

Sami Alahautala
PYLVÄSMAADOITUKSET

Opinnäytetyö
CENTRIA AMMATTIKORKEAKOULU
Sähkötekniikan koulutusohjelma
Lokakuu 2014

TIIVISTELMÄ OPINNÄYTETYÖSTÄ

Yksikkö Ylivieskan yksikkö	Aika Lokakuu 2014	Tekijä/tekijät Sami Alahautala
Koulutusohjelma Sähkötekniikan koulutusohjelma		
Työn nimi Pylväsmaadoitukset		
Työn ohjaaja Jari Halme		Sivumäärä 40
Työelämäohjaaja		
<p>Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli perehtyä pylväsmaadoituksiin Suomen olosuhteissa. Opinnäytetyön tarkoituksena oli myös tutkia ukkosjohtimien ja pylväsmaadoitusten vaikutusta toisiinsa. Työssä perehdytään pylväsrakenteisiin, maadoituksiin, pylväsmaadoituksiin, ukkosjohtimiin ja pylväspotentiaaliin.</p>		
Asiasanat Pylväsmaadoitukset, maadoitus, ukkosjohtimet		

ABSTRACT

Unit Ylivieska unit	Date October 2014	Author/s Sami Alahautala
Degree programme Degree programme in electrical engineering		
Name of thesis Tower earthing		
Instructor		Pages 40
Supervisor Jari Halme		
<p>The objective of this thesis was to research tower earthing in Finland's geographical conditions. The purpose of this thesis was also to research how tower earthing and lightning conductors affect each other. This thesis also discussed tower structure, earthing, tower earthing, lightning conductors and tower potential.</p>		

Keywords Tower earthing, earthing, lightning conductors

KÄSITTEET

A	johtimen poikkipinta-ala
D	pallon, levyn tai verkon halkaisija
d	köysimaadoituselektrodin halkaisija
f	johtimen riippuma
h	elektrodin upotussyvyys
I_e	maadoituselektrodin kautta kulkeva virta
I_e	maasulkuvirta
I_{ej}	pylväältä j maahan kulkeva virta
$I_{eT,i}$	pylvään maasulkuvirta
I_m	verkon kapasitiivinen maasulkuvirta
I_0	verkon nollavirta
I_{0a}	johdon vikavirta
I_{0b}	johdon vikavirta
L	maadoituselektrodin pituus
l_j	jänteen pituus
n	tarkasteluun sisällytettävien pylväiden lukumäärä
q	pylvään johtimen painon aiheuttama voima pituusyksikköä kohti
r	reduktiokerroin
R_e	maadoituselektrodin maadoitusresistanssi
R_T	pylvään maadoitusresistanssi
s	jänteen pituus
s	levyelektrodin paksuus
S_j	pisteen P ja pylvään j maadoituksen keskipisteen välinen etäisyys
U_a	askeljännite
U_e	maadoitusjännitteen raja-arvo
U_k	kosketusjännite
U_m	maadoitusjännite
U_s	siirtyvä jännite
U_{tp}	takaperoinen kosketusjännite

V	maan pinnan potentiaali
Z_e	maadoitusimpedanssi
Z_m	keskinäisimpedanssi
Z_{Ti}	pylvään i resultoiva maadoitusimpedanssi
Z_u	ukkosjohtimen impedanssi
Z_u	ukkosjohtimien impedanssi yhden jänteen pituudella
z_u	ukkosjohtimen impedanssi per pituus
σ	pylvään johtimen jännitys
ρ	maaperän ominaisresistanssi

TIIVISTELMÄ	
ABSTRACT	
KÄSITTEIDEN MÄÄRITTELY	
SISÄLLYS	
1 JOHDANTO	1
2 PYLVÄSRAKENTEET	2
2.1 Rakenteet	2
2.2 Materiaalit	2
2.3 Perustukset	5
2.4 Haruskorroosio	6
2.5 Pylväiden mitoitus	7
3 MAADOITUS	9
3.1 Yleistä	9
3.1.1 Käyttö- ja suojamaadoitukset	10
3.2 Maadoitus- ja vaarajännitteet	10
3.2.1 Maadoituselektrodit	10
3.2.2 Kosketus- ja askeljännitteet	10
3.2.3 Takaperoinen kosketusjännite ja siirtyvä jännite	11
3.3 Maadoitusresistanssi	13
4 PYLVÄSMAADOITUKSET	17
4.1 Pylväsmaadoituksen tehtävä	17
4.2 Pylvään perus- ja lisämaadoitukset	17
4.3 Pylväsmuuntamon maadoitus	19
4.4 Pylväserottimen maadoitus	22
5 UKKOSJOHTIMET	24
5.1 Ukkosjohtimien materiaalit	25
5.2 Ukkosjohtimet ja relesuojaus	25
5.3 Ukkostiheys ja ukkoshäiriöt	28
5.4 Ukkosjohtimiin kertyvän jääkuorman aiheuttamat viat	30
6 PYLVÄSPOTENTIAALI	32
6.1 Pylväspotentiaalien suuruutta koskevat määräykset	32
6.2 Pylväspotentiaalin leviäminen	32
7 PYLVÄSMAADOITUKSET JA UKKOSJOHTIMET	37
8 LOPPUSANAT	39
LÄHTEET	40

KUVIOT

KUVIO 1. Erilaisia pylväsrakenteita	3
KUVIO 2. Harustetun puisen 110 kV portaalipylvään johtoalue	4
KUVIO 3. Kapean johtokadun I-pylväsratkaisu	5
KUVIO 4. Haruskorroosiota aiheuttava kuparimaadoituksen ja harusteräksen muodostama galvaaninen pari	7
KUVIO 5. Kosketusjännitekäyrät ja maadoitusjännitevaatimusten vertailu	11
KUVIO 6. Pylvään läheisyydessä esiintyvä potentiaalijakauma	12
KUVIO 7. Eräitä maadoituselektrodirakenteita	15
KUVIO 8. Portaalipylvään perustuksen maadoitus	18
KUVIO 9. Pylväismaadoituselektrodeja	18
KUVIO 10. Potentiaaliohjauselektrodeja	19
KUVIO 11. Pylväsmuuntamon maadoitus	20
KUVIO 12. Pylväserottimen maadoitus	22
KUVIO 13. Ukkosjohdin ja vaihejohdin	24
KUVIO 14. Ukkosviat Fingridin 110 kV:n johdoilla ja Suomen keskimääräinen vuotuinen salamatiheys vuosina 1997-2010	29
KUVIO 15. Salamoiden keskimääräinen vuotuinen määrä Suomessa	30

TAULUKOT

TAULUKKO 1. Avojohtojen tyypillisiä arvoja	8
TAULUKKO 2. Maalajien ominaisresistanssin arvoja	13
TAULUKKO 3. Elektrodirakenteiden maadoitusresistanssien yhtälöitä	14
TAULUKKO 4. Eri maadoituselektrodien maadoitusresistanssin suhde verrattuna suoran johtimen maadoitusresistanssiin	16
TAULUKKO 5. Esimerkkejä ukkosjohtimen impedanssista	26
TAULUKKO 6. Erilaisten jääkuormien ominaisuuksia	32
TAULUKKO 7. Ukkosjohtimettoman ja ukkosjohtimellisen johdon jännitemittaus tuloksia	38

1 JOHDANTO

Sähköpylväät ovat sähköverkon perusta. Ne kannattelevat johtimia, joita pitkin suurin osa sähköstä kulkee Suomessa. Suurilla jänniteillä pylväät usein maadoitetaan estämään vaaratilanteiden syntymistä vikatapauksissa.

Tässä opinnäytetyössä perehdytään pylväsmaadoituksiin ja erillaisiin pylväsrakenteisiin. Alussa tarkastellaan erilaisten pylväiden rakennetta, materiaalia ja perustuksia eri jännitetasoilla. Tarkastellaan, miten haruskorroosio vaikuttaa pylväisiin ja perehdytään myös lyhyesti pylväiden mitoittamiseen.

Opinnäytetyössä perehdytään myös maadoitukseen yleisellä tasolla ja tarkastellaan vikatapauksissa esiintyviä maadoitus- ja vaarajännitteitä.

Ukkosjohtimet ovat tärkeä osa voimajohtojen suojausta. Tässä työssä tarkastellaan ukkosjohtimia yleisesti ja perehdytään salamaniskujen aiheuttamiin ukkoshäiriöihin sähköverkossa.

Opinnäytetyön loppupuolella käydään läpi pylväspotentiaalia ja tutkitaan, miten pylväsmaadoitukset ja ukkosjohtimet vaikuttavat toisiinsa.

2 PYLVÄSRAKENTEET

2.1 Rakenteet

Pylväitä tarvitaan johtimien ripustamiseen. Pylväs koostuu pylvään runko-osasta, ukkosköysien ripustamiseen tarvittavista ukkospukeista ja yhdestä tai useammasta orresta. Pylväät voivat olla suorilla johto-osuuksilla käytettäviä ripustuspylväitä, johdon suunnan muuttuessa käytettäviä kulmapylväitä, kiristyspylväitä ja päätepylväitä. (Elovaara & Haarla 2011.)

Ripustuspylväisiin ei kohdistu merkittäviä veto- tai sivuttaissuuntaisia rasituksia, mutta kulmapylväissä johdon kulkusuuntaan nähden poikittaiset voimat ovat suuria. Kiristyspylväät ovat taas sellaisia, joissa pylvään eri puolilla johdon kulkusuunnassa vaikuttavat voimat poikkeavat toisistaan olennaisesti. Kiristyspylväät ovat tyypillisesti kahden peräkkäisen kiristysvälin rajapylväitä, ja ne muodostavat johtoreitillä johtimille jäykän ripustuspisteen. Päätepylväät ovat kiristyspylväitä, joissa johtimen suuntaiset voimat kohdistuvat vain pylvään toiselle puolelle. (Elovaara & Haarla 2011.)

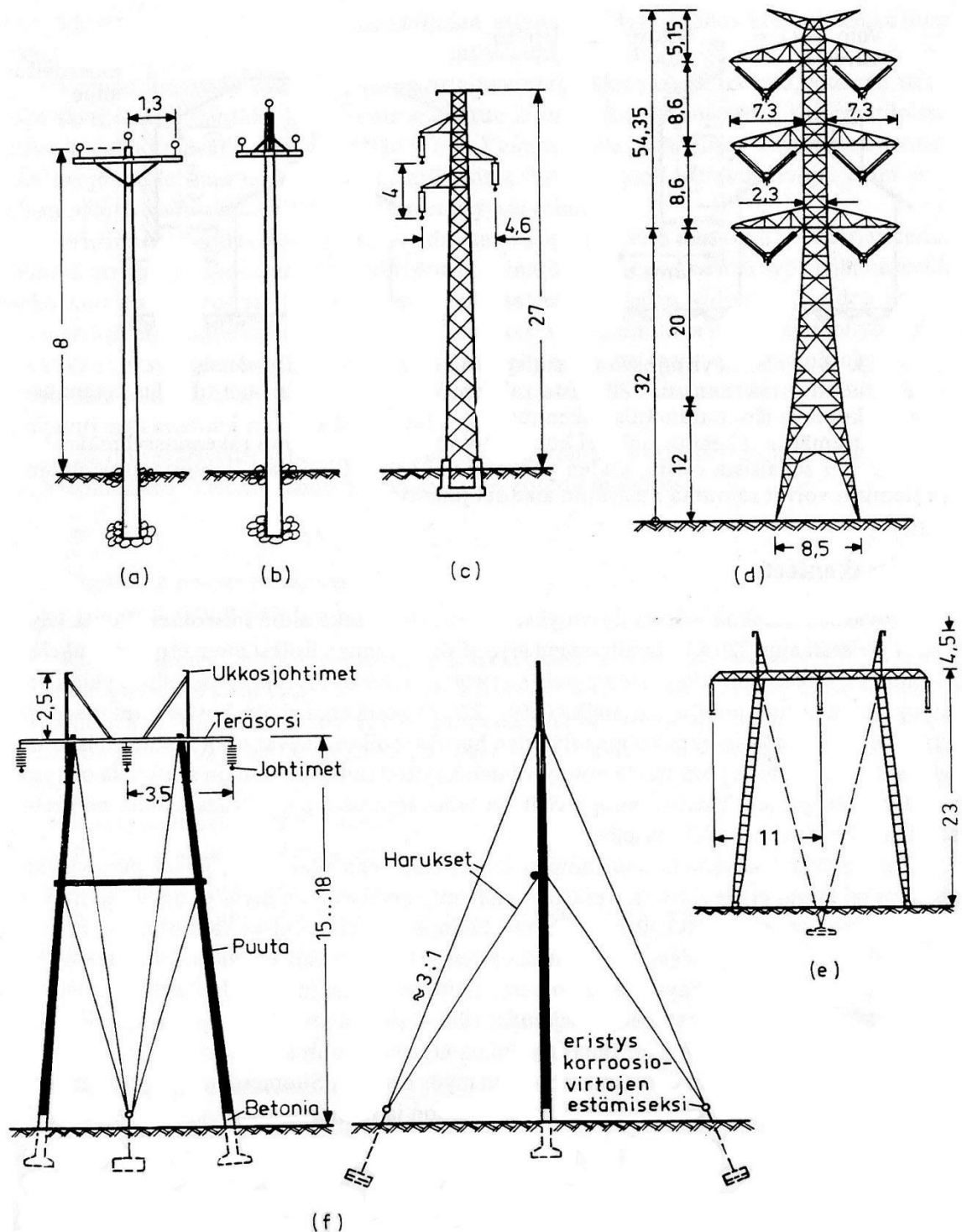
2.2 Materiaalit

Pylväsmateriaalina toimii useimmiten puu, teräs ja alumiiniseokset. Puuta käytetään yleisesti 110 kV jännitteeseen asti. Halvan hinnan lisäksi puun etuna on jakelujännitteillä, että saadaan käyttöön pylvään eristävä vaikutus etenkin ilmastollisia ylijännitteitä vastaan. Suurimmilla jännitteillä puupylväiden käyttöä rajoittaa etenkin saatavilla olevien pylväspuiden pituus. (Elovaara & Laiho 1988.)

Teräspylväitä käytetään suurimmilla jännitteillä sekä tilanteissa, joissa puupylvään korkeus tai lujuus ei ole riittävä. Pylväiden teräsosat on ruostesuojattava kuumasinkitsemällä tai maalaamalla. (Elovaara & Laiho 1988.)

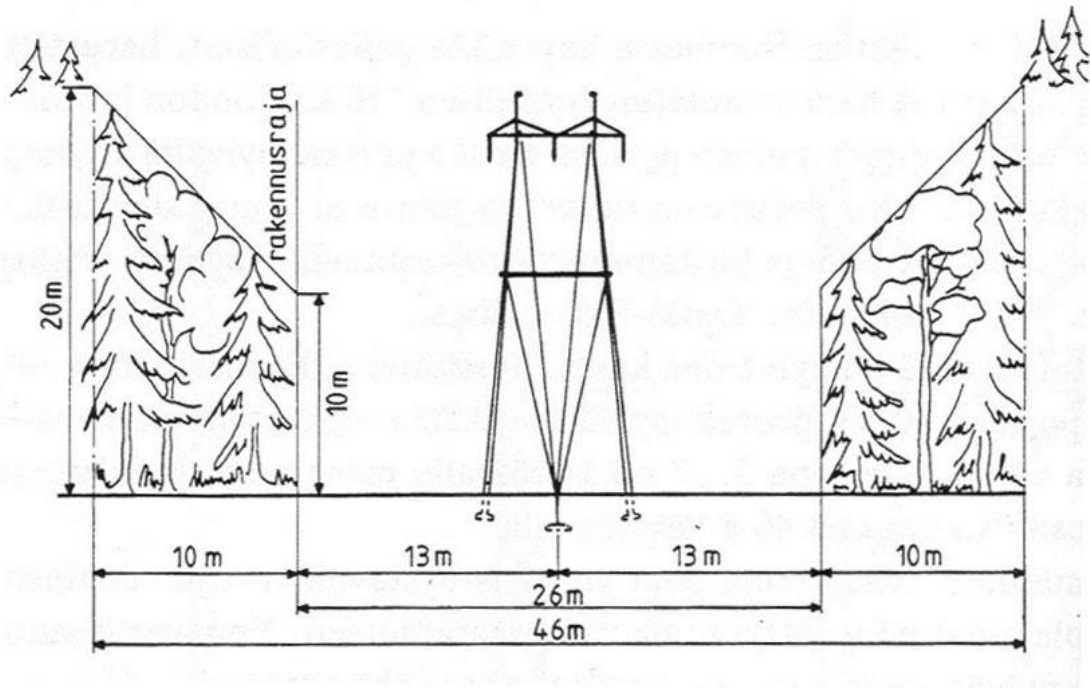
Pienjännitteellä ja keskijännitteellä on suurin osa pylväistä ns. I-pylväitä. Tarpeen vaatiessa pylvääseen asennetaan sivutukia ja haruksia. Pienjännitejohtojen tapauksessa

tavanomainen johtoratkaisu on käyttää riippukierrejohtoa, joka kiinnitetään pylvään koukulla. Keski-jänniteverkon pylvät varustetaan tavallisesti orrella. (Elovaara & Laiho 1988.)



KUVIO 1. Erilaisia pylvärakenteita. a) ja b) 20 kV puupylväitä, c) vapaasti seisova 110 kV pylväs I-ketjuin, d) vapaasti seisova 400 kV metallipylväs V-ketjuin, e) 400 kV harustettu metallipylväs, f) 110 kV harustettu puupylväs. (Elovaara & Laiho 1988, 358.)

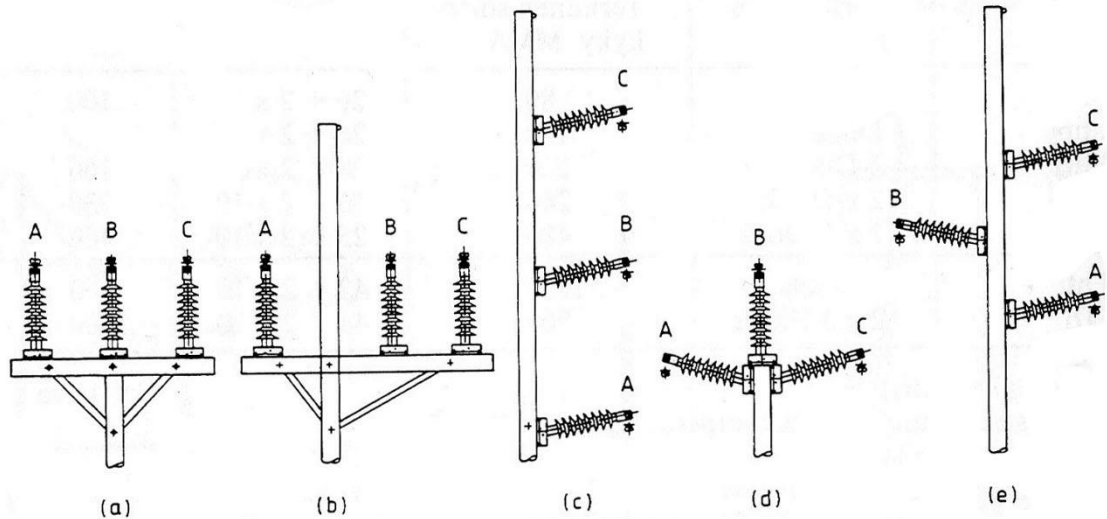
Jännitteestä 110 kV lähtien Suomessa käytetään pääasiallisesti harustettuja portaalipylväitä. Koska portaalipylväitä käytettäessä pylväsosiin kohdistuu lähinnä vain puristusta tai vetoa mutta ei juuri taivutusta, saavutetaan näillä pylväillä suuri materiaali- ja kustannussäästö vastaaviin vapaasti seisoviin pylväisiin verrattuna. (Elovaara & Laiho 1988.)



KUVIO 2. Harustetun puisen 110 kV portaalipylvään johtoalue, joka koostuu 26 m leveästä johtoalueesta ja reunavyöhykkeistä. (Elovaara & Laiho 1988, 360.)

Muita harustetun pylvään etuja ovat ympäristöystävällisyys ja vähäinen alttius salamahäiriölle. Molemmat edut liittyvät pylvään mataluuteen. Ympäristöhaittoja vähentää myös se, että itse pylväs ja sen harukset vaativat vain vähän maa-alaa. Harustettu pylväs ei siksi liiemmalli häiritse esim. maanviljelyä. (Elovaara & Laiho 1988.)

Kuvion 1 esittämä vapaasti seisova pylväs tarvitsee n. 45 % pienemmän johtoalueen kuin vastaava portaalipylväs. Sitä käytetään varsinkin taajama-alueilla. Korkeutta ja orsia lisäämällä pylvästä on kehitettävissä myös kaksoisjohdon pylväs, jos käyttövarmuus tai siirtoteho edellyttää kahden virtapiirin rakentamista. Mikäli halutaan vielä kapeampi johtoalue, voidaan hyödyntää tukieristimiä ja esim. puusta, betonista tai putkesta valmistettua I-pylvästä. (Elovaara & Laiho 1988.)



KUVIO 3. Kapean johtokadun I-pylväsratkaisuja: b), c) ja e) ukkosjohtimella varustetut ratkaisut, muut ukkosjohtimettomia. (Elovaara & Laiho 1988, 360.)

Pylväiden käyttötarkoituksen ja mitoitusperusteiden perusteella puhutaan kannatuspylväistä, kiristyspylvästä, päätepylväistä ja kulmapylväistä. Kannatuspylväiden tehtävänä on vain kantaa johtimia. Kiristyspylväs on puolestaan kahden peräkkäisen kiristysvälin rajapylväs. Kiristysvälillä sijaitsevilla kannatuspylväissä johtimien kiinnityskohdat pääsevät liikkumaan itse johdon suunnassa. Itse kiristyspylväissä tämä liike ei ole mahdollista. Päätepylväät ovat puolestaan koko johdon päätteenä. Kulmapylväiden kohdalla johdon suunta muuttuu. (Elovaara & Laiho 1988.)

2.3 Perustukset

Perustusten tehtävänä on siirtää pylväsrakenteeseen kohdistuvat voimat maahan. Perustamistapoina voidaan mainita esim. pylvään alaosan upottaminen riittävän syväälle maahan tai erillisen perusrakenteen käyttö. Pylväspuun maahan upottaminen on tavanomainen ratkaisu esim. keskijänniteverkoissa, mutta 110 kV johdoilla käytetään yleisesti erillistä perusrakennetta. (Elovaara & Laiho 1988.)

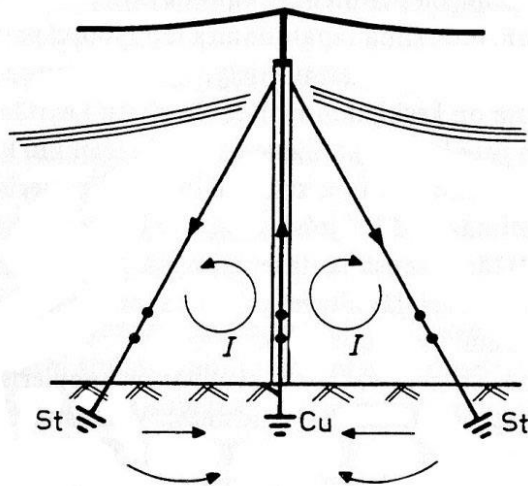
Maahan upotettava puupylväs on vietävä niin syväälle, että maan sisään jäävän osan pituus on ainakin 1/7 pylväspanuun koko pituudesta, kuitenkin vähintään 1,4 m. Pylväs tuetaan kivillä tyvestä ja maan pinnalta. (Elovaara & Laiho 1988.)

Erillinen perustus tehdään tavallisimmin teräsbetonista. Myös puu saattaa tulla kysymykseen yhdessä teräksen kanssa, jolloin päästään tuntuvasti kevyempään mutta samalla myös heikomman kestävyuden omaavaan rakenteeseen kuin betoniperustuksia käytettäessä. (Elovaara & Laiho 1988.)

2.4 Haruskorroosio

Kun käytetään harustettuja pylväitä maadoitetun orsin, on muistettava hyvin johtavassa maassa syntyvä korroosioriski. Harukset ovat yleensä terästä, mutta pylväsmaadoitus ja potentiaalintasauselektrodi kuparia. Mikäli maaperä ei eristä kuparia ja terästä riittävästi toisistaan, voi syntyä ko. metallien jalouserosta johtuva korroosiovirta, joka aiheuttaa harusteräksen syöpymisen. Tämän seurauksena harus voi ajan mittaan katketa. (Elovaara & Laiho 1988.)

Ilmiö voidaan estää eristyksellä, joka sijoitetaan yleensä siten, että siltä vaaditaan vain puristuslujuutta. Samaan tulokseen päästään luonnollisesti myös haruseristimellä, joka on sijoitettava niin korkealle, ettei sitä voi koskettaa. 110 kV jännitteestä alkaen pelkän korroosiovirtaeristyksen teko on huomattavasti taloudellisempi vaihtoehto. (Elovaara & Laiho 1988.)



KUVIO 4. Haruskorroosiota aiheuttava kuparimaadoituksen ja harusteräksen muodostama galvaaninen pari. (Elovaara & Haarla 2011, 271.)

2.5 Pylväiden mitoitus

Pylvään päämitat määräytyvät lähinnä sähköteknillisten seikkojen ja turvallisuusnäkökohtien perusteella. Tärkeinä päämittoihin vaikuttavina tekijöinä tulevat vaikuttamaan etäisyystekijät. Pylvään korkeus on valittava siten, että johtimet kaikissa tilanteissa pysyvät riittävän ylhäällä. Koska jänneväli vaikuttaa johtimen riippuman suuruuteen likimääräisyhtälön 1 osoittamalla tavalla, vaikuttaa pylvään mittoihin myös edulliseksi harkittu jänneväli. Johdinriippuma f saadaan yhtälöstä:

$$f = \frac{qs^2}{8A\sigma}, \quad (1)$$

missä q = johtimen painon aiheuttama voima pituusyksikköä kohti

s = jänneen pituus

A = johtimen poikkipinta-ala

σ = johtimen jännitys.

(Elovaara & Haarla 2011.)

TAULUKKO 1. Avojohtojen tyypillisiä arvoja. (Elovaara & Haarla 2011, 272.)

U_m / kV	0,4	24	52	123	245	420
vaiheväli / m	0,5	1,3	1,5	3,5	6,0	11,0
jännenväli / m	50	80	120	240	320	360
orren korkeus / m	7,5	8,0	9,5	15	21	23

3 MAADOITUS

3.1 Yleistä

Maadoituksen tarkoituksena on yhdistää jokin laite tai virtapiirin jokin kohta maahan mahdollisimman tehokkaasti maassa olevan metallisen kappaleen eli maadoituselektrodin välityksellä. (Elovaara & Haarla 2011.)

Sähköturvallisuuden kannalta maadoitusten ensisijaisena tarkoituksena on rajoittaa vikatapauksissa esiintyviä kosketusjännitteitä ja askeljännitteitä. Vika voi liittyä rakennuksen sähköasennuksiin tai sitä syöttävään järjestelmään, suurjänniteverkko mukaan lukien. Vikaan voidaan rinnastaa myös ukkosen aiheuttamat ylijännitteet. (Maadoituskirja 2007.)

Maadoitusten rakenteen pitää:

- a) varmistaa mekaaninen lujuus ja korroosionkestävyys
- b) kestää termiseltä kannalta katsottuna laskelmissa määritetty suurin vikavirta
- c) estää vahingot omaisuudelle ja laitteille
- d) varmistaa henkilöturvallisuus huomioon ottaen maadoituksissa maasulun aikana esiintyvät jännitteet
- e) varmistaa johdolle tietty luotettavuus

Maadoitusten rakenteeseen liittyvät parametrit ovat täten:

- vikavirran suuruus
- vian kesto aika

(Suurjännitesähköasennukset ja ilmajohdot 2009.)

3.1.1 Käyttö- ja suojamaadoitukset

Maadoitukset jaetaan käyttö- ja suojamaadoituksiin. Käyttömaadoittamisessa virtapiirin osa yhdistetään maahan suoraan tai pienen impedanssin välityksellä.

Käyttömaadoituksen tehtävänä on pitää virtajohtimien jännite maan suhteen sellaisena, ettei se aiheuta vaaratilanteita tai vaurioita. Suojamaadoittamisessa taas maadoitukseen yhdistetään virtapiiriin kuulumaton jännitteelle altis osa, kuten sähkölaitteen metallinen runko. Suojamaadoituksen tehtävänä on estää vaarallisen kosketusjännitteen syntyminen kosketeltavaan, eristysvian tai muun syyn vuoksi jännitteelliseksi muuttuvaan osaan. (Elovaara & Haarla 2011.)

3.2 Maadoitus- ja vaarajännitteet

3.2.1 Maadoituselektrodit

Maadoituselektrodin maadoitusresistanssin suuruuden ja siten myös maadoituselektrodin rakenteen määräävät elektrodin kautta kulkeva virta I_e sekä elektrodissa syntyvälle jännitehäviölle eli maadoitusjännitteelle turvallisuus- tai muista syistä asetettu raja-arvo U_e . Maadoitusresistanssin mitoitusarvo on yksittäisen elektrodin tapauksessa laskettavissa yhtälöstä:

$$R_e = \frac{U_e}{I_e} \quad (2)$$

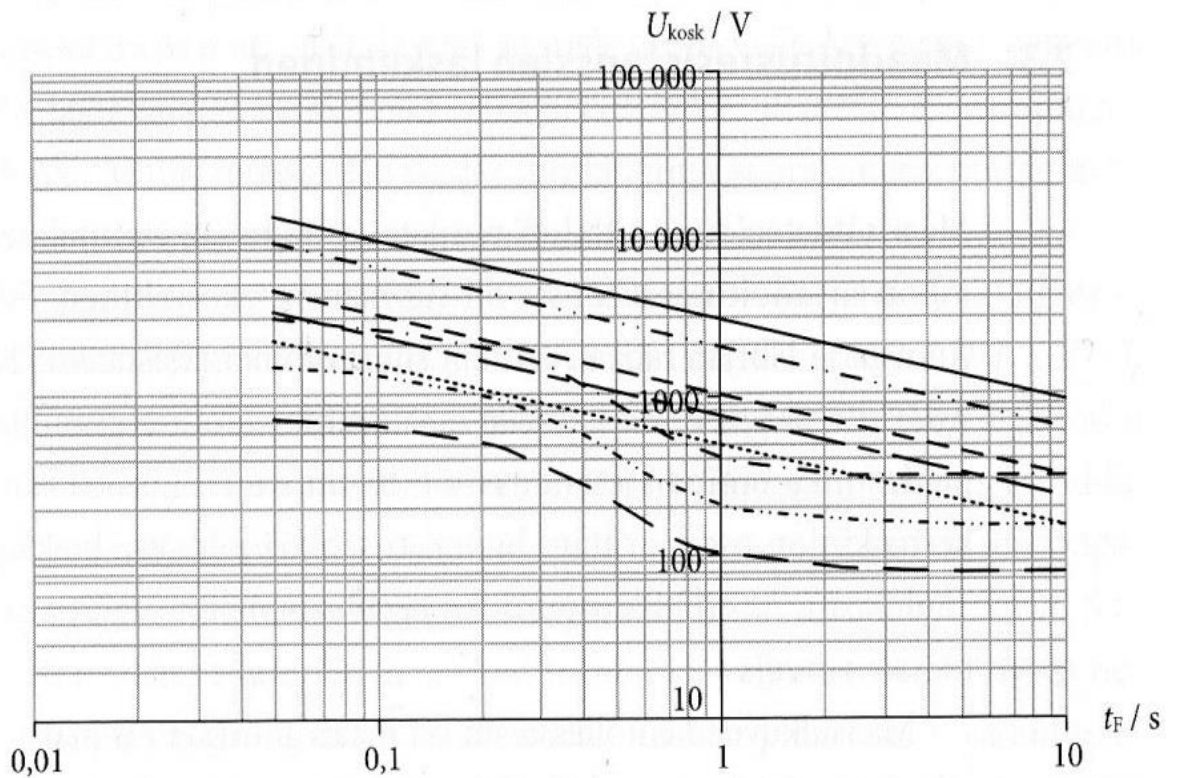
(Elovaara & Haarla 2011.)

3.2.2 Kosketus- ja askeljännitteet

Maadoitusjännitteen rinnalla puhutaan usein kosketus- ja askeljännitteestä. Näistä käytetään yhteisnimitystä vaarajännitteet. Kosketusjännitteellä tarkoitetaan kosketustilanteessa ihmiskehon kosketuskohdan ja maan välillä tietyllä hetkellä vaikuttavaa jännitettä. Kosketusjännitettä, joka esiintyy kahden jaloilla samanaikaisesti

kosketeltavan, toisistaan metrin etäisyydellä olevien pisteiden välillä, kutsutaan askeljännitteeksi. (Elovaara & Haarla 2011.)

Kosketusjännitteen raja-arvot riippuvat sekä siitä, kuinka helposti kosketusjännite voi aiheuttaa varaa, että siitä, kuinka kauan kosketusjännitteen aiheuttava vikavirta kestää.



KUVIO 5. Kosketusjännitekäyrät ja maadoitusjännitevaatimusten vertailu.

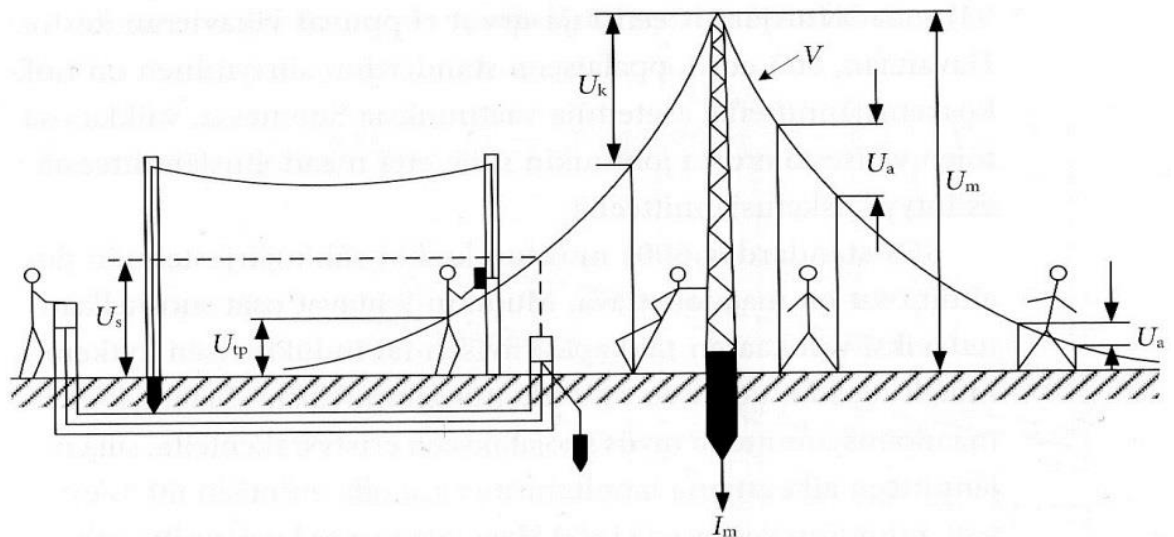
Standardin SFS 6001 kosketusjännitevaatimusten (kuvan käyrät) ja julkaisun A1-93 asettamien maadoitusjännitevaatimusten (kuvan laskevat suorat) vertailu. Alin käyrä on kosketusjännitteen niin sanottu peruskäyrä (U_{D1}), ja kaksi muuta käyrää ilmoittavat siihen nähden 2- ja 4-kertaiset kosketusjännitteen arvot. Suorana kuvautuvat riippuvuudet kuvaavat maadoitusjännitteen riippuvuutta maasulun vaikutusajasta (t_F). (Elovaara & Haarla 2011, 431.)

3.2.3 Takaperoinen kosketusjännite ja siirtyvä jännite

Muita vaarajännitteitä ovat takaperoinen kosketusjännite ja siirtyvä jännite. Takaperoinen kosketusjännite voi syntyä, kun pylvään läheisyyteen tuodaan jokin kauempaa

maadoitettu eristetty johde tai johto, kuten vesijohto. Siirtyvä jännite on puolestaan takaperoiselle kosketusjännitteelle päinvastainen ilmiö: maasulussa olevan pylvään potentiaali siirtyy kauemmaksi pylvästä pitkin eristettyä johdetta, jota voidaan koskettaa sen toisessa päässä. (Elovaara & Haarla 2011.)

Kuvio 6 havainnollistaa virrallisen maadoituselektrodin ympärillä esiintyvää potentiaalijakaumaa (potentiaalisuppilo) sekä edellä mainittujen erillaisten vaarajännitteiden syntymistapoja. Potentiaali muuttuu jyrkimmin maasulussa olevan pylvään tai vastaavan läheisyydessä. Maasulussa olevan kohteen lähellä saa siis suurimmat kosketus- ja askeljännitteet. (Elovaara & Haarla 2011.)



KUVIO 6. Pylvään läheisyydessä esiintyvä potentiaalijakauma. (Elovaara & Haarla 2011, 429.)

V = Maan pinnan potentiaali

U_m = Maadoitusjännite

U_k = Kosketusjännite

U_a = Askeljännite

U_s = Siirtyvä jännite

U_{tp} = Takaperoinen kosketusjännite

(Elovaara & Haarla 2011.)

3.3 Maadoitusresistanssi

Maadoitusresistanssilla R tarkoitetaan maadoituselektrodien resistanssiarvoa ja sen arvo kuvaa maadoituksen hyvyyttä.

Maadoitusten suunnittelun perustana on maan ominaisresistanssi ρ , johon maadoitusresistanssi on suoraan verrannollinen. Suomessa on erittäin suuri ominaisresistanssi johtuen lähelle maan pintaan ulottuvasta graniittisesta kallioperästä, jonka ominaisresistanssi on erittäin suuri. Lisäksi ohut irtomaakerroskin on usein huonosti sähköä johtavaa hiekkaa tai soraa. (Elovaara & Haarla 2011.)

TAULUKKO 2. Maalajien ominaisresistanssin arvoja. (Elovaara & Haarla 2011, 432.)

Aine	Keskimäärin, Ωm	Tavallisimmat vaihtelurajat, Ωm
Savi	40	25–70
Savensekainen 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

Suuri ominaisresistanssi aiheuttaa suuren maadoitusresistanssin. Tämä heikentää maadoituksen hyvyyttä, koska mitä suurempi maadoitusresistanssi on, sitä huonompi ja vaarallisempi maadoitus on sähkölaitteiden ja ihmisten kannalta. (Elovaara & Haarla 2011.)

Kuviossa 7 on esitetty eräiden maadoituselektrodirakenteiden kuvia ja taulukossa 3 vastaavien elektrodirakenteiden maadoitusresistanssien yhtälöt vaihtojännitteellä, kun elektrodit upotetaan homogeeniseen maahan. Yhtälöitä johdettaessa on oletettu, että elektrodien poikkileikkaukset ovat pyöreitä. (Elovaara & Haarla 2011.)

TAULUKKO 3. Elektrodirakenteiden maadoitusresistanssien yhtälöitä. (Elovaara & Haarla 2011, 433.)

N:o	Tapaus	Yhtälö	Huom.
1	Pallo pinnassa	$R = \rho/\pi D$	
2	Levy pinnassa	$R = (\rho/\pi D) \arcsin(r/x) \approx \rho/2D$	$s \ll D = 2r$
3	Pystysuora tanko tai putki pinnassa	$R = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \frac{4L}{1,36 \cdot d}$	$d \ll L$
4	Pystysuora tanko tai putki upotettuna	$R = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \frac{4L}{1,36 \cdot d} \cdot \frac{2h+L}{4h+L}$	$d \ll L$
5	Suora johdin pinnassa	$R = \frac{\rho}{\pi L} \ln \frac{2L}{1,36 \cdot d}$	$d \ll L$
6	Suora johdin upotettuna	$R = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \frac{L^2}{1,85 \cdot hd}$	$d \ll 4h$

Taulukon suureet:

L = maadoituselektrodin pituus (m)

D = pallon, levyn tai verkon halkaisija (m)

d = köysimaadoituselektrodin halkaisija tai puolet nauhaelektrodin leveydestä (m)

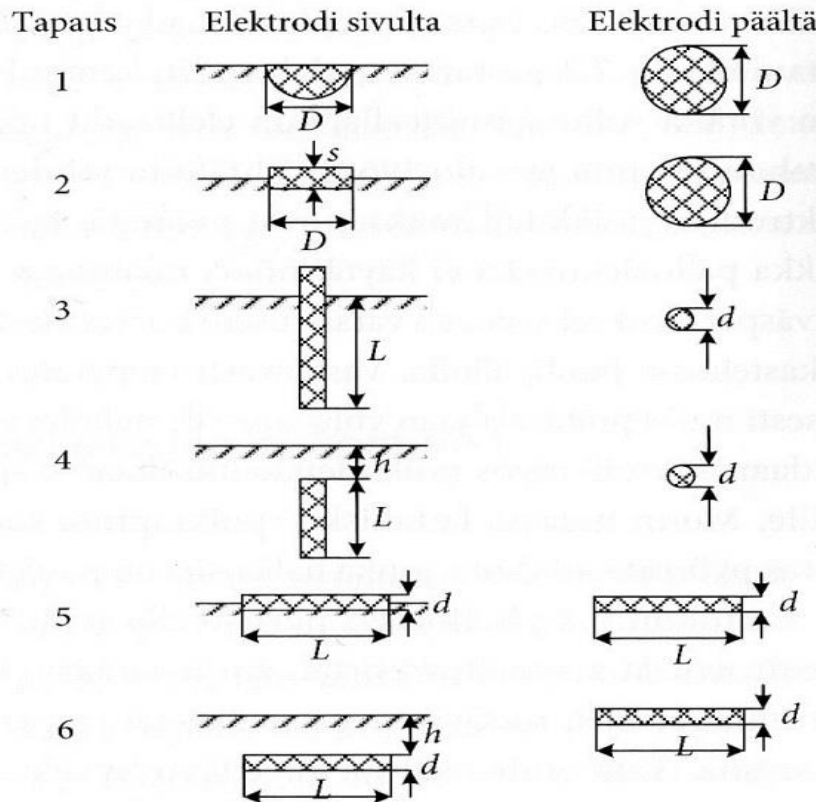
s = levyelektrodin paksuus

ρ = maaperän ominaisresistanssi (Ωm)

h = elektrodin upotussyvyys (m)

Yhtälöiden perusteella nähdään, että ominaisresistanssin ohella maadoitusresistanssin määräävät lähinnä mitat L ja D eli sauvamaisen elektrodin pituus ja pallo- tai ympyrälevymäisen elektrodin halkaisija. Tätä ominaisuutta käytetään hyväksi, kun


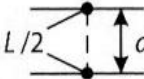






kallioelektrodille porataan halkaisijaltaan suurehko reikä, johon itse elektrodi ja sen ympärille tulevat ominaisresistanssiltaan pienehköt täytemassat tulevat. Hyvin syvällä olevan elektrodin maadoitusresistanssi on noin 50 % pinnalla olevan elektrodin arvosta. (Elovaara & Haarla 2011.)



KUVIO 7. Eräitä maadoituselektrodirakenteita. (Elovaara & Haarla 2011, 434.)

Jos maadoituselektrodiin aiotaan käyttää ainoastaan tietty määrä johdinmateriaalia, saavutetaan pienin maadoitusresistanssin arvo suoralla elektrodilla. Tämä ilmenee taulukossa 4, jossa on esitetty maadoitusresistanssin suhteellinen kasvu verrattaessa rengasmaisen, säteittäisen tai yhdensuuntaisiin osajohtimiin jaetun maadoituselektrodin maadoitusresistanssia kokonaispituudeltaan samankokoisen suoran johtimen arvoon. (Elovaara & Haarla 2011.)

TAULUKKO 4. Eri maadoituselektrodien maadoitusresistanssin suhde verrattuna suoran johtimen maadoitusresistanssiin. (Elovaara & Haarla 2011, 435.)

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

4 PYLVÄSMAADOITUKSET

4.1 Pylväsmaadoituksen tehtävä

Pylväsmaadoituksen tehtävänä on:

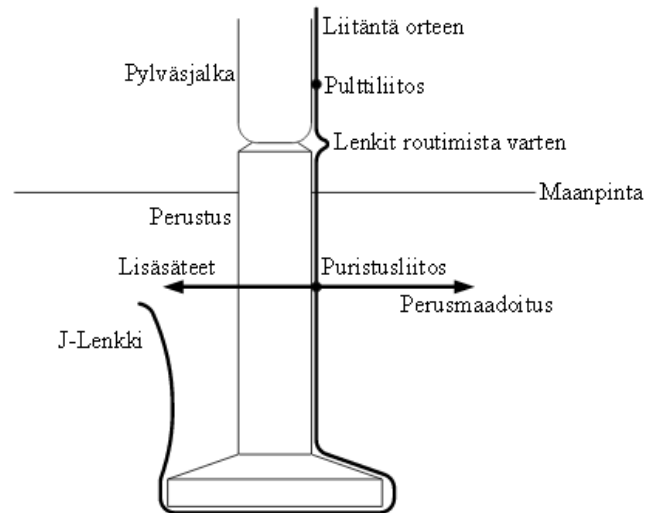
- vähentää ukkoshäiriötä pienentämällä pylvään potentiaalia siten, että pylvääseen tai ukkosjohtimeen osunut salamanisku ei aiheuta takaiskua
- mahdollistaa ukkosjohtimettomalla johdolla maasulkusuojauksen toiminta ja parantaa sen toimintaherkkyyttä ukkosjohtimellisellakin johdolla
- pienentää pylvään maadoitus- ja kosketusjännitettä

(Elovaara & Haarla 2011.)

4.2 Pylvään perus- ja lisämaadoitukset

Pylväsmaadoitus koostuu pylvään perusmaadoituksesta ja mahdollisista lisämaadoituksista.

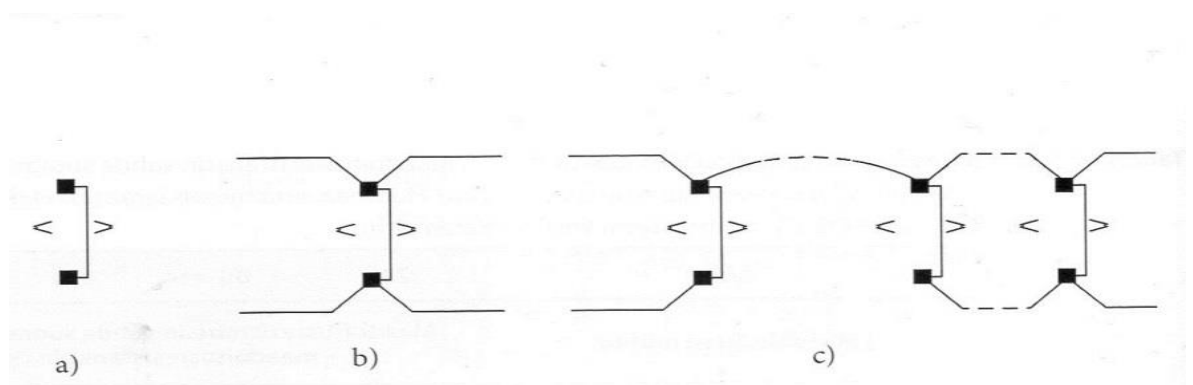
Perusmaadoituksen muodostavat portaalipylväällä pylvään perustukset, niiden alle sijoitetut J-lenkit, harukset harusankkureineen sekä pylvään jalat yhdistävä kupariköysi. Vapaasti seisovilla pylväillä perusmaadoitus koostuu yhdestä säteittäismaadoituksesta tai pystymaadoituksesta.



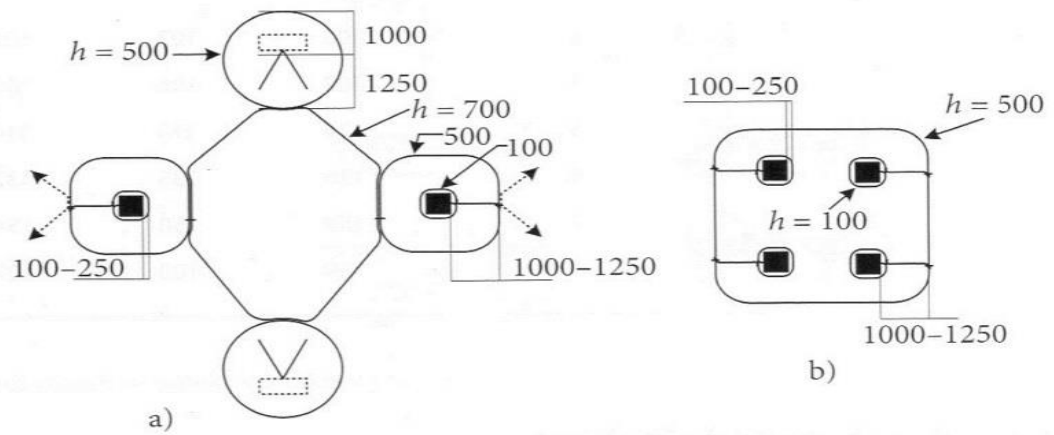
KUVIO 8. Portaalipylvään perustuksen maadoitus. (Valjus 1979, 11.)

Nimitystä luonnollinen maadoitusresistanssi käytetään pylväsperustusten ja harusten määräämässä resistanssista. Mikäli luonnollisella resistanssilla ei päästä maadoitusresistanssin tavoitearvoon, käytetään lisämaadoituksia, jotka ovat käytännön olosuhteiden takia useimmiten vaakaelektrodeja. Huonossa maaperässä käytetään pylväältä toiselle ulottuvia niin sanottuja läpimeneviä maadoituselektrodeja. (Elovaara & Haarla 2011.)

Kuvio 9 esittää pylväsmaadoituselektrodien periaatteellista rakennetta, kun niitä katsotaan pylvään huipulta. Kuvio 10 esittää esimerkkejä pylväillä käytettävistä potentiaalinohjauselektrodeista, joiden tehtävänä on rajoittaa pylvään läheisyydessä saatavan kosketus- tai askeljännitteen arvoa. (Elovaara & Haarla 2011.)



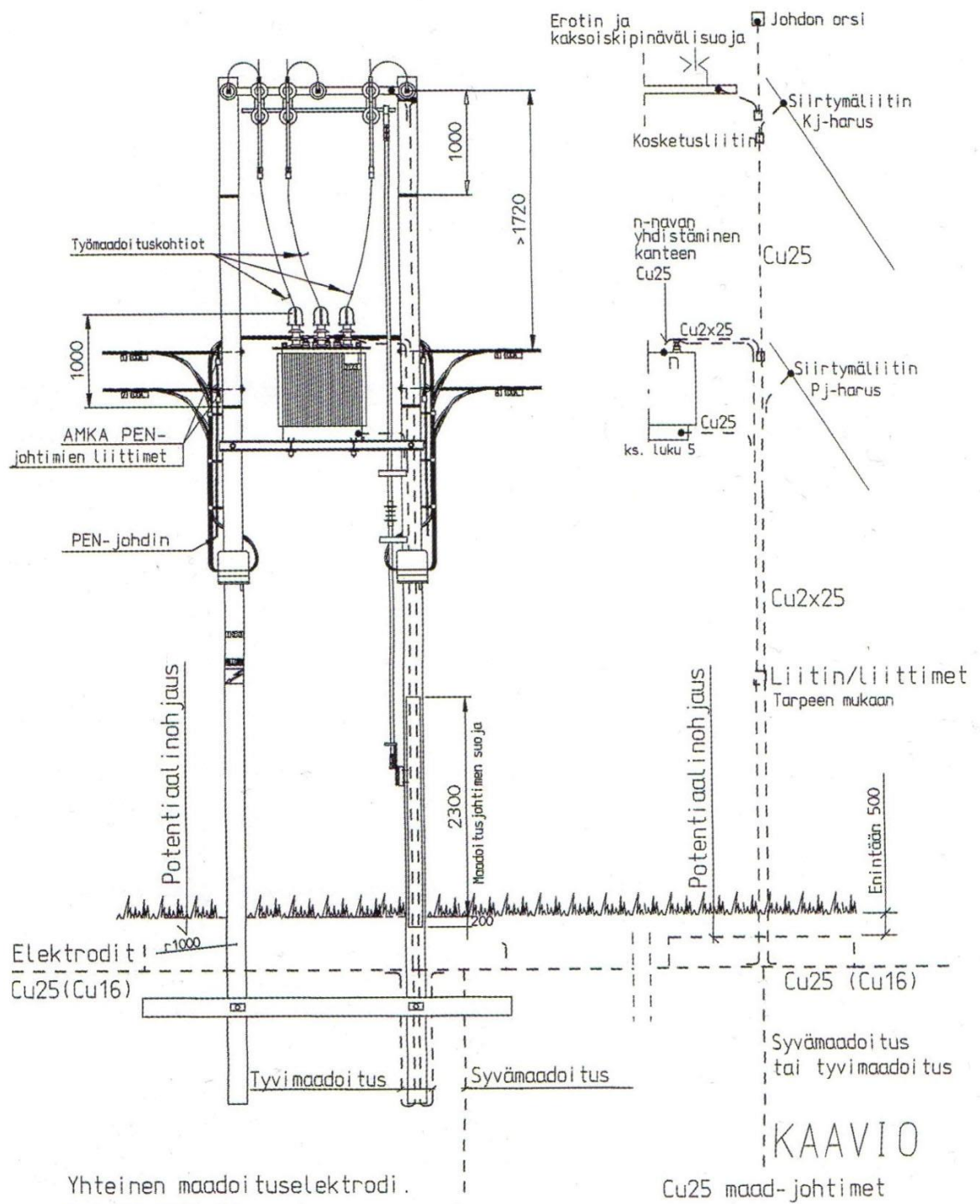
KUVIO 9. Pylväsmaadoituselektrodeja: a) perusmaadoitus, b) säteismaadoitus, c) läpimenevä johdinelektrodi. (Elovaara & Haarla 2011, 436.)



KUVIO 10. Potentiaaliohjauselektrodeja. Potentiaaliohjauselektrodi a) harustetulla pylväällä ja b) vapaasti seisovalla pylväällä. (Elovaara & Haarla 2011, 436.)

4.3 Pylväsmuuntamon maadoitus

Pylväsmuuntamoille tehdään kuvion 11 mukainen maadoitus.



KUVIO 11. Pylväsmuuntamon maadoitus. (Maadoituskirja 2007, 92.)

Suurjännitepuolen suojamaadoitusjohdin asennetaan pylvästä pitkin suoraan maahan. Tähän suojamaadoitusjohtimeen kytketään kaikki suojamaadoitettavat osat kuten muuntaja, pylväserottimen runko, myös johdon orsi ja harukset. Johdin jatkuu pylvään tyvimaadoituselektrodiksi ja liitetään maassa vaakasuoraan elektrodiin. (Maadoituskirja 2007.)

Muuntajan n-navasta asennetaan Cu 25 mm² -johdin myös suoraan maahan. Muuntajan n-napaan tuodaan haara myös suojamaadoitusjohtimesta. Muuntajan n-navan järjestelmämaadoituksena toimivat siis Cu 2 x 25 mm² johtimet. Myös muuntajan n-navasta asennettu johdin asennetaan tyvimaadoituselektrodiksi ja kytketään vaakasuoraan maadoituselektrodiin. (Maadoituskirja 2007.)

Jos tyvimaadoitusta ei jostain syystä asenneta, se voidaan korvata syvämaadoituksella (pystymaadoituksella). Uusissa asennuksissa, joihin liittyy muuntamopylväiden pystytys, voidaan yleensä asentaa tyvimaadoitukset. (Maadoituskirja 2007.)

Potentiaaliohjauselektrodi upotetaan enintään 0,5 m syvyydelle ja 1 m etäisyydelle pylväistä. Potentiaaliohjauselektrodi kytketään kahdesta pisteestä vaakasuoraan maadoituselektrodiin. Potentiaaliohjauselektrodi sekä vaakasuora maadoituselektrodi voivat olla myös Cu 16 mm² -johtimia, jos ne eivät ole alttiina korroosiolle tai mekaaniselle vahingoittamiselle. Jos vaakasuora elektrodi on kaapeliuojassa, sen poikkipinta tulee olla Cu 25 mm². (Maadoituskirja 2007.)

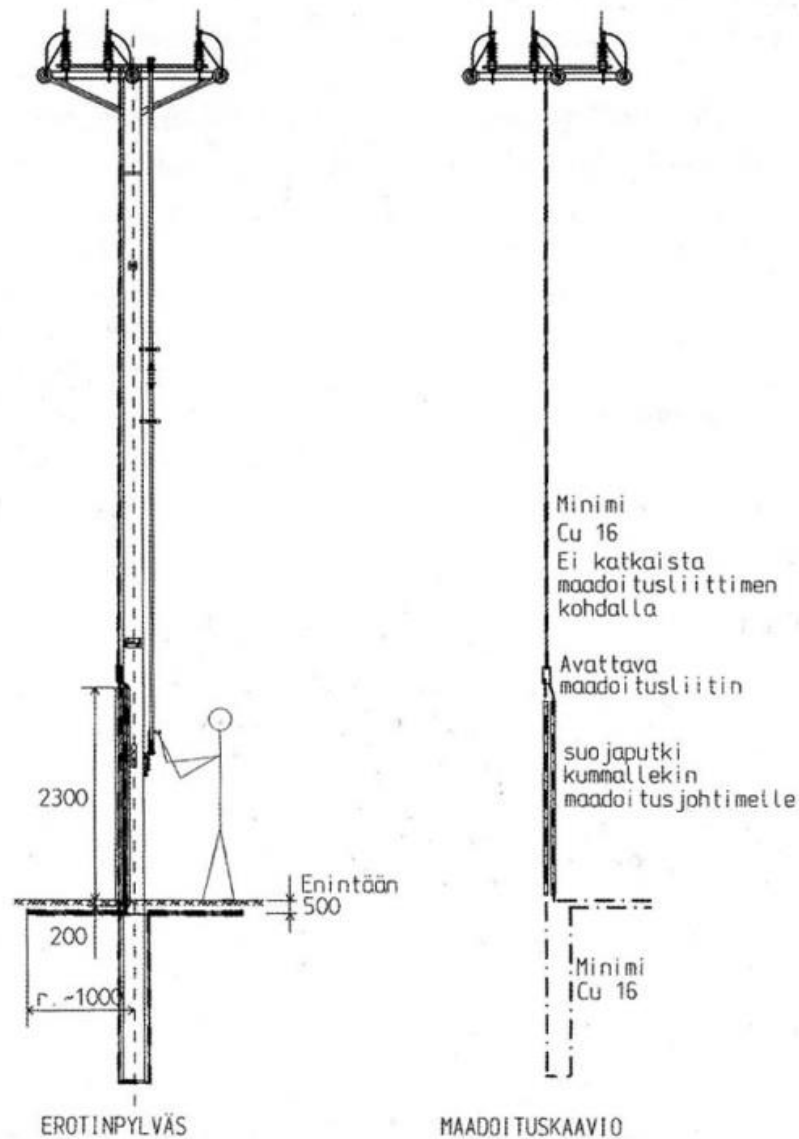
Pylvään kyljessä olevat Cu 2 x 25 mm² -johtimet pitää suojata 2,3 m korkeudelle. Liittimet suojaputken yläpuolelle voidaan asentaa, jos rakentamismenetelmä niitä edellyttää. (Maadoituskirja 2007.)

Jos pylväs on kalliolla, ei potentiaaliohjausta tarvitse asentaa. Muuntamon maadoituselektrodi on kuitenkin rakennettava ylijännitesuojauksen takia mahdollisimman lähelle muntamoä käyttäen erillistä, tätä varten rakennettua pylvästä. Etenkin silloin tulee kiinnittää elektrodin muotoon huomiota. (Maadoituskirja 2007.)

Muuntamon suurjännite-erottimen ohjaimen ohjausputkessa on eristin. Erottimen maadoituksen suhteen menetellään samoin kuin pylväserottimen tapauksessa.

Pylväsmuuntopiirin maadoitusjärjestelmän maadoitusimpedanssi pitää kuitenkin mitata. Potentiaalinhjausrenkaan toiminta on varmistettu kahdella liitoksella. (Maadoituskirja 2007.)

4.4 Pylväserottimen maadoitus



KUVIO 12. Pylväserottimen maadoitus. Vasemman puoleinen kuva osoittaa käsin ohjattavan pylväserottinaseman rakenteen. Oikean puoleinen osoittaa maadoitusjohtimien ja potentiaalinhjausrenkaan toiminnan. (Maadoituskirja 2007, 94.)

Suojamaadoitusjohdin vieään erottimelta katkaisematta tyvimaadoitukseen ja siitä muodostetaan potentiaalinhjausrenkas pylvään ympärille. Potentiaalinhjausrenkas on

enintään 500 mm syvällä maassa. Käytetyn Cu-johtimen minimivahvuus on 16 mm².
(Maadoituskirja 2007.)

Käyttäjän suorittaessa ohjausta, hän seisoo potentiaaliohjausrenkaan päällä, eikä häneen kohdistu jännitettä vikatilanteessakaan. (Maadoituskirja 2007.)

Eroittimen ohjauskampea ei saa yhdistää ohittavaan suojamaadoitusjohtimeen, sillä salamaylijännitteen aikana siihen saattaisi tulla useiden kilovolttien syöksyjännite.
(Maadoituskirja 2007.)

Ohjaustangon eristimen nimellijännite on 24 kV. Se estää, ettei ohjaustangon kautta pääse jännitettä käyttäjän käsiin.
(Maadoituskirja 2007.)

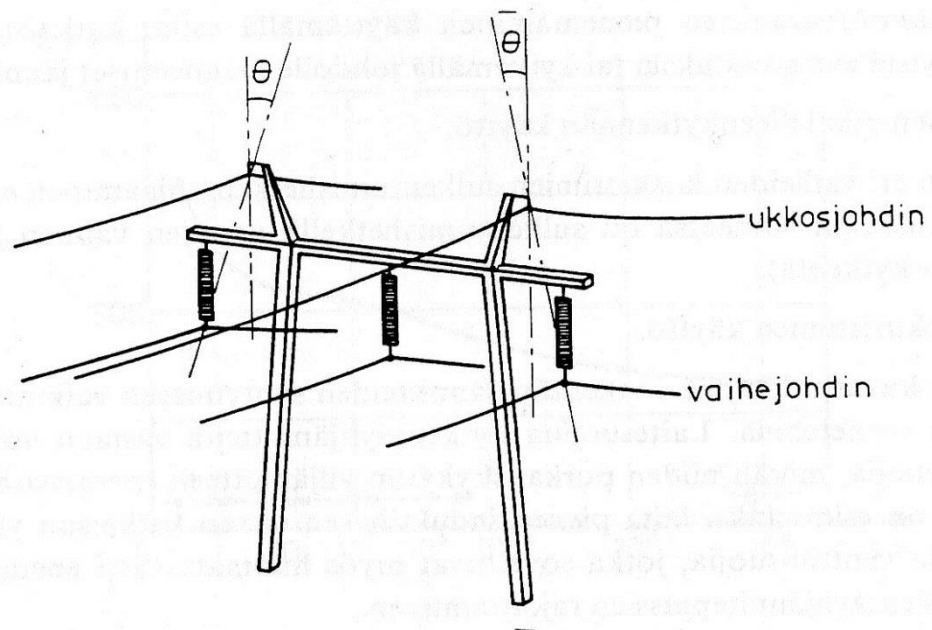
Näin rakennetulle pylväseroittimen maadoitukselle ei ole maadoitusresistanssivaatimusta. (Maadoituskirja 2007.)

Jos erotin on kalliolla, ei potentiaaliohjausta tarvitse rakentaa. Maadoitus on rakennettava mahdollisimman lähelle erotinta sitä varten rakennettuun pylvääseen. Maadoitusta ei saa viedä lähimmälle suurjännite-pylväälle, koska se on liian kaukana ja salamasyöksyjännite saattaisi tulla ohjaustangon kautta kalliolle ja käyttäjän käsiin.
(Maadoituskirja 2007.)

5 UKKOSJOHTIMET

Avojohtoja koskevan standardin SFS-EN 50341-1 mukaan ukkosjohtimella tarkoitetaan maahan joillakin tai kaikilla pylväillä yhdistettyä johdinta, joka on tavallisesti sijoitettu vaihejohtimien yläpuolelle antamaan tietyn asteisen suojan salamaniskuja vastaan.

(Vaihtosähköilmajohdot yli 45 kV jännitteillä 2002.).



KUVIO 13. Ukkosjohdin ja vaihejohdin. Kuviossa θ = suojauskulma. (Elovaara & Laiho 1988, 194.)

Ukkosjohtimien tehtävänä on:

- estää salamaniskujen osuminen vaihejohtimiin
- kuljettaa osaa maasulkuvirrasta, jolloin maan kautta palaava virta ja sen aiheuttamat vaarajännitteet ja sähkömagneettisen kentän vaikutus pienenevät
- kytkeä vikapylväs tai asema rinnan toisten pylväiden tai läheisen aseman kanssa, jolloin maasulkuvirran kohtaama impedanssi ja maadoitusjännite pienenevät.

(Pesonen 1976.)

Ukkosjohtimia käytetään Suomessa 400 kV ja 220 kV johdoilla sekä lähes kaikilla

110 kV johdoilla. Ukkosjohtimia käytetään sähköasemien läheisyydessä usein myös 24-52 kV johdoilla. Suomessa vallitsevat vaikeat maadoitusolosuhteet rajoittavat voimakkaasti ukkosjohtimien käyttöä keskijänniteverkoissa, sillä suuri pylväsmaadoituksen maadoitusresistanssi aikaansaa takaiskun salamapurkauksen osuessa ukkosjohtimeen. (Elovaara & Laiho 1988.)

Ukkosjohtimien vaikutuksesta avojohdon ukkoshäiriömääriin saa hyvän käsityksen tarkastelemalla Imatran Voiman asiasta tekemän tutkimuksen tuloksia. Niiden mukaan ukkosjohtimettoman 110 kV johtojen ukkoshäiriömäärä on 7,0-kertainen verrattuna maadoitettujen ukkosjohtimellisten johtojen ukkoshäiriömäärästä. (Elovaara & Laiho 1988.)

Ukkosjohtimet menettävät paljon suojaustehostaan ilman pylväsmaadoituksia. Suomessa saadut kokemukset ovat osoittaneet, että ukkosköysillä varustetun, mutta ilman pylväsmaadoituksia olevan johdon ukkoshäiriömäärä on noin kaksinkertainen ukkosjohtimilla ja pylväsmaadoituksilla varustettuun johtoon verrattuna. (Pesonen 1976.)

5.1 Ukkosjohtimien materiaalit

Yleensä ukkosjohtimina käytetään teräs-, teräsalumiini- tai terässeosalumiinijohtimia. Näistä teräsjohtimilla on selvästi suurin impedanssi. Teräsalumiini- ja terässeosalumiinijohtimien käyttöä ukkosjohtimina puoltaa myös se, että niiden reduktiokerroin on huomattavasti pienempi (0,4-0,5) kuin teräsjohtimien reduktiokerroin (0,9). Suurilla virroilla teräsjohtimet voivat vielä kyllästyä, mikä vaikeuttaa laskujen suorittamista. (Elovaara & Haarla 2011.)

5.2 Ukkosjohtimet ja relesuojaus

Relesuojauksen toimintaedellytyksiä tarkasteltaessa on tutkittava ukkosjohtimien ja suppeahkojen pylväsmaadoitusten muodostamaa ketjua. Ketjun päässä vaikuttava tehollinen impedanssi $Z_T = |Z_T|$ saadaan myöhemmin esitettävistä yhtälöistä.

Taulukko 5 esittää tämän impedanssin arvoja muutamalla maan ominaisresisttiivisyyden ρ arvolla, kun jänteen pituus on 110 kV johdolle tyypillinen 200 m. (Elovaara & Haarla 2011.)

TAULUKKO 5. Esimerkkejä ukkosjohtimen impedanssista (Elovaara & Haarla 2011, 437.)

Ukkosjohtimet	ρ Ωm	z_u Ω/km	Ilman lisämaadoitusta*		Lisämaadoituksilla	
			R_T/Ω	Z_T/Ω	R_T/Ω	Z_T/Ω
2 × 35 St	500	3,3	60	3,1	15	1,6
	2300	3,3	200	5,7	32	2,3
	10000	3,3	550	9,5	50	2,9
2 × Imatra (teräsalumii- nijohdin)	500	0,60	60	1,3	15	0,7
	2300	0,65	200	2,5	32	1,0
	10000	0,70	550	4,4	50	1,3

Taulukko 5 osoittaa, että ukkosjohtimellisella johdolla pelkästään pylväsperustusten ja harusten muodostama maadoitus takaa hyvin nollavirtareleisiin perustuvan maasulkusuojauksen toiminnan. Resultoivat maadoitusimpedanssit ovat nimittäin alhaiset, vaikka maan ominaisresistanssi olisi suuri. (Elovaara & Haarla 2011.)

Distanssisuojien selektiivinen toiminta edellyttää lyhyillä johdoilla ja huonosti johtavassa maaperässä jo lisämaadoitusta, sillä niiden toiminta perustuu johtojen myötäimpedanssiin, jonka suuruus on tyypillisesti 0,3-0,4 Ω/km . Distanssirele ei voi toimia, jos mittaussilmukan resistanssi on suuri. Pylvään lisämaadoitus pienentää maapiirin resistanssia ja parantaa distanssisuojauksen edellytyksiä. (Elovaara & Haarla 2011.)

Ukkosjohtimettomilla silmukkaverkon johdoilla distanssisuojia ei voida käyttää suojarleinä, koska maasulkupiirin suuri resistanssi estää niiden havahtumisen. Virtaan perustuvat nollavirtareleet voivat toimia maasuluissa, mutta tällöin tulee ongelmaksi laukaisun hitaus, sillä silmukkaverkossa laukaisuajat on porrastettava selektiivisyyden takia. Ääritilanteissa määräysten mukainen maasulkusuojaus voi olla täysin mahdoton toteuttaa ilman ukkosköysiä. (Elovaara & Haarla 2011.)

Myös maadoitus- ja kosketusjännitteille ukkosköysillä ja pylväasmaadoituksilla on ratkaiseva merkitys. Tarkastellaan havainnollisuuden vuoksi ukkosjohtimettoman 110 kV johdon pylvästä alueella, missä maan ominaisresistiivisyys on 500 Ωm. Tällaisissa oloissa pylvään luonnollinen maadoitusresistanssi on taulukon 5 mukaan noin 60 Ω. Vaikka vikaimpedanssittoman maasulun maasulkuvirta olisi 3 kA, rajoittaa 60 Ω maadoitusresistanssi virran noin 1 kA suuruiseksi. Maadoitusjännite on tällöin 50 kV eli lähes vaihejännitteen 63,5 kV suuruinen. (Elovaara & Haarla 2011.)

Maadoitusjännitteen alentaminen vaarattomaan arvoon edellyttäisi alle 1 Ω maadoitusresistanssia, minkä saavuttaminen ilman ukkosköysiä on Suomessa useimmiten mahdottomuus. Jos sitä vastoin käytetään teräsalumiiniukkosjohtimia, päästään taulukon 5 mukaan luonnollisella pylväasmaadoituksella arvoon 1,3 Ω ja lisämaadoituksin jo arvoon 0,7 Ω. (Elovaara & Haarla 2011.)

On huomattava, että ukkosjohtimien reduktiovaikutuksesta maahan menevä vikavirta pienenee teräsalumiiniukkosköysillä noin 50-60 % verrattuna ilman ukkosjohtimia saatavaan syntyvään arvoon. (Elovaara & Haarla 2011.)

Maadoitusjännitteen lisäksi pylväasmaadoitukset vaikuttavat huomattavasti siihen, miten maasulkupotentiaali leviää maadoituselektrodin ulkopuolelle. Usein vaikeimmat ongelmat aiheuttaakin ympäristön pienjännite- ja televerkkoihin leviävä jännite. Huonossa maaperässä voi jopa käydä niin, että maadoituksia parantamalla pahennetaan tilannetta ympäristössä. Tämä selviää yhtälöstä 3, joka antaa maasulussa olevan johdon lähistöllä olevan pisteen P potentiaalın. (Elovaara & Haarla 2011.)

$$V_P = \frac{\rho}{2\pi} \left| \sum_{j=1}^n (I_{ej} / S_j) \right| \quad (3)$$

missä

S_j = pisteen P ja pylvään j maadoituksen keskipisteen välinen etäisyys

I_{ej} = pylväältä j maahan kulkeva virta

ρ = maaperän ominaisresistanssi

n = tarkasteluun sisällytettävien pylväiden lukumäärä.

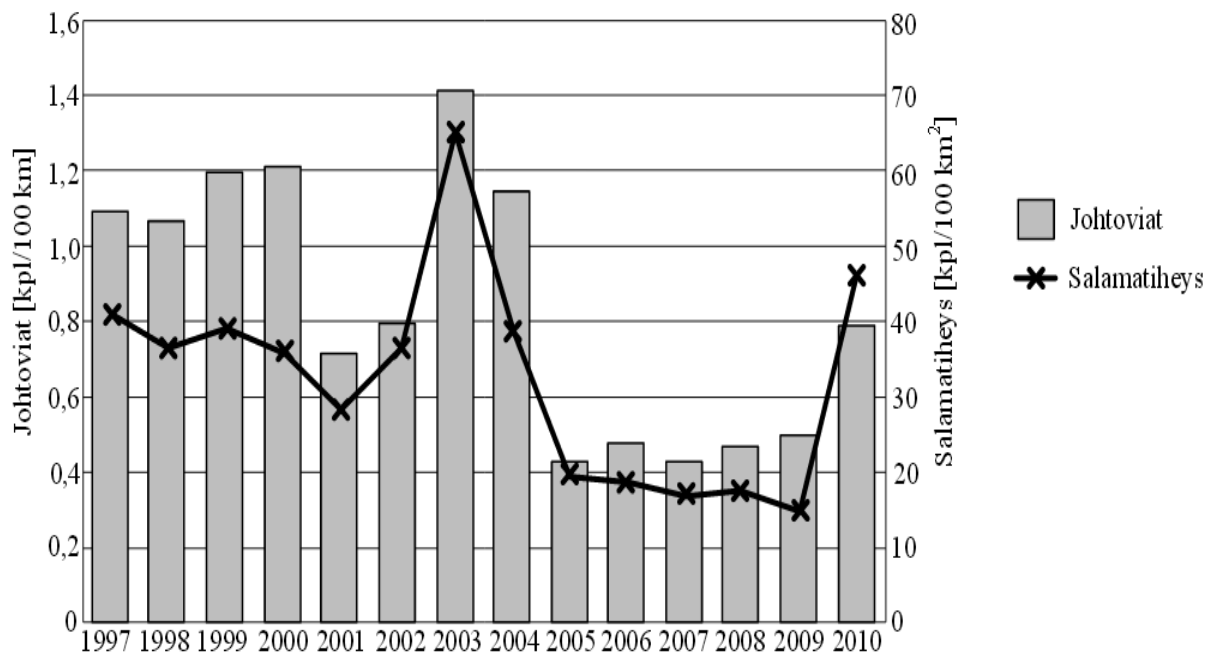
(Elovaara & Haarla 2011.)

5.3 Ukkostiheys ja ukkoshäiriöt

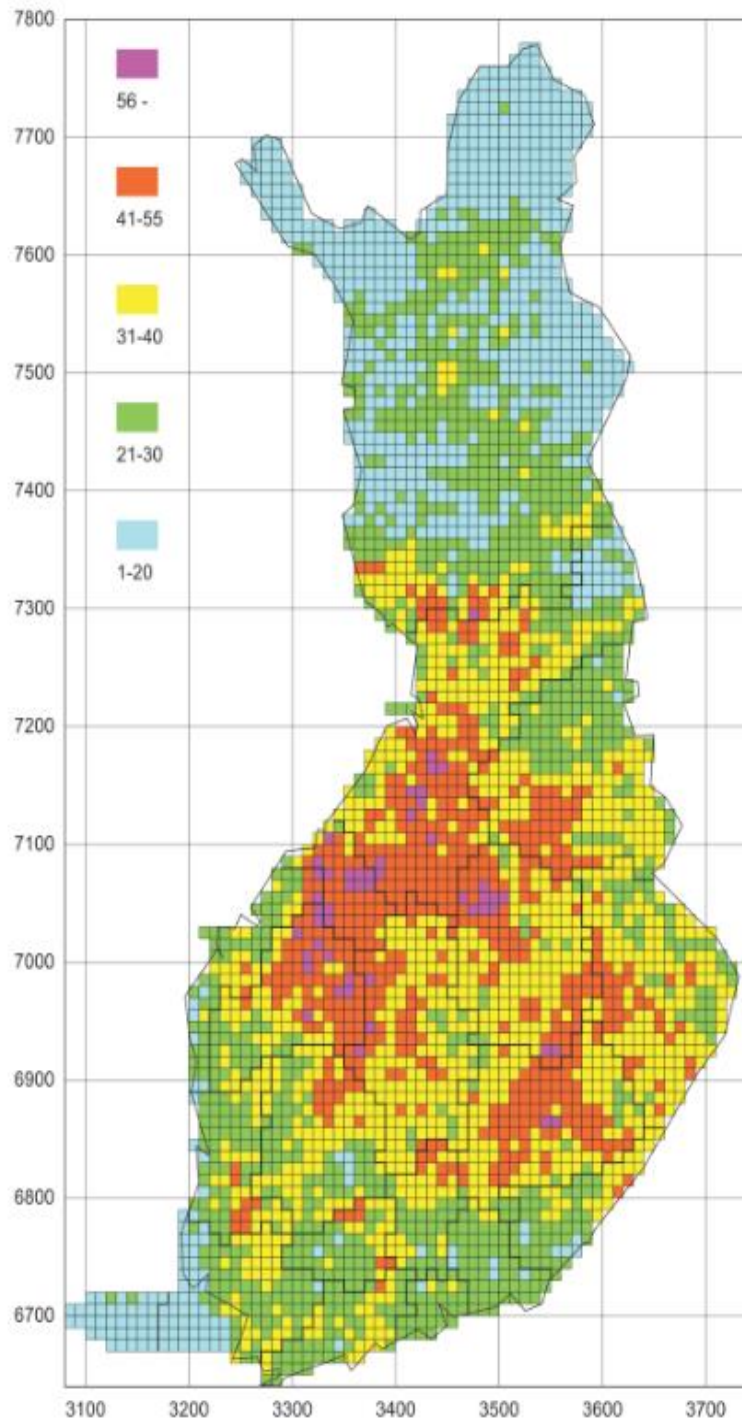
Ukkonen on tyypillisin vian aiheuttaja avojohdoilla. Avojohtojen ukkostiheyteen vaikuttavia seikkoja ovat esimerkiksi:

- alueen salamatiheys
- ukkosjohtimet, pylväsmadoitukset ja johdon syöksyjännitelujuus sekä
- johdon korkeus ja johtoa mahdollisesti ympäröivän metsän korkeus

Voimajohtoon osuvien salamaniskujen lukumäärä on lähes lineaarisesti riippuvainen alueen salamatiheydestä. (Seppänen 2011.)



KUVIO 14. Ukkosviat Fingridin 110 kV johdoilla ja Suomen keskimääräinen vuotuinen salamatiheys vuosina 1997-2010. (Finngriid Oyj 2011.)



KUVIO 15. Salamoiden keskimääräinen vuotuinen määrä 10×10 km ruuduilla Suomessa vuosina 1998-2010. (Mäkelä 2010.)

Suunniteltaessa johtojen ukkossuojausta ei yleensä huomioida alueen salamatiheyttä, vaan alueesta riippumatta uudet johdot suojataan ukkosta vastaan niin tehokkaasti kuin taloudellisesti on kannattavaa. Suunniteltaessa uutta johtoa olisi periaatteessa

mahdollista ottaa alueen salamatiheys huomioon siten, että suojauksen tehokkuus vaihtelisi salamatiheyden mukaan. Näin ollen ukkossuojausta voisi tehostaa Keski- ja Kaakkois-Suomessa sekä Pohjanmaan eteläosissa esimerkiksi Pohjois-Suomen johtojen kustannuksella. (Seppänen 2011.)

Ukkosjohtimeen osunut salamanisku aiheuttaa takaiskun, mikäli salamavirran aiheuttama jänniterasitus vaihejohtimen ja maadoitetun osan yli kasvaa niin suureksi, että niiden välisen ilmavälin jännitelujuus ylittyy. Takaiskun syntyminen riippuu salamavirran lisäksi ukkosjohtimista, pylväsmaadoituksista ja voimajohdon syöksyjännitelujuudesta. Karkeasti arvioituna kunnollisilla pylväsmaadoituksilla varustetulle portaalipylväsjohdolle asennettavat ukkosjohtimet vähentävät ukkoshäiriöitä suhteessa 1:3,6. Tälläisiin arvioihin liittyy kuitenkin aina suuri epävarmuus. (Seppänen 2011.)

5.4 Ukkosjohtimiin kertyvän jääkuorman aiheuttamat viat

Suomen olosuhteissa ukkosjohtimiin voi talven kuluessa kertyä jääkuormia. Tyypillinen jääkuormavika syntyy, kun ukkosjohdin venyy jään painon vaikutuksesta ja osuu vaihejohtimeen tuulenpuuskan seurauksena. Usein jääkuormaviat ovat toistuvia vikoja ukkosjohtimen heilahdellessa useita kertoja vaihejohtinta vasten. Lisäksi ukkosjohtimet voivat heilahdella voimakkaasti, jos suuri osa niiden jääkuormasta putoaa kerralla. Jääkuormavikojen paikallistaminen on usein työlästä. (Seppänen 2011.)

Jääkuormia syntyy pääsäännöllisesti kahdella mekanismilla: pilven tai sumun sisällä jäätymällä sekä vesi- tai lumisateen vaikutuksesta.

TAULUKKO 6: Erilaisten jääkuormien ominaisuuksia (Seppänen 2011, 14.)

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

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

Jääkuorman kertymiseen vaikuttavat erityisesti ilmastolliset olosuhteet ja maaston muodot. Pitkään kestävä pakkasjakso voi aiheuttaa johtimien ympärille suuren huurrekuorman. Sään lauhtuminen voi tiputtaa kuorman johtimista, mutta pahojen jääkuormatilanteiden yhteydessä johtimiin voi kertyä vuorotellen sekä huurretta että kosteaa lunta, ja lumisateiden välissä pakkasen kiinnittää jääkuorman yhä tiukemmin johtimiin kiinni. Korkeilla maaston kohdilla johtimet ovat mataliin paikkoihin verrattuna useammin pilven sisällä ja näin ollen voimakkaammin alttiina huurtumiselle. (Seppänen 2011.)

Ukkosjohtimien aiheuttamia jääkuormavikoja esiintyy ongelmallisilla voimajohdoilla keskimäärin 2-3 vuoden välein. Jääkuormia käydään kuitenkin pudottamassa johdoilta, mikä vähentää jääkuormien aiheuttamia vikoja. (Seppänen 2011.)

6 PYLVÄSPOTENTIALIAALI

6.1 Pylväspotentiaalien suuruutta koskevat määräykset

Johtojen suojamaadoitusvaatimukset on annettu standardeissa SFS 50341-1 ja SFS 50341-3-7. Kosketusjännitteisiin ei tarvitse puuttua, kun jokin seuraavista ehdoista toteutuu.

1. Pylväät ovat sähköä johtamattomia, eikä niillä ole maahan yhteydessä olevia johtavia osia. Esimerkiksi puupylväät katsotaan tällaisiksi pylväiksi.
2. Johto on varustettu suojaavalla automaattisella laukaisulla, ja ihmisiä ei liiku tällaisen johdon pylvään läheisyydessä säännöllisesti tai oleskele siellä pitkiä aikoja.
3. Johdon maasulussa johdolla tapahtuva maapotentiaalin nousu eli maadoitusjännite U_e täyttää ehdon $U_e < 2U_D$, missä U_D on kuvion 5 esittämä peruskäyrä (U_{D1}) tai sen lisäresistansseilla aikaansaatu modifikaatio.
4. Kosketusjännite johdolla (U_T) on kuvion 5 peruskäyrää alhaisempi ($U_T < U_D = U_{D1}$).

(Elovaara & Haarla 2011.)

Mikäli yksikään edellä olevista ehdoista ei täyty, on ryhdyttävä toimenpiteisiin kosketusjännitteiden pienentämiseksi. Hyväksyttäviä toimenpiteitä ovat muun muassa potentiaaliohjauselektrodit, pylvään erottaminen ympäristöstä eristysaineisella aidalla, joka estää pylvään metallisosien tahattoman kosketuksen, tai maan pintakerroksen korvaaminen eristävällä aineella, esimerkiksi soralla. (Elovaara & Haarla 2011.)

6.2 Pylväspotentiaalin leviäminen

Homogeenisessä maassa pylväspotentiaali etenee melko tasaisesti eri suuntiin, kun tarkastellaan kohteita, jotka ovat etäällä maasulussa olevasta pylvästä. Kun johto on ukkosjohtimellinen ja pylväsmaadoitukset oletetaan pistemäisiksi tai puolipalloiksi ja vian oletetaan tapahtuvan n-pylväisen johdon varrella, voidaan potentiaalia pisteessä P

johdon lähistöllä tarkastella aikaisemmin esitetyn yhtälön 3 avulla. (Elovaara & Haarla 2011.)

Ukkosjohtimettomalla johdolla vain vikapylväs vaikuttaa maadoituspotentiaaliin. Myös ukkosjohtimettomalla johdolla maadoituspotentiaalinen arvo saadaan yhtälöstä 3 asettamalla muuttujalle n arvo 1. (Elovaara & Haarla 2011)

Verkossa suoritettujen mittaukset ovat osoittaneet, että potentiaalinen leviämistä ei voi laskea pelkästään pylvään ympäristössä tehtyjen pintamaan ominaisresistanssimittausten perusteella, vaan potentiaalinen leviämiseen vaikuttavat sekä maaperän pintakerrosten että pohjakerrosten ominaisvastukset. (Elovaara & Haarla 2011)

Pintakerroksen ollessa huomattavasti pohjakerrosta paremmin johtavaa, potentiaali leviää kauemmaksi kuin homogeenisessä maassa, ja jos pohjakerros on paremmin johtavaa, potentiaali ei leviä yhtä kauas kuin homogeenisessä maassa. Suomen 110 kV:n verkossa suoritettujen mittausten mukaan 90 prosentissa tapauksista potentiaalille etäisyydellä x ($20 \text{ m} \leq x \leq 200 \text{ m}$) pylväästä pätee:

$$V_{90}(x) \leq 0.11 * U_p * \ln\left(\frac{13300}{x}\right) \quad (4)$$

missä x on etäisyys metreinä.

Maadoitusjännite saadaan yleisessä tapauksessa yhtälöstä:

$$U_e = Z_e * I_e \quad (5)$$

missä

I_e = maasulkuvirta

Z_e = maadoitusimpedanssi

(Elovaara & Haarla 2011.)

Maasta erotetussa verkossa maasulkuvirta on verkon kapasitiivinen maasulkuvirta I_m eli $I_e = I_m$. Muunlaisissa kuin maasta erotetuissa verkoissa maasulkuvirta saadaan verkon nollavirrasta:

$$I_e = \underline{r} * 3I_0 \quad (6)$$

(Elovaara & Haarla 2011.)

Yhtälössä reduktiokerroin \underline{r} (itseisarvo) kuvaa maasulkutilanteessa maan kautta kulkevan virran suhdetta kokonaismaasulkuvirtaan. Reduktiokerroin \underline{r} määräytyy ukkosjohtimien oman impedanssin \underline{Z}_i ja ukkosjohtimien ja vaihejohtimien välisen keskinäisimpedanssin \underline{Z}_m avulla, ja se on todellisuudessa kompleksiluku:

$$\underline{r} = 1 - \frac{\underline{Z}_m}{\underline{Z}_i} \quad (7)$$

(Elovaara & Haarla 2011.)

110 kV johdoilla reduktiokerroin on 0,9-0,95, jos ukkosjohtimet ovat terästä, ja 0,3-0,55, kun ukkosjohtimet ovat teräsalumiinia. Teräksellä poikkipinnan vaikutus reduktiokertoimeen on selvästi pienempi kuin teräsalumiinilla. Suuremmilla jännitteillä reduktiokertoimet ovat hieman pienempiä kuin 110 kV johdoilla, mutta tämä johtuu enemmänkin ukkosjohtimien poikkipinnasta kuin pylvään mitoista. (Elovaara & Haarla 2011.)

Maadoitusjännitteiden suuruksia laskettaessa yhtälöjä 5 ja 6 käyttökelpoisempiin yhtälöihin avojohdoilla päästään tarkastelemalla virtojen jakautumista maasulkupylvään ympärillä. Ukkosköysiä käyttävällä avojohdolla pylväsmaadoitukset on yhdistetty luotettavasti ukkosjohtimiin. (Elovaara & Haarla 2011.)

Pylvään i resultoiva maadoitusimpedanssi Z_{Ti} saadaan yhtälöstä 9 ja pylvään maasulkuvirta I_{eTi} johdon molemmista suunnista virtaavien vikavirtojen $3I_{0a}$ ja $3I_{0b}$ summana. Maasulkupotentiaalın aiheuttava virta saadaan, kun johto-osien a ja b ukkosjohtimia myöten palaavat osat maasulkuvirrasta otetaan huomioon reduktiokertoimien r avulla. (Elovaara & Haarla 2011.)

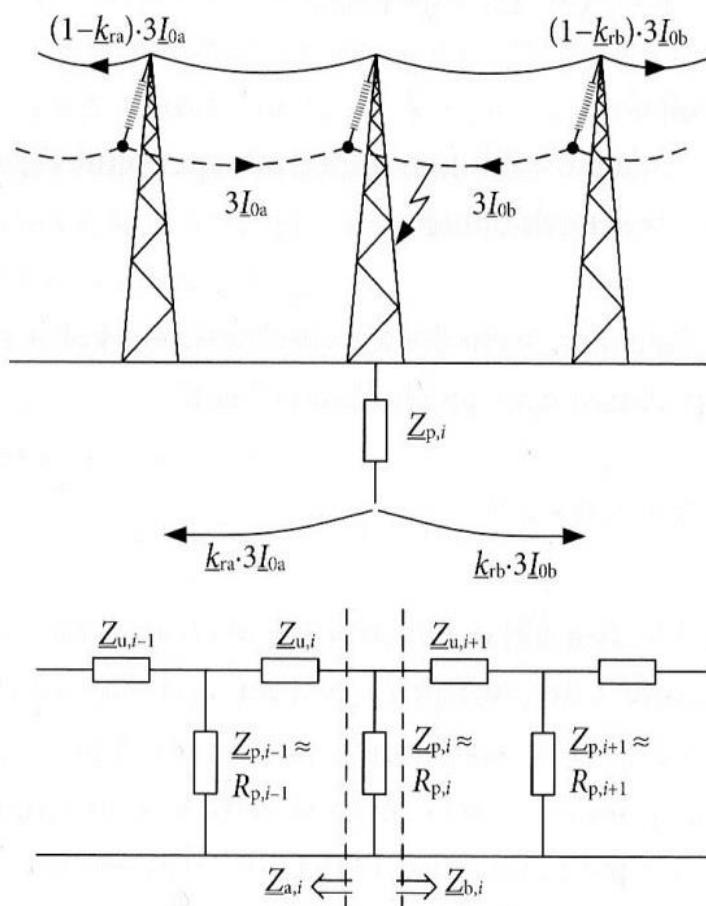
Osa vikavirrasta $I_{eT,i}$ palaa ukkosjohtimia myöden eikä vaikuta pylväspotentiaaliin, joten pylväspotentiaalin nousu aiheutuu vain vikavirran osuudesta $rI_{eT,i}$. Kuvion 16 pylvään maapotentiaalin nousu määräytyy siten yhtälön 9 antamasta virrasta. (Elovaara & Haarla 2011.)

$$\frac{1}{Z_{T,i}} = \frac{1}{R_{T,i}} + \frac{1}{Z_{a,i}} + \frac{1}{Z_{b,i}} \quad (8)$$

$$I_{eT,i} = r_a 3I_{0a} + r_b 3I_{0b} \quad (9)$$

Pylvään I potentiaaliksi maasulussa saadaan siten

$$U_{T,i} = I_{eT,i} * Z_{T,i} \quad (10)$$



KUVIO 16. Pylväspotentiaalin suuruuteen ukkosjohtimellisella johdolla vaikuttavat virrat ja impedanssit. Vika tapahtuu keskimmäisellä pylvällä. (Elovaara & Haarla 2011, 443.)

Käytännössä teräsalumiinijohtimista muodostetun ukkosjohdinparin impedanssi on 0,5-0,7 Ω/km ja vastaava arvo teräsukkosköysillä on 2-3,3 Ω/km . Koska avojohdon jänneiden pituus on alue- ja kantaverkoissa 150-400 m, päädytään johtopäätökseen, että yleensä $R_T \gg Z_U$. Ketjun resultoivaksi ketjuimpedanssiksi saadaan tällöin:

$$Z_T \approx \sqrt{R_T Z_U} = \sqrt{R_T z_u l_j} \quad (11)$$

missä

Z_U = ukkosjohtimien impedanssi yhden jänteen pituudella

R_T = pylvään maadoitusresistanssi

z_u = ukkosjohtimen impedanssi pituusyksikköä kohti

l_j = jänteen pituus.

(Elovaara & Haarla 2011.)

Kaukana asemalta kysymyksessä on kaksi suuntaa, joten kokonaisimpedanssi saadaan yhtälöstä:

$$Z_{T,\infty} = 0,5 \times Z_T \quad (12)$$

(Elovaara & Haarla 2011.)

7 PYLVÄSMAADOITUKSET JA UKKOSJOHTIMET

Tässä luvussa tarkastelen ukkosjohtimien ja pylväsmaadoitusten yhteisvaikutusta. Kerron miten vikatapauksissa esiintyvät vaarajännitteet vaihtelevat ukkosjohtimellisella johdolla ja ukkosjohtimettomalla johdolla. Tarkastelen ukkosjohtimettoman johdon ja ukkosjohtimellisen johdon eroja Janne Seppäsen tekemän diplomityön pohjalta.

Taulukossa 7 on esitetty Seppäsen mittaamia arvoja ukkosjohtimettomalle ja ukkosjohtimelliselle johdolle. Mittaustulokset on skaalattu vastaamaan maasulkuvirtaa 1 kA.

TAULUKKO 7. Ukkosjohtimettoman ja ukkosjohtimellisen johdon jännitemittaus tuloksia. (Seppänen 2011, 61)

Ominaisuus	Ukkosjohtimeton johto, ehjä läpimenevä maajohdin	Ukkosjohtimellinen johto
Suurin mitattu kosketusjännite	460 V	1650 V
Vikaantuneen pylvään maadoitusjännite	1130 V	1720 V
Potentiaalisuppilo vikaantuneen pylvään ympäristössä	Ulottuvuus useita kilometrejä	Ulottuvuus vain kymmeniä metrejä

Taulukon 7 tulosten mukaisesti suurin kosketusjännite sekä vikaantuneen pylvään maadoitusjännite on ukkosjohtimellisella voimajohdolla. Suurimmat jännitteet olivat vikapaikassa, jossa johdolla oli teräsukkosjohtimet. Vikapaikassa, jossa johdolla oli teräsalumiiniukkosjohtimet, vaarajännitteet eivät olleet yhtä suuria. Tämä johtuu eroista ukkosjohtimien johtavuuksissa. Koska teräsalumiiniukkosjohtimien johtavuus on parempi, myös niiden reduktiokerroin sekä vikapaikasta näkyvä ketjuimpedanssi ovat pienempiä. Tällöin myös vaarajännitteet jäävät pinemmeksi. (Seppänen 2011.)

Läpimenevällä maajohtimella varustetulla johdolla vikapaikan ympärille muodostuva potentiaalisuppilo ulottuu huomattavasti laajemmalle alueelle kuin ukkosjohtimellisella johdolla. Potentiaalisuppilo on hyvin laaja, koska virta leviää laajalle alueelle maajohdinta pitkin. Koska maajohtimien maadoitusimpedanssi on pieni, vikaantuneen pylvään maadoitusjännite ja myös kosketusjännitteet pysyvät melko alhaisina. (Seppänen 2011.)

Potentiaalisuppilon laajuus voi kuitenkin lisätä siirtyvien potentiaalieriskien riskiä. Vaarallinen tilanne voi syntyä esimerkiksi tapauksessa, jossa pitkä kaapeli kuljettaa potentiaalia kauaksi vikapaikasta. Sen sijaan vaarallisia potentiaaleja ei voi siirtyä esimerkiksi aitoja tai muita lyhyitä asennuksia pitkin, koska potentiaalisuppilo maajohtimen ympäristössä on hyvin loiva. Näin ollen vaarallisia potentiaalieroja ei synny lyhyillä matkoilla. (Seppänen 2011.)

Taulukon 7 tuloksista havaitaan, että ukkosjohtimettomalla johdolla ukkosvikojen määrä tulee olemaan suurempi kuin ukkosjohtimellisella johdolla. Näin ollen ukkosjohtimettomia johtoja voidaan käyttää ainoastaan paikoissa, joissa salamatiheys on pieni. Ukkosvikojen lisääntymisen myötä on odotettavissa, että myös monivaiheisten vikojen määrä kasvaa. Myös eristinvaurioiden määrä voi kasvaa. Ukkosviat ovat lähes aina ohimeneviä, eivätkä aiheuta merkittävää haittaa normaaleille yksityisasiakkaille. Sen sijaan erityisesti monivaiheisten vikojen aiheuttamista jännitekuopista voi olla haittaa esimerkiksi prosessiteollisuudelle. (Seppänen 2011.)

8 LOPPUSANAT

Tein tämän opinnäytetyön oman mielenkiintoni pohjalta kyseiseen aiheeseen. Minua ovat aina kiinnostaneet salamet ja huomattuani ukkosjohdinten liittyvän aiheeseen oli opinnäytetyön aihe selvä. Pylväsmaadoitukset oli tarpeeksi laaja aihe, vaikkei siitä kirjallisuutta kovin paljoa olekaan. Opin paljon uutta pylväsmaadoituksista, ja oli mielenkiintoista nähdä, miten pylväsmaadoitukset ja ukkosjohtimet vaikuttavat toisiinsa.

LÄHTEET

Elovaara, J. & Haarla, L. 2011. Sähköverkot II. Tallinna: Otatieto.

Elovaara, J. & Laiho, Y. 1988. Sähkölaitostekniikan perusteet. Helsinki: Otatieto.

Johtoviat Fingridin verkossa. Sisäinen raportti. Fingrid Oyj. Helsinki, 2011.

Maadoituskirja. Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto STUL. 2007. Espoo: Painokurki.

Mäkelä, A. Salamahavainnot. 2010. Verkkodokumentti. Saatavissa:

<https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/18419/2010nro5.pdf?sequence=3>

Pesonen, A. et al. 1976. 110 kV johtojen suunnittelu, rakentaminen ja kunnossapito. Helsinki: INSKO.

Seppänen, J. 2011. Diplomityö. Saatavissa:

<http://lib.tkk.fi/Dipl/2011/urn100520.pdf> . Luettu 8.6.2014.

SFS-EN 50341-1. 2002. Vaihtosähköilmajohdot yli 45 kV jännitteillä. Osa 1: Yleiset vaatimukset. Yhteiset määrittelyt. Helsinki: Suomen standardoimisliitto.

SFS 6001. 2009. Suurjännitesähköasennukset ja ilmajohdot. Helsinki: Suomen standardoimisliitto.

Valjus, J. et al. 1979. Sähköverkkojen maadoitusten suunnittelu, rakentaminen ja mittaus. Helsinki: INSKO.