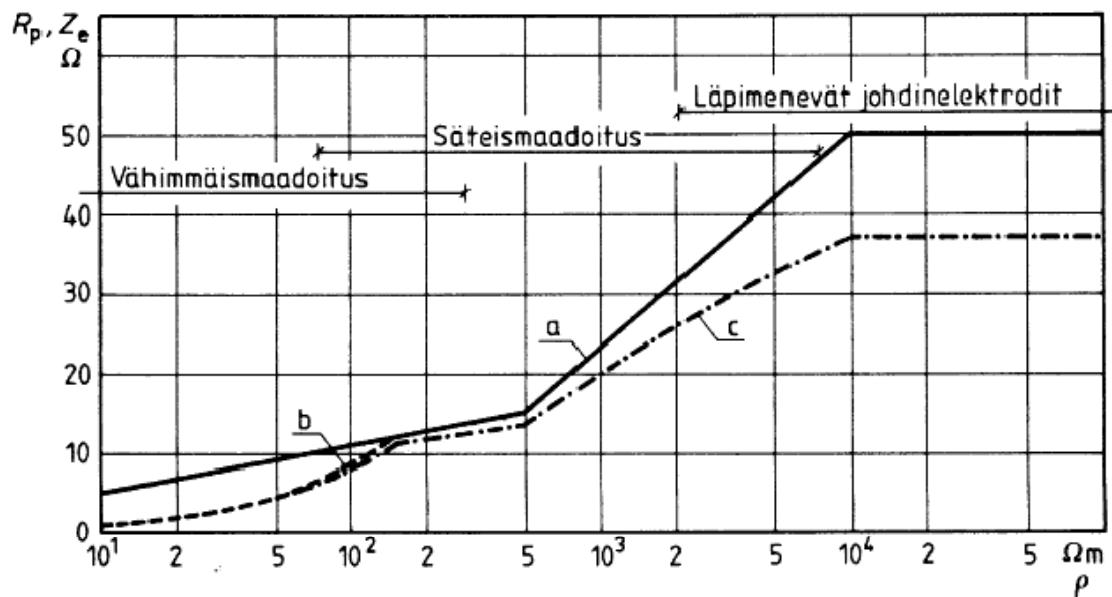
$$\rho_r = \frac{266 \text{ } \Omega\text{m} + 304 \text{ } \Omega\text{m} + 1136 \text{ } \Omega\text{m}}{3} = 570 \text{ } \Omega\text{m}$$

Maan ominaisresistanssin keskiarvoksi saadaan 570  $\Omega\text{m}$ . Seuraavaksi katsotaan tavoitearvokäyrästä (kuvio 15) haluttu maadoitusresistanssi.

Halutuksi maadoitusresistanssiksi  $R_T$  saadaan käyrältä  $16,5 \Omega$ . Lisättävän maadoituselektrodin pituuden tarve arvioidaan kuvion 16 mukaisesta käyrästä.

→ Lisättävä määrä 100 metriä.

### 11.1.3 Maadoitustavan valinta



Kuvio 17 Pylväismaadoitusten mitoitus (110...400 kV). a) tavoitearvot, b) perusmaadoituksella saatava keskim. arvo, c) resultoiva aaltovastus ukkosjohtimet mukaan luettuna (J. Elovaara, Y. Laiho, 1988, 421)

Maan ominaisresistanssin ollessa  $570 \Omega\text{m}$  ja tavoitearvon ollessa  $16,5 \Omega$ , valitaan kuvion 17 käyrästä maadoitustavaksi säteismaadoitus. Maadoitus toteutetaan vetämällä kaksi 50 metrin sädettä kumpaankin suuntaan pylväältä katsottuna. Säteet sijoitetaan johtoaukean kumpaankin reunaan, jotta ne eivät peittäisi toisiaan ja potentiaali jakaantuisi tasaisesti joka puolelle pylvästä.



### 11.2.4 Pylvään potentiaali

Lasketaan seuraavaksi pylvään 20 potentiaali eli maadoitusjännite kappaleessa 8 esitettyjen yhtälöiden 2 ja 3 avulla. Laskelmissa käytetyt reduktiokertoimen ja ukkosjohtimen impedanssin arvot on otettu kyseisen johdon maapotentiaaliraportista. Ukkosjohtimen reduktiokertoimenä on käytetty arvoa  $k_r = 0,40$  ja impedanssina  $Z_u = 0,655 \Omega/\text{km}$ . Maasulkuvirran arvona on käytetty suurinta maasulkuvirtaa, jolloin tilanne on pahin mahdollinen.

Lasketaan pylvään 20 maadoitusimpedanssi:

$$Z_m = 0,5 \cdot \sqrt{R_p \cdot I_j \cdot Z_u}$$

Feral- ukkosjohtimia käytettäessä maasulkuvirta jakaantuu useammalle pylväälle kuin teräsukkosjohtimilla. Tällöin keskimääräinen jänteen pituus  $I_j$  lasketaan ottamalla huomioon vikapylväältä kumpaankin suuntaan 10 pylvään jänteen pituus. Teräsukkosjohtimilla laskuissa huomioidaan 5 pylvästä kumpaankin suuntaan.

$$I_j = \frac{I_{j-10} + I_{j-9} \dots I_{jvika} \dots I_{j+9} + I_{j+10}}{21} = 236,513 \text{ m}$$

Keskimääräinen pylväiden maadoitusresistanssi  $R_p$  saadaan laskettua alla esitetyllä yhtälöllä. Keskimääräiseen maadoitusresistanssiin huomioidaan, samoin kuin jänteen pituuden laskennassakin, feral- ukkosjohtimia käytettäessä 10 pylvästä vikapylväältä kumpaankin suuntaan. Lasketaan vakioksi oletettu maadoitusresistanssi.

$$R_p = \left( \frac{\frac{1}{R_{t-10}} + \frac{1}{R_{t-9}} \dots + \frac{1}{R_t} + \frac{1}{R_{t+9}} + \frac{1}{R_{t+10}}}{n} \right)^{-1} = 16,76 \Omega$$

jossa  $R_t$  on vikapylvään indeksi ja  $n$  huomioitujen pylväiden määrä.

Keskimääräisen maadoitusresistanssin  $R_p$  :n laskennassa on käytetty maadoituspöytäkirjoista saatuja tavoitearvoja, eli saatava maadoitusjännite ei ole sama kuin toteutetuilla maadoituksilla saatava maadoitusjännite, vaan ns. alustava arvio pylvällä esiintyvistä maadoitusjännitteistä.

Lasketaan seuraavaksi resultoiva maadoitusimpedanssi:

$$Z_m = 0,5 \cdot \sqrt{16,76 \Omega \cdot 0,2365 \text{ km} \cdot 0,655 \Omega / \text{km}} = 0,8055 \Omega$$

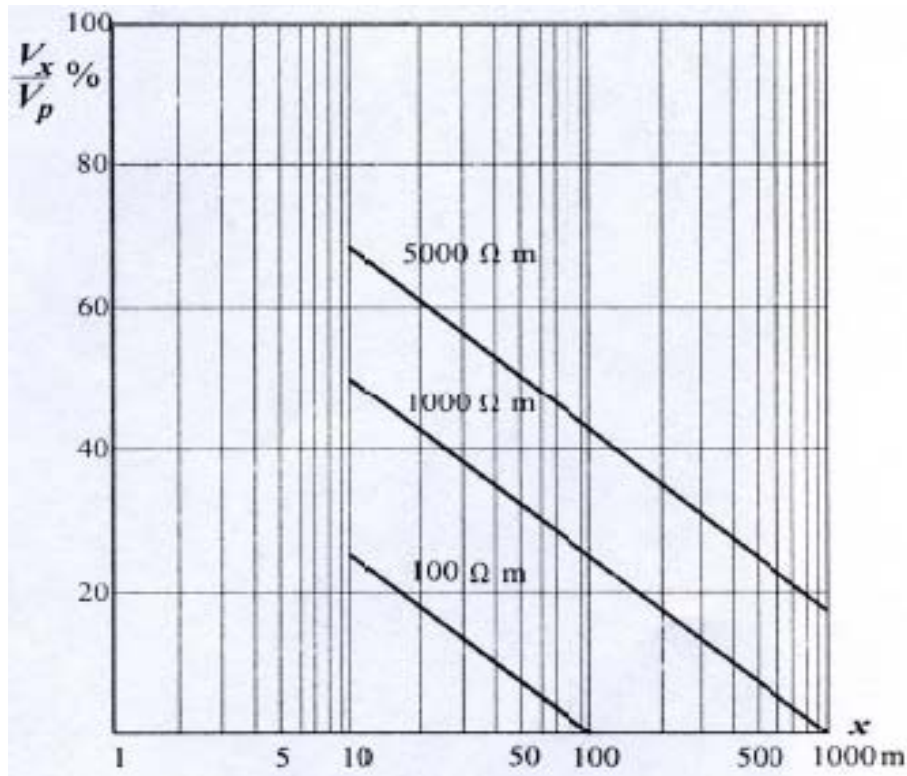
Lasketaan maadoitusjännite resultoivan maadoitusimpedanssin, annetun reduktiokerroimen ja suurimman maasulkuvirran avulla.

$$U_e = k_r \cdot Z_m \cdot I_m = 0,4 \cdot 0,8055 \Omega \cdot 1,75 \text{ kA} = 564 \text{ V}$$

Laskettu maadoitusjännite on siis pylvällä esiintyvän suurimman mahdollisimman jännitteen ja kaukana pylvästä olevan referenssipisteen, jonka potentiaali on nolla, potentiaaliero (kuvio 1).

### 11.2.5 Pylvään potentiaalin leviäminen ympäristöön

Kuten jo kappaleessa 9.2 mainittiin, laskennallinen tarkastelu pylvään potentiaalin leviämisestä ympäristöön on suhteellisen epätarkka. Arvioidaan pylvään 20 potentiaalin leviämistä ympäristöön alla esitetyn kuvion 18 avulla.



Kuvio 18 Maapotentiaalin leviäminen suurjännitejohdon pylväällä (VHV- ohje 05, 2001, 12)

Kuviossa 18 pystyakselilla on pisteen x potentiaali prosentteina pylvään maadoitusjännitteestä etäisyydellä L pylvästä.

Maan keskimääräisen ominaisresistanssin ollessa 570 Ωm kuvion 18 mukaan maadoitusjännitteestä on 20 metrin päässä pylvästä jäljellä noin 32 %, eli 180 V ja sadan metrin päässä noin 15 %, eli 84,6 V.

Tarkastellaan seuraavaksi maadoitusjännitettä suuruutta sallitun kosketusjännitteen mukaan. Pylväs 20 sijaitsee noin 2 kilometrin päässä ylitornion sähköasemalta ja on noin 30 metrin etäisyydellä torniontiestä. Pylvään sijaintipaikan perusteella voidaan kohtuudella olettaa, että pylväspaikan läheisyydessä ihmiset käyttävät yleisesti kenkiä.

Tehdään kosketusjännite tarkastelu kuvion 14 käyrältä  $U_{D2}$ . Laukaisuajan ollessa 0,2 sekuntia suurin sallittu kosketusjännite käyrän  $U_{D1}$  mukaan on 1060 V.

→ Maadoitusjännite syntyvän kosketusjännitteen kannalta OK.

Siirtyvän potentiaalin kannalta StM 10 § 2 asettama on 3350 V.

→ Maadoitusjännite siirtyvän potentiaalin kannalta OK.

Viestintäviraston määräyksen 43 C/2010M mukaan televerkkoihin indusoitunut sähkömotorinen voima saa korkeintaan olla 0,2 sekunnin laukaisuajalla 1200 V. Indusoituvien jännitteiden tarkastelua ei voida kuitenkaan tehdä tässä esimerkki tapauksessa, koska tarvittaisiin enemmän tietoa johdon muiden pylväiden potentiaaleista ja johdon lähellä sijaitsevista televerkoista.

## 12 YHTEENVETO

Tutkitun kirjallisuuden ja sähköverkkoyhtiöiden ohjeiden perusteella saatiin kerättyä paljon tietoa pylväsmadoituksista, maadoitustavoista, maadoitusten mitoittamisesta ja kosketusjännitetarkasteluista. Kerättyjä tietoja maadoituksista ja niiden mitoittamisesta voidaan käyttää apuna pylväsmadoituksia suunniteltaessa jos suunnittelussa otetaan huomioon sähköturvallisuusmääräysten ja standardien mukaiset rajoitukset. Työ ei kuitenkaan ole virallinen ohje pylväsmadoitusten suunnitteluun.

Työn tarkoituksena oli alun perin olla hieman laajempi, mutta työn edetessä huomattiin sen paisuvan melko suureksi, joten siitä jätettiin joitakin osia pois.

Lopputulokseksi saatiin kattava paketti tietoa vaarajännitteistä, maadoittamisesta, maadoitusmittauksista, ukkosjohtimen vaikutuksista maadoittamiseen, kosketusjännitetarkastelusta ja pylväsmadoitusten mitoittamisesta. Työn alkuperäisenä tarkoituksena ollut maadoituselektrodin mitoittaminen saatiin käytyä melko perusteellisesti läpi esimerkkimitoituksen avulla. Mitoitusta voidaan käyttää esimerkkinä todellisissa elektrodin mitoitusilanteessa, mutta on kuitenkin syytä ottaa huomioon verkon haltijan antamat ohjeet ja mahdollisesti muuttuneet määräykset.

Erilaiset pylväsmadoitustavat ja ukkosjohtimien vaikutusta maadoituksiin käytiin läpi melko perusteellisesti työssä. Työstä selviää myös kuinka maan ominaisresistanssimittaukset suoritetaan. Mittausmenetelmistä työssä ei esitellä kuin neljän piikin menetelmä, eli Wenner- menetelmä, joka yleisimmin käytetty mittaustapa.

Loppujen lopuksi työstä saatiin kasattua melko laaja dokumentti pylväsmadoitusten suunnittelua varten. Työssä käydään läpi maadoituselektrodin mitoituksen kannalta keskeisimmät seikat ja työn perusteella tulisi sähköalan ammattilaisen osata mitoittaa elektrodit. Mielestäni työ onnistui hyvin, vaikka muutamia keskeisiä asioita suunnittelusta joudittiinkin jättämään pois työn laajuuden takia.

## LÄHTEET

Vaara- ja häiriöjännitevaliokunta. 2001. VHV- ohje 05.

Dipl. Ins. Ilmo Nousmaa. 1979. 110...400 kV Johtojen pylväsmadoitukset.  
Helsinki: INSKO

Suomen Standardisoimisliitto SFS. 2005. SFS 6001+A1 Suurjännitesähköasennukset.  
1.painos. Helsinki: SESKO ry

Sähkötarkastuskeskus. 1989. Sähköturvallisuusmääräykset. Helsinki: Gummerus kirja-  
paino

Viestintävirasto 43 C/2010M. 2010. Määräysviestintäverkon sähköisestä suojaamisesta.  
Helsinki: Viestintävirasto

Eltel networks. 2010. Induktiovaarajänniteselvitys 110 kV Vihtamo – Vuokatti

Lauri Aura, Antti J. Tonteri. 1993. Sähkölaitostekniikka. Helsinki: WSOY

Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto STUL. 2007. *Maadoituskirja*. Helsinki: Painokurki  
Oy

Fingrid Oyj. 2008. Tekninen määrittely

Punkka K. 1984. 110...400 kV johtojen maadoitusten suunnittelu. Imatran Voima Oy

Insinöörijärjestöjen koulutuskeskus. Sähköverkkojen maadoitusten suunnittelu, raken-  
taminen ja mittaaminen. 1979

Dipl. Ins. A. J. Pesonen. 1960. Imatran Voima Oy. Helsinki

Elovaara, Jarmo - Laiho, Yrjö. 1988. Sähkölaitostekniikan perusteet. 3. uud. painos.  
Helsinki: Otatieto.

P-n. 1974. 110...400 kV pylväiden potentiaaliohjauselektrodit. Imatran Voima Oy.  
Helsinki

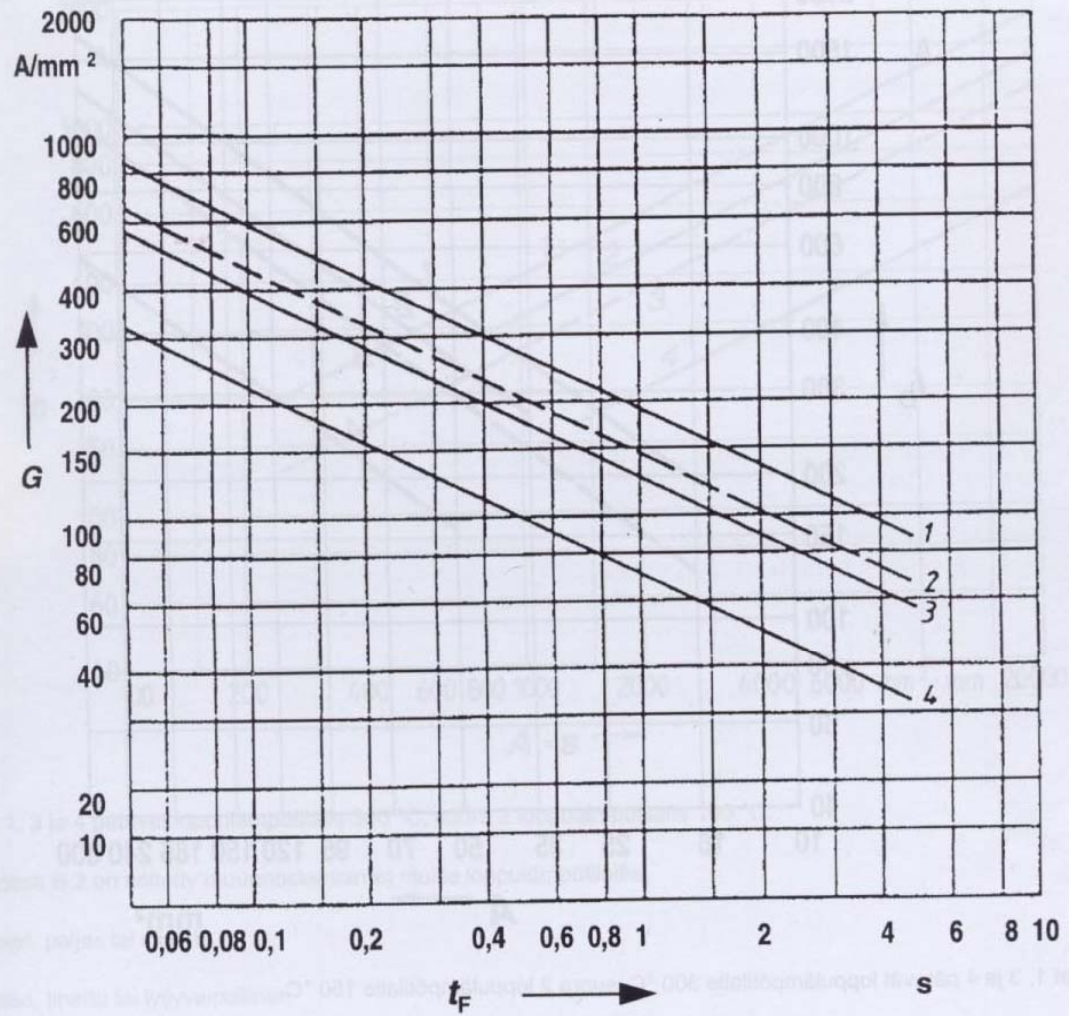
Fingrid Oyj, 2005, Voimajohtojen maadoitukset, Vantaa

Y. Ojala Consulting, 20.4.2011, Maadoituskoulutus, Espoo

## LIITE 1

PYLVÄSMAADOITUKSET										SuuTun 3751
110 kV johto - - - - - pylväs n:o 20 (työ n:o - - - - -) ; pylväs laji 1H mater. W perus.TBJ										
Suunnitelu pvm. / Suunnittelija 16. 09 2010/				Luonnollinen res. $R_{ml} = \text{ } \Omega$		Tavoitearvo $R_T = 16.5 \Omega$		Kontrollimittaus: Pvm. /Mittaja . 20 / - - - - - $R_m = \text{ } \Omega$ <input type="checkbox"/> sarjam. <input type="checkbox"/> jännite-/virtamittausm. $I_K = \text{ } \text{mA}$ $U_0 = \text{ } \text{V}$		
Pka:	A		B		C		D			
Maa:										
a m	R $\Omega$	$\frac{R}{a}$ $\frac{\Omega}{m}$	R $\Omega$	$\frac{R}{a}$ $\frac{\Omega}{m}$	R $\Omega$	$\frac{R}{a}$ $\frac{\Omega}{m}$	R $\Omega$	$\frac{R}{a}$ $\frac{\Omega}{m}$	R $\Omega$	$\frac{R}{a}$ $\frac{\Omega}{m}$
1	56	352								
2	21.2	266								
4	12.1	304								
8	12.0	603								
16	11.3	1136								
Maadoltussuunnitelma: Odotettavissa $R_m = 14.2 \Omega$ 16 mm <sup>2</sup> Cu -köyttä 100 m mm <sup>2</sup> Cu -köyttä m Muoviputkea (PVC) m Huom.				Maadoltustyö: Vaimistunut . 20 / mm <sup>2</sup> -köyttä m mm <sup>2</sup> -köyttä m Muoviputkea (PVC) m Huom.				Jälkimittaus: a/m 20 40 60 80 100 120 140 160 R/ $\Omega$ R/ $\Omega$ $R_m = \text{ } \Omega$ <input type="checkbox"/> 40 / 25 m <input type="checkbox"/> 100 / 63 m Pvm. /Mittaja . 20 / - - - - - $R_m = \text{ } \Omega$ <input type="checkbox"/> 40 / 25 m <input type="checkbox"/> 100 / 63 m Pvm. /Mittaja . 20 / - - - - - Pvm. /Mittaja . 20 / - - - - - <input type="checkbox"/> sarjam. <input type="checkbox"/> jännite-/virtamittausm. <input type="checkbox"/> HF $I_K = \text{ } \text{mA}$ $U_0 = \text{ } \text{V}$ $R_m = \text{ } \Omega$ Pvm. /Mittaja . 20 / - - - - - <input type="checkbox"/> sarjam. <input type="checkbox"/> jännite-/virtamittausm. <input type="checkbox"/> HF $I_K = \text{ } \text{mA}$ $U_0 = \text{ } \text{V}$ $R_m = \text{ } \Omega$		
1632 VTM - VKT 110 kV										
Suhde 1: 500 Jänne 257 m										

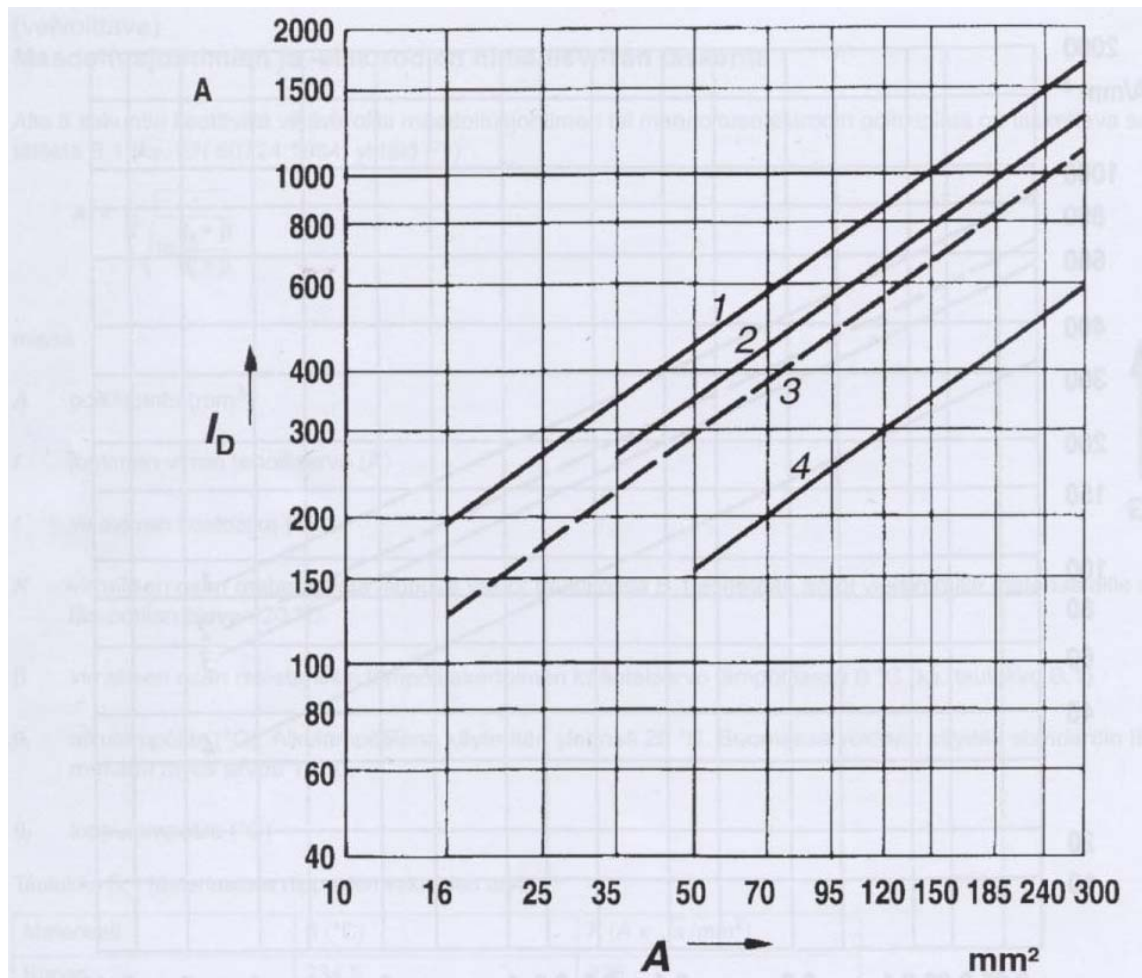




Suorat 1, 3 ja 4 pätevät loppulämpötilalle 300 °C, suora 2 loppulämpötilalle 150 °C.

- 1 Kupari, paljas tai sinkkipäällysteinen
- 2 Kupari, tinattu tai lyijyvaipalla
- 3 Alumiini, vain maadoitusjohdin
- 4 Sinkitty teräs

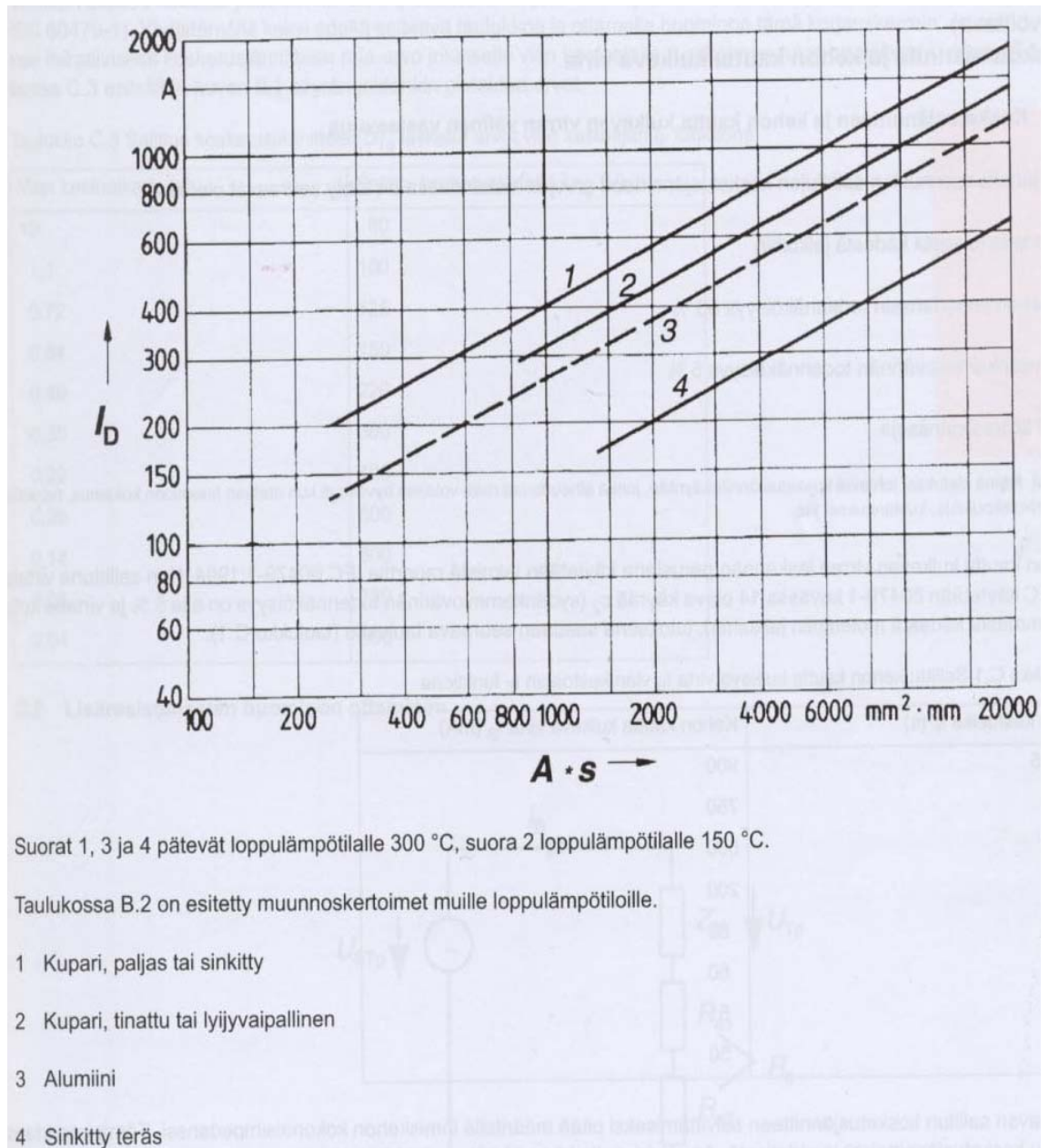
## LIITE 3



Suorat 1, 3 ja 4 pätevät loppulämpötilalle 300 °C, suora 2 loppulämpötilalle 150 °C.

Taulukossa B.2 on esitetty muunnoskerroimet muille loppulämpötiloille.

- 1 Kupari, paljas tai sinkkipäällysteinen
- 2 Kupari, tinattu tai lyijyvaipallinen
- 3 Alumiini
- 4 Sinkitty teräs



**Maadoituselektrodien materiaalit ja vähimmäismitat mekaanisen lujuuden ja korroosionkestävyyden takia**

Materiaali	Elektrodin tyyppi	Vähimmäiskoko					
		Ydinosa			Päällyste/vaippa		
		Halkaisija (mm)	Poikkipinta (mm <sup>2</sup> )	Paksuus (mm)	Yksittäiset arvot (µm)	Keskimääräiset arvot (µm)	
Teräs	kuumasinkitty	Nauha <sup>2)</sup>		90	3	63	70
		Profiili (ml. levyt)		90	3	63	70
		Putki	25		2	47	55
		Sauvaelektrodin pyörötanko	16			63	70
		Vaakasuoran maadoituselektrodin pyöreä johdin	10				50
	lyijyvaipalla <sup>1)</sup>	Vaakasuoran maadoituselektrodin pyöreä johdin	8			1000	
	päällystetyllä kuparivaipalla	Sauvaelektrodin pyörötanko	15			2000	
	elektrolyytti-kuparivaipalla	Sauvaelektrodin pyörötanko	14,2			90	100
Kupari	paljas	Nauha		50	2		
		Vaakasuoran maadoituselektrodin pyöreä johdin		25 <sup>3)</sup>			
		Köysi	1,8*	25 <sup>3)</sup>			
		Putki	20		2		
	tinattu	Köysi	1,8*	25		1	5
	sinkitty	Nauha		50	2	20	40
	lyijyvaipalla <sup>1)</sup>	Köysi	1,8*	25		1000	
		Pyöreä johdin		25		1000	
* köyden yksittäisen johtimen halkaisija							
1) ei sovellu upotettavaksi suoraan betoniin							
2) nauha, valssattu tai leikattu pyöristetyillä reunoilla							
3) Olosuhteissa, joissa kokemuksen mukaan korroosioriski ja mekaanisen vaurion riski on alhainen, voidaan käyttää poikkipintaa 16 mm <sup>2</sup> .							

MAADOITURESISTANSSIN RIIPPUUUS MAAN OMINAISRESISTANSSISTA JA  
 VAAKAMAADOITUSELEKTRODIN PITUUDESTA (16 mm<sup>2</sup> Cu, upotussyvyys 70 cm)

