

Jussi Luukkainen

**VOIMAJOHTOJEN
MAADOITUSMITTAUKSET**
Maadoitusmittausprosessin kehittäminen

Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta
Diplomityö
Toukokuu 2020

TIIVISTELMÄ

Jussi Luukkainen: Voimajohtojen maadoitusmittaukset
Diplomityö
Tampereen yliopisto
Sähkötekniikka, DI
Toukokuu 2020

Maadoitusmittaukset ovat mukana voimajohdon elinkaaren jokaisessa vaiheessa. Maan resistiivisyysmittauksilla saatu tieto maaperän ominaisuuksista on maadoitussuunnittelun perusta. Henkilöturvallisuuden ja voimajohdon häiriöttömän toiminnan varmistamiseksi, sen maadoitusten kunto tulee tarkastaa määrävälein. Voimajohtojen tapauksessa tämä tarkoittaa lähes poikkeuksetta pylväsmaadoitusten hyvyyttä kuvaavan maadoitusresistanssin mittaamista. Suomessa maadoitusolosuhteet ovat verrattain haasteelliset, minkä lisäksi voimajohtoilla on erityispiirteitä, jotka monimutkaistavat maadoittamista ja mittaamista entisestään. Turvallinen, luotettava ja tehokas maadoitusmittaaminen on ammattitaitoa vaativa tehtävä.

Työn tavoitteena oli kehittää maadoitusmittausprosessia Eltel Networks Oy:ssä. Pää tavoite oli löytää keinoja parantaa maadoitusresistanssimittauksen luotettavuutta keskimäärin. Työssä etsittiin myös muita keinoja tehostaa maadoitusmittausprosessia ja mittauksilla saadun tiedon hyödyntämistä. Työ alkoi tutustumalla maadoittamiseen ja maadoitusmittauksiin liittyvään tutkimuskirjallisuuteen sekä nykyisiin käytäntöihin. Alussa tutustuttiin myös mittausmenetelmiin ja niiden suorittamiseen käytännön tasolla. Pääpaino oli käytössä olevissa mittausmenetelmissä, mutta myös joidenkin uusien menetelmien toimintaperiaatteisiin perehdyttiin ja tarkasteltiin niiden soveltuvuutta voimajohtojen maadoitusmittauksiin. Aihetta käsittelevä tutkimuskirjallisuus on pääosin ulkomaista ja useimmiten myös melko vanhaa. Voimajohtojen maadoitusten näkökulmasta tehtyä tutkimusta on myös melko vähän saatavilla. Haasteena olikin taustateorian soveltaminen Suomen maadoitusolosuhteisiin ja voimajohtojen erityispiirteisiin. Teoriatutkimuksen lisäksi tehtiin tilastollista vertailua erityyppisten pylväiden ja maadoitusten maadoitusresistanssimittauksista. Vertailussa käytetty aineisto koostui voimajohtojen kunnossapidon osana tehdyistä maadoitusresistanssimittauksista laadituista pöytäkirjoista. Pöytäkirjoihin on kirjattu tiedot mm. mittaustuloksista menetelmittäin sekä maadoitusresistanssiin ja mittaustuloksiin mahdollisesti vaikuttavista tekijöistä. Mittaustulokset ryhmiteltiin näiden tekijöiden perusteella ja menetelmien luotettavuutta vertailtiin ryhmittäin.

Tilastollisen vertailun perusteella maadoitusresistanssimittauksen tuloksissa on suurta hajontaa, ja mittausvirhe on keskimäärin suuri. Selkein virheen aiheuttaja oli vertailun perusteella useimmissa tapauksissa epärealistiseen maaperämalliin perustuvan vertailuarvon käyttö. Lisäksi joidenkin mittausmenetelmien havaittiin olevan selkeästi epäluotettavia tietäntyyppisten maadoitusten mittaamisessa. Vertailun tulokset tukivat pääosin esiteltyä teoriaa, ja tiettyjen menetelmien huonolle luotettavuudelle tietäntyyppisten maadoitusten mittauksissa löytyi teoreettista perustaa. Maadoittamisen ja maadoitusmittaamisen teorian moniulotteisuus nosti esiin myös mittausta suorittavien henkilöiden ammattitaidon merkityksen maadoitusmittausprosessissa.

Työssä esitetään keinoja, joilla luotettavuutta maadoitusresistanssimittauksissa voidaan parantaa. Lisäksi suositellaan kaksikerrosmaaperämalliin käyttöönottoa voimajohtojen maadoitusten suunnittelussa ja maadoitusresistanssimittauksen vertailuarvona. Maadoitusmittauksia suorittaville henkilöille annettavassa ohjeistuksessa ja perehdytyksessä tullaan jatkossa tuomaan selkeämmin esiin virhetekijöiden vaikutusta mittaustulokseen ja korostamaan menetelmien soveltuvuuden tärkeyttä. Työssä perehdyttiin joihinkin hyvin lupaaviin uusiin mittausmenetelmiin, kuten Boys-menetelmä ja selektiivinen käännepestemenetelmä. Eriteltyjen mittausmenetelmien soveltuvuutta voimajohtojen maadoitusmittauksiin selvitetään perusteellisemmin erillisessä kehitysprojektissa.

Avainsanat: Maadoitus, maadoitusmittaus, maadoitusresistanssi, resistiivisyys, voimajohto

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ABSTRACT

Jussi Luukkainen: Transmission line earthing measurements, improving the earthing measurement process
Master's thesis
Tampere University
Electrical Engineering, MSc
May 2020

Earthing measurements are a part of an overhead transmission line's life cycle in its every phase. The data acquired by soil resistivity measurements is the basis of the earthing system design of an overhead transmission line. To ensure the safety and proper function of a line, the condition of its earthings must be checked periodically. This is usually done by measuring the overhead transmission line's earth resistances. The earthing conditions of Finland are relatively challenging. Additionally, overhead transmission lines have some special features that make earthing and earthing measurements even more challenging. Safe, reliable and efficient earthing measurement is a difficult task that requires a lot of expertise.

The aim of this work was to improve the earthing measurement process in Eitel Networks Oy. The main objective was to find ways to improve the reliability of earth resistance measurements in general. Secondary objective was to find ways to make the process and the usage of the data acquired by the measurements more efficient. The work began by getting to know the theory behind earthing and earthing measurements and the current practices. The focus was on the earthing measurement methods that are currently used in the earthing measurement process. Additionally, some new methods and their applications in the measurement of overhead transmission lines was also explored. Most of the research and literature that form the theoretical background of this work is not done in Finland and most of it is not from the point of view of overhead line earthings. Applying the background theory to Finland's earthing conditions and the special features of overhead transmission lines was a challenge that was encountered in this work. In addition to the theoretical study, a statistical analysis comparing different earth resistance measurement methods was done. The material that was used in the statistical analysis consisted of results obtained by earthing measurements done as part of maintenance work of overhead transmission lines. Measurements were divided into groups by the features of the earthings that were measured.

According to the statistical analysis, the dispersion between measurement results and the average measurement error was generally very considerable. Most apparent source of error in most cases was the reference value of the earth resistance that the measured results were compared to. The error was caused by unrealistic soil model that has likely been used in the design of the earthing system. Additionally, it was discovered that some methods are clearly unreliable in the earth resistance measurement of certain earthing types. The results were mainly in line with the presented theory and there was theoretical base for bad performance of certain methods for certain types of earthings. The complexity of the theory and vast number of variables included in earth resistance measurements also highlighted the importance of proficiency of the person carrying out the earth resistance measurements.

Ways to improve the reliability of earth resistance measurements were presented. Two-layer soil model was proposed to be implemented in the design of earthings. It was also proposed that a reference value corresponding to a two-layer soil model could be used to evaluate the earth resistance measurement results. Guides and education given to the personnel carrying out earth resistance measurements should include more in-depth instructions on how to evaluate the effect of different error sources to the measurement results and highlight the importance of using the right method for each measurement. The Boys -method and the selective fall of potential method and their applications in overhead transmission line earthing measurements will be further explored.

Keywords: Earthing, earthing measurement, earth resistance, soil resistivity, transmission line

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin OriginalityCheck service.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Eltel Networks Oy:lle. Yrityksen puolelta työn ohjaajana toimi suunnittelupäällikkö Ari Sipiläinen. Tampereen yliopiston puolelta työn ohjaajana ja tarkastajana toimi tutkimuspäällikkö ja dosentti Kari Lahti ja toisena tarkastajana toimi projektipäällikkö Ari Nikander.

Haluan kiittää Ari Sipiläistä kaikesta saamastani tuesta. Kiitokset kuuluvat myös työtä ohjanneelle Kari Lahdelle, joka toi esiin monia hyviä näkökohtia maadoitusasioihin liittyen. Ehkä suurimman kiitoksen ansaitsevat kuitenkin läheiset ihmiset, jotka ovat olleet tukenani koko prosessin ajan.

Diplomityön aihe oli haastava ja hyvin mielenkiintoinen. Voimajohtojen maadoitussuunnittelijan työssä opituista asioista on ollut paljon hyötyä diplomityön teossa. Diplomityön kautta maadoitukseen liittyvistä asioista saatu oppi tulee varmasti myös olemaan hyödyksi työssäni voimajohtojen ja suurjännitelaitteiden parissa.

Helsingissä, 4.5.2020

Jussi Luukkainen

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. VOIMAJOHTOJEN MAADOITUKSET	3
2.1 Vaatimukset voimajohtojen maadoituksille	3
2.2 Maan resistiivisyys	5
2.3 Maadoitusresistanssi	7
2.3.1 Puolipalloelektrodi	9
2.3.2 Vaakaelektrodi	11
2.3.3 Pystyelektrodi	14
2.3.4 Muut elektrodityypit	16
2.4 Voimajohtojen erityispiirteet maadoittamisen kannalta	18
2.4.1 Suuret vikavirrat	18
2.4.2 Ukkosjohtimet ja reduktio	19
2.4.3 Maadoitukset suurilla taajuuksilla	21
2.5 Pylväsmaadoitukset	22
3. VAARA- JA HÄIRIÖJÄNNITTEET	24
3.1 Kapasitiivinen ja induktiivinen kytketyminen	25
3.2 Konduktiivinen kytketyminen	25
3.2.1 Maadoitusjännite	25
3.2.2 Potentiaalini leviäminen	26
3.2.3 Kosketus- ja askelijännitteet	29
3.3 Yhteenveto vaara- ja häiriöjännitteistä	31
4. MAAN RESISTIIVISYYDEN MITTAAMINEN	33
4.1 Wenner -menetelmä	33
4.2 Schlumberger -menetelmä	35
4.3 Resisttiivisyyden mittaaminen pystyelektrodin avulla	37
4.4 Boys -menetelmä	37
4.5 Haasteet maan resistiivisyyden mittaamisessa	39
4.6 Maaperämalli	40
4.7 Yhteenveto maan resistiivisyyden mittaamisesta	41
5. MAADOITUSRESISTANSSIN MITTAAMINEN	43
5.1 Käänne pistemenetelmä	43
5.1.1 Käänne pistemenetelmän teoria	44
5.1.2 Käänne pistemittauksen suorittaminen	46
5.1.3 Apuelektrodien sijainti	48
5.1.4 Yhteenveto käänne pistemenetelmästä	50
5.2 Suurtaajuusmenetelmä	52
5.3 Sarjamittausmenetelmät	54
5.3.1 Virta-jännitemenetelmä	57
5.3.2 Pihtimittaus	58
5.4 Selektiivinen maadoitusresistanssin mittaaminen	59

5.5	Haasteet maadoitusresistanssimittauksissa	59
5.6	Yhteenveto maadoitusresistanssin mittausmenetelmistä	61
6. MAADOITUSRESISTANSSIMITTAUSTEN LUOTETTAVUUS TILASTOJEN VALOSSA		63
6.1	Aineisto ja mittaustulosten ryhmittely	63
6.2	Mittausaineiston analysointi	65
6.3	Tulokset	66
6.3.1	Suunnitteluarvojen ja kaksikerrosmallin mukaisten maadoitusresistanssien vertailukelpoisuus	66
6.3.2	Pylvästyypin vaikutus mittausvirheeseen	69
6.3.3	Kaksikerrosmaaperän ja heijastuskertoimen vaikutus mittausvirheeseen	70
6.3.4	Maan resistiivisyyden ja maadoitusten laajuuden vaikutus mittausvirheeseen menetelmittäin	71
6.3.5	Maadoitusresistanssin vaikutus mittausvirheeseen	74
6.4	Tulosten tulkinta	75
7. YHTEENVETO		80
LÄHTEET		84

LIITE A: MAADOITUSPÖYTÄKIRJA JA MAADOITUSTARKASTUSPÖYTÄKIRJA

LIITE B: MITTAUSVIRHEIDEN JAKAUTUMINEN MENETELMITÄIN

LYHENTEET JA MERKINNÄT

IEEE	engl. Institute of Electrical and Electronics for Engineers, kansainvälinen tekniikan alan järjestö
SFS	Suomen Standardoimisliitto SFS ry, standardisoinnin keskusjärjestö Suomessa
Cigre	engl. Council on Large Electric Systems, kansainvälinen sähkövoimajärjestelmiin keskittyvä voittoa tuottamaton järjestö
VHV	Vaara- ja häiriöjännitevaliokunta
$3I_0$	nollavirtojen summa
A	puolipalloelektrodin pinta-ala
a	mittauselektrodien välinen etäisyys Wenner- ja Schumberger -menetelmissä
b	mittauselektrodien upotussyvyys Wenner- ja Schlumberger -menetelmissä
c	virtaelektrodien ja jännite-elektrodien välinen etäisyys Schlumberger -menetelmässä
d	elektrodin, maadoituslevyn tai -ruudukon halkaisija
D	mitattavan maadoituksen ja virta-apuelektrodin välinen etäisyys käännepistemittauksessa
dV	potentiaaliero puolipalloelektrodia ympäröivän maan pinnalla
h	elektrodin upotussyvyys
h_1	pintamaan syvyys kaksikerrosmaaperämallissa
I	virta
I_e	maavirta
I_{ej}	maavirta pylväällä j
I_{mitt}	mittausvirta
J	virrantiheys
k_r	reduktiokerroin
k_{ra}	reduktiokerroin suunnasta a
L	elektrodin pituus
R	resistanssi
r	elektrodin säde
r_e	puolipalloelektrodin ekvivalenttisäde
R_l	pylväsperustusten maadoitusres maadoitusresistanssi eli luonnollinen resistanssi
R_m	maadoitusresistanssi
R_{mitt}	maadoitusresistanssin mittaustulos
R_t	maadoitusresistanssin tavoitearvo
R_x	Sarjamittausperiaatteella toimivissa menetelmissä apumaadoituksena käytettävän maadoituksen resistanssi
s_j	etäisyys pylvästä j
U	jännite
U_a	askeljännite
$U_{D1} - U_{D4}$	suurimmat sallitut kosketusjännitteet erilaisissa pylväiden sijaintipaikoissa
U_e	maadoitusjännite
U_k	kosketusjännite
U_s	siirtyvä jännite
U_{tp}	takaperoinen kosketusjännite
V	potentiaali
V_1, V_2	elektrodien 1 ja 2 potentiaalit

V_{11}	elektrodin 1 kautta kulkevan virran aikaansaama potentiaali elektrodissa 1
V_{12}	elektrodin 1 kautta kulkevan virran aikaansaama potentiaali elektrodissa 2
V_{13}	elektrodin 1 kautta kulkevan virran aikaansaama potentiaali elektrodissa 3
V_{31}	elektrodin 3 kautta kulkevan virran aikaansaama potentiaali elektrodissa 1
V_{32}	elektrodin 3 kautta kulkevan virran aikaansaama potentiaali elektrodissa 2
V_P	maan potentiaali pisteessä P
W	virtaelektrodien välinen etäisyys Boys -menetelmässä
x	etäisyys puolipalloelektrodin keskipisteestä
X	jänniteapuelektrodin etäisyys mitattavan maadoituksen keskipisteestä käännepistemittauksessa
X_0	jänniteapuelektrodin etäisyys mitattavan maadoituksen keskipisteestä, jolla mittaustulos on yhtä suuri kuin maadoituksen todellinen maadoitusresistanssi
Z	virtaelektrodin ja uloimman jännite-elektrodin välinen etäisyys Boys-menetelmässä
η	elektrodin 3 kautta kulkevan virran aikaansaama potentiaali elektrodissa 1 etäisyyden D funktiona
θ	mittauskulma, mitattavan maadoituksen keskipisteen ja jänniteapuelektrodin muodostaman suoran ja mittaussuoran välinen kulma
ρ	maan resistiivisyys
ρ_1	pintamaan resistiivisyys
ρ_2	syvämaan resistiivisyys
ρ_a	näennäinen resistiivisyys
ϕ	elektrodin 3 kautta kulkevan virran aikaansaama potentiaali elektrodissa 2 etäisyyksien D ja X erotuksen funktiona
ψ	elektrodin 1 kautta kulkevan virran aikaansaama potentiaali elektrodissa 2 etäisyyden X funktiona

1. JOHDANTO

Maadoitusten tehtävä on varmistaa, etteivät sähkölaitteet aiheuta haittaa tai vaaraa. Erityisesti suurjännitelaitteistoissa, vikavirtojen ollessa suuria, maadoituksilla on suuri merkitys turvallisuuden varmistajana. Maadoitusmittaukset ovat mukana voimajohdon elinkaaren jokaisessa vaiheessa, suunnittelusta kunnossapitoon. Maan resistiivisyysmittauksilla saatu tieto maaperän ominaisuuksista toimii maadoitussuunnittelun perustana ja voimajohdon kunnossapitovaiheessa maadoitusten kunto tarkastetaan määräjain mittaamalla voimajohtopylväiden maadoitusten maadoitusresistanssi. Luotettavalla maadoitusmittauksen avulla varmistetaan, että maadoitukset on mitoitettu siten, että voimajohto on turvallinen käyttää.

Suomessa maaperä on keskimäärin huonosti johtavaa ja usein epähomogeenista. Tämän vuoksi maadoituksista joudutaan usein tekemään melko laajoja, jotta voimajohtojen asetetut turvallisuusvaatimukset täyttyvät. Lisäksi voimajohtoja rakennetaan usein tilan säästämiseksi ja maisemahaittojen minimoimiseksi samoille johtokaduille, jolloin rinnakkaisten voimajohtojen pylväsmaadoitukset yhdistetään toisiinsa. Voimajohdot sijaitsevat taajamien kasvun ja kaapeloinnin lisääntymisen myötä myös yhä useammin laajojen maadoitusjärjestelmien läheisyydessä. Kaikki edellä mainitut seikat tekevät maadoitusmittauksista haasteellisempaa. Lisäksi uudet voimajohdot toteutetaan käytännössä aina teräsrakenteisilla pylväillä, joiden maadoitusmittaamiseen liittyy myös omat haasteensa.

Tämän työn tarkoituksena on löytää keinoja parantaa nimenomaan maadoitusmittauksien luotettavuutta, mutta myös tehostaa mittausprosessia ja mittauksilla saadun tiedon hyödyntämistä. Työssä perehdytään maadoittamiseen, vaarajännitteisiin ja maadoitusmittaukseen liittyvään tutkimuskirjallisuuteen. Lisäksi työssä vertaillaan maadoitusresistanssin mittauksessa käytettyjä menetelmiä tilastoidun maadoitusmittausdatan avulla. Taustalla olevan teorian ja tilastollisen vertailun tulosten perusteella muodostetaan näkemys Eltel Networks Oy:n nykyisen maadoitusmittausprosessin ongelmakohdista ja esitetään ratkaisuja näihin ongelmiin.

Luvussa 2 esitellään maadoittamisen peruskäsitteet, vaatimukset voimajohtojen maadoituksille sekä erityispiirteet, joita voimajohtojen maadoituksiin liittyy. Luvussa 3

käydään läpi voimajohtojen aiheuttamien vaarajännitteiden eri kytkeytymistavat ja keinoja niiden aiheuttamien haittojen minimoimiseksi. Pääpaino on konduktiivisesti kytkeytyvissä vaarajännitteissä, sillä niiden suuruuteen maadoittamisella voidaan eniten vaikuttaa. Luvuissa 4 ja 5 tutustutaan maadoitusmittausten taustalla olevaan teoriaan ja mittausten suorittamiseen käytännössä. Keskiössä ovat Eltelin käyttämät mittaussuuremittausmenetelmät, mutta myös joitakin uusia menetelmiä tuodaan esiin. Luvussa 6 esitellään maadoitusresistanssin mittaussuuremittausmenetelmien luotettavuuden tutkimiseksi tehty tilastollinen analyysi ja sen tulokset. Luvussa 7 tehdään yhteenveto työstä ja esitellään maadoitusmittausprosessin kehittämiseksi tilastollisen tutkimuksen ja taustateorian perusteella esitetyt toimenpiteet.

2. VOIMAJOHTOJEN MAADOITUKSET

Maadoittamiseksi kutsutaan laitteen tai virtapiirin yhdistämistä maaperään, mikä toteutetaan tavallisesti kuparista tehdyn elektrodin välityksellä. Maadoitukset voidaan luokitella tehtäviensä mukaan suojamaadoituksiin ja käyttömaadoituksiin. Suojamaadoituksen tehtävä on yhdessä vikasuojauksen kanssa estää vikatilanteessa ihmisille ja eläimille vaarallisten jännitteiden syntyminen yhdistämällä virtapiiriin kuulumattomat osat maahan. Käyttömaadoituksen tehtävä taas on yhdistää virtapiiriin kuuluva osa maahan siten, ettei virtajohtimien potentiaali maahan verrattuna pääse kasvamaan niin suureksi, että siitä aiheutuisi vaurioita tai vaaraa. Maadoittaminen on siis tärkeä osa sähkölaitteistoa ja sen tehtävä on varmistaa laitteiston käyttäjän ja laitteiston ympäristön turvallisuus. [6, s. 427]

Tässä luvussa käsitellään ensin voimajohtojen maadoituksille asetetut vaatimukset. Sen jälkeen käydään läpi maaperän vaikutus maadoitukseen ja maadoituksen tehokkuutta kuvaavan maadoitusresistanssin muodostuminen erilaisilla elektrodityypeillä. Lopuksi luodaan katsaus voimajohtojen maadoittamisen erityispiirteisiin, käytäntöihin ja Suomen maadoitusolosuhteiden aiheuttamiin haasteisiin.

2.1 Vaatimukset voimajohtojen maadoituksille

Voimajohtoilla sovellettavat maadoitusvaatimukset on esitetty pääosin standardeissa SFS-EN 50341-1 ja SFS-EN 50341-2-7, mutta myös standardin SFS 6001 vaatimuksia sovelletaan esimerkiksi voimajohdon aikaansaamien siirtyvien jännitteiden kohdalla [30, s. 24]. Standardin SFS-EN 5034 mukaan käyttötaajudella 50 Hz toimivien maadoitusten suunnittelun on varmistettava, että:

- 1) Maadoituksilla on riittävä mekaaninen lujuus ja korroosiokestävyys
- 2) Maadoitukset kestävät termisesti suurimman vikavirran
- 3) Henkilöturvallisuudelle asetetut vaatimukset täyttyvät, ottaen huomioon voimajohdon maasulun aikana esiintyvät jännitteet

Maadoitusten avulla pyritään lisäksi välttämään omaisuudelle aiheutuvia vahinkoja. Mekaaninen lujuus, korroosionkestävyys ja terminen kestävyys saavutetaan yleensä käyttämällä poikkipinnaltaan vähintään standardin mukaisia maadoituselektrodeja.

Taulukossa 1 on esitetty standardissa SFS-EN 50341-1 esitetyt maadoitus- ja yhdyselktrodien pienimmät sallitut poikkipinnat.

Taulukko 1. Pienimmät sallitut maadoitus- ja yhdistyselektrodien poikkipinta-alat eri materiaaleilla [31, s. 202].

elektrodin materiaali	poikkipinta-ala
Kupari	16 mm ²
Alumiini	35 mm ²
Teräs	50 mm ²

Standardissa sallitaan myös muiden materiaalien käyttö sillä edellytyksellä, että niiden kestoisuudet vastaavat vähintään taulukon 1 mukaisten elektrodien kestoisuuksia. [31, s. 200]

Käytännössä elektrodit ovat useammasta poikkipinnaltaan pienemmästä kuparijohtimesta kerrattuja paljaita köysiä. Esimerkiksi poikkipinnaltaan 25 mm² maadoituselektrodi koostuu tavallisesti seitsemästä kerratusta poikkipinnaltaan pienemmästä kuparilangasta, joiden yhteenlaskettu poikkipinta-ala on 25 mm².

Taulukosta 1 nähdään, että Suomessa pienin sallittu elektrodin poikkipinta on standardin mukaan 16 mm². Uudet voimajohtopylväiden maadoitukset tehdään tavallisesti kuitenkin käyttäen vähintään 25 mm² kupariköyttä ja esimerkiksi kantaverkkoyhtiö Fingrid Oyj vaatii käytettävän aina vähintään 25 mm² kuparisia elektrodeja, kun yhdistetään voimajohdon maadoituksia rinnakkaisten voimajohtojen tai sähköasemien maadoituksiin [32]. Standardin SFS 6001 mukaan suurjännitejärjestelmän maadoitukset tulee suunnitella ja toteuttaa siten, että niiden maadoituksien mittaukset ja jatkuvuustestit on mahdollista suorittaa [33, s. 98]. Käytännössä tämä huomioidaan liittämällä maadoitukset voimajohtopylvääseen käyttäen irrotettavia kaapelikenkäpulttiliitoksia.

Standardissa SFS-EN 50341 henkilöturvallisuudelle asetettujen vaatimusten täyttymisen varmistaminen on huomattavasti vaikeampaa. Luvussa 3 on tarkemmin esitetty voimajohdon aiheuttamat vaarajännitteet, niille asetetut raja-arvot, miten ne voidaan määrittää sekä miten niiden syntymistä voidaan ehkäistä ja miten niiden haittavaikutuksia voidaan vähentää. Olennaisia lähtötietoja henkilöturvallisuuden varmistamisessa ovat odotettavissa oleva vikavirran suuruus, vian kesto aika, pylväiden maadoitusresistanssit sekä maaperän resistiivisyys.

Vikatilanteessa maahan kulkevan vikavirran suuruus yhdessä pylvään maadoitusresistanssin ja pylvästä ympäröivän maaperän resistiivisyyden kanssa määrittävät pylväällä ja sen ympäristössä vaikuttavien maadoitus-, askel- ja kosketusjännitteiden suuruuden. Maadoituselektrodin rakenteella voidaan vaikuttaa paitsi pylvään maadoitusresistanssiin, mutta myös askel- ja kosketusjännitteiden suuruuteen. Sellaisia elektrodeja joiden ensisijainen tarkoitus on rajoittaa askel- ja kosketusjännitteitä kutsutaan potentiaalinojauselektrodeiksi, ja niiden suunniteluun ja toteutukseen on annettu ohjeita standardissa SFS 6001 [33, s. 113] ja standardin SFS-EN 50341 kansallisten velvoittavien määrittelyiden osassa 6 [30, s. 24]. Maadoitussuunnittelijan tehtävä on vikavirtatietojen ja maaperän ominaisuuksien perusteella suunnitella sellainen maadoitus, joka täyttää maadoitus-, askel- ja kosketusjännitteille asetetut vaatimukset.

Vian kestoaika määrittää suurimmat sallitut jännitteet pylvään ympäristössä. Vikavirtatietojen ja kosketus- ja maadoitusjännitevaatimusten perusteella määritetään tavoiteltava maadoitusresistanssi. Maadoitusresistanssin ja vikavirran suuruuden avulla voidaan laskea pylväällä vikatilanteessa esiintyvien jännitteiden suuruudet. Kosketus- ja maadoitusjännitevaatimukset yhdessä pylvään ympäristön kanssa määrittävät, millainen maadoitusratkaisu kullekin pylväälle tulee tehdä. Joissain tapauksissa pylvästä ympäröivän maaperän resistiivisyys on niin suuri, ettei maadoitusresistanssin tavoitearvoon kannata kohtuuttomien kustannusten vuoksi edes pyrkiä. Tällöin voidaan tyytyä rajoittamaan pylväällä vaikuttavia askel- ja kosketusjännitteitä esimerkiksi asentamalla potentiaalinojauselektrodeja tai eristämällä pylväs.

2.2 Maan resistiivisyys

Maan resistiivisyys vaikuttaa olennaisesti maadoitusjärjestelmän suunnitteluun, ja sitä voidaankin pitää maadoitusuunnittelun perustana. Maadoitusjärjestelmän maadoitusresistanssi on suoraan verrannollinen maaperän resistiivisyyteen, ja nämä yhdessä vikavirran kanssa määrittävät pylväällä esiintyvien jännitteiden suuruuden. Maan resistiivisyyden symboli on ρ ja yksikkö Ωm [9]. Maan resistiivisyys määritellään maan tilavuuden ja resistanssin avulla. Kuution muotoisessa palassa maata, jossa kuution kahden vastakkaisen sivun välinen resistanssi on 5Ω , resistiivisyys on $5 \Omega\text{m}$. Maan resistiivisyys vaihtelee huomattavasti maaperän tyypistä riippuen. Resistiivisyyteen vaikuttavia tekijöitä ovat mm. maaperän tyyppi, raekoko ja kosteus. Taulukossa 2 on esitetty tyypillisiä maaperän resistiivisyyssarvoja maaperän tyyppin mukaan.

Taulukko 2. Tyypillisiä resistiivisyyksiä eri maaperätyypeillä, lähteestä [31, s. 380].

maaperän tyyppi	maaperän resistiivisyys (Ωm)
soinen maaperä	5-40
hiesu, savi, hummus	20-200
hiekkä	200-2500
rapautunut kallio	Useimmiten alle 1000
sora	2000-3000
hiekkakivi	2000-3000
moreeni	Jopa 30000
graniitti	Jopa 50000

Suomessa maaperän resistiivisyys on yleensä hyvin suuri – keskimäärin noin 2300 Ωm . Tämän on todettu johtuvan lähelle maan pintaa ulottuvasta graniittisesta kallioperästä. Lisäksi graniittisen kallioperän päällä oleva ohut pintakerros on usein huonosti johtavaa maa-ainesta, kuten soraa jonka keskipaksuus on vain noin 8,5 m [6, s. 432] [34].

Ilmastolliset tekijät, kuten sade ja lämpötilan muutokset voivat aiheuttaa huomattavia tilapäisiä muutoksia maan resistiivisyydessä. Resistiivisyyden on havaittu pienenevän voimakkaasti maan kosteuden lisääntyessä aina noin 20 tilavuusprosentin kosteuteen asti. Tämän jälkeen lisääntyneellä kosteudella ei ole havaittu olevan suurta vaikutusta resistiivisyyteen. Lämpötilan muutosten, etenkin 0 °C ympäristössä, on havaittu vaikuttavan maaperän resistiivisyyteen. Maaperässä olevan veden jäätyessä, maaperän resistiivisyys nousee huomattavasti. Resistiivisyyden muutoksen suuruus riippuu lisäksi mm. maaperän raakoosta ja tiiveydestä. Maaperän suolapitoisuudella ja suolojen kemiallisella koostumuksella on myös todettu olevan vaikutusta maaperän resistiivisyyteen. Esimerkiksi vuorisuolalla on korkea resistiivisyys, mutta veden kanssa ne muodostaa hyvin johtavan liuoksen, jolla on pieni resistiivisyys. Tätä ominaisuutta käytetään hyväksi esimerkiksi hiilestä ja suolasta valmistetuissa seoksissa, joita voidaan käyttää maan resistiivisyyden pienentämiseen. [19, s. 2][35, s. 3]

Eri maalajit reagoivat ympäristöolosuhteiden muutoksiin eri tavalla riippuen mm. maalajin raakoosta ja tiheydestä. Mitä syvemmälle maahan mennään, sitä pienempiä ovat ilmastollisten tekijöiden, kuten lämpötilamuutosten ja sateen vaikutukset. Lappia

lukuun ottamatta, routa ulottuu Suomessa harvoin 50 cm alapuolelle [36]. Myös esimerkiksi sateesta johtuvat maaperän kosteuden muutokset ovat vähäisempiä syvemmällä maassa. Maadoituselektrodit pyritäänkin sijoittamaan pääasiassa 70 cm ... 100 cm syvyyteen, missä ne ovat vähemmän alttiita roudan vaikutukselle.

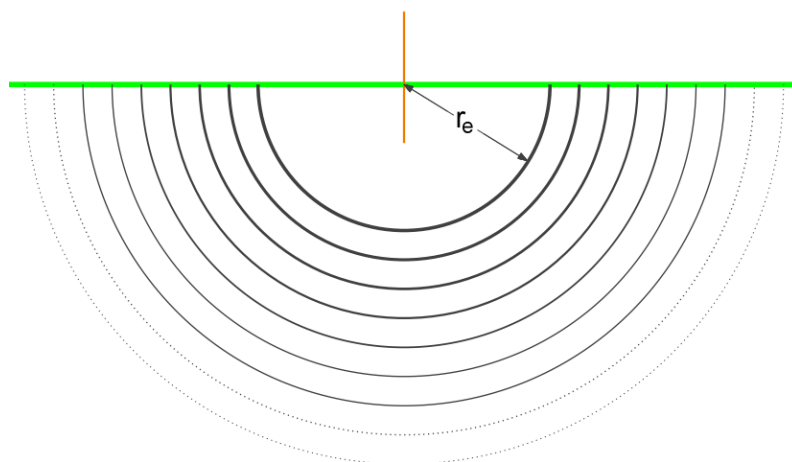
2.3 Maadoitusresistanssi

Maadoitusresistanssi, eli maadoitettavan rakenteen ja kaukaisen referenssimaan välinen resistanssi, on maadoituksen hyvyttä kuvaava suure. Johdettaessa maadoituselektrodin kautta maahan virta I , maadoitusresistanssi on maadoituselektrodin potentiaalin ja maadoituselektrodin kautta maahan kulkevan virran I osamäärä. [6, s. 427]

$$R_m = \frac{U}{I} \quad (1.1)$$

Yleisesti ottaen maadoitus on sitä parempi, mitä pienempi sen maadoitusresistanssi on. Vaarajännitteiden vuoksi joudutaan joskus kuitenkin asentamaan tavoitearvon mukaisia maadoituksia huonommat maadoitukset. Etenkin ukkosjohtimettomien johtojen pylväillä joudutaan toisinaan rajoittamaan maahan tunkeutuvaa virtaa ja potentiaalin nousua kasvattamalla maadoitusresistanssia.

Maadoituselektrodia ympäröivän maan voidaan ajatella koostuvan keskenään yhtä paksuista kerroksista, kuten Kuvassa 1. Kullakin kerroksella on oma resistanssinsa, ja kerrosten muodostama kokonaisresistanssi on elektrodin maadoitusresistanssi.

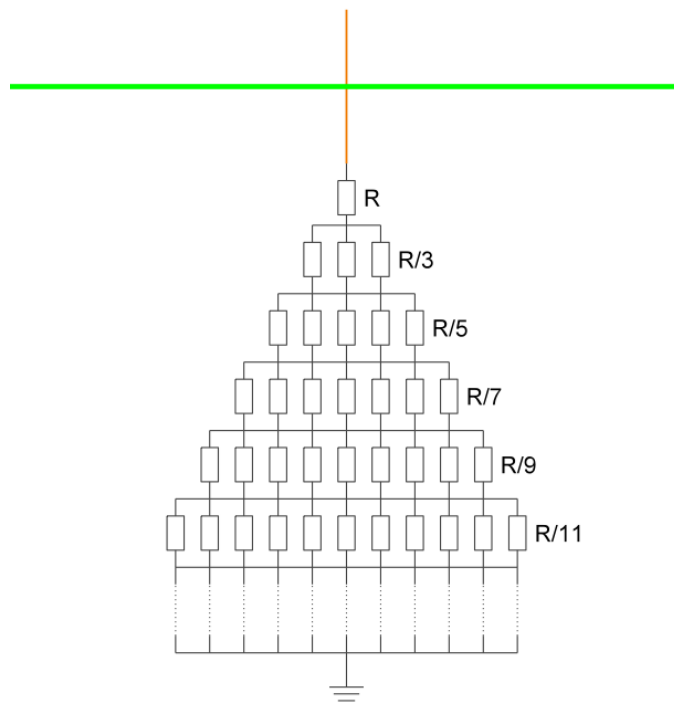


Kuva 1. Maadoituselektrodia ympäröivät maakerrokset, muokattu lähteestä [18, s. 3].

Elektrodia lähimpänä olevan kerroksen pinta-ala on pienin ja resistanssi suurin. Seuraavan kerroksen pinta-ala on aina suurempi ja resistanssi pienempi, kuin sitä

edeltävällä kerroksella. Mitä lähempänä elektrodia kerros on, sitä suurempi vaikutus sillä on kokonaisresistanssiin. Edettäessä niin kauas elektrodista, ettei seuraavalla kerroksella ole enää vaikutusta kokonaisresistanssiin, ollaan elektrodin vaikutusalueen ulkopuolella. Tässä kohdassa ollaan niin kutsutussa neutraalimaassa tai referenssimaassa. Vaikutusalueen laajuus riippuu elektrodia ympäröivän maaperän resistiivisyydestä ja maadoituselektrodin tai -järjestelmän rakenteesta. [18]

Elektrodia ympäröiviä maakerroksia voidaan ajatella myös Kuvan 2 osoittamalla tavalla sarjaan ja rinnan kytkettyinä vastuksina. Lähimpänä elektrodia olevalla maakerroksella on yksikköresistanssi R . Seuraavalla kerroksella on suurempi pinta-ala, joten se voidaan ajatella useamman yksikköresistanssin rinnankytkentänä. Jokaisen kerroksen resistanssi on näin pienempi kuin edeltävän kerroksen ja jokaisen kerroksen vaikutus kokonaisresistanssiin on pienempi kuin edeltävän kerroksen.



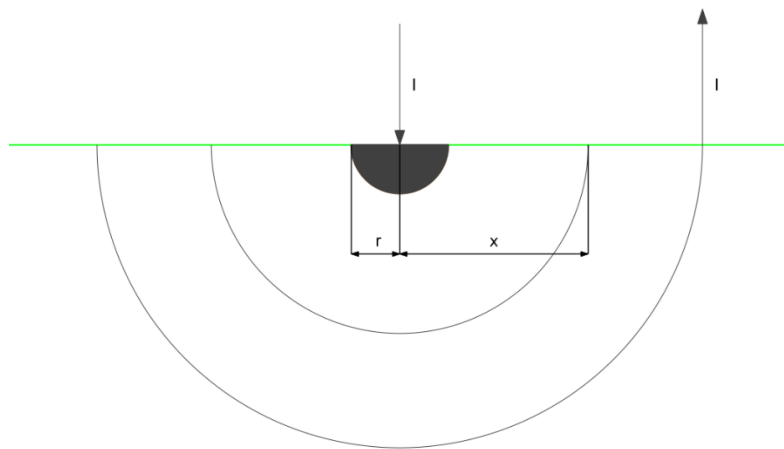
Kuva 2. Yksinkertaistettu kuvaus maadoitusresistanssin muodostumisesta, muokattu lähteestä [18, s. 3].

Todellisuudessa maa on harvoin homogeenista. Eri kerroksien resistiivisyydet ovat siis erisuuria, eikä kerroksia voida tarkasti mallintaa samansuuruisien yksikköresistanssien rinnankytkentänä. Malli on siis karkea yksinkertaistus, mutta se on kuitenkin hyödyllinen siinä mielessä, että se auttaa ymmärtämään maadoituksen ja maadoitusresistanssin luonnetta sekä "potentiaalilupilon" muodostumista maaperään.

2.3.1 Puolipalloelektrodi

Puolipalloelektrodi on maahan upotettu puolipallon muotoinen elektrodi, jonka tasainen osa on maan pinnan kanssa samassa tasossa. Puolipalloelektrodilla on rajoitetusti suoria käytännön sovelluskohteita, mutta se on hyödyllinen, sillä se on matemaattisesti helppo mallintaa ja ymmärtää. Puolipalloelektrodin maadoitusresistanssin yhtälöitä käytetään usein hyväksi, kun johdetaan muun muotoisten elektrodien yhtälöitä.

Tarkastellaan Kuvan 3 mukaista tilannetta, jossa r säteinen puolipallon muotoinen elektrodi on sijoitettu maahan.



Kuva 3. Puolipalloelektrodi maanpinnassa.

Maan voidaan ajatella olevan äärettömän suuri puolipallo, jolla on resistiivisyys ρ ja äärettömän kaukana sijaitseva hyvin johtava kuori. Johdettaessa puolipalloelektrodin kautta maahan virta I , virta kulkee maassa äärettömän kaukana sijaitsevaan hyvin johtavaan kuoreen. Virrantiheys voidaan laskea kaavalla (2.1)

$$J = \frac{I}{A} \quad (2.1)$$

missä J on virrantiheys, I on elektrodin läpi kulkeva virta, A on puolipalloelektrodin pinta-ala. Puolipallon, jonka säde on r , pinta-ala A saadaan yhtälöstä

$$A = 2\pi r^2 \quad (2.2)$$

Virrantiheyden yhtälöksi etäisyydellä x puolipalloelektrodin keskipisteestä saadaan näin ollen yhtälö (2.3)

$$J = \frac{I}{2\pi x^2} \quad (2.3)$$

Potentiaaliero dV maassa puolipallosta poispäin taas on muotoa

$$dV = I \frac{\rho}{2\pi x^2} dx \quad (2.4)$$

Äärettömän kaukana sijaitsevan kuori sijaitsee neutraalimaassa, joten sen potentiaali on 0 V, ja x etäisyydellä puolipalloelektrodin keskipisteestä sijaitsevan pisteen potentiaali V_P saadaan laskettua kaavalla (2.5)

$$V_P = I \frac{\rho}{2\pi} \int_x^\infty \frac{1}{x^2} dx = I \frac{\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{x} - \frac{1}{\infty} \right) \quad (2.5)$$

koska $\frac{1}{\infty} \ll \frac{1}{x}$, on potentiaali missä tahansa pisteessä muotoa (2.6)

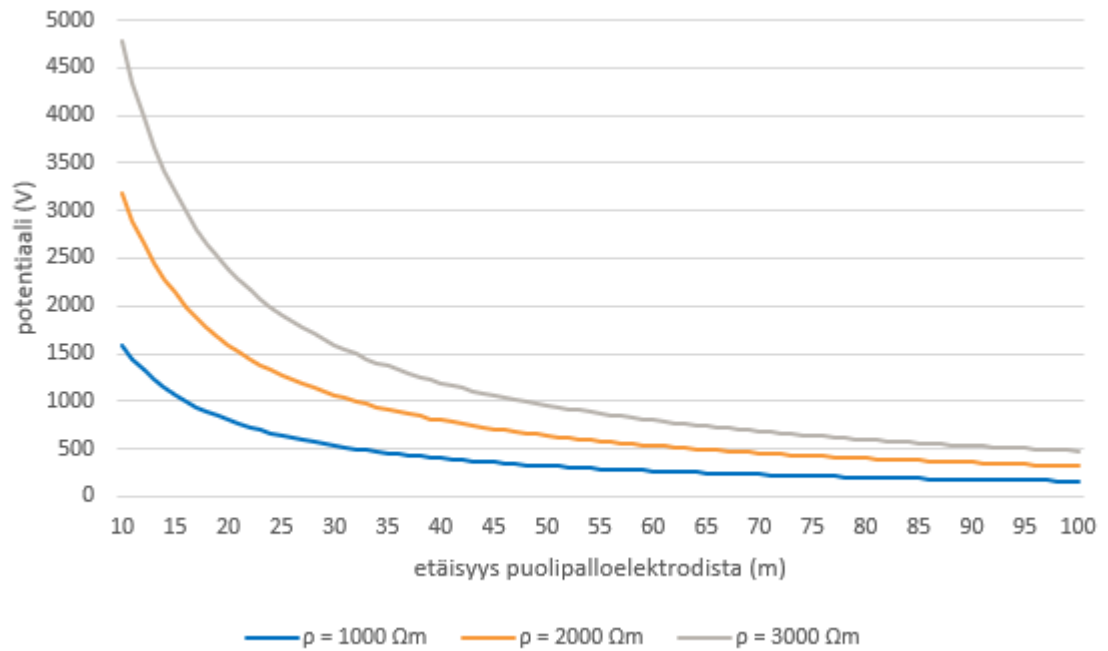
$$V_P = I \frac{\rho}{2\pi x} \quad (2.6)$$

Puolipalloelektrodin säde on r ja maadoitusresistanssi on elektrodin potentiaalın ja elektrodin kautta maahan kulkevan virran osamäärä, joten puolipalloelektrodin maadoitusresistanssi saadaan yhtälöstä (2.7) [20, s. 1-2][24, s. 90-94]

$$R_m = \frac{V}{I} = \frac{\rho}{2\pi r} \quad (2.7)$$

Puolipalloelektrodi auttaa ymmärtämään, mitä tapahtuu virran kulkiessa maadoituselektrodin kautta maahan. Eri elektrodityypeille voidaan määrittää niin kutsuttu ekvivalenttisäde. Ekvivalenttisäteen avulla voidaan erilaisten elektrodien maadoitusresistanssit laskea kuin ne olisivat puolipalloelektrodeja. Ekvivalenttisäteen määrittäminen on sitä helpompaa, mitä yksinkertaisempi elektrodityyppi on kyseessä. Ekvivalenttisädeä määritettäessä oletetaan elektrodia ympäröivä maaperä homogeeniseksi, jolloin laskenta on yksinkertaisempaa. Epähomogeenisessa maaperässä sijaitsevan elektrodin ekvivalenttisäteen määrittäminen on hyvin vaikeaa, ja se vaatii käytännössä aina tietokoneavusteista laskentaa [29, s. 16].

Kuvaan 4 on hahmoteltu potentiaalın leviäminen puolipalloelektrodin ympäristössä, kun ympäröivä maaperä on homogeenista. Kuvaa varten laskettiin potentiaalit kolmessa eri tapauksessa käyttäen kaavaa (2.6). Elektrodien säde ja niiden kautta maahan tunkeutuva virta on kaikissa kuvan tapauksissa yhtä suuri, mutta ympäröivän maaperän resistiivisyys vaihtelee.



Kuva 4. *Potentiaalilin leviäminen puolipalloelektrodin ympäristössä homogeenisessa maaperässä, kun $I_e = 100 \text{ A}$ ja $r = 1 \text{ m}$.*

Kuvasta nähdään, että maaperän resistiivisyydellä on huomattava vaikutus potentiaalilin leviämiseen homogeeniseen maaperään haudatun puolipalloelektrodin ympäristössä. Kuvaajien väliset erot johtuvat siitä, että erilaisiin maaperiin haudattujen elektrodien maadoitusresistanssit ovat erisuuret. Maavirran ollessa sama kaikissa tapauksissa, vain maadoitusjännite muuttuu. Maadoitusjännitteet eri tapauksissa poikkeavat toisistaan niin merkittävästi, että luettavuuden parantamiseksi kuvaaja on leikattu alkamaan 10 m etäisyydellä elektrodin pinnasta. Todellisuudessa suurempi maadoitusresistanssi rajoittaisi myös jonkin verran maahan tunkeutuvaa virtaa, jolloin erot maadoitusjännitteiden välillä eivät olisi niin suuria kuin kuvan esimerkitapauksessa.

2.3.2 Vaakaelektrodi

Vaakaelektrodi on voimajohtopylväiden maadoittamiseen Suomessa yleisimmin käytetty elektrodityyppi [22]. Vaakaelektrodilla tarkoitetaan maahan upotettua vaakasuoraa johdinta. Vaakamaadoituselektrodin maadoitusresistanssin laskemiseksi on esitetty useita kaavoja. Tässä alaluvussa on esitelty kolme erilaista tapaa laskea vaakamaadoituselektrodin maadoitusresistanssi ja vertailtu kaavoilla saatuja tuloksia.

Yksi tapa laskea vaakamaadoituselektrodin maadoitusresistanssi on määrittää ensin puolipalloelektrodia vastaava ekvivalenttisäde ja sijoittaa se puolipalloelektrodin maadoitusresistanssin laskentakaavaan.

Homogeeniseen maaperään upotetun vaakamaadoituselektrodin ekvivalenttisäde voidaan laskea kaavalla (2.8)

$$r_e = \frac{L}{\ln \frac{4L}{d}} \quad (2.8)$$

missä r_e on vaakamaadoituselektrodin ekvivalenttisäde, L on vaakamaadoituselektrodin pituus ja d on vaakamaadoituselektrodin halkaisija [29, s. 16]. Kun sijoitetaan ekvivalenttisäde puolipalloelektrodin maadoitusresistanssin kaavaan (2.8), saadaan vaakaelektrodin maadoitusresistanssin kaavaksi (2.9)

$$R_m = \frac{\rho}{2\pi r_e} = \frac{\rho}{2\pi \left(\frac{L}{\ln \frac{4L}{d}} \right)} \quad (2.9)$$

Maahan vaakasuunnassa upotetun elektrodin maadoitusresistanssia voidaan arvioida myös seuraavan sarjan avulla (2.10)

$$R_m = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{2L}{r} + \ln \frac{2L}{2h} - 2 + \frac{2h}{L} - \frac{(2h)^2}{4L^2} + \frac{(2h)^4}{32L^4} \dots \right) \quad (2.10)$$

missä R_m on elektrodin maadoitusresistanssi, ρ elektrodia ympäröivän maan resistiivisyys, L elektrodin pituus, r elektrodin säde ja h elektrodin upotussyvyys [5].

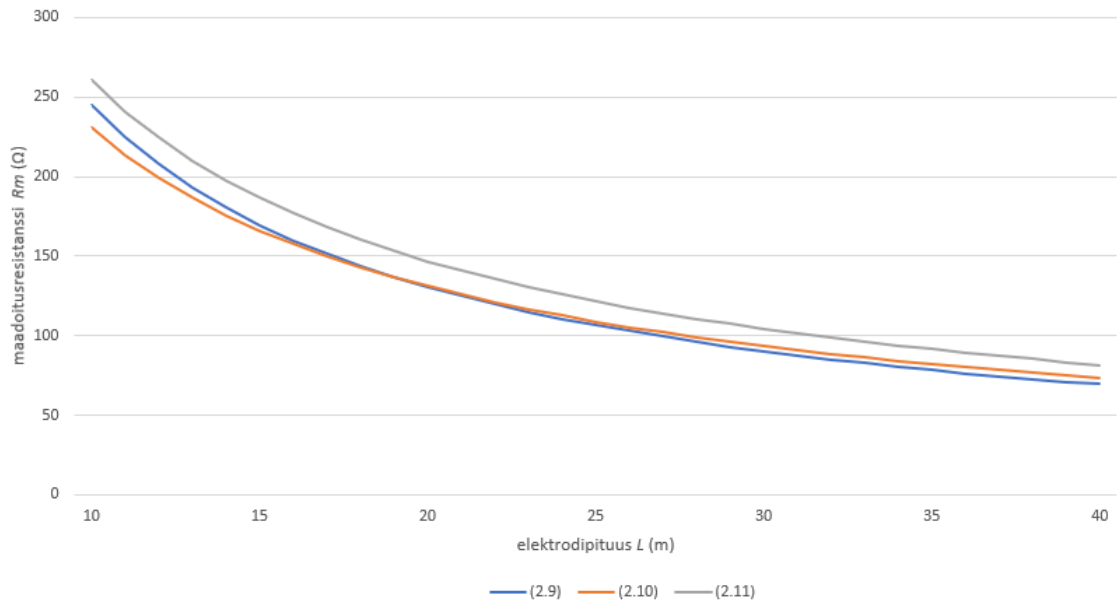
SFS 6001 standardissa on esitetty laskentakaavoja erilaisten elektrodityyppien maadoitusresistanssien laskemiseksi. Standardin SFS 6001 liitteessä *NA Standardin soveltaminen Suomessa* esitetyt kaavat ovat useimmiten riittävän tarkkoja käytännön tarpeisiin. Standardin mukaan maadoitusresistanssi voidaan laskea riittävällä tarkkuudella käyttäen kaavaa (2.11)

$$R_m = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \frac{L^2}{1,85hd} \quad (2.11)$$

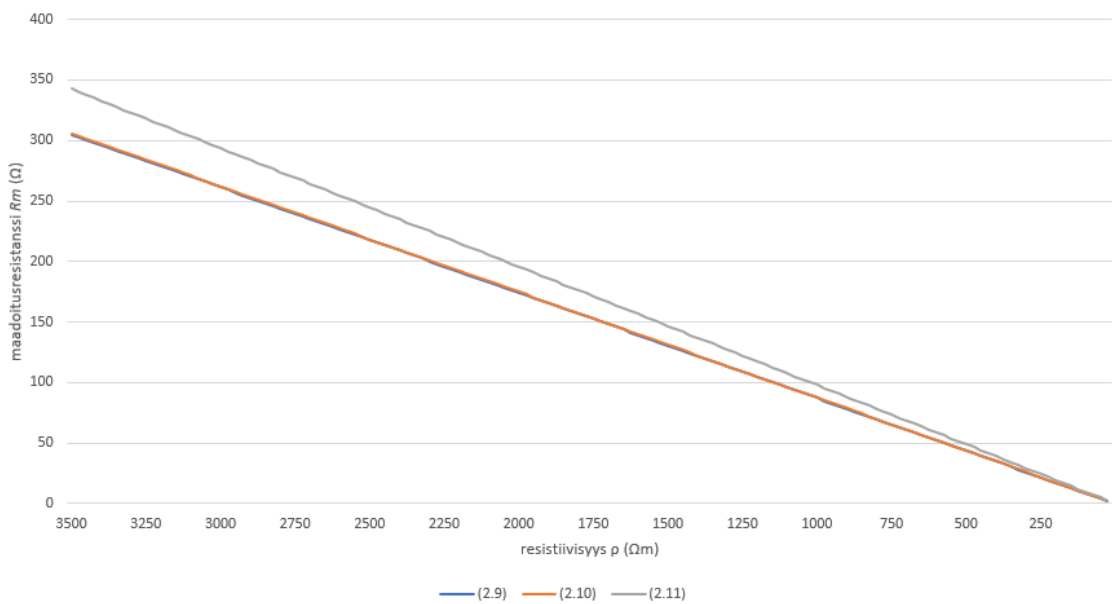
missä R_m on maadoitusresistanssi, ρ elektrodia ympäröivän maan resistiivisyys, L elektrodin pituus, h elektrodin upotussyvyys ja d elektrodin halkaisija [33, s. 148-149].

Kuvassa 5 on edellä esitetyillä kaavoilla saaduista vaakaelektrodien maadoitusresistansseista piirretty kuvaajat elektrodipituuden muuttuessa ja maan resistiivisyyden ollessa 1500 Ωm . Kuvassa 6 taas on muutettu maan resistiivisyyttä elektrodipituuden pysyessä vakiona (20 m). Laskelmissa on käytetty elektrodin upotussyvyytensä 0,7 m ja elektrodin poikkipinta-alana 25 mm². Kuvaajista on selkeyden vuoksi jätetty pois eri elektrodipoikkipinta-aloilla lasketut maadoitusresistanssit. Elektrodin poikkipinta-alan vaikutus maadoitusresistanssiin on kuitenkin hyvin vähäinen. Esimerkiksi 16 mm² elektrodin poikkipinta-alalla lasketut maadoitusresistanssit ovat noin

98 % vastaavien 25 mm² poikkipinta-alalla laskettujen elektrodien maadoitusresistansseista.



Kuva 5. Maadoitusresistanssi elektrodipituuden funktiona eri laskentakaavoilla, kun $\rho=1500 \Omega\text{m}$ ja $A=25 \text{ mm}^2$.



Kuva 6. Maadoitusresistanssi resistiivisyyden funktiona eri laskentakaavoilla, kun $L=20 \text{ m}$, $h=0,7 \text{ m}$ ja $A=25 \text{ mm}^2$.

Kuvaajista voidaan nähdä, että ekvivalenttisäteen avulla (2.9) ja kaavalla (2.10) lasketut maadoitusresistanssit ovat lähes samat kaikilla elektrodipituuksilla ja maan resistiivisyyksillä laskettuna. SFS 6001:ssä esitetyllä kaavalla (2.11) lasketut maadoitusresistanssit ovat taas jonkin verran suuremmat kaikilla elektrodipituuksilla ja

resistiivisyyksillä. Erot eivät ole erityisen suuria, mutta kuitenkin huomattavia. Maan resistiivisyyden ollessa $3500 \Omega\text{m}$, kaavalla (2.11) laskettu maadoitusresistanssi on noin 13 % suurempi kuin kaavoilla (2.9) ja (2.10) lasketut maadoitusresistanssit. Ero pienenee maan resistiivisyyden mukana. Kuvasta 5 voidaan havaita myös, että mitä lyhyempi elektrodi on, sitä suurempi vaikutus on lisätyllä elektrodipituudella ja lisätyn elektrodipituuden vaikutus on vähäinen 40 m jälkeen.

Koska SFS 6001:n liite NA on luonteeltaan velvoittava ja siinä esitetyllä kaavalla lasketut maadoitusresistanssit ovat suurempia kuin muilla kaavoilla lasketut maadoitusresistanssit, on perusteltua käyttää SFS 6001:n mukaisia laskentakaavoja maadoitusten suunnittelussa. Näin ollaan niin sanotulla ”turvallisella puolella”.

2.3.3 Pystyelektrodi

Maahan pystysuunnassa upotetuilla elektrodeilla, eli pystyelektrodeilla on tiettyjä etuja vaakaelektrodeihin verrattuna:

- Pystyelektrodien vaikutusalue vaakasuunnassa on pienempi, joten vian aiheuttama potentiaali leviää pienemmälle alueelle.
- Samalla kuparimäärällä saavutettava maadoitusresistanssi on pienempi pystyelektrodilla kuin vaakaelektrodilla.
- Pystyelektrodit eivät ole alttiina katkeamiselle esimerkiksi maankaivun tai salaojituksen seuraksena ja niitä on vaikeampi varastaa.
- Pystyelektrodeilla on vaakaelektrodeja paremmat suurtaajuusominaisuudet [37, s. 74].

Pystyelektrodien käyttö voimajohtopylväiden maadoitukseen on kuitenkin Suomessa harvinaisempaa johtuen usein kallioisesta tai kivikkoisesta maaperästä. Toisaalta paikoissa, joissa on asfaltoituja teitä, asutusta, rautateitä tai muita vaakaelektrodin asennusta hankaloittavia rakenteita, pystyelektrodi voi olla ainoa vaihtoehto. Pystyelektrodeja käytetään huomattavasti enemmän tiheimmin asutuissa maissa, joissa asutus, tiet, rautatiet ym. ovat voimajohdon tiellä useammin kuin Suomessa. Maadoitusolosuhteista johtuen Suomessa joudutaan yleensä asentamaan suurempia määriä kuparia hyväksyttävän maadoitusresistanssin saavuttamiseksi.

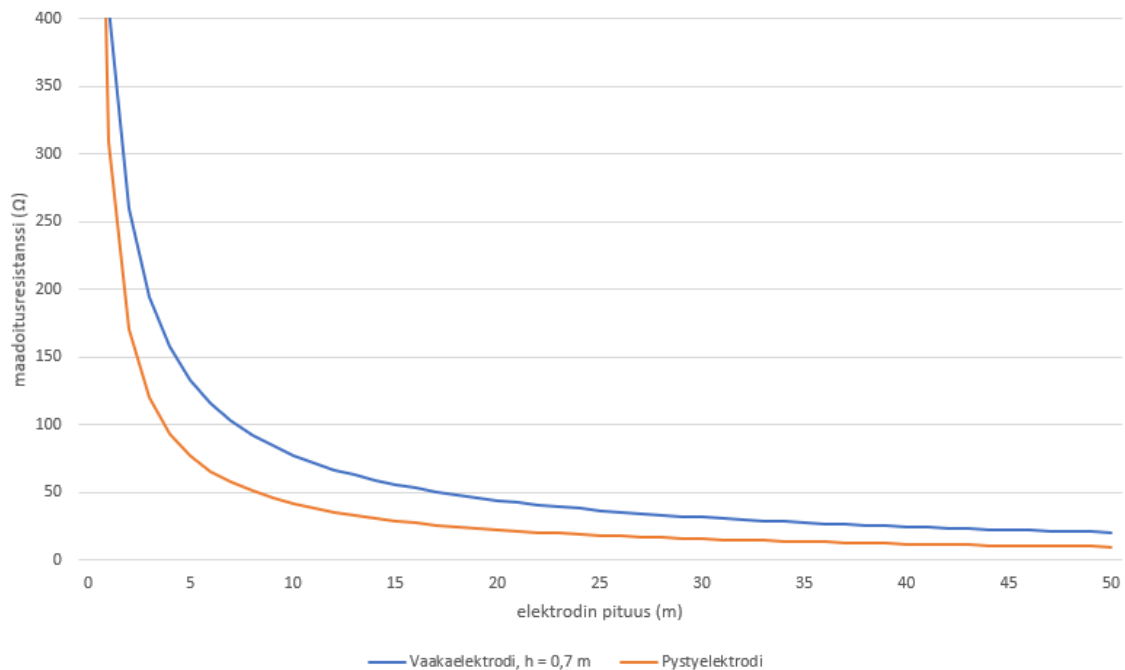
Standardin SFS 6001 mukaan pystyelektrodin maadoitusresistanssi voidaan maadoitusta suunniteltaessa laskea kaavalla (2.12)

$$R_m = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \frac{4L}{1,36d} \frac{2h+L}{4h+L} \quad (2.12)$$

missä R_m on pystyelektrodin maadoitusresistanssi, ρ elektrodia ympäröivän maaperän resistiivisyys, L elektrodin pituus, d elektrodin halkaisija ja h elektrodin upotussyvyys. Toinen usein esitetty kaava pystyelektrodin maadoitusresistanssin laskemiseksi on kaava (2.13) [38, s. 15][37]

$$R_m = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \left(\frac{4L}{r} - 1 \right) \right) \quad (2.13)$$

Kuvassa 7 on esitetty vaaka- ja pystyelektrodeilla saavutettavat maadoitusresistanssit eri elektrodipituuksilla. Maadoitusresistanssit on laskettu standardin SFS 6001 kaavoilla (2.11) ja (2.12). Maan resistiivisyyden on oletettu olevan 500 Ωm , pystyelektrodin upotussyvyyden on oletettu olevan sama kuin sen pituus ja vaakaelektrodin syvyyden on oletettu olevan 0,7 m.



Kuva 7. Vaakaelektrodin ja pystyelektrodin maadoitusresistanssit eri elektrodipituuksilla, $\rho = 500 \Omega\text{m}$.

Kuvasta nähdään, että standardin SFS 6001 kaavoilla laskettuna pystyelektrodin maadoitusresistanssi on huomattavasti pienempi kuin vaakaelektrodin vastaavalla pituudella saavutettava maadoitusresistanssi. Esimerkiksi 5 m pituisella pystyelektrodilla saavutettava maadoitusresistanssi on noin 75 Ω , kun vastaavalla vaakaelektrodilla maadoitusresistanssi on noin 130 Ω . Pidemmällä elektrodeilla ero on suhteellisesti vielä

suurempi. Esimerkiksi 30 m pitkällä pystyelektrodilla saavutettava maadoitusresistanssi on noin 15Ω ja vastaavalla vaakaelektrodilla saavutettava maadoitusresistanssi on noin 31Ω .

Pystyelektrodin upottaminen esimerkiksi 30 m syvyyteen on kuitenkin useimmissa tapauksissa kohtuuttoman vaikeaa saavutettavaan hyötyyn nähden. Todellisuudessa saavutettava maadoitusresistanssi ei myöskään välttämättä ole läheskään niin hyvä kuin kaavalla (2.12) laskettu maadoitusresistanssi. Varsinkin Suomen olosuhteissa, lähelle maan pintaa ulottuva kallio vaikeuttaa elektrodin upottamista ”äärimmäisiin” syvyyksiin. Syvemmällä sijaitsevan kallion resistiivisyys on myös hyvin suuri, jolloin maadoitusresistanssi todellisuudessa harvoin pienenee kaavan (2.12) ennustamalla tavalla, vaikka maadoituselektrodi sinne upotettaisiinkin.

Pystymaadoitusten käyttö on ollut ennen hyvin yleistä, mutta nykyään niitä käytetään jostain syystä melko vähän [22]. Yksi syy pystymaadoitusten vähenemiseen voi olla se, että niiden kuntoa ei voida tarkastaa kaapelitutkan avulla samalla tavalla kuin vaakamaadoitusten. Pystymaadoituselektrodit voisivat kuitenkin olla hyvä ratkaisu esimerkiksi pylväillä, joille tehdään paaluperustukset. Fingridin maadoituksia koskevassa ohjeessa [39] on määritelty, että tällaisilla pylväillä vähintään 2 perustuspaalun mukana tulee maahan upottaa maadoituselektrodit. Niitä ei kuitenkaan huomioida pylvään maadoitusresistanssin laskennassa. Paaluperustuksia tehdään tavallisesti pylväille, jotka sijaitsevat huonosti kantavassa maaperässä, kuten suolla tai savimaalla. Tällaiset paikat ovat otollisia maadoittamisen kannalta ja niissä voitaisiin maadoitusresistanssin tavoitearvo monesti saavuttaa pelkillä perustuspaalujen mukana upotettavilla pystyelektrodeilla.

2.3.4 Muut elektrodityypit

Vaikka vaakaelektrodi ja pystyelektrodi ovat voimajohdoilla yleisimmin käytetyt elektrodityypit, voidaan maadoitusjärjestelmä joskus joutua toteuttamaan monimutkaisempia elektrodiratkaisuja käyttäen. Esimerkiksi ruudukon muotoinen elektrodirakenne on hyvin yleinen etenkin sähköasemien maadoittamisessa. Ruudukon muotoon asennetuilla elektrodeilla pyritään myös potentiaalintasausvaikutukseen ruudukon alueella ja näin voidaan estää vaarallisten askel- ja kosketusjännitteiden syntyminen, kun ruudukko on riittävän tiheä. Voimajohdoilla potentiaalintasaukseen käytetään tavallisesti renkaan muotoisia elektrodeja, jotka asennetaan maadoitettavan rakenteen, kuten pylväsjalan ympärille. Taulukossa 3 on esitetty erimuotoisten elektrodien maadoitusresistanssien laskentakaavoja.







Taulukko 3. Eri maadoituselektrodityyppien laskentakaavoja [33, s. 148].

elektrodityyppi	laskentakaava	huom.
pallo pinnassa	$R_m = \frac{\rho}{\pi d}$	
levy pinnassa	$R_m = \frac{\rho}{\pi d}$	$s \ll d$
pystysuora tanko tai putki pinnassa	$R_m = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \frac{4L}{1,36d}$	$d \ll L$
upotettu pystysuora tanko tai putki	$R_m = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \frac{4L}{1,36d} \frac{2h + L}{4h + L}$	$d \ll L$
vaakasuora johdin pinnassa	$R_m = \frac{\rho}{\pi L} \ln \frac{2L}{1,36d}$	$d \ll L$
upotettu vaakasuora johdin	$R_m = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \frac{L^2}{1,85hd}$	$d \ll 4h$
ruudukko	$R_m = \frac{\rho}{2d} + \frac{\rho}{L}$	

Taulukon kaavat ovat yksinkertaistuksia ja sisältävät oletuksia, mutta ne ovat kuitenkin tarkkuudeltaan riittäviä käytännön tarpeisiin. Maadoitusresistanssin laskeminen absoluuttisen tarkasti on yksinkertaisimmissakin tapauksissa usein käytännössä mahdotonta, johtuen lukuisista maadoitusresistanssiin vaikuttavista muuttujista ja epävarmuustekijöistä, kuten maaperän epähomogeenisuudesta ja sääolosuhteista, jotka vaikuttavat maan resistiivisyyteen ja sitä kautta myös maadoitusresistanssiin.

Taulukkoon 4 on koottu erimuotoisilla elektrodeilla saavutettavia maadoitusresistansseja suhteutettuna vaakaelektrodin maadoitusresistanssiin. Taulukon arvoja laskettaessa on kaikkien vaakaelektrodien upotussyvyudeksi oletettu 0,7 m, maaperän on oletettu olevan homogeenista ja maan resistiivisyys on kaikissa tapauksissa yhtä suuri. Taulukon 4 arvoja tulkitaan siten, että jos esimerkiksi 60 m pitkällä vaakaelektrodilla saavutetaan 100 Ω maadoitusresistanssi, renkaan muotoisella elektrodilla, jonka kehän pituus on 60 m, saavutetaan 108 Ω maadoitusresistanssi.

Taulukko 4. Samalla elektrodipituudella saavutettava maadoitusresistanssi suhteessa vaakasuoran elektrodin maadoitusresistanssiin [33, s. 149].

pituus L/m	20	60	200	600
muoto	Maadoitusresistanssin suhde vaakasuoran johtimen			
	100	100	100	100
0,2 m	133	144	155	159
 2 m	109	123	135	143
20 m	92	98	109	119
	103	103	102	102
	116	115	114	112
	109	108	107	106
	159	158	154	148

Taulukosta nähdään, että vaakaelektrodi on hyvin tehokas elektrodi verrattuna muihin elektrodityyppeihin. Taulukon elektrodityypeistä vain kaksi rinnakkain asennettua vaakaelektrodia on tehokkaampi maadoitustapa kuin yksittäinen vaakaelektrodi. Kahden rinnakkain asennetun vaakaelektrodin tapauksessakin on edellytyksenä, että elektrodit ovat riittävän etäällä toisistaan, ja että yhteenlaskettu elektrodipituus ei ole liian suuri. Tämän takia, mikäli kahta vaakaelektrodia käytetään, pyritään ne sijoittamaan joko eri puolille pylvästä tai johtokadun vastakkaisille reunoille.

2.4 Voimajohtojen erityispiirteet maadoittamisen kannalta

Voimajohtoihin liittyy joitakin erityispiirteitä, jotka tekevät voimajohtojen maadoittamisesta, sekä niiden mittaamisesta paikoin haastavampaa kuin muiden maadoitusten. Tällaisia erityispiirteitä ovat mm. suuret vikavirrat, eri pylväiden maadoitukset yhdistävät ukkosjohtimet ja suuritaajuiset salamavirrat.

2.4.1 Suuret vikavirrat

Sähköverkon maadoitustapa vaikuttaa olennaisesti verkossa esiintyvien maasulkuvirtojen suuruuteen. Suomen kantaverkossa 400 kV ja 220 kV verkot ovat

tehollisesti maadoitettuja ja 110 kV verkko on pääasiassa osittain maadoitettu. Verkon maadoitustavasta johtuen, vikavirrat ovat pääasiassa hyvin suuria. [40, s. 9]

Siirtoverkossa tyypillinen vikavirta yksivaiheisessa maasulussa on 110 kV verkossa noin 3,0 kA luokkaa, kun 400 kV verkossa vikavirta voi yksivaiheisessa maasulussa olla jopa 12 kA. Suurten vikavirtojen vuoksi voimajohtojen maadoitukset ovat usein melko laajoja. [8]

2.4.2 Ukkosjohtimet ja reduktio

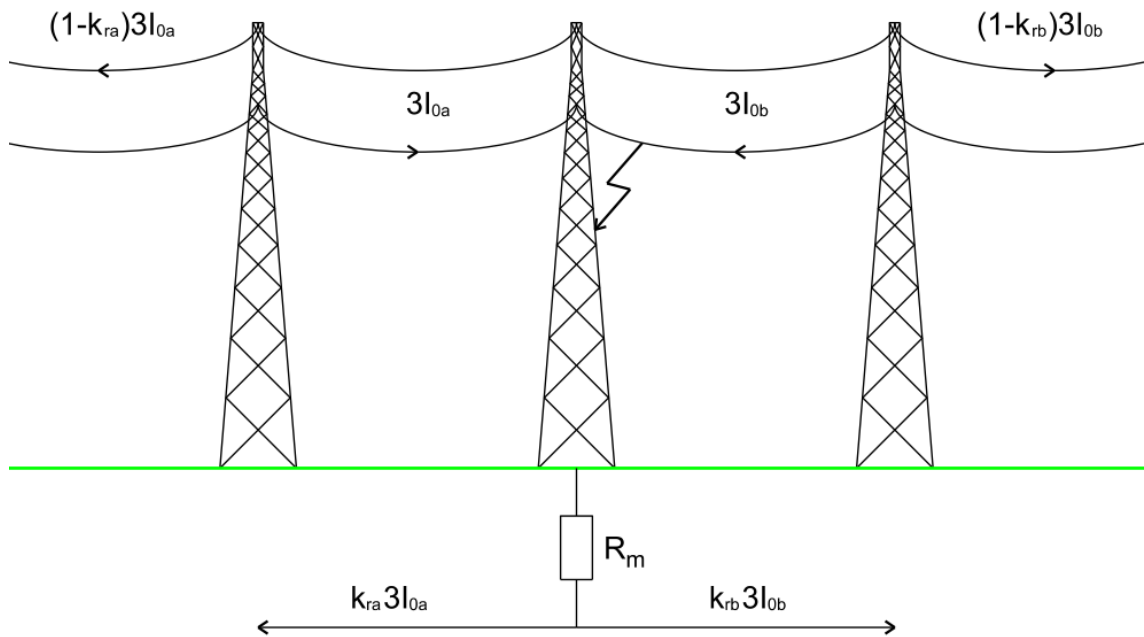
Suomessa rakennettaville uusille voimajohtoille asennetaan käytännössä aina ukkosjohtimet, joiden tehtävänä on suojata vaihejohtimia suorilta salamaniskuilta ja pienentää vikatilanteessa maahan tunkeutuvaa virtaa reduktiovaikutuksen avulla. Reduktio on ilmiö, jossa ukkosjohtimiin indusoituu vaihejohtimien summavirrasta riippuvainen, mutta vastakkaissuuntainen virta. Reduktiovaikutuksen ansiosta osa maasulkuvirrasta palaa maan sijaan ukkosjohtimia pitkin aiheuttamatta maapotentiaalin nousua. Ukkosjohtimet myös yhdistävät rinnakkaiset pylvää ja niiden maadoitukset toisiinsa parantaen resuloivaa maadoitusimpedanssia. Ukkosjohtimien ansiosta vikavirta ei kulje vain yhden pylvään maadoitusten kautta, vaan vikavirta jakautuu useammalle pylvääle. Toisaalta ukkosjohtimellisella johdolla vika näkyy maadoitusjännitteenä ja maapotentiaalin nousuna useammalla pylväällä. [15, s. 8-9]

Voimajohdon normaalikäytössä reduktiosta on lähinnä haittaa, koska ukkosjohtimiin indusoituvat virrat aiheuttavat häviöitä ja häiriöitä. Maasulkutilanteessa ukkosjohtimiin indusoituu virta, joka pienentää resuloivaa maahan tunkeutuvaa virtaa. [16, s. 43]

Ukkosjohtimellisilla johdoilla maahan tunkeutuvan virran suuruuteen vaikuttaa vikapylvään maadoitusresistanssi, ukkosjohtimien reduktiokerroin ja ukkosjohtimien välityksellä vikapylvään rinnalle kytkeytyvien muiden pylväiden maadoitusresistanssit. Reduktiokerroin on maavirran ja nollavirtojen summan osamaara (2.14)

$$k_r = \frac{I_e}{3I_0} \quad (2.14)$$

missä k_r on reduktiokerroin, I_e on maavirta ja $3I_0$ on nollavirtojen summa. Yksivaiheista maasulkutilannetta ukkosjohtimilla varustetulla johdolla on havainnollistettu Kuvassa 8.



Kuva 8. Yksivaiheinen maasulku ja vikavirran jakautuminen ukkosjohtimellisella johdolla.

Kuvasta nähdään, miten eri syöttösuunnista tulevat vikavirrat $3I_{0a}$ ja $3I_{0b}$ jakautuvat maasulussa olevalla pylväällä reduktiokertoimien k_{ra} ja k_{rb} mukaan.

Reduktiokertoimen suuruuteen vaikuttavat ukkos- ja vaihejohtimien materiaali sekä niiden välinen geometria. Hyvin johtavilla ukkosjohtimilla on suurempi reduktiovaikutus – siis pienempi reduktiokerroin – kuin huonosti johtavilla ukkosjohtimilla. Ukkosjohtimien tyypillä onkin suurin vaikutus reduktiokertoimen suuruuteen, mutta myös pylväsrakenteella, eli vaihe- ja ukkosjohtimien välisellä keskinäisellä geometrialla, on vaikutusta. Reduktiovaikutus on sitä voimakkaampi, mitä lähempänä toisiaan vaihe- ja ukkosjohtimet sijaitsevat. [15]

Taulukossa 5 on esimerkkejä reduktiokertoimista yleisesti käytetyillä ukkosjohtimilla ja pylväsrakenteilla. Taulukon arvot on laskettu tietokoneohjelmistolla, jota Eltel käyttää reduktiokertoimien määrittämiseen voimajohtojen suunnittelussa. Ohjelmistossa on tietoja eri ukkos- ja virtajohtimien ominaisuuksista. Ohjelmistoon syötetään vaihe- ja ukkosjohtimien tyypit ja niiden sijainnit kaksiulotteisessa koordinaatistossa, joiden perusteella ohjelma laskee ukkosjohtimien reduktiokertoimen ja impedanssin kilometriä kohti. Vaihe- ja ukkosjohtimien väliset etäisyydet ovat Eltelin tyyppipylväiden mukaisia.

Taulukko 5. Ukkosjohtimien reduktiokertoimet ja impedanssit eri pylväsrakenteilla, $f=50$ Hz.

ukkosjohtimet	pylvästyyppi	reduktiokerroin	impedanssi (Ω/km)
Fe52	1T	0,93	1,96+j1,05
Sustrong	1T	0,49	0,21+j0,66
Fe52	1H	0,93	1,96+j1,03
Sustrong	1H	0,45	0,21+j0,63

Nähdään, että Fe52- ja Sustrong -ukkosjohtimien reduktiokertoimilla ja impedansseilla on suuri ero pylvästyypin vaikutuksen ollessa vähäisempi. T-pylväsrakenteessa Fe52 -teräsjohtimilla reduktiokerroin on noin 0,93 Ω , kun samassa pylväessä Sustrong -teräsalumiinijohtimilla reduktiokerroin on noin 0,49 Ω . Maasulkutilanteessa esimerkiksi 110 kV voimajohdolle jokseenkin tyypillisellä 3500 A vikavirralla, Fe52 -ukkosjohtimilla varustetun johdon maadoitusten kautta maahan tunkeutuva virta olisi 1540 A suurempi kuin Sustrong -ukkosjohtimilla varustetulla johdolla.

Ukkosjohtimien lisäksi myös muilla voimajohdon kanssa yhdensuuntaisilla metallisilla rakenteilla on reduktiovaikutusta. Esimerkiksi rinnalla kulkevien voimajohtojen ukkosjohtimet, junaradat ja metalliset vesi- tai kaasuputket lisäävät reduktiota. Vaihejohtimien alle voidaan asentaa myös erillinen niin kutsuttu reduktiojohdin, jonka tehtävä on ainoastaan pienentää maahan tunkeutuvaa virtaa, eikä suojata vaihejohtimia salamaniskuilta.

2.4.3 Maadoitukset suurilla taajuuksilla

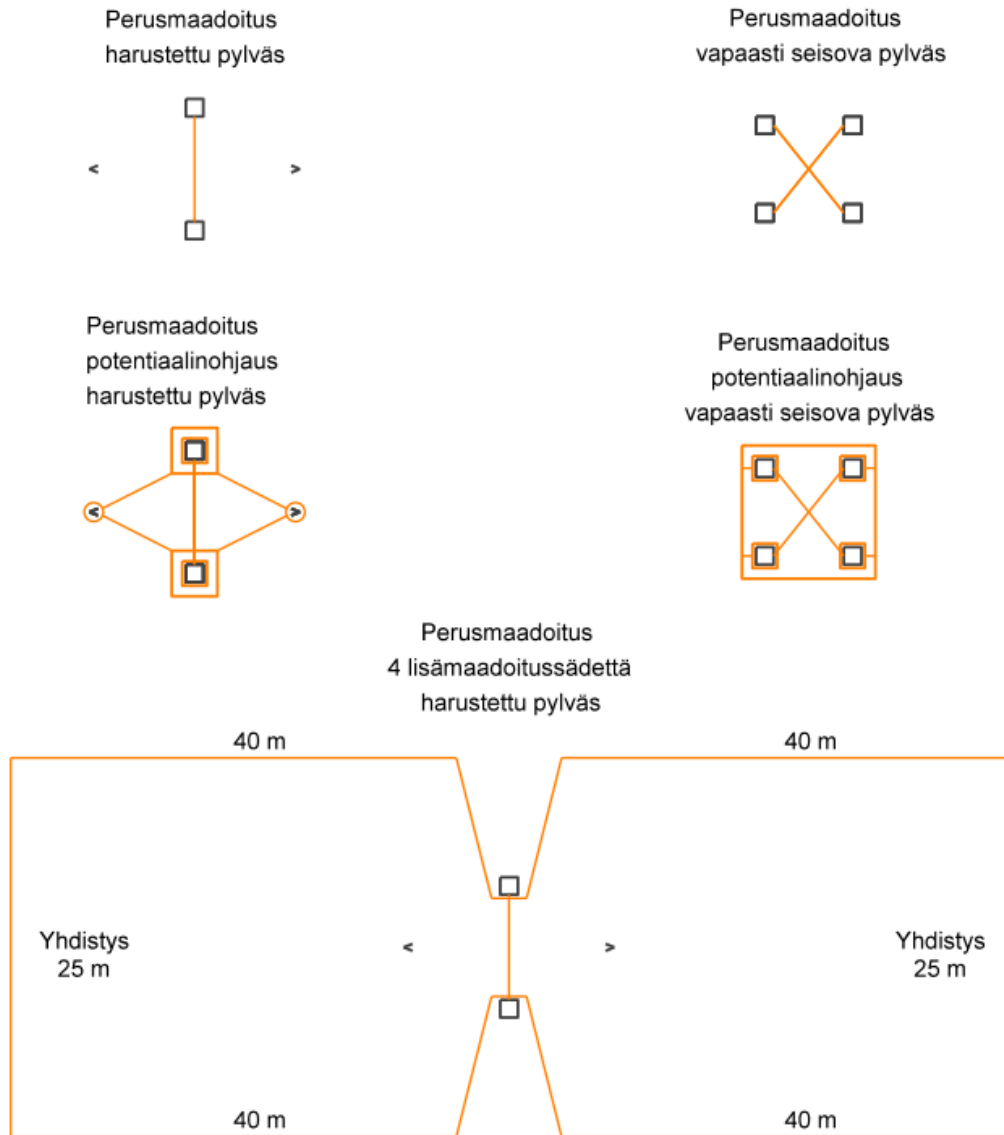
Salamaniskusta syntyvän syöksyaallon kohtaamaa resistanssia kutsutaan ekvivalenttiresistanssiksi. Ekvivalenttiresistanssi ei ole yhtä suuri kuin käyttötaajuisen virran kohtaama maadoitusresistanssi. Maassa sijaitsevan johtimen eli maadoituselektrodin aaltoimpedanssi on noin 170 Ω . Syöksyaallon nopeus samassa johtimessa on noin 100 m/ μs [17, s. 9]. Maadoituselektrodin osat ehtivät vaikuttaa resistanssiin vasta edestakaisen aallon kulkuajan jälkeen, jolloin maadoituselektrodin osan etäisyydellä syöksyaallon injektio pisteestä on vaikutusta syöksyaallon kohtaamaan resistanssiin. [16, s. 49-50]

Salaman iskiessä elektrodi käyttäytyy alkuhetkellä kuin se olisi noin 170Ω vastus, ja vastusarvo pienenee, kun elektrodin kauempana sijaitsevat osat niin sanotusti ”ehtivät mukaan”. Tiettyä pistettä kauempana sijaitsevat elektrodin osat eivät siis ehdi lainkaan mukaan, eivätkä näin ollen vaikuta ekvivalenttiresistanssiin. Maajohtimessa syöksyaallon etenemisnopeuden ollessa noin $100 \text{ m}/\mu\text{s}$ eivät 50 m kauempana sijaitsevat elektrodin osat ehdi vaikuttaa syöksyaallon kohtaamaan resistanssiin. Salamasuojauksen kannalta onkin siis parempi käyttää maadoittamiseen useampaa rinnakkaista maadoituselektrodia kuin yhtä pitkää maadoituselektrodia. Esimerkiksi, jos tavoiteltava maadoitusresistanssi saavutettaisiin asentamalla yksi 100 m pitkä vaakaelektrodi, on syöksyaallon kohtaaman resistanssin kannalta järkevämpää asentaa kaksi 50 m pitkää vaakaelektrodia. [16][17][37, s. 74]

2.5 Pylväsmaadoitukset

Pylväsmaadoitusten tehtävä on estää salamaniskuista aiheutuneiden takaiskujen syntyminen parantamalla syöksyaallon injektioitumista maahan, mahdollistaa maasulkusuojauksen toiminta sekä pienentää vian aiheuttamia maadoitus-, kosketus- ja askeljäännitteitä pylväällä. Imatran Voimassa tutkittiin vuonna 1975, miten ukkosjohtimet ja pylväsmaadoitukset vaikuttavat johdon ukkoshäiriöiden määrään. Tutkimuksessa todettiin, että ukkosjohtimilla varustetun maadoittamattoman johdon ukkoshäiriöiden määrä on noin kaksinkertainen ukkosjohtimilla ja pylväsmaadoituksilla varustetun johdon ukkoshäiriöiden määrään verrattuna. Standardeissa ei suoranaisesti aseteta vaatimuksia maadoituksille salamasuojauksen kannalta, vaan salamasuojauksen tarkka määrittely kuuluu projektispesifikaation piiriin. [15, s.2-3]

Voimajohtojen pylväsmaadoitukset koostuvat tyypillisesti perusmaadoituksesta sekä mahdollisista lisämaadoituksista ja kosketusjännitteiden pienentämiseksi tarkoitetuista potentiaalinojauselektrodeista. Perusmaadoitus koostuu pylvään perustuksista, perustuksien alla sijaitsevista niin kutsutuista J-lenkeistä sekä pylväsjalat yhdistävistä kupariköysistä. Pylvään perustusten muodostamaa maadoitusresistanssia kutsutaan pylvään luonnolliseksi resistanssiksi R_l . Lisämaadoituksia asennetaan tyypillisesti silloin, kun luonnollinen resistanssi on suurempi kuin maadoitusresistanssin tavoitearvo R_t . Lisämaadoitukset ovat käytännön syistä yleensä maahan upotettuja vaakamaadoituselektrodeja tai joissain tapauksissa pystyelektrodeja. Erittäin huonosti johtavassa maaperässä voidaan joutua asentamaan pylväältä toiselle ulottuvia niin kutsuttuja läpimeneviä elektrodeja. Kuvassa 9 on esitetty tyypillisiä Suomessa käytettäviä pylväsmaadoituksia. [6, s. 435][41][39]



Kuva 9. Yleisiä voimajohtopylväiden maadoittamiseen käytettyjä elektrodirakenteita.

Kuten kuvasta nähdään, pylväsmaadoitusten teossa pyritään salamasuojusominaisuuden vuoksi välttämään yli 40 m pituisia lisämaadoitussäiteitä, ja rinnakkaiset elektrodit sijoitetaan yli 20 m etäisyydelle toisistaan. Rinnakkaiset elektrodit yhdistetään tavallisesti päistä toisiinsa, jolloin saavutetaan hieman parempi maadoitusresistanssi ja luotettavuus. Näin maadoituselektrodi voi katketa yhdestä kohdasta esimerkiksi salaojituksen seurauksena maadoitusresistanssin vielä kärsimättä merkittävästi. Potentiaalinhjauselektrodien tarkoitus on pienentää pylväällä esiintyviä kosketusjännitteitä, mutta etenkin harustettujen pylväiden tapauksessa ne laajentavat pylvään maadoituksen vaikutusaluetta ja parantavat maadoitusresistanssia jonkin verran. Pylväsmaadoitukset voivat siis olla melko laajoja ja suhteellisen monimutkaisia muodoiltaan. Maadoitusjärjestelmän laajuus ja monimutkainen muoto ovat molemmat maadoitusresistanssin mittaamista hankaloittavia tekijöitä.

3. VAARA- JA HÄIRIÖJÄNNITTEET

Voimajohdon aiheuttamia vaarallisia tai haitallisia jännitteitä kutsutaan vaarajännitteiksi. Vaarajännitteitä voi syntyä voimajohdon normaalikäytössä, mutta tavallisesti vaarajännitteillä tarkoitetaan voimajohdon vikatilanteessa syntyviä vaarajännitteitä.

Sähköturvallisuuslain sähkölaitteita ja -laitteistoja koskevien yhteisten vaatimusten 6 § mukaan: ” Sähkölaitteet ja -laitteistot on suunniteltava, rakennettava, valmistettava ja korjattava niin sekä niitä on huollettava ja käytettävä käyttötarkoituksensa mukaisesti niin, että:

1. niistä ei aiheudu kenenkään hengelle, terveydelle tai omaisuudelle vaaraa;
2. niistä ei sähköisesti tai sähkömagneettisesti aiheudu kohtuutonta häiriötä;
3. niiden toiminta ei häiriinny helposti sähköisesti tai sähkömagneettisesti.

Jos sähkölaitte tai -laitteisto ei täytä 1 momentissa säädettyjä edellytyksiä, sitä ei saa saattaa markkinoille, luovuttaa toiselle eikä ottaa käyttöön.” [42]

Standardeissa SFS-EN 50341-1 ja SFS-EN50341-2-7 sekä Viestintäviraston määräyksessä 43 F/2015M on asetettu vaatimukset voimajohdon aiheuttamille vaarajännitteille. Täyttämällä standardien ja Viestintäviraston määräyksen asettamat vaatimukset varmistutaan siitä, että yllä mainitut sähköturvallisuuslain kohdat 1 ja 2 täyttyvät.

Yleisin vikatilanne voimajohdoilla on yksivaiheinen maasulku. Näin ollen voimajohdot suunnitellaankin Suomessa siten, että standardien vaatimukset vaarajännitteiden osalta täyttyvät voimajohdon yksivaiheisessa maasulkutilanteessa. Kaksoismaasulkutilanteessa vikavirran aiheuttama jännite voi olla hyvin korkea, mutta kaksoismaasulun katsotaan olevan niin harvinainen voimajohdoilla, ettei niitä oteta huomioon vaarajännitteitä tarkasteltaessa [43, s. 4].

Tässä luvussa tutustutaan ensin pintapuolisesti vaarajännitteiden eri kytketyymismuotoihin. Sen jälkeen syvennyttään konduktiivisesti kytkettyihin vaarajännitteisiin, sillä maadoituksilla voidaan vaikuttaa erityisesti juuri konduktiivisesti kytkettyihin vaarajännitteisiin. Lopuksi käydään läpi, miten vaarajännitteet käytännössä

huomioidaan voimajohdon maadoitussuunnittelussa ja mikä on maadoitusmittauksien merkitys vaarajännitteiden näkökulmasta.

3.1 Kapasitiivinen ja induktiivinen kytkeytyminen

Johtavan rakenteen, kuten telejohdon tai kaasuputken, kulkiessa voimajohdon lähellä kytkeytyy siihen kapasitiivisesti jännite. Kapasitiivisen kytkeytymisen kautta syntyvän jännitteen suuruuteen vaikuttaa voimajohdon ja johtimen keskinäinen etäisyys ja näiden yhdensuuntaisesti kulkeman matkan pituus. [44]

Maan alle asennetut johtimet eivät ole alttiita kapasitiivisesti kytkeytyville vaarajännitteille, koska johtimen ympärillä oleva maa estää voimajohdon sähkökentän vaikutuksen johtimessa. Sama vaikutus on esimerkiksi telejohtojen armeerauksella. Käytännössä kapasitiivisesti kytkeytyville vaarajännitteille alttiina ovat siis lähinnä ilmassa kulkevat metallivaipattomat johdot ja maan päälle asennetut metalliset putket. [44][27]

Voimajohto synnyttää vaarajännitteitä sitä ympäröiviin metallisiin rakenteisiin myös induktiivisesti voimajohdossa kulkevan virran aikaansaaman magneettikentän välityksellä. Induktiivisesti kytkeytyvien vaarajännitteiden suuruuden määräävät indusoivan virran suuruus, yhdensuuntaisen matkan pituus, sekä voimajohdon ja metallisen rakenteen välinen keskinäisimpedanssi. Keskinäisimpedanssiin vaikuttavat voimajohdon ja induktiokohteen keskinäiset etäisyydet, maan resistiivisyys ja indusoivan virran taajuus.

3.2 Konduktiivinen kytkeytyminen

Voimajohdon suunnittelussa on kaikki vaara- ja häiriöjännitteet otettava huomioon, mutta maadoituksilla voidaan suoraan vaikuttaa erityisesti konduktiivisesti kytkeytyviin, eli suoraan galvaanisen yhteyden kautta välittyviin jännitteisiin.

3.2.1 Maadoitusjännite

Maadoituselektrodin ja kaukaisen referenssimaan välistä potentiaaliero kutsutaan maadoitusjännitteeksi. Normaalitilanteessa maadoituselektrodin potentiaali on hyvin lähellä referenssimaan potentiaalia. Vikatilanteessa maadoituselektrodin kautta maahan tunkeutuva virta, eli maavirta I_e , saa aikaan maadoituselektrodin potentiaalinosuun. Maadoitusjännitteen suuruus riippuu maavirran suuruudesta ja maadoituselektrodin maadoitusresistanssista ja se voidaan laskea kaavalla (3.1)

$$U_e = I_e R_m \quad (3.1)$$

missä U_e on maadoitusjännite, I_e on maavirta ja R_m on vikapylvään maadoitusresistanssi.

Ukkosjohtimettomalla johdolla maadoitusjännite on lähes vaihejännitteen suuruinen, sillä maavirta rajoittaa vain vikapylvään maadoitusresistanssi. Suomessa kuitenkin lähes kaikille johdoille asennetaan ukkosjohtimet, joiden ansiosta yksittäisen pylvään maadoitusten kautta maahan kulkeva virta pienenee. Pienemmän maavirran ansiosta maadoitusjännitteet ukkosjohtimellisen johdon pylväillä ovat huomattavasti alhaisemmat.

3.2.2 Potentiaalini leviäminen

Potentiaalini leviämisellä tarkoitetaan maavirran aikaansaamaa maan potentiaalini nousua voimajohtopylvään ympäristössä. Pylvään maadoituksilla voidaan maadoitusjännitteen lisäksi vaikuttaa merkittävästi potentiaalini leviämiseen pylvään ympäristössä. Homogeenisessa maaperässä potentiaali leviää tasaisesti ja sen mallintaminen on yksinkertaista, mutta epähomogeenisessa maaperässä mallintamisesta tulee haastavampaa.

Ukkosjohtimellisella johdolla potentiaalini leviämistä homogeenisessa maaperässä voidaan mallintaa kaavan (3.2) avulla [6, s. 438]

$$V_P = \frac{\rho}{2\pi} \left| \sum_{j=1}^n (I_{ej} / s_j) \right| \quad (3.2)$$

missä s_j on johdon lähistöllä olevan pisteen P ja pylvään j maadoituksen keskipisteen välinen etäisyys, I_{ej} on pylvään j kautta maahan kulkeva virta, ρ on maaperän resistiivisyys ja n on tarkasteltavien pylväiden lukumäärä.

Yhtälön avulla voidaan päätellä, että huonosti johtavassa maaperässä sijaitsevalla pylväällä tilanne potentiaalini leviämisen kannalta voi huonontua parannettaessa pylvään maadoituksia. Pylväsmaadoituksia parannettaessa pylvään kautta maahan kulkeutuvaa virtaa rajoittava maadoitusresistanssi pienenee, jolloin maavirta pylväällä kasvaa ja pisteen P potentiaali nousee.

Potentiaalini leviäminen voi olla ongelma, kun huonosti johtavassa maaperässä sijaitsevan pylvään läheisyydessä on esimerkiksi pienjänniteverkon osia. Potentiaalini leviäminen pienjännitejärjestelmään voi aiheuttaa vaaratilanteita ja vaurioita. Tällaisissa tapauksissa on sitä parempi, mitä huonompi maadoitus ongelmapylväällä on ja mitä parempi maadoitus rinnakkaisilla pylväillä on. Joskus voi siis olla tarpeen asentaa tarkoituksella "huonot" maadoitukset, jotta vältetään ylisuurten potentiaalini siirtyminen

muihin järjestelmiin. Suurjännitejärjestelmästä pienjännitejärjestelmään siirtyville jännitteille on asetettu raja-arvot standardissa SFS 6001.

Ukkosjohtimettomilla johdoilla pisteen P potentiaaliin vaikuttaa vain vikapylvään maadoitusresistanssi. Tällöin pisteen P potentiaali saadaan laskettua samalla kaavalla (3.2) kuin ukkosjohtimellisella johdolla, mutta muuttujan n arvoksi asetetaan tällöin 1.

Maaperän epähomogeenisuudesta ja monesta muusta epävarmuustekijästä johtuen potentiaalin leviämisen mallinnus matemaattisesti on melko epätarkkaa. Luotettavin tapa potentiaalin leviämisen selvittämiseksi olisi mittaus, mutta se on usein myös hyvin työläs.

Potentiaalin leviämisen laskemiseen on esitetty myös muita, käytännön kokemuksiin perustuvia, kaavoja. Vaara- ja häiriöjännitevaliokunta on mm. esittänyt ohjeessaan VHV-05 [43, s. 12] kaavan (3.3) vikapylvään ympäristön potentiaalin laskemiseksi

$$\frac{V_P}{U_e} = 0,11 \ln \frac{\rho}{s} \quad (3.3)$$

missä V_P on potentiaali pisteessä P, U_e on vikapylvään maadoitusjännite, ρ on maaperän resistiivisyys vikapylvään kohdalla ja s on pisteen P etäisyys pylvästä.

Imatran Voima Oy:ssä tehtiin vuonna 1995 tutkimus [28], jossa koottiin ja analysoitiin mittaustuloksia potentiaalin leviämisestä erilaisilla voimajohtopylväillä. Erilaiset pylväät ryhmiteltiin ukkosjohtimien, maaperäolosuhteiden ja pylväiden maadoitustyyppien mukaan. Tutkimuksessa maapotentiaalien todettiin olevan keskimäärin selkeästi korkeampia kuin VHV:n esittämällä kaavalla (3.3) laskettuna.

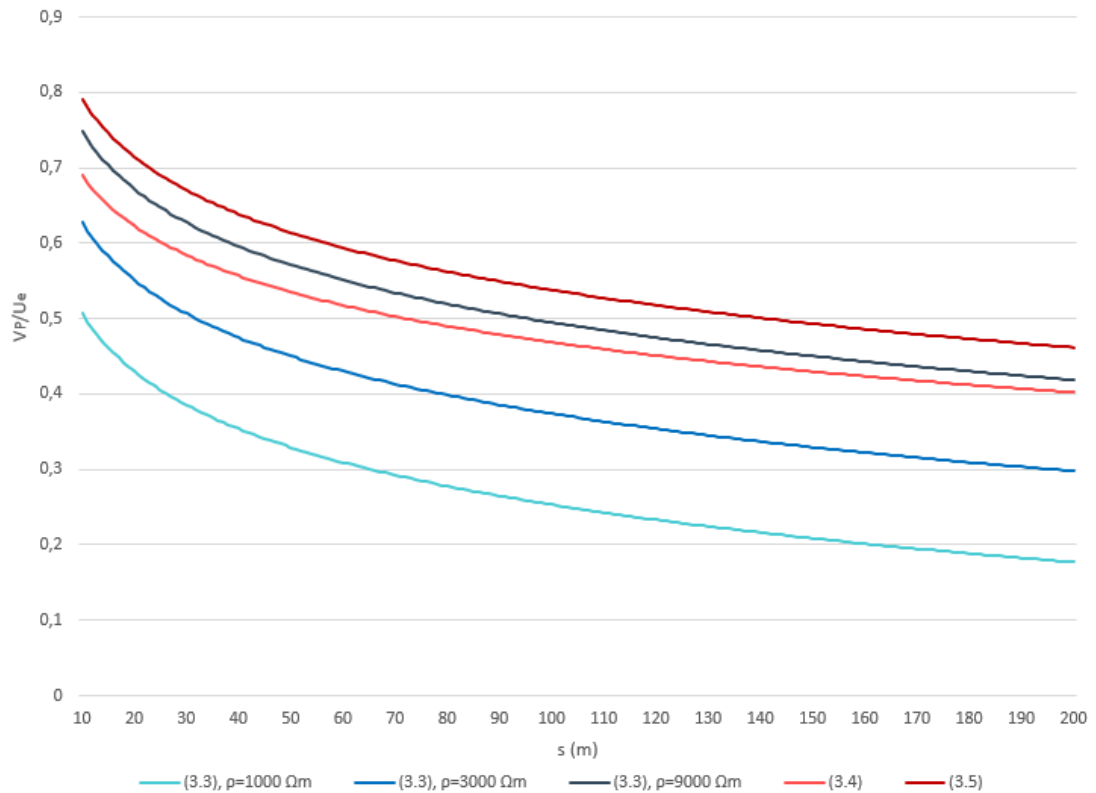
Tutkimusraportissa esitettiin vaihtoehtoiset kaavasovitukset (3.4 ja 3.5) erityyppisillä ukkosjohtimilla varustettujen voimajohtojen maapotentiaalien laskemiseksi. Raportin mukaan kaavaa (3.4) voidaan soveltaa teräsalumiinisilla ukkosjohtimilla varustetuilla johdoilla ja kaavaa (3.5) teräksisillä ukkosjohtimilla varustetuilla johdoilla.

$$\frac{V_P}{U_e} = 0,096 \ln \frac{13200}{s} \quad (3.4)$$

$$\frac{V_P}{U_e} = 0,11 \ln \frac{13300}{s} \quad (3.5)$$

missä s on pisteen P etäisyys vikapylvästä. Kaavoja voidaan soveltaa, kun s_j toteuttaa ehdon $20 \text{ m} \leq s \leq 200 \text{ m}$. Esitetyissä kaavoissa etäisyys maadoituksesta on ainoa muuttuja, ja maan resistiivisyyden paikalla on tutkimuksessa määritetyt vakiot 13200 ja 13300.

Kuvaan 10 on piirretty yllä esitetyillä kaavoilla lasketut maapotentiaalit etäisyyden funktiona. Sinisen sävyisillä viivoilla on esitetty VHV:n esittämällä kaavalla (3.3) lasketut potentiaalit. Potentiaalit on laskettu kolmessa erilaisessa maaperässä: 1000 Ωm , 3000 Ωm ja 9000 Ωm .



Kuva 10. Maan pinnan potentiaali etäisyyden funktiona eri kaavoilla laskettuna.

Kuvasta huomataan, että suhteellisen pienillä resistiivisyyden arvoilla kaavalla (3.3) lasketut maapotentiaalit ovat huomattavasti pienempiä kuin Imatran Voiman tutkimuksessa esitetyillä kaavoilla (3.4 tai 3.5) lasketut potentiaalit. Suurilla resistiivisyyden arvoilla VHV-ohjeessa [43] esitetyllä kaavalla (3.3) lasketut potentiaalit ovat vertailukelpoisia kaavoilla (3.4 ja 3.5) laskettujen potentiaalien kanssa vasta hyvin suurilla resistiivisyysarvoilla (8000...10000 Ωm).

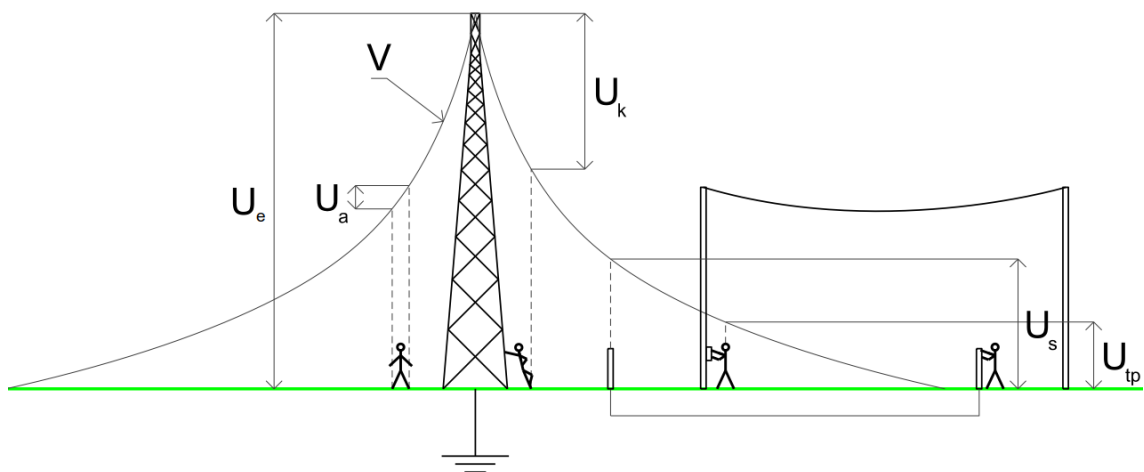
Tutkimustulos voisi olla osoitus siitä, että potentiaalien leviämistä ei voida mallintaa vain pintamaan resistiivisyyden avulla, vaan siihen vaikuttaa myös resistiivisyys syvemmällä maaperässä. Tämä on ristiriidassa yleisen käsityksen kanssa, jonka mukaan juuri pintakerrosten ominaisuudet vaikuttavaisivat potentiaalini leviämiseen [38, s. 9][11].

Suomessa maaperän resistiivisyys on syvemmällä keskimäärin huomattavasti suurempi kuin pintamaassa. Tutkimusaineisto oli kuitenkin melko suppea, koostuen vain 21 pylvään ympäristössä mitatuista potentiaaleista. Arvioitaessa potentiaalini leviämistä

ukkosjohtimellisen johdon ympäristössä, on hyvä huomata, että VHV:n kaavalla (3.3) saadut tulokset voivat olla optimistisia, etenkin hyvin johtavassa maaperässä, todelliseen potentiaalin leviämiseen verrattuna.

3.2.3 Kosketus- ja askeljännitteet

Kosketusjännitteellä tarkoitetaan sitä osaa maadoitusjännitteestä, joka esiintyy ihmiskehossa kosketuskohdan ja maan välillä. Askeljännitteellä tarkoitetaan potentiaaliero, joka esiintyy ihmisen jalkojen välillä askelvälin ollessa 1 m [45, s. 14]. Kosketusjännite voi esiintyä myös niin kutsuttuna takaperoisena kosketusjännitteenä tilanteessa, jossa kosketellaan maasulussa olevan pylvään läheisyydessä jotain maasta eristettyä johdetta, joka on maadoitettu kauempana. Takaperoiselle jännitteelle on olemassa päinvastainen ilmiö, jota kutsutaan siirtyväksi jännitteeksi. Siirtyvä jännite esiintyy maasulussa olevan pylvään läheisyydessä sijaitsevan eristetyn johteen, kuten kaapelin toisessa päässä. Eri tavoilla esiintyviä ihmiselle vaarallisia vaarajännitteitä on havainnollistettu Kuvassa 11, jossa V on maan potentiaali, U_e maadoitusjännite, U_k kosketusjännite, U_a askeljännite, U_s siirtyvä jännite ja U_{tp} takaperoinen kosketusjännite.



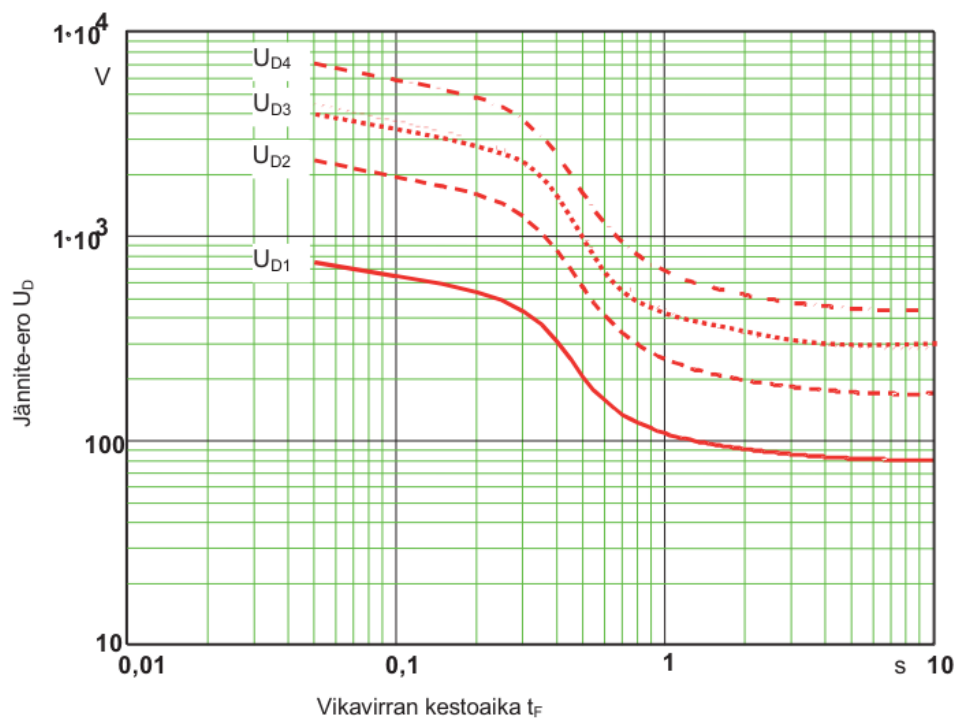
Kuva 11. Kosketus- ja askeljännitteen eri esiintymismuodot, perustuu lähteeseen [6, s. 429].

Kuvassa 11 on esitetty myös niin kutsuttu potentiaalisuppilo, joka muodostuu pylvään ympärille, kun potentiaalin leviämistä kuvaavista yhtälöistä hahmotellaan kuvaaja, jossa x-akselilla on etäisyys maadoituksen keskipisteestä ja y-akselilla on maan potentiaali.

Voimajohdoilla sovelletaan Suomessa standardeja SFS-EN 50341-1 ja SFS-EN 50341-2-7. Näissä standardeissa on esitetty voimajohdon suojamaadoitusvaatimukset ja raja-arvot kosketusjännitteille. Askeljännitteelle ei Suomessa sovellettavissa standardeissa

anneta raja-arvoja, mutta arvioitaessa askeljännitteen aiheuttaman kammiovärinän todennäköisyys, on se askeljännitteen tapauksessa pienempi kuin kosketusjännitteen aiheuttaman. Tästä syystä oletetaan, että vaarallisia askeljännitteitä ei esiinny, jos kosketusjännitevaatimukset täyttyvät. Voimajohdon pylvään sallitun kosketusjännitteen raja-arvo riippuu pylvään sijaintipaikasta ja vian kestoajasta. Kosketusjännitteen raja-arvot ovat alhaisempia esimerkiksi paikoissa, joissa ihmiset oleskelevat säännöllisesti, tai joissa voidaan olettaa ihmisten oleskelevan paljain jaloin. Korkeampia kosketusjännitteitä voidaan sallia paikoissa, joissa voidaan olettaa ihmisten käyttävän kenkiä, tai joissa ihmisten voidaan olettaa oleskelevan vain satunnaisesti. [31, s. 204-208]

Kosketusjännitteen sallitut arvot eri vian kestoajoilla erilaisissa sijaintipaikoissa saadaan Kuvan 12 käyristä. Kosketusjännitteiden sallitut arvot perustuvat virtaan I_B , joka aiheuttaa ihmiskehon kautta kulkiessaan 5 % todennäköisyydellä sydänkammiovärinän [6, s. 440][46, s. 45].



Kuva 12 Kosketusjännitteen sallitut arvot erilaisissa sijaintipaikoissa vian kestoajan funktiona, lähteestä [31, s. 206].

Peruskäyrän U_{D1} arvot edustavat sallittua kosketusjännitettä paikoissa, joissa ihmiset voivat oleskella paljain jaloin, kuten uimarannat ja leikkikentät. Siinä ei ole otettu huomioon lisäresistanssien, kuten kenkien tai erittäin huonosti johtavan maaperän vaikutusta. Käyrät U_{D2} - U_{D4} edustavat sallittuja kosketusjännitteitä paikoissa, joissa

ihmisten voidaan olettaa käyttävän jalkineita, ja joissa maan resistiivisyys on korkea. [31, s. 206-208]

3.3 Yhteenveto vaara- ja häiriöjännitteistä

Konduktiivisesti kytkeytyvät jännitteet määrittävät suurelta osin voimajohdon vaikutuksen henkilöturvallisuuteen voimajohdon ympäristössä. Valitulla maadoitusratkaisulla voidaan vaikuttaa erityisesti konduktiivisesti kytkeytyviin vaarajännitteisiin.

Voimajohdolle on ennen käyttöönottoa tehtävä henkilöturvallisuuden varmistamiseksi niin kutsuttu vaarajänniteselvitys. Yleisesti vaarajänniteselvitys tehdään osana voimajohdon yleissuunnitteluvaihetta. Osana vaarajänniteselvitystä laaditaan maapotentiaaliraportti, jossa jokaisen pylvään maadoitusjännite ja potentiaalit johdon ympäristössä lasketaan. Laskettuja maadoitusjännitteitä ja maapotentiaaleja verrataan standardien ja määräysten asettamiin raja-arvoihin. Tarvittaessa määritetään suojaustoimenpiteet ympäristön henkilöturvallisuuden ja ympäristössä sijaitsevan omaisuuden turvaamiseksi. Suunnitteluvaiheessa on käytettävissä vain pylväspaikoilta mitatut maan resistiivisyysarvot. Resisttiivisyyden ja maadoitusresistanssin tavoitearvon perusteella on määritetty kullekin pylväälle asennettavien maadoituselektrodien määrä ja sijainti, joiden perusteella määritetään kunkin pylvään maadoitusresistanssi. Maan resistiivisyyden, suunniteltujen maadoitusresistanssien, ukkosjohtimien ominaisuuksien ja vikavirtatietojen perusteella lasketaan maadoitusjännitteet ja maapotentiaalit jokaisella pylväällä. Maan resistiivisyyden tunteminen pylväspaikkojen ympäristössä on siis ehdoton edellytys voimajohdon onnistuneelle suunnittelulle.

Voimajohdon käyttöönoton jälkeen alkaa kunnossapitovaihe. Osana kunnossapittoa voimajohdon pylväät ja maadoitukset tarkastetaan noin 12 vuoden välein. Tarkastuksessa pylväiden kunto tarkastetaan silmämääräisesti ja pylväiden maadoitusresistanssit mitataan. Havainnot kirjataan ylös ja mitattua maadoitusresistanssia verrataan suunniteltuun maadoitusresistanssiin. Toimenpiteisiin ryhdytään, mikäli johdolla havaitaan korjausta vaativia puutteita tai mitatut maadoitusresistanssit ovat merkittävästi huonompia kuin suunnitelmissa. Suunnitteluarvoon verrattuna kaksinkertaista mittausarvoa pidetään merkittävästi huonompana [47].

Maapotentiaalit voivat aiheuttaa ongelmia, vaikka tarkastuksessa ei olisi havaittukaan kunnostusta vaativia puutteita tai merkittävästi suunniteltua huonompia maadoitusresistanssin arvoja. Voimajohto sijoittuu laajalle alueelle ja 12 vuoden aikana

sen ympäristössä on voinut tapahtua paljon vaarajännitteiden kannalta merkittäviä muutoksia. Voimajohdon läheisyyteen on voinut tulla asutusta, pienjänniteverkon osia, vesijohtoja tai muuta sellaista. Myös vikavirtatiedot ovat voineet muuttua suunnittelun jälkeen. Vikavirrat ovat voineet kasvaa tai vian automaattisen poiskytkennän toiminta-aikaa on voitu muuttaa. Näistä syistä vaarajänniteselvitys olisi hyvä päivittää aika ajoin ainakin maapotentiaalien osalta. Usein maapotentiaaliraportti päivitetäänkin kunnossapitotarkastusten jälkeen käyttäen mitattuja maadoitusresistanssien arvoja.

Voimajohdon turvallisuutta tai kunnostustoimenpiteitä määritettäessä ollaan maadoitusresistanssien mittaustulosten varassa. Onkin siis hyvin tärkeää, että maadoitusresistanssia voidaan mitata luotettavasti, ja että maadoitus suunnittelu on tehty oikein. Epärealistisen pienestä maadoitusresistanssin suunnitteluarvosta johtuvat tarpeettomat kunnostustoimenpiteet tai ylimääräinen selvitystyö voivat aiheuttaa merkittäviä kustannuksia. Epäluotettavalla maadoitusresistanssin mittauksella voi olla samat seuraukset. Tarpeelliset investoinnit maadoitusten parantamiseksi voivat jäädä tekemättä, jos maadoitusresistanssien mittauservot ovat todellisia maadoitusresistanssien arvoja pienemmät. Seurauksena voi tässä tapauksessa olla ympäristölleen vaarallinen voimajohto.

4. MAAN RESISTIIVISYYDEN MITTAAMINEN

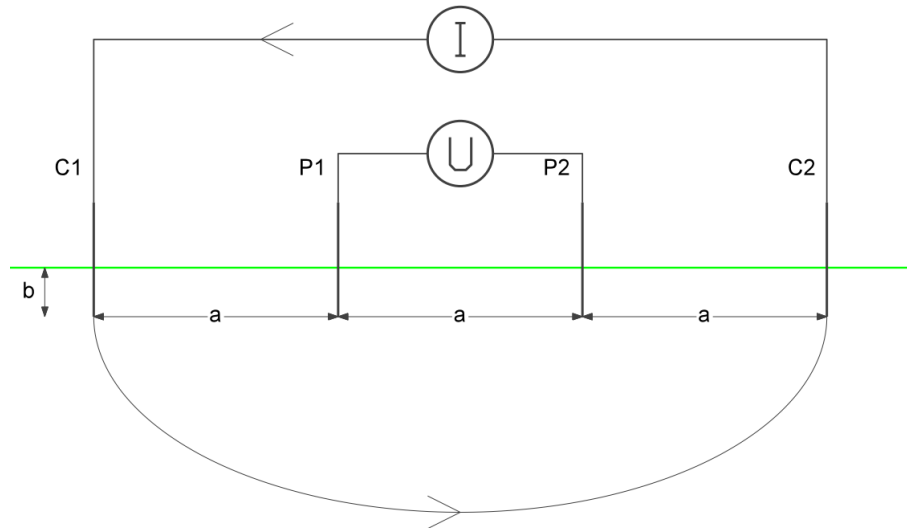
Maan resistiivisyys mitataan voimajohdon suunnitteluvaiheessa, jotta osataan määrittää minkälainen maadoitus kullekin pylväälle tulee asentaa. Maan resistiivisyyden mittaukseen on kehitetty monia menetelmiä. Mittausmenetelmät ovat kuitenkin pääpiirteiltään samankaltaisia. Tavallisesti virtaa syötetään maahan, maan yli vaikuttava jännite mitataan, lasketaan resistanssi ja resistanssin avulla lasketaan maan resistiivisyys. Eroavaisuudet mittausmenetelmien välillä liittyvät virta- ja jännite-elektrodien asetteluun ja siihen, miten resistanssia käytetään resistiivisyyden laskentaan. Yleisimmin käytetty menetelmä on Wenner -menetelmä ja siitä kehitetyt erilaiset variaatiot, kuten Schumberger -menetelmä [1].

Maan resistiivisyys on maadoitussuunnittelun perusta ja maadoitukset määrittävät pitkälti voimajohdon turvallisuuden. Maan resistiivisyyden mittauksen tulee siis olla mahdollisimman luotettavaa. Maa on kuitenkin monimutkainen elementti ja sen resistiivisyyden luotettava ja tarkka mittaaminen on haasteellista, sillä maassa voi olla monia häiriötekijöitä, jotka vääristävät mittaustulosta. Virheellisillä mittaustuloksilla taas voi olla kauaskantoiset seuraukset tarpeettomien kustannusten tai huonon ja vaarallisen maadoitusjärjestelmän muodossa.

Tässä luvussa esitellään maan resistiivisyyden mittausmenetelmiä ja haasteita, joita maan resistiivisyyttä mitattaessa voidaan kohdata, sekä keinoja näiden haasteiden välttämiseksi tai niiden vaikutusten minimoimiseksi.

4.1 Wenner -menetelmä

Kenties käytetyin ja tunnetuin menetelmä maaperän resistiivisyyden mittaukseen on Wenner-menetelmä, jota kutsutaan joskus myös neljän pisteen menetelmäksi. Wenner-menetelmässä neljä elektrodia C1, C2, P1 ja P2 upotetaan maahan samalle suoralle tasaisin välein a syvyydelle b Kuvan 13 mukaisesti.



Kuva 13. Wenner -menetelmän mittauspiiri ja elektrodien asettelu.

Elektrodiin C1 johdetaan virta, joka kulkee maan kautta syvyydellä a elektrodiin C2. Jännite elektrodien P1 ja P2 välillä mitataan ja lasketaan resistanssi

$$R = U/I \quad (4.1)$$

missä R on elektrodien P1 ja P2 välisen maan resistanssi, I on virta ja U resistanssin R yli vaikuttava jännite. Maan resistiivisyys syvyydellä a voidaan nyt laskea kaavalla

$$\rho = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}} \quad (4.2)$$

missä ρ on maaperän resistiivisyys syvyydellä, a on elektrodien välinen etäisyys ja b on elektrodien upotussyvyys. Elektrodiväli a on yleensä vähintään 10-kertainen upotussyvyyteen b verrattuna. Jos upotussyvyys merkitään $b = 0$, yhtälö sievenee muotoon

$$\rho = 2\pi a R \quad (4.3)$$

Luvussa 2.2 todettiin, että maan resistiivisyys voi vaihdella huomattavasti esimerkiksi sääolosuhteista riippuen. Maan resistiivisyyden absoluuttisen tarkka määrittäminen ei siis ole useinkaan tarpeen, sillä maan resistiivisyys muuttuu jatkuvasti ja yksinkertaistettu kaava riittää lähes aina käytännön tarpeisiin. Kun elektrodiväliä a muutetaan, mittausvirta kulkee eri syvyydellä ja saadaan laskettua maan resistiivisyys eri syvyyksillä. On huomattava, että mittaus tuottaa jonkinlaisen keskimääräisen maaperän resistiivisyyden syvyydellä a . Tieto maan resistiivisyydestä eri syvyyksillä auttaa maadoitusjärjestelmän suunnittelussa. Jos esimerkiksi maan pintakerros on huonosti johtavaa ainesta ja syvemmällä on paremmin johtavaa maata,

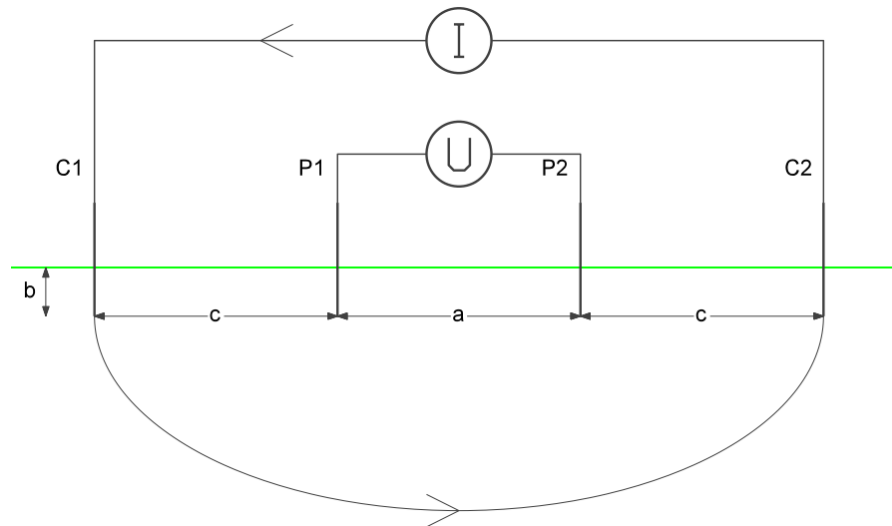
pystymaadoituselektrodeja käyttämällä voidaan aikaansaada parempi maadoitusresistanssi. [38, s. 12][6, s. 454-455]

Suomessa voimajohtojen maadoitus suunnittelua varten mitataan yleensä maan resistiivisyys elektrodiväleillä $a = 1 \text{ m}, 2 \text{ m}, 4 \text{ m}, 8 \text{ m}$ ja 16 m . Maadoituselektrodien mitoituksessa ja maadoitusjärjestelmän maadoitusresistanssin laskennassa käytetään tavallisesti näillä elektrodiväleillä laskettujen resistiivisyyksien keskiarvoa. [22]

Wenner -menetelmää pidetään hyvin luotettavana mittausmenetelmänä, se on helppo ymmärtää ja se on hyvin tunnettu. Wenner -menetelmä ei myöskään vaadi monimutkaista mittauslaitteistoa, vaan on toteutettavissa melko edullisilla ja yksinkertaisilla laitteilla. Ehkäpä näistä syistä menetelmä on niin laajasti käytössä. Toisaalta Wenner -menetelmä on melko työläs, koska mittaaja joutuu siirtämään jokaista elektrodia mittauksien välissä. Tähän ongelmaan vastaamaan on käytetty mm. kevennettyä menetelmää, jossa toinen jännite-elektrodeista pysyy paikallaan ja vain 3 elektrodia siirretään mittauksien välissä. Näin kävelymatka hieman vähenee. Haittapuolena kevennetyissä menetelmässä on, että mittauksen keskikohta siirtyy, mikä aiheuttaa epätarkkuutta mittaustuloksessa. [1]

4.2 Schlumberger -menetelmä

Wenner-menetelmällä mitattaessa potentiaaliero sisempien elektrodien välillä pienenee, kun elektrodien välistä etäisyyttä kasvatetaan. Tämä on ollut ongelmallista etenkin vanhempia mittalaitteita käytettäessä. Uudet mittarit kykenevät kuitenkin mittaamaan hyvin pieniä potentiaalieroja, joten tätä ongelmaa ei nykyaikaisia mittalaitteita käytettäessä ole. Toinen Wenner -menetelmään liitetty ongelma on se, että jokaista elektrodia joudutaan siirtämään mittausten välissä. Osittain näiden ongelmien takia on kehitetty niin kutsuttu Schlumberger-menetelmä maan resistiivisyyden mittaamiseen. Schlumberger -menetelmä on esitetty Kuvassa 14.



Kuva 14. Schlumberger -menetelmän mittauspiiri ja elektrodien asettelu.

Kuvasta nähdään, että menetelmä on hyvin samankaltainen, kuin Wenner -menetelmä. Siinä käytetään myös neljää elektrodia C1, C2, P1 ja P2. Elektrodien C1 ja C2 välissä kulkee virtaa, potentiaaliero elektrodien P1 ja P2 välillä mitataan ja lasketaan resistanssi. Ero Schlumberger -menetelmän ja Wenner -menetelmän välillä on, että Schlumberger -menetelmässä vain virtaelektrodeja C1 ja C2 siirretään, kun jännite-elektrodit P1 ja P2 pysyvät paikallaan koko mittauksen ajan ja niiden välinen etäisyys a on vakio.

Myös Schlumberger menetelmässä mitataan resistanssi, jonka avulla määritetään resistiivisyys. Resistiivisyys ρ lasketaan Schlumberger -menetelmällä mitatuista resistansseista kaavalla (4.4)

$$\rho = \frac{\pi c(c+a)}{a} R \quad (4.4)$$

missä c on virtaelektrodien etäisyys jännite-elektrodeista, a on jännite-elektrodien etäisyys toisistaan ja R on mitattu resistanssi. Kaavalla voidaan laskea resistiivisyys riittäväällä tarkkuudella, kun elektrodien upotussyvyys b on pieni verrattuna jännite-elektrodien välisiin etäisyyksiin ja virtaelektrodien etäisyys c toteuttaa ehdon $c > 2a$. Kaavalla (4.4) saadaan laskettua maan resistiivisyys suunnilleen syvyydessä, joka on yhtä suuri kuin etäisyys mittauspiirin keskipisteestä virtaelektrodiin. Kaavaa tarkastelemalla sekä Kuvia 13 ja 14 vertailemalla saatetaan huomata, että Wenner -menetelmä on itseasiassa Schlumberger -menetelmän erikoistapaus, jossa elektrodivälit a ja c ovat yhtä suuret. [38, s. 13-14][13, s. 240]

Schlumberger -menetelmällä on etuja verrattuna Wenner -menetelmään. Mittausjohtimien ei Schlumberger -menetelmää käytettäessä tarvitse olla yhtä pitkiä. Jos halutaan mitata maan resistiivisyys esimerkiksi 30 m syvyydessä, pisimmän

mittaussjohtimen tulee Schlumberger -menetelmässä olla 30 m, kun taas Wenner -menetelmällä pisimmän mittaussjohtimen tulisi olla vähintään 40 m pitkä. Myös kävely matka lyhenee, kun jokaista elektrodia ei tarvitse siirtää mittausten välissä. Vaatimuksena tosin on, että mittausta suorittavia henkilöitä on vähintään kaksi. Jos mittaaja on yksin, joutuu hän joka tapauksessa kävelemään virtaelektrodilta toiselle siirtäessään näitä. Useimmiten mittausta suorittava henkilö on yksin, joten kävely matkassa ei todellisuudessa juurikaan säästetä.

4.3 Resisttiivisyyden mittaus pystyelektrodin avulla

Maaperän resistiivisyys voidaan määrittää maadoitusresistanssin avulla, kun maadoitusresistanssi on tunnettu. Tässä menetelmässä mitataan pystyelektrodin maadoitusresistanssi ja tämän avulla lasketaan elektrodia ympäröivän maaperän resistiivisyys. Aiemmin esitetystä pystyelektrodin maadoitusresistanssin laskentakaavasta (2.13) saadaan uudelleen järjestelemällä maaperän resistiivisyyden kaava (4.5)

$$\rho = \frac{R_m 2\pi L}{\ln\left(\frac{4L}{r}\right) - 1} \quad (4.5)$$

missä ρ on maaperän resistiivisyys, R_m on pystyelektrodin maadoitusresistanssi, r on sen säde ja L on pystyelektrodin upotussyvyys (pituus). Maadoitusresistanssin mittaus voidaan suorittaa eri pystyelektrodin upotussyvyyksillä, jolloin saadaan laskettua maaperän resistiivisyys eri syvyyksillä. Tietojen avulla voidaan päätellä minkälaista maaperämallia maadoitussuunnittelussa tulee käyttää. [38, s. 15]

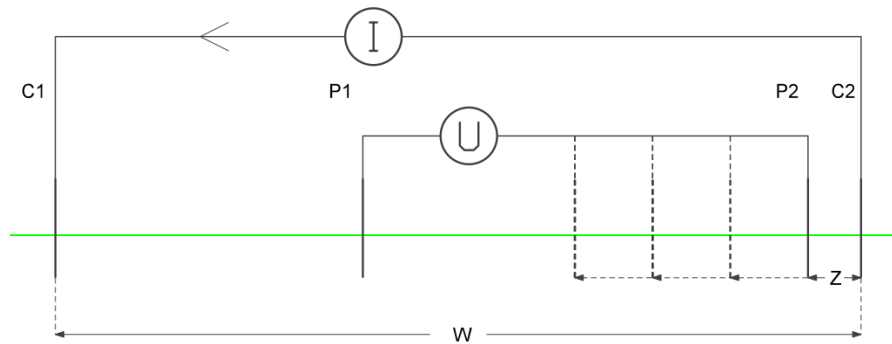
Menetelmällä saadaan mitattua maaperän resistiivisyys vain pystyelektrodin vaikutusalueella ja esimerkiksi Wenner- ja Schlumberger -menetelmillä saadaan mitattua resistiivisyyttä huomattavasti suuremmalta alueelta. Pystyelektrodin upottaminen suuriin syvyyksiin voi myös olla hyvin työlästä ja aikaa vievää. Tässäkin suhteessa muut menetelmät, kuten Wenner ja Schlumberger ovat parempia. Wenner- ja Schlumberger -menetelmillä voidaan mitata maaperän resistiivisyyttä suurissa syvyyksissä huomattavasti helpommin kuin syvyyden muutosmenetelmällä. Menetelmän käyttö voisi tulla kyseeseen paikassa, jossa ei ole tilaa mittaaselektrodeille. Tällöin pystyelektrodin maadoitusresistanssin mittaaminen voi kuitenkin muodostua ongelmaksi.

4.4 Boys -menetelmä

Tässä työssä tutustutaan Wenner-, Schlumberger-, ja pystyelektrodi -menetelmien lisäksi niin kutsuttuun Boys -menetelmään, joka on nimetty kehittäjänsä Philip Boysin

mukaan. Menetelmä on melko uusi. Menetelmää käsittelevä tutkimusraportti julkaistiin vuonna 2016. [1]

Boys-mittaus voidaan suorittaa samaa mittauskalustoa käyttäen kuin Wenner- ja Schlumberger -mittaukset. Menetelmä on myös neljän elektrodin menetelmä, jossa on kaksi virtaelektrodia ja kaksi jännite-elektrodia. Erona on kuitenkin, että Boys -menetelmässä vain yhtä elektrodia siirretään. Mittauspiiri on esitetty Kuvassa 15.



Kuva 15. Boys-menetelmän mittauspiiri ja elektrodien asettelu.

Boys -menetelmässä oletetaan, että paikallaan pysyvän jännite-elektrodin ympärillä resistanssikäyrä on symmetrinen. Homogeenisessa maaperässä sijaitsevien identtisten elektrodien tapauksessa näin myös on [3]. Schlumberger -menetelmän kaavaa muokkaamalla saadaan Boys -menetelmän kaava (4.6)

$$\rho = \frac{2(R_{\text{mitt}} - R_{\text{ref}})\pi Z(W - Z)}{W - 2Z} \quad (4.6)$$

missä R_{ref} on kuvitteellisen resistanssikäyrän arvo kohdassa, joka vastaa liikkuvan jännite-elektrodin sijaintia, Z on virtaelektrodin ja siirtyvän jännite-elektrodin välinen etäisyys ja W virtaelektrodien välinen etäisyys.

Menetelmää käsittelevässä tutkimuksessa [1] verrattiin Boys -menetelmää ja Wenner -menetelmää matemaattisesti ja käytännön mittauksien valossa. Matemaattisessa vertailussa verrattiin kullakin menetelmällä laskettuja resistiivisyyksiä erilaisilla maaperämalleilla. Matemaattisen vertailun perusteella menetelmillä saatuja resistiivisyyksisarvoja ei voida suoraan verrata keskenään, mutta sovittamalla tuloksista käyrät saatiin molemmilla menetelmillä käytännössä samat tulokset. Käytännön mittauksia suoritettiin kolmessa eri kohteessa ja niidenkin perusteella Boys-menetelmällä saadut tulokset olivat vertailukelpoisia Wenner-menetelmällä saatujen tulosten kanssa.

Raportissa esitetään, että mittaukseen kuluva aika on noin puolet Wenner -menetelmään verrattuna. Tämä, vertailukelpoiset mittaustulokset ja se, ettei menetelmä vaadi erityisiä mittalaitteita tekevät Boys -menetelmästä hyvin kiintoisan, kun tavoitteena on maadoitusmittausprosessin kehittäminen. Mittaukseen kuluvan ajan puolittuessa voidaan samassa ajassa mitata resistiivisyys esimerkiksi suunnitellun pylvään molemmilta puolilta, jolloin maadoitus suunnittelijalla on huomattavasti paremmat lähtötiedot pylväsmaadoitusten suunnitteluun.

4.5 Haasteet maan resistiivisyyden mittaamisessa

Maan resistiivisyyttä mitattaessa tulee pyrkiä minimoimaan virhetekijöiden vaikutus. Mittausvirheet voivat johtua ulkoisista aiheuttajista tai ne voivat aiheutua inhimillisten tekijöiden seurauksena. Ulkoiset aiheuttajat voidaan jakaa passiivisiin ja aktiivisiin virheen aiheuttajiin. [38, s. 18]

Passiiviset virheen aiheuttajat tarjoavat mittausvirralle vaihtoehdoisen reitin maan sijaan. Ne muokkaavat mittausvirran aiheuttamaa potentiaalın nousua maaperässä. Maaperän resistiivisyydmittauksissa mitataan mittausvirran aiheuttamaa potentiaalın nousua, jonka avulla lasketaan resistanssi. Mittaustulos vääristyy, kun mittausvirta kulkee maan sijaan esimerkiksi maassa olevan metallisen putken kautta. Passiivisista aiheuttajista johtuva virhe voidaan minimoida mittaamalla resistiivisyys siten, että ”mittaussuora” on kohtisuoraan virheen aiheuttajaa vasten. Mittaajalla tulisi olla tieto maassa sijaitsevista metallisista rakenteista, jotta hän voi suunnitella oikean mittaussuunnan. [38, s. 8, 18-19]

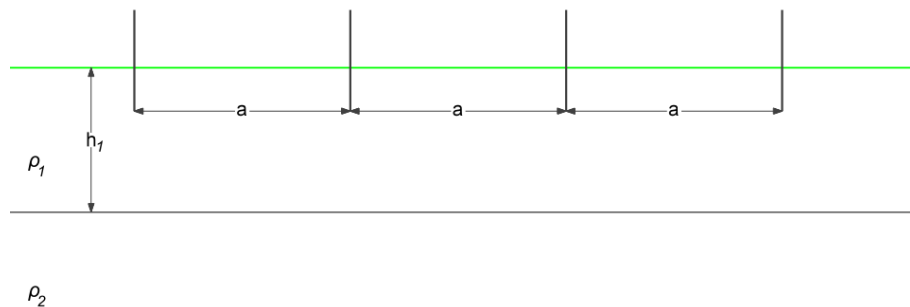
Aktiiviset virheen aiheuttajat tuovat mittauspiiriin ylimääräisiä virtoja ja jännitteitä. Esimerkiksi rinnalla kulkeva voimajohto voi indusoida mittajohtimiin ylimääräisen jännitteen, joka vääristää mittaustulosta. Virhettä voivat aiheuttaa myös maassa kulkevat hajavirrat, jotka summautuvat mittausvirtaan vääristäen mittaustulosta. Rinnakkaisista järjestelmistä indusoituvien jännitteiden minimoimiseksi mittaussuunnan tulisi olla kohtisuoraan rinnakkaisia indusioivia sähköjohtoja vasten. Voimajohdosta saattaa indusoida mittajohtimeen vaarallinen latausjännite, jos mittajohdin kulkee voimajohdon rinnalla pitkän matkan ja voimajohdossa kulkee suuri virta. [38, s. 18-19]

Maan resistiivisyyttä mittaavalla henkilöllä tulisikin olla hyvä perusymmärrys mittaamenetelmän toimintaperiaatteesta ja virhettä aiheuttavista tekijöistä, jotta mittaaminen olisi luotettavaa, tehokasta ja turvallista.

4.6 Maaperämalli

Kun maaperän resistiivisyys eri syvyyksillä on mitattu, tulisi määrittää sellainen maaperämalli, joka parhaiten vastaa todellisuutta. Voimajohtojen maadoitussuunnittelussa on ollut yleisenä käytäntönä, että maaperä oletetaan homogeeniseksi ja sen resistiivisyys saadaan eri piikkiväleillä saatujen resistiivisyyksien keskiarvona [22][7]. Tiedetään kuitenkin, että maaperän resistiivisyys vaihtelee usein huomattavasti etenkin pystysuunnassa. Maaperän oletaminen homogeeniseksi voi siis johtaa virheelliseen maaperämalliin ja sitä kautta virheelliseen maadoitussuunnitteluun.

Maaperän mallintaminen niin kutsutun kaksikerrosmallin avulla antaa usein riittävän tarkan kuvan maaperästä [38, s. 14]. Kaksikerrosmallissa maaperän ajatellaan jakautuneen kahteen päällekkäiseen, vaakasuunnassa homogeeniseen maakerrokseen kuten Kuvassa 16.



Kuva 16. Kaksikerrosmallin parametrit Wenner -menetelmän mukaisella elektrodien asettelulla.

Kuvassa nähdään kaksikerrosmallin parametrit ρ_1 , ρ_2 ja h_1 . Wenner-menetelmällä mitattujen resistiivisyyksien ja mittauksessa käytettyjen elektrodivälien a avulla voidaan laskea kaksikerrosmallin mukainen näennäinen resistiivisyys kaavalla (4.7)

$$\rho_a = \rho_1 \left(1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{K^n}{\sqrt{1 + \left(\frac{2nh_1}{a}\right)^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{4 + \left(\frac{2nh_1}{a}\right)^2}} \right) \right) \quad (4.7)$$

missä ρ_1 on pintakerroksen resistiivisyys, K on heijastuskerroin ja h_1 on pintakerroksen paksuus. Kaksikerrosmallin parametrit ρ_1 , ρ_2 ja h_1 ovat tuntemattomia ja ne täytyy määrittää iteratiivisesti. Tähän on kehitetty erilaisia menetelmiä. [38, s.50-52][14][21]

Kun tuntemattomat parametrit ρ_1 ja ρ_2 on määritetty, voidaan heijastuskerroin laskea kaavalla (4.8)

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (4.8)$$

jossa K on heijastuskerroin, ρ_1 on pintakerroksen resistiivisyys ja ρ_2 on alemman kerroksen tai syvämaan resistiivisyys. Nyt kaikki kaavan (4.7) tekijät tunnetaan ja voidaan laskea näennäinen resistiivisyys ρ_a .

Heijastuskertoimen arvo antaa myös kuvan maaperän ominaisuuksista ja siitä, miten maahan johdettu virta käyttäytyy. Heijastuskertoimen kaavasta nähdään, että pintamaan ollessa paremmin johtavaa maa-ainesta, heijastuskerroin saa positiivisia arvoja. Jos taas pintamaa on huonosti johtavaa ainesta ja syvemmällä on paremmin johtavaa maata, heijastuskerroin saa negatiivisia arvoja. Homogeenisessa maaperässä heijastuskerroin on 0. Heijastuskertoimen itseisarvo on sitä suurempi mitä suurempi ero maaperän kerroksien resistiivisyyksien välillä on. Maahan tunkeutuva virta kulkee siis lähempänä maan pintaa heijastuskertoimen ollessa positiivinen ja hakeutuu syvemmälle maaperään, kun heijastuskerroin on negatiivinen.

4.7 Yhteenveto maan resistiivisyyden mittaamisesta

Maaperän mallintaminen 1, 2, 4, 8 ja 16 m elektrodiväleillä mitattujen resistiivisyyksien keskiarvon avulla ei välttämättä anna riittävää kuvaa maadoitusresistanssin laskemista ja potentiaalin leviämisen mallintamista varten. Yleisesti käytetty ja useimmissa tapauksissa riittävän tarkaksi malliksi todettu kaksikerrosmalli voisi olla parempi tapa mallintaa maaperää. IEEE:n ohjeessa [38] on todettu, että maadoitusresistanssi on pääasiassa riippuvainen syvempien maakerrosten resistiivisyydestä. Tässä yhteydessä syvemmällä kerroksella tarkoitetaan syvyyttä, joka on samaa luokkaa kuin vaakaelektrodijärjestelmän laajuus tai pystyelektrodin tapauksessa jopa 10 kertaa elektrodin upotussyvyys [38, s. 9].

Myös Southey ja Dawalibi toteavat tutkimuksessaan [23], että maan resistiivisyyden mittauksessa käytettävän maksimielektrodivälin tulisi riippua maadoituksen laajuudesta. Tutkimuksessa laskettiin maadoitusverkon todelliset maadoitusresistanssit sekä kosketus- ja askeljäännitteet erilaisissa kaksikerrosmaaperissä. Arvot laskettiin myös Wenner -menetelmän tuottaman resistiivisyyden mukaan eri maksimielektrodiväleillä. Lopuksi verrattiin todellisia arvoja mittaustulosten perusteella laskettuihin arvoihin. Tulosten perusteella kosketus- ja askeljäännitteiden kannalta riittävän tarkka maaperämalli voidaan määrittää Wenner -menetelmällä mitatuista resistiivisyyksistä, kun maksimielektrodiväli on samaa luokkaa maadoitusverkon laajuuden kanssa. Maadoitusresistanssin kannalta riittävän tarkan maaperämallin määrittämiseksi tulisi resistiivisyys tutkimuksen mukaan mitata maksimielektrodivälillä, joka on noin 3 kertaa maadoitusverkon laajuus. He toteavat myös, että maaperän resistiivisyyden

määrittämiseksi joltain syvyydeltä, tulee elektrodivälin a olla moninkertainen tähän syvyyteen verrattuna. Elektrodivälin tulee olla vieläkin suurempi maaperässä, jossa pintakerros on paremmin johtavaa kuin alemmat kerrokset. Suomessa näin usein on. [23]

Suomessa voimajohtopylväille tehdään normaalisti vähintään perusmaadoitus. Perusmaadoitus on esimerkiksi 110 kV voimajohdon harustetun pylvään tapauksessa vähintään noin 10 m pituinen vaakaelektrodi pylväsalkojen välillä. Lisämaadoitussäteiden käyttö on haastavien maadoitusolosuhteiden vuoksi hyvin yleistä ja pylväsmaadoitus voi hyvinkin olla laajuudeltaan jopa 100 m luokkaa. Tällöin noin 16 m syvyydeltä mitattu resistiivisyys ei olisi missään nimessä riittävä, vaan resistiivisyys tulisi mitata noin 100 m elektrodivälillä. Resisttiivisyyden mittaaminen 100 m elektrodivälillä tarkoittaisi Wenner-menetelmää käytettäessä, että pisimpien mittajohtimien tulisi olla 150 m pitkiä. Lisäksi pylväsapaikalta tulisi myös löytää noin 300 m pitkä esteetön alue, jossa mittaus suoritettaisiin. Mittaus veisi tällöin huomattavasti enemmän aikaa kuin Eltelin nykyisen ohjeistuksen ja käytäntöjen mukaan suoritettu mittaus.

5. MAADOITUSRESISTANSSIN MITTAAMINEN

Standardin SFS 6001 velvoittavan *liitteen M* [33, s. 132] mukaan laajan maadoitusjärjestelmän ulkopuolella olevien suurjänniteasennusten maadoitusresistanssit on laskettava tai mitattava järjestelmällisesti ennen asennuksen vastaanottoa. Laajan maadoitusjärjestelmän sisäpuolella maadoitusjärjestelmän perussuunnitelman katsotaan olevan riittävä, eikä SFS 6001 -standardissa velvoiteta näiden maadoitusten maadoitusresistanssien mittaamista. SFS 6001 -standardi kuitenkin velvoittaa todentamaan mittaamalla, että ”yksittäiset maadoitukset on yhdistetty laajaan maadoitusjärjestelmään”.

Vastaanoton jälkeen suurjännitesähköaseman maadoitusresistanssi suositellaan mitattavan 6-12 vuoden välein [33, s. 145-146][26, s. 140]. Voimajohtojen maadoitusten mittauksille ei ole niitä koskevissa standardeissa annettu suositusaikaväliä, mutta yleinen käytäntö on mitata voimajohdon pylväiden maadoitusresistanssit noin 12 vuoden välein. Mittaukset voidaan tehdä voimajohdon jokaisella pylväällä tai vain osalla pylväistä riippuen voimajohdon haltijasta.

Tässä luvussa esitellään maadoitusresistanssin mittaamiseen käytettäviä menetelmiä ja haasteita, joita voimajohdon maadoitusresistanssia mitattaessa usein kohdataan. Pääpaino on Eitelissä käytössä olevissa menetelmissä. Lopuksi pohditaan maadoitusresistanssin onnistuneen mittauksen edellytyksiä.

5.1 Käännepistemenetelmä

Kenties tunnetuin ja yleisimmin käytetty maadoitusresistanssin mittaamenetelmä on käännepistemenetelmä. Käännepistemenetelmä on kompensatioperiaatteeseen perustuva mittaamenetelmä, jossa mitataan suoraan resistanssiarvoja siirrettävän apuelektrodin ja mitattavan maadoituksen välillä. Mitatuista arvoista piirretään käyrä, jonka vaakasuorasta osasta saadaan mitattavan maadoituselektrodin tai elektrodijärjestelmän maadoitusresistanssi. [26, s. 141]

Mittauksessa mittarin sisäinen virtalähde syöttää virtaa mitattavaan maadoituselektrodiin. Virta kulkee maan kautta virta-apuelektrodiin, josta se kulkee takaisin virtamittariin. Mitattavan elektrodin ja virta-apuelektrodin väliin sijoitetun jänniteapuelektrodin ja mitattavan elektrodin välille syntyy potentiaaliero. Mittari

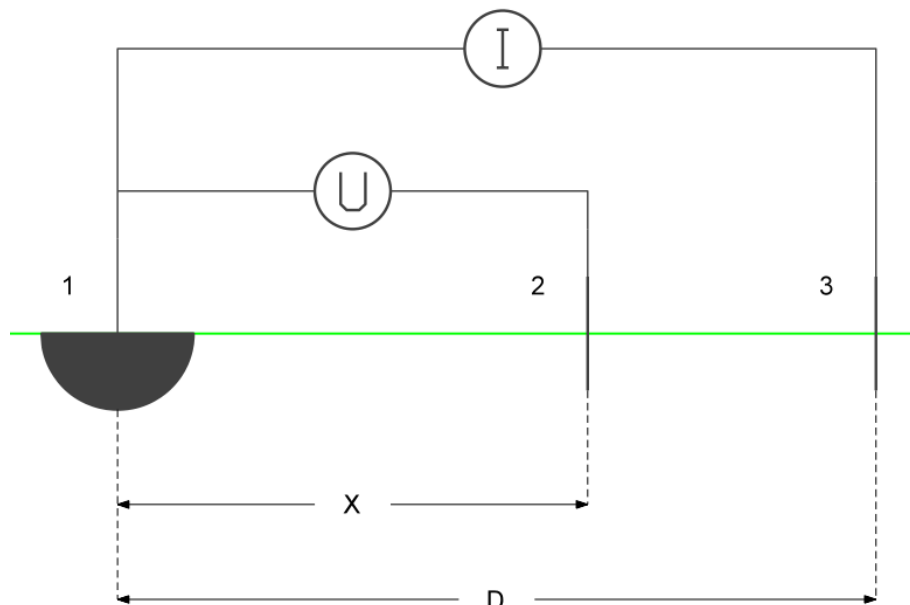
palauttaa maadoitusresistanssin arvon, kun mittarin sisäinen siltakytkentä saavuttaa tasapainon. [26, s. 140-142]

Monet muut mittausmenetelmät pohjautuvat käänne pistemenetelmään ja ovat itse asiassa perinteisen käänne pistemenetelmän variaatioita. Käänne pistemenetelmän teoria pätee monen mittausmenetelmän tapauksessa ja samoja haasteita kohdataan muita mittausmenetelmiä käytettäessä.

5.1.1 Käänne pistemenetelmän teoria

Tarkastellaan käänne pistemenetelmän teoriaa ensin homogeeniseen maaperään sijoitetun puolipalloelektrodin tapauksessa, sillä se on paitsi maadoitusresistanssin laskennan myös maadoitusresistanssin mittauksen kannalta matemaattisesti helpoin elektrodityyppi mallintaa. Aikaisemmin on kuitenkin todettu, että voimajohtopylväiden maadoitukset ovat usein muodoiltaan monimutkaisempia ja sijaitsevat harvoin homogeenisessa maaperässä. Toisaalta on myös todettu, että monimutkaisempia maadoitusjärjestelmiä voidaan mallintaa puolipalloelektrodin ekvivalenttisäteen avulla.

Kuvassa 17 on esitetty normaali käänne pistemenetelmän mittauspiiri. Siinä elektrodi 1 on mitattava maadoitusjärjestelmä, elektrodi 2 on jänniteapuelektrodi ja elektrodi 3 on virta-apuelektrodi. Ympäröivällä maaperällä on resistiivisyys ρ .



Kuva 17. Käänne pistemenetelmän ”normaali” elektrodien asettelu.

Elektrodin 1 kautta johdetaan maahan virta I , joka kulkee maassa elektrodin 3 kautta takaisin virtalähteeseen. Virta saa maassa aikaan jännitteen, jota mitataan jännite-

elektrodin 2 avulla. Merkitään potentiaalia, jonka elektrodin 1 kautta maahan johdettu virta aiheuttaa elektrodin 2 sijaintikohdassa V_{12} , elektrodin 1 kautta maahan johdetun virran elektrodissa 3 aikaansaamaa potentiaalia merkitään V_{13} ja niin edelleen. Oletetaan, että elektrodin 1 maahan johtaman virran suuruus on 1 A. Merkitään elektrodin 1 maahan johtaman virran suuntaa positiiviseksi ja elektrodin 3 kautta kulkevan virran suunta negatiiviseksi. Elektrodien 1 ja 2 potentiaaleille V_1 ja V_2 voidaan kirjoittaa yhtälöt (5.1) ja (5.2)

$$V_1 = V_{11}(I') + V_{32}(-I') \quad (5.1)$$

$$V_2 = V_{12}(I') + V_{32}(-I') \quad (5.2)$$

missä I' on virran itseisarvo. Elektrodin 2 avulla mitattava jännite on elektrodin 1 ja elektrodin 2 potentiaalien erotus (5.3)

$$U = V_1 - V_2 \quad (5.3)$$

joka voidaan kirjoittaa muotoon

$$U = I'(V_{11} - V_{31} - V_{12} + V_{32}) \quad (5.4)$$

Elektrodin 1 maadoitusresistanssi saadaan maadoitusresistanssin määritelmän mukaisesti elektrodin 1 potentiaalın ja virran osamäärästä. Virran suuruus on 1 A, joten V_{11} on itseasiassa numeerisesti yhtä suuri kuin elektrodin 1 resistanssi R_1 . Maadoitusresistanssille saadaan siis yhtälö (5.5)

$$R_m = R_1 + (V_{32} - V_{31} - V_{12})/1 \text{ A} \quad (5.5)$$

V_{31} , V_{32} ja V_{12} ovat elektrodien välisien etäisyyksien, muodon ja asettelun sekä maaperän ominaisuuksien funktioita. Merkitään näitä funktioita

$$V_{31} = \eta(D) \quad (5.6)$$

$$V_{32} = \phi(D - X) \quad (5.7)$$

$$V_{12} = \psi(X) \quad (5.8)$$

Mitattu resistanssi on mitattavan elektrodin 1 todellinen maadoitusresistanssi, jos

$$V_{32} - V_{31} - V_{12} = 0 \quad (5.9)$$

jolloin myös

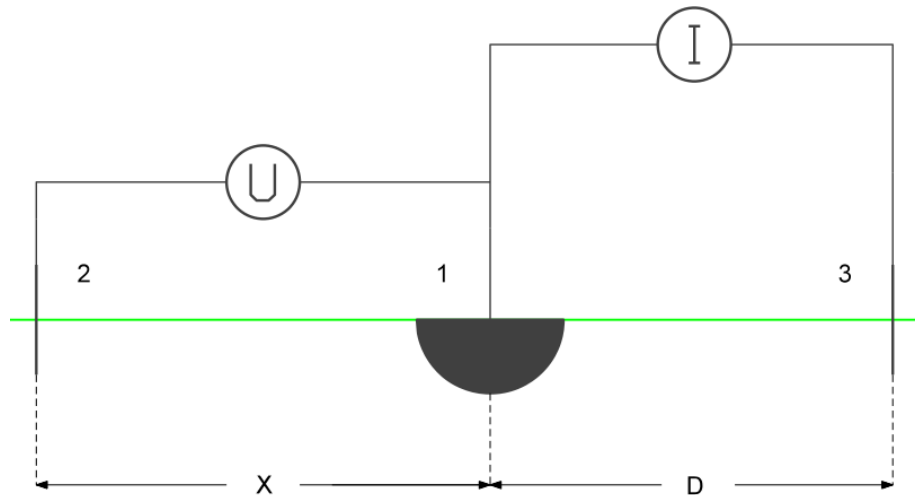
$$\phi(D - X) - \eta(D) - \psi(X) = 0 \quad (5.10)$$

Elektrodien oletetaan edelleen olevan puolipallon muotoisia ja ympäröivän maaperän oletetaan olevan homogeenista. Tällöin funktiot η , ϕ ja ψ ovat kääntäen verrannollisia etäisyyteen mitattavan elektrodin keskipisteestä [38, s. 53-55].

Mitattavan elektrodin todellinen maadoitusresistanssi saadaan, kun sijoitetaan elektrodi 2 elektrodien 1 ja 3 väliselle suoralle kohtaan, jossa yhtälö (5.11) toteutuu.

$$\frac{1}{D-X} - \frac{1}{D} - \frac{1}{X} = 0 \quad (5.11)$$

Tämän yhtälön ainoa positiivinen ratkaisu X_0 on $0,618D$. Mikäli elektrodi 2 sijoitetaan Kuvan 18 mukaisesti elektrodin 1 toiselle puolelle, termi $D-X$ tulee korvata termillä $D+X$ ja yhtälö saa ratkaisun $X_0 = 1,618D$. [2]



Kuva 18. Käännepistemenetelmä, vaihtoehtoinen elektrodien asettelu.

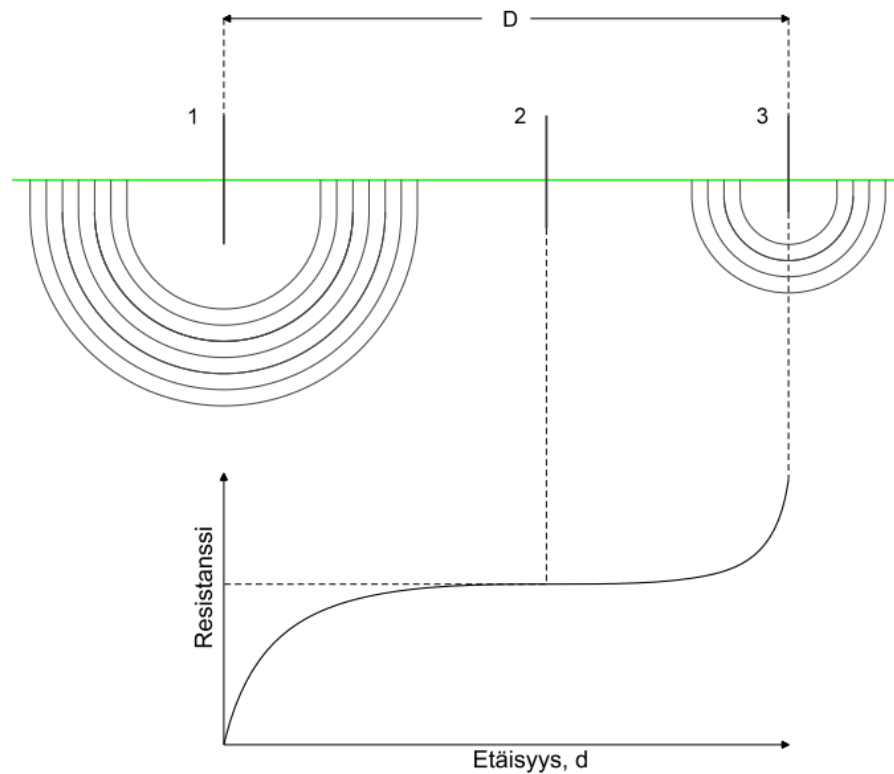
On huomattava, että etäisyydet mitattavan maadoituksen niin sanottuun sähköiseen keskipisteeseen ovat merkitseviä oikean jänniteapuelektrodin paikan kannalta. Homogeenisessa maaperässä sijaitsevan puolipalloelektrodin tapauksessa geometrinen keskipiste ja "sähköinen" keskipiste ovat sama asia, mutta käytännössä eri muotoisilla elektrodeilla, jotka sijaitsevat epähomogeenisessa maaperässä näin ei läheskään aina ole.

5.1.2 Käännepistemittauksen suorittaminen

Tavallisesti käännepistemittaus suoritetaan Kuvan 17 mukaista "normaalia" elektrodien asettelua käyttäen, missä jänniteapuelektrodi on asetettu mitattavan maadoituksen ja virta-apuelektrodin väliin. Voimajohtopylväiden maadoitusmittauksissa suositellaan tyypillisesti käytettävän 200 m virta-apuelektrodietäisyyttä [33, s. 129][48][47].

Jänniteapuelektrodi asetetaan lähelle mitattavaa maadoitusta, ohjeissa ja suosituksissa usein 20 m etäisyydelle, ja mitataan resistanssi. Mittaustulos kirjataan muistiin, siirretään jänniteapuelektrodia lähemmäs virta-apuelektrodia ja toistetaan mittaus. Näin edetään tasaisin välein, kunnes ollaan lähellä virta-apuelektrodia. Yleisesti jänniteapuelektrodia

siirretään 20 m välein ja viimeinen mittaustulos otetaan 160 m kohdalta. Mitatuista arvoista piirretään käyrä, kuten Kuvassa 19.

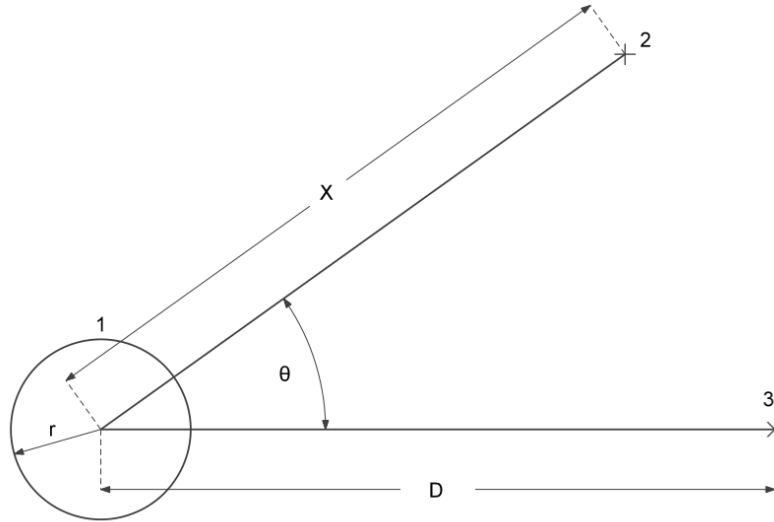


Kuva 19. Ideaalinen käyrämuoto käännepistemittauksessa.

Käyrässä on neutraalimaan kohdalla havaittavissa selkeästi tasaisempi osa, jonka kohdalta luetaan mitattavan maadoituksen maadoitusresistanssi. Todellisuudessa käännepistemenetelmällä saadun käyrän käyrämuoto voi poiketa Kuvan 19 ideaalisesta käyrämuodosta hyvinkin paljon ja käyrältä voi olla vaikea havaita yhtä selkeää vaakasuoraa osaa. Mikäli käyrällä ei ole havaittavissa vaakasuoraa osaa, mutta selkeä käännepiste on havaittavissa, voidaan maadoitusresistanssin arvo lukea myös käännepisteen kohdalta [26, s. 144]. Jos käyrässä esiintyy paljon aaltoilua tai muuta ”normaalista” poikkeavaa, tulee vaihtaa mittaussuuntaa ja tehdä mittaus uudelleen. Mikäli mittaussuunnan vaihtaminen ei ole mahdollista, voidaan maadoitusresistanssin arvo mitata myös epäluotettavampia menetelmiä, kuten sarjamittausmenetelmää käyttäen. Joissain tapauksissa ulkopuolisia häiriötekijöitä voi olla niin paljon, ettei luotettavaa mittaustulosta saada millään käytettävissä olevalla menetelmällä. Tällöin tulee maadoituselektrodien kunto vähintään tarkistaa kaapelitutkan avulla. [3][47][48]

5.1.3 Apuelektrodien sijainti

Mitattavan elektrodin ja apuelektrodien sijoittuminen toisiinsa nähden vaikuttaa tietyissä olosuhteissa merkittävästi mittaustarkkuuteen. Havainnollistetaan asiaa Kuvan 20 avulla.



Kuva 20. Käänne pistemenetelmän elektrodien asettelu ja mittauskulma, puolipalloelektrodin mittaus.

Kuvassa mitattava elektrodi on r säteinen puolipalloelektrodi 1, elektrodi 3 on D etäisyydellä mitattavasta elektrodista sijaitseva virtaelektrodi ja elektrodi 2 on etäisyydellä X sijaitseva jänniteapuelektrodi. Suorien 1-3 ja 1-2 välinen kulma on θ .

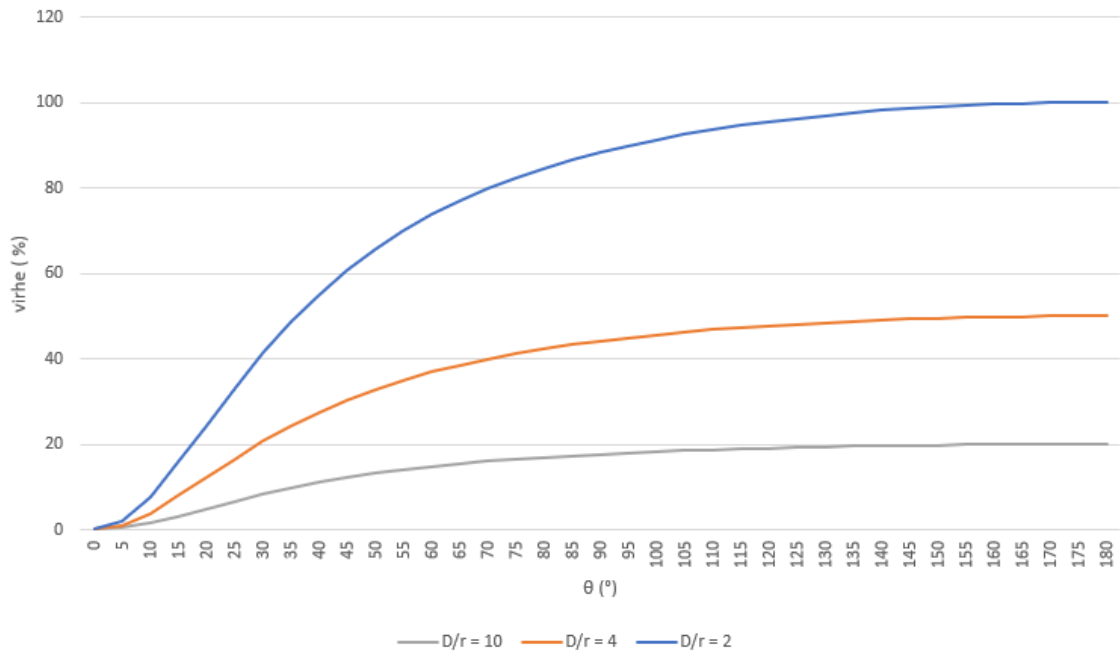
Tällaisessa tapauksessa käänne pistemenetelmällä mitattu resistanssi R_{mitt} saadaan yhtälöstä (5.12)

$$R_{mitt} = \frac{\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{D} - \frac{1}{X} + \frac{1}{\sqrt{X^2 + D^2 - 2XD \cos \theta}} \right) \quad (5.12)$$

missä ρ on maaperän resistiivisyys. Puolipalloelektrodin todellinen maadoitusresistanssi R_m saadaan kaavasta (2.7) ja mitatun maadoitusresistanssin ja todellisen maadoitusresistanssin suhde R_{mitt}/R_m voidaan laskea kaavalla (5.13) [25]

$$\frac{R_{mitt}}{R_m} = 1 - \frac{1}{\left(\frac{r}{D}\right)} - \frac{1}{\left(\frac{r}{X}\right)} + \frac{1}{\sqrt{\left(\left(\frac{r}{D}\right)^2 + \left(\frac{r}{X}\right)^2\right) - 2\frac{r^2}{DX} \cos \theta}} \quad (5.13)$$

Kuvaan 21 on piirretty kaavan (2.7) ja kaavan (5.13) avulla laskettu mittausvirhe mittauskulman funktiona. Mitattuja maadoitusresistansseja laskettaessa on jänniteapuelektrodin etäisyytenä käytetty yhtälön (5.11) ratkaisua $X_0 = 0,618D$, jossa käänne pistemenetelmä tuottaa oikean tuloksen homogeenisessa maaperässä.



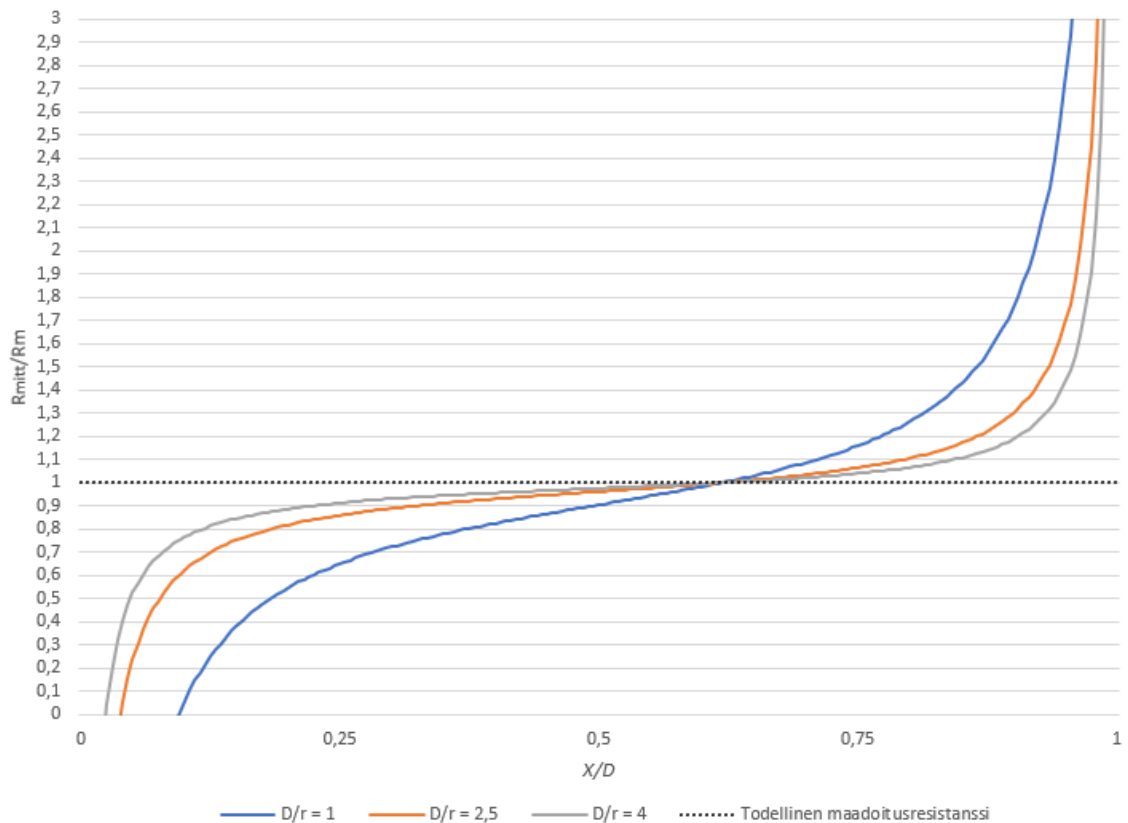
Kuva 21. Mittauskulman vaikutus mittausvirheeseen eri virta-apuelektrodietäisyyden ja maadoituksen laajuuden suhteilla D/r .

Kuvasta nähdään, että etäisyyden D suhde mitattavan elektrodin laajuuteen vaikuttaa merkittävästi mittausvirheeseen. Mittaustulos vääristyy mittauskulman kasvaessa sitä voimakkaammin, mitä pienempi etäisyyden D ja maadoituksen laajuuden r suhde on. Mittaustulosten laskennassa on oletettu maaperän olevan homogeenista ja jänniteapuelektrodin sijaitsevan kohdassa $0,618D$. Tämän takia mittausvirhe on 0 % kaikilla D/r , kun mittauskulma toteuttaa ehdon $\theta = 0^\circ$. Kuvaaja havainnollistaa riittävän virta-apuelektrodin etäisyyden D tärkeyttä käännepestemenetelmän luotettavuuden kannalta. Käännepestemittauksen voidaan sanoa "sietävän" jänniteapuelektrodin poikkeamia mittaussuoralta paremmin, kun virta-apuelektrodi sijaitsee riittävän etäällä mitattavasta maadoituksesta.

Kuvassa 22 havainnollistetaan virta-apuelektrodin etäisyyden D merkitystä käännepestemenetelmän tarkkuuteen. Kuvassa sininen käyrä kuvaa käännepestemenetelmällä kaavan (5.12) mukaisia mittaustuloksia, kun virta-apuelektrodin etäisyys mitattavan maadoituksen keskipisteestä on yhtä suuri kuin maadoituksen laajuus metreissä. Oranssi käyrä kuvaa käännepestemittauksia, kun virta-apuelektrodin etäisyys maadoituksen keskipisteestä on 2,5 kertaa maadoituksen laajuus. Harmaalla käyrällä virta-apuelektrodin ja maadoituksen laajuuden suhde on 4.

Kuvaajaa varten on laskettu ekvivalenttisäde kaavalla (2.8) 50 m pitkälle vaakaelektrodille, minkä avulla on laskettu elektrodin todellinen maadoitusresistanssi homogeenisessa maaperässä. Todellista maadoitusresistanssia ja kaavalla (5.12)

laskettuja käännepestemittaustuloksia on vertailtu eri virta-apuelektrodin etäisyyksillä. Mittauskulma θ on kaikissa tapauksissa 0° . Pystyakselilla on mitatun resistanssin suhde todelliseen maadoitusresistanssiin R_{mitt}/R_m ja vaaka-akselilla on jänniteapuelektrodin etäisyyden suhde virta-apuelektrodin etäisyyteen X/D . Esimerkiksi sininen käyrä kuvaa 50 m pitkän vaakaelektrodin käännepestemittaustuloksia, kun virta-apuelektrodin etäisyys D on 50 m.



Kuva 22. Virta-apuelektrodietäisyyden ja maadoituksen laajuuden suhteen D/r vaikutus käännepestemittauksen käyrämuotoon.

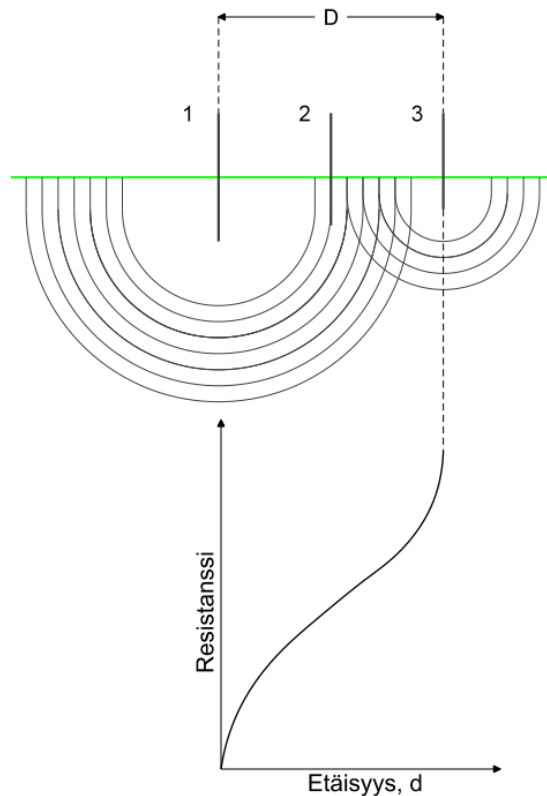
Kuvaajista nähdään, että mittauskulman ollessa 0° mittaustulos on yhtä suuri kuin mitattavan elektrodin todellinen maadoitusresistanssi kohdassa, jossa jänniteapuelektrodin etäisyys X maadoituksen keskipisteestä on $0,618D$. Nähdään myös, että virta-apuelektrodin ja mitattavan maadoituksen laajuuden suhde on merkittävä tekijä käännepestemenetelmän luotettavuuden kannalta. Oranssin ja harmaan käyrän tapauksissa on helppo lukea maadoitusresistanssin arvo mittauskäyrältä. Siniseltä käyrältä sen sijaan ei voida lukea maadoitusresistanssia luotettavasti.

5.1.4 Yhteenveto käännepestemenetelmästä

Käännepestemenetelmää käsittelevässä kirjallisuudessa ja tutkimuksissa oletetaan usein, että maaperä on täysin homogeenista tai maan resistiivisyyden vaihtelua

oletetaan tapahtuvan vain pystysuunnassa. Etenkin Suomen olosuhteissa maaperän huonon johtavuuden vuoksi joudutaan käyttämään laajoja maadoituksia riittävän alhaisen maadoitusresistanssin saavuttamiseksi. Laajan maadoitusjärjestelmän mittaaminen vaatii pitkiä etäisyyksiä virtaelektrodin ja mitattavan järjestelmän välillä, jotta päästään neutraalimaahan. Oletus, että maaperä on homogeenista vaakasuunnassa ei välttämättä pidä paikkaansa, kun käytetään esimerkiksi 200 m virtaelektrodin etäisyyttä.

Virta-elektrodin etäisyys 200 m on vain nyrkkisääntö, joka perustuu keskiarvoihin. Käännepistemittaus voidaan suorittaa myös lyhyempää etäisyyttä käyttäen. Toisaalta voi myös olla, että erittäin laajojen maadoitusten tapauksissa voidaan joutua käyttämään vieläkin suurempaa etäisyyttä, jotta päästään neutraalimaahan. Käännepistemittaukselle ominainen käyrä voi siis muodostua pienemmilläkin virta-apuelektrodin etäisyyksillä, mutta mittauksen luotettavuuden kannalta on kuitenkin sitä parempi, mitä pidemmälle virta-apuelektrodi viedään [10][3]. Jos ei jostain syystä voida viedä virta-apuelektrodiä riittävän kauas, leikkaavat mitattavan maadoitusjärjestelmän ja virta-apuelektrodin vaikutusalueet toisiaan ja käyrästä muodostuu samankaltainen kuin Kuvassa 23.



Kuva 23 Käännepistemittauksen käyrämuoto, kun virta-apuelektrodi sijaitsee liian lähellä mitattavaa maadoitusta.

Todellinen haaste käännepistemittauksessa on oikean jänniteapuelektrodin paikan löytäminen. Erityisesti maaperän ominaisuuksilla on suuri vaikutus oikeaan jänniteapuelektrodin sijaintiin. Oikea jänniteapuelektrodin paikka on voimakkaasti riippuvainen maaperän heijastuskertoimesta. Homogeenisessa maaperässä oikea jänniteapuelektrodin etäisyys on $0,618D$, mutta kaksikerrosmaassa oikea paikka voi vaihdella välillä $0,5D$ ja $0,9D$ riippuen heijastuskertoimen K arvosta. Mitä suurempi on heijastuskertoimen itseisarvo, sitä enemmän oikea jänniteapuelektrodin paikka X_0 poikkeaa arvosta $0,618D$. Oikea jänniteapuelektrodin etäisyys on pienempi kuin $0,618D$ heijastuskertoimen arvon ollessa negatiivinen ja suurempi kuin $0,618D$, kun heijastuskertoimen arvo on positiivinen [4, s. 114][3]. Lisäksi pintamaan syvyydellä h_1 on merkittävä vaikutus oikeaan jänniteapuelektrodin sijaintiin [3].

Käännepistemenetelmällä voidaan periaatteessa mitata kaikenlaisia maadoituksia. Ennen mittausta täytyy kuitenkin varmistaa, että mitattavan pylvään maadoitukset on erotettu muista niiden rinnalle ukkosjohtimien kautta kytkeytyvistä pylväistä ja niiden maadoituksista. Puupylväillä erottaminen tapahtuu irrottamalla ukkosjohtimia ja maadoituselektrodeja yhdistävät alastuontijohtimet maadoituselektrodeista. Teräsrakenteisilla pylväillä erottaminen on ongelmallisempaa, koska pylväsrakenteet ovat galvaanisesti yhteydessä perustuksiin ja niiden kautta maahan [22]. Ukkosjohdinten ja pylvään välisten liitosten irrottaminen ei turvallisuussyistä ole mahdollista ilman johdon ottamista pois käytöstä. Se veisi myös kohtuuttoman paljon aikaa ja vaatisi, että mittajat kuljettaisivat mittauskaluston lisäksi pylvääseen kiipeämiseen vaadittavia varusteita mukanaan. Maadoituselektrodien irrottaminen pylvästä ei välttämättä ole täysin luotettava tapa erottaa maadoituksia ukkosjohtimista, sillä pylvääät maadoittuvat periaatteessa myös betonisten perustustensa ja niiden raudoitusten kautta. Uudet voimajohtopylväät ovat käytännössä aina teräsrakenteisia, joten perinteisen käännepistemenetelmän käyttökohteet vähenevät jatkuvasti. Toisaalta Suomessa on yhä suuri määrä puusta tehtyjä voimajohtopylväitä, joiden kunnossapitotarkastuksissa käännepistemenetelmää voidaan edelleen käyttää.

5.2 Suurtaajuusmenetelmä

Teräsrakenteista pylvästä ei välttämättä saada luotettavasti erotettua ukkosjohtimien ja viereisten pylväiden muodostamasta impedanssiketjusta, koska pylvääät ovat galvaanisessa yhteydessä maahan myös perustuksien kautta. Ketjuimpedanssi on käyttötaajuudella yleensä hyvin pieni verrattuna mitattavan pylvään maadoitusresistanssiin. Mitattaessa tällaisen pylvään maadoitusresistanssia käännepistemenetelmällä suurin osa mittausvirrasta kulkee ukkosjohtimiin ja sieltä

edelleen rinnalle kytkeytyvien pylväiden maadoitusten kautta maahan. Perinteistä käännepestemenetelmää ei voida pitää luotettavana tällaisen pylvään maadoitusresistanssin mittaamiseen. [29, s. 4]

Pylväsmaadoitusten maadoitusresistanssi on käytännössä kokonaan resistiivistä. Ukkosjohtimien impedanssi taas sisältää taajuusriippuvaisen komponentin, joka kasvaa taajuuden kasvaessa. Käytettäessä riittävän suurta mittausvirran taajuutta kasvaa ukkosjohtimien ja rinnakkaisten pylväiden impedanssi niin suureksi, että käytännössä kaikki mittausvirta kulkee mitattavan pylvään maadoituselektrodien kautta maahan. Suurtaajuusmenetelmällä voidaan sulkea pois rinnalle kytkeytyvän impedanssiketjun vaikutus ja mittaus voidaan suorittaa samalla tavalla kuin perinteinen käännepestemittaus. [29, s. 4-8]

Suurtaajuusmenetelmä eli HF-menetelmä soveltuu periaatteessa kaikkien pylvästyypin maadoitusmittauksiin. Menetelmän käytölle on kuitenkin omat rajoitteensa. Cigren työryhmän C4.2.02 vuonna 2005 suorittamassa tutkimuksessa [29] mallinnettiin ukkosjohtimella varustetun johdon pylväiden maadoitusresistanssin mittauksia 26 kHz ja 150 kHz mittaustaajuuksilla. Tulosten perusteella mittausvirhe on sitä suurempi, mitä suurempi on mitattavan pylvään maadoitusresistanssi. Mittausvirhe oli myös suurempi 26 kHz:n mittaustaajuudella kuin 150 kHz:n taajuudella. Tutkimuksessa todettiin mittausvirheen olevan merkittävä pylväillä, joiden maadoitusresistanssi oli suurempi kuin 50 Ω . Mallinnetulla johdolla oli vain yksi ukkosjohdin ja jokaisen pylvään maadoitusresistanssin oletettiin olevan yhtä suuri. Jänneväli oli mallinnuksessa jokaisella pylväällä noin 500 m.

Suomessa useimmilla johdoilla on kaksi ukkosjohdinta, jänneväli on tyypillisesti noin puolet mallin mukaisesta ja maadoitusresistanssit ovat todellisuudessa eri suuruiset eri pylväillä. Tutkimuksen tuloksia voidaan kuitenkin pitää luotettavina ja niistä nähdään, että suurtaajuusmenetelmä ei ole ihanteellinen sellaisten maadoitusten mittaamiseen, joiden maadoitusresistanssi on suuri.

Suurtaajuusmenetelmä vaatii käännepestemenetelmän tavoin kaksi apuelektrodia, jotka tulee viedä riittävän kauas mitattavasta maadoitusjärjestelmästä. Esimerkiksi asfaltoiduilla alueilla, teiden tai junaratojen läheisyydessä apuelektrodeille ei välttämättä löydy sopivaa paikkaa. Suurtaajuusmaadoitusmittalaitteet ovat myös huomattavasti kalliimpia, kuin perinteiseen käännepestemenetelmään soveltuvat mittalaitteet. Perinteiset mittalaitteet voivat myös olla monikäyttöisempiä kuin suurtaajuusmittalaitteet. Esimerkiksi ABB:n valmistama HW2S -mittalaite on tarkoitettu vain

maadoitusresistanssin mittaamiseen HF-menetelmällä [49], kun taas melko yleisellä ja huomattavasti halvemmalla Megger DET4TD2 -mittarilla voidaan mitata maadoitusresistanssin lisäksi mm. maan resistiivisyyttä [50]. Vaihtoehtoja on kuitenkin vähän sellaisten pylväiden maadoitusresistanssin mittaamiseen, joilla on ukkosjohtimet, ja jotka ovat galvaanisessa yhteydessä maahan perustustensa kautta. Suurtaajuusmenetelmä on ainoa mittaussuunnitelma, jota esimerkiksi Fingrid suosittelee tällaisten pylväiden maadoitusresistanssin mittaamiseen. [47]

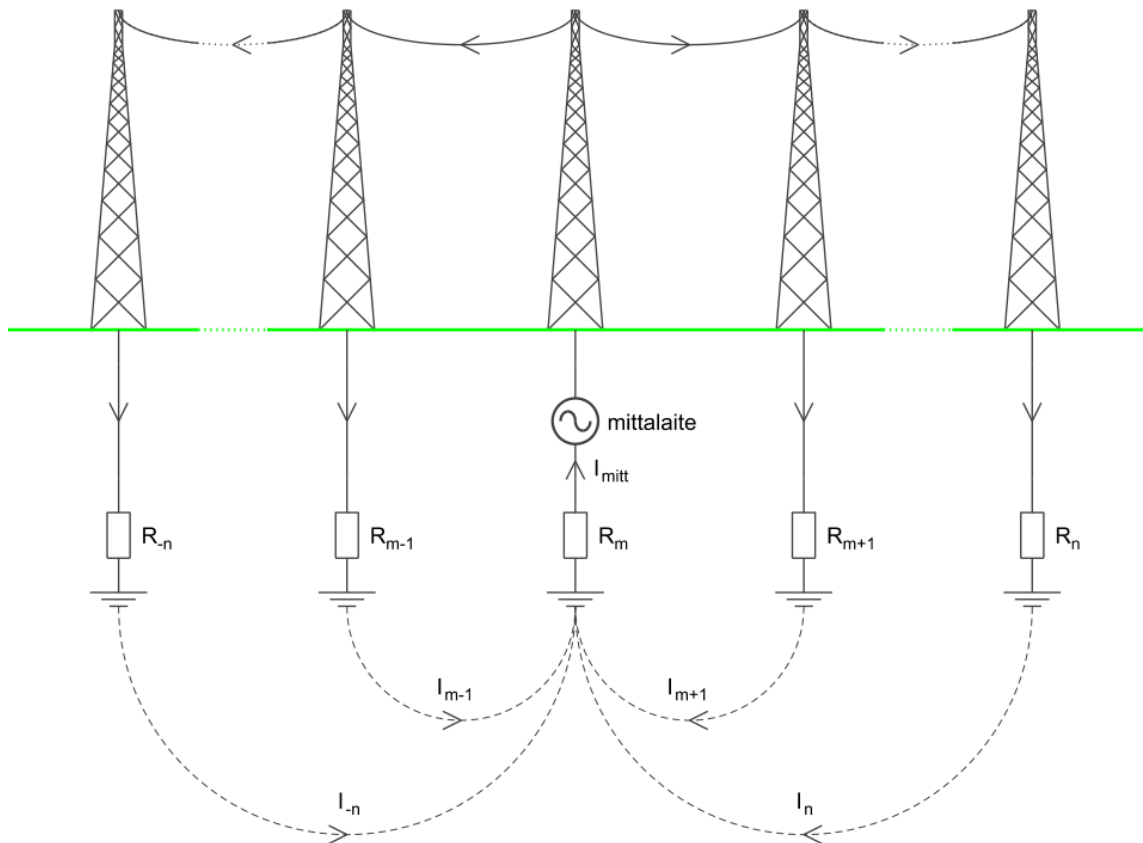
5.3 Sarjamittausmenetelmät

Sarjamittausmenetelmissä mitataan tuntemattoman resistanssin ja tunnetun resistanssin sarjaankytkennän resistanssia. Tuntematon resistanssi on tässä tapauksessa mitattavan pylvään maadoitusresistanssi R_m , joka saadaan mitatun sarjaresistanssin R_{mitt} ja tunnetun resistanssin R_x erotuksena (5.14)

$$R_m = R_{mitt} - R_x \quad (5.14)$$

Voimajohtopylväiden maadoitusresistanssia mitattaessa sarjaresistanssi on mitattavan pylvään maadoitusresistanssin ja johdon ketjuimpedanssin sarjaankytkennän resistanssi. Ketjuimpedanssin suuruus riippuu rinnakkaisten pylväiden maadoitusresistansseista ja niitä yhdistävien ukkosjohtimien ominaisuuksista. [38, s. 21][48]

Tavallisesti ketjuimpedanssi on teräsalumiinisilla ukkosjohtimilla varustetulla johdolla noin 1Ω luokkaa ja se voidaan jättää huomiotta, koska voimajohtopylväiden maadoitusresistanssit ovat yleensä huomattavasti tätä suurempia. Teräksisillä ukkosjohtimilla ketjuimpedanssi voi kuitenkin olla useita ohmeja. Tällöin mittaussuunnitelma on huomattava mitattaessa pylväitä, joiden maadoitusresistanssi on pieni. Sarjaresistanssi on periaatteessa aina suurempi kuin mitattavan pylvään maadoitusresistanssi. Ollaan siis ”turvallisella puolella”, jos ketjuimpedanssi jätetään vähentämättä sarjaresistanssista. Yhtälössä (5.14) R_x on ”tunnettu”, mutta todellisuudessa se sisältää rinnakkaisten pylväiden maadoitusresistanssit, joita ei voida varmuudella tuntea. Kuvassa 24 nähdään sarjamittausmenetelmän periaate ja mittaussuunnitelman kulku.



Kuva 24. Sarjamittausmenetelmän periaate ja mittausvirran kulku.

Mitattavan pylvään maadoituksen ja ukkosjohtimien kautta rinnalle kytkeytyvien pylväiden maadoitusten muodostamaan silmukkaan kytketään jännite. Jännite saa aikaan virran, joka jakautuu rinnakkaisille pylväille ja palaa maan kautta mitattavan pylvään maadoitukseen. Silmukan jännitehäviöiden ja mittausvirran I_{mitt} avulla saadaan kokonaisresistanssi R_x . Mittausta varten täytyy mitattava pylvä ja sen maadoitukset irrottaa toisistaan, jotta mittausvirta kulkee silmukan läpi. Käytettävästä mittausmenetelmästä riippuen jännitelähteenä toimii joko mittarin oma jännitelähde tai ukkosjohtimiin vaihejohtimista indusoituva tyhjäkäyntijännite.

Sarjamittausmenetelmät ovat yksinkertaisia ja nopeita mittausmenetelmiä, mutta niillä on rajoitteensa. Ne soveltuvat vain sellaisille johdoille, joiden pylvää ja ukkosjohtimet on yhdistetty toisiinsa siten, että liitosresistanssi on hyvin pieni eli johdoille, joiden pylväiden ja ukkosjohtimien väliin on asennettu niin kutsutut sähköisesti luotettavat liitokset. Ukkosjohtimien ja pylvään välinen liitosresistanssi kytkeytyy sarjaan pylvään maadoitusresistanssin kanssa ja vääristää mittaustulosta ylöspäin. Osa mittausvirrasta voi kulkea mitattavan silmukan ohi, kun pylvä on galvaanisessa yhteydessä perustuksiin. Tällöin mittaustulos vääristyy alaspäin. Sarjamittauspiirin muodostavien pylväiden välillä sijaitsevat metalliset rakenteet voivat muuttaa mittausvirran kulkua

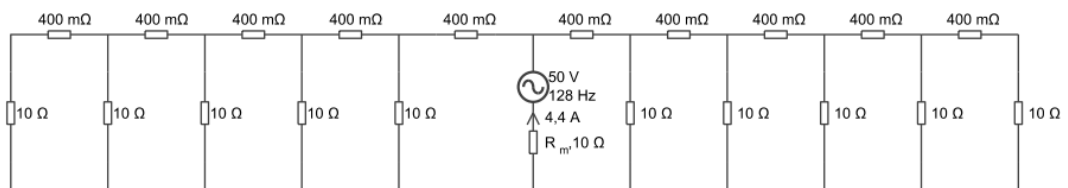
vääristäen mittaustulosta. Menetelmässä ei myöskään ole ”sisäänrakennettua” tarkastusmenetelmää, jolloin mittaustuloksen luotettavuus jää mittauksen suorittajan arvioitavaksi.

Sarjamittausmenetelmiä ei siis voida pitää täysin luotettavina, eikä niitä suositella käytettäväksi ensisijaisena menetelmänä voimajohtopylväiden maadoitusresistanssin mittaamiseen. Käytännössä niitä käytetään kuitenkin melko paljon sen nopeuden vuoksi. [48]

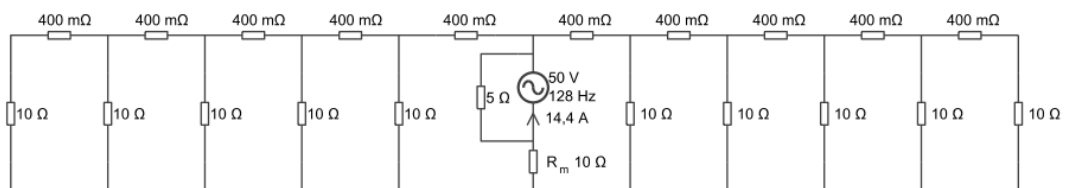
Havainnollistetaan sarjamittausmenetelmän periaatetta laskuesimerkin avulla. Mitattavan maadoituksen maadoitusresistanssi on $10\ \Omega$. Mitattavan pylvään rinnalle kytkeytyy ukkosjohtimien välityksellä 10 pylvästä, 5 molemmin puolin. Jokaisen rinnakkaisen pylvään maadoitusresistanssi on myös $10\ \Omega$. Ukkosjohtimien resistanssi jännävälillä on $0,4\ \Omega$, joka on samaa suuruusluokkaa kuin Sustrong -ukkosjohtimilla tyypillisellä jännävälillä 250 m, kun mittausvirran taajuus on 128 Hz. Mittausvirran taajuudeksi on valittu 128 Hz, koska sitä käytetään mm. Eltelissä käytössä olevassa Megger DET 4T2C maadoitusmittarissa [51].

Kuvaan 25 on piirretty sarjamittausmenetelmän mittauspiiri. Laskuesimerkissä 1 on sarjamittausmenetelmän kannalta ideaalinen tilanne, jossa mitattava pylväs voidaan luotettavasti erottaa maadoituksista ja mittari kytkeä pylvään ja maadoitusten väliin ilman häiriötekijöitä. Laskuesimerkissä 2 on ylimääräinen $5\ \Omega$ vastus, jonka avulla mallinnetaan perustusten ja pylvään välisiä liitosresistansseja, joiden kautta mittausvirta kykenee ohittamaan mitattavan maadoitusresistanssin.

Laskuesimerkki 1



Laskuesimerkki 2



Kuva 25. Sarjamittausmenetelmä, laskuesimerkit mittausvirheen muodostumisesta.

Laskuesimerkki 1: Jännitelähteen tuottama jännite on 50 V, mitattavan maadoituksen yli mitattu virta I on noin 4,4 A. Sarjaresistanssi voidaan näiden avulla laskea $R_{mitt} = U/I = 11,36 \Omega$. Laskuesimerkissä 1 rinnalle kytkeytyvien maadoitusten tuoma lisäresistanssi on siis noin 1,36 Ω .

Laskuesimerkki 2: Sama tilanne kuin laskuesimerkissä 1, mutta nyt osa mittausvirrasta ohittaa mitattavan maadoitusresistanssin perustusten kautta. Huomataan, että virhe kasvaa huomattavasti. Nyt mitattu virta on noin 14,4 A, joten 50 V mittausjännitteellä sarjaresistanssiksi saadaan $R_{mitt} = 3,47$. Virhe on laskuesimerkin 2 tapauksessa huomattava.

Sarjamittausmenetelmän luotettavuus siis kärsii merkittävästi, jos pylvään maadoituksia ei saada luotettavasti eristettyä pylväästä. Virhe on sitä suurempi, mitä pienempi resistanssi pylvään ja maadoitusten välillä on. Perustusten ja liitosresistanssien muodostaman ”virhevastuksen” resistanssia on todellisuudessa hyvin vaikea arvioida, joten sitä ei voida poistaa mittaustuloksesta.

5.3.1 Virta-jännitemenetelmä

Virta-jännitemenetelmä eli U/I -menetelmä on myös sarjamittausperiaatteeseen perustuva menetelmä. Menetelmää ei tule sekoittaa voltti-ampeerimenetelmään, jota käytetään suurten maadoitusten, kuten sähköasemien maadoitusverkkojen, maadoitusimpedanssien mittaukseen. Erona ”tavalliseen” sarjamittausmenetelmään on, että tässä menetelmässä mittausvirtana käytetään ukkosjohtimiin induoituvan jännitteen aikaansaamaa virtaa. Mittaus suoritetaan irrottamalla pylvään maadoitukset pylväästä ja mittaamalla niiden välinen tyhjäkäyntijännite U_0 ja oikosulkuvirta I_k . Näiden avulla voidaan laskea sarjaresistanssi R_{mitt} kaavalla (5.15)

$$R_{mitt} = \frac{U_0}{I_k} \quad (5.15)$$

Mitattavan pylvään maadoitusresistanssi saadaan edelleen kaavasta (5.14).

Tyhjäkäyntijännitteen U_0 suuruus määräytyy ukkosjohtimien ominaisuuksien ja johdon kuormitusvirran mukaan. Teräsalumiinisilla ukkosjohtimilla varustetulla johdolla tyhjäkäyntijännite on yleensä suurempi kuin teräksisillä ukkosjohtimilla varustetulla johdolla. Jännite voi olla suuruudeltaan satoja millivolteja tai jopa kymmeniä voltteja. [48]

Menetelmää ei tietävästi ole juurikaan käsitelty kansainvälisessä tutkimuksessa, mutta se on Suomessa melko yleinen voimajohtojen maadoitusresistanssien mittauksessa.

Mittausmenetelmä kuuluu myös Fingridin hyväksymiin voimajohtojen maadoitusmittausmenetelmiin [47]. Menetelmää voidaan Ertelin sisäisen ohjeen [48] ja Fingridin pylväsmaadoitusmittauksia koskevan ohjeen [47] mukaan käyttää, vaikka ukkosjohtimien ja pylväiden väliset sähköisesti luotettavat liitokset puuttuisivatkin johdolta. Tällöin mittauksen luotettavuuden edellytyksenä kuitenkin on, että tyhjäkäyntivirta I_k on yli 200 mA.

5.3.2 Pihtimittaus

Pihtimittausmenetelmä perustuu myös sarjamittausperiaatteeseen, jossa mitataan tuntemattoman resistanssin ja jonkin tunnetun resistanssin sarjaankytkennän resistanssia. Se on kätevä tapa mitata sellaisen maadoituselektrodin maadoitusresistanssia, joka on kytketty rinnan muiden maadoitusten kanssa kuten Kuvassa 25.

Pihtimittarissa on kela, jonka avulla se indusoi mitattavaan järjestelmään jännitteen. Jännitteen aikaansaama virta kulkee rinnalla olevien maadoituselektrodien kautta maahan ja maasta virta palaa mitattavan elektrodin kautta lähteeseen. Jännitteen U ja paluvirran I osamääränä saadaan kaikkien rinnan kytkettyjen maadoitusten resultoiva resistanssi.

Menetelmää koskevat pääasiosin samat rajoitteet kuin muitakin sarjamittausperiaatteeseen perustuvia menetelmiä. Luotettava mittaustulos edellyttää, että mitattavan pylvään rinnalle kytketty ”apumaadoitus”, joka sijaitsee mitattavan maadoituksen vaikutusalueen ulkopuolella, ja jonka maadoitusresistanssi on pieni verrattuna mitattavan maadoituksen maadoitusresistanssiin.

Pihtimittausmenetelmään soveltuvat mittalaitteet käyttävät yleensä melko korkeita mittaustaajuuksia, jotta mittalaitteiden fyysinen koko saadaan mahdollisimman pieneksi. Esimerkiksi Chauvin Arnouxin valmistamat CA6416 ja CA6517 silmukkavastuspihdit käyttävät mittaustaajuutena 2083 Hz. Korkea mittaustaajuus kasvattaa myös ukkosjohtimien impedanssia. Kuvan 25 laskuesimerkissä ukkosjohtimien impedanssi kasvaisi noin 6,6 ohmiin, mikä kasvattaisi mitattua sarjaresistanssia huomattavasti. Kyseiset mittalaitteet mittaavat ja näyttävät erikseen mitatun sarjaresistanssin resistiivisen ja induktiivisen osan, joten korkeasta taajuudesta johtuva suuri induktiivinen osa voidaan eliminoida mittaustuloksesta [52].

Pihtimittausmenetelmä on siis perinteisen sarjamittausmenetelmän tavoin nopea ja vaivaton mittausmenetelmä, joka on tietyin edellytyksin myös luotettava. Mittaajalla tulee

kuitenkin olla riittävästi tietoa mitattavasta järjestelmästä ja hänen tulee ymmärtää menetelmän ja mittalaitteen rajoitteet. Pihtimittausmenetelmä ei vaadi apuelektrodien käyttöä ja sillä voidaan saada mittaustulos myös paikoissa, joissa esimerkiksi käännepestemenetelmän käyttö ei ole esteiden takia mahdollista. Pihtimittausmenetelmää ei voida käyttää ainoana tai ensisijaisena menetelmänä, mutta se voi olla hyvä lisä maadoitusmittaajan ”arsenaalissa”. [38, s. 27-28, s. 66-69]

5.4 Selektiivinen maadoitusresistanssin mittaus

Ukkosjohtimien ja rinnakkaisten pylväiden muodostaman pylväsketjun aiheuttaman mittausingelman ratkaisemiseksi on kehitetty myös menetelmä, joka on muuten samankaltainen kuin käännepestemenetelmä, mutta siinä mitataan erillisten pihtien tai virtamittaussilmukoiden avulla vain mitattavan maadoituksen kautta maahan kulkeva mittausvirta. [52]

Tässä mittaamenetelmässä maadoituselektrodeja ei tarvitse irrottaa pylväsrakenteista, sillä ukkosjohtimien ja pylväasperustusten kautta kulkeva virta voidaan sulkea pois, eikä mittausvirta näin pääse ohittamaan mittauspiiriä pylväasperustusten kautta, kuten käännepestemenetelmää tai sarjamittausmenetelmiä käytettäessä. Menetelmä ei myöskään vaadi korkean mittaustaajuuden käyttämistä.

Menetelmä ei Suomessa ole vielä kovin tunnettu, eikä esimerkiksi Fingridin maadoitusmittausohjeessa ole otettu kantaa kyseisen menetelmän luotettavuuteen tai suositeltaviin käyttökohteisiin. Se on HF-menetelmän lisäksi ainoa tässä työssä esitelty menetelmä, joka soveltuu sellaisten pylväiden maadoitusresistanssien mittaamiseen, jotka ovat galvaanisessa yhteydessä maahan perustustensa kautta.

5.5 Haasteet maadoitusresistanssimittauksissa

Voimajohtopylväiden maadoitusresistansseja mitattaessa voidaan kohdata lukuisia haasteita. Maassa kulkevat hajavirrat ja maassa sijaitsevat metalliset rakenteet voivat vääristää mittausvirtaa ja mitattavia potentiaaleja. Lisäksi sopivan mittaussuunnan löytäminen voi etenkin taajama- ja teollisuusalueilla olla hyvin vaikeaa.

Useimmissa maadoitusresistanssin mittaamenetelmissä maahan syötetään virtaa ja mitataan potentiaalieroa jänniteapuelektrodin avulla. Tällaisia menetelmiä käytettäessä on tärkeää, että molempien apuelektrodien maadoitusresistanssit ovat riittävän alhaiset. Liian korkea virta-apuelektrodin maadoitusresistanssi estää riittävän mittausvirran kulun mittauspiirissä, jolloin ei saada luotettavaa mittaustulosta. Liian korkea apuelektrodin

maadoitusresistanssi voi johtua maaperän korkeasta resistiivisyydestä tai korkeasta liitosresistanssista elektrodin pinnan ja maaperän välillä. Liitosresistanssi voi olla korkea esimerkiksi kivikkoisessa maaperässä, jossa elektrodin pinnan ja maaperän väliin jää ilmaa, kun elektrodi upotetaan maahan. Monissa nykyaikaisissa maadoitusmittareissa onkin automaattinen apuelektrodien maadoitusresistanssien mittaustoiminto, joka tuottaa virheilmoituksen, eikä anna suorittaa mittausta mikäli apuelektrodin maadoitusresistanssi on liian korkea [50][52].

Apuelektrodien maadoitusresistanssia voidaan yrittää parantaa monella tavalla. Tavallisesti ensimmäisenä yritetään työntää apuelektrodiä syvemmälle maahan ja saavuttaa riittävän alhainen apuelektrodin maadoitusresistanssi kasvattamalla maaperän kanssa kosketuksissa olevaa pinta-alaa. Vaihtoehtoisesti voidaan yrittää saavuttaa parempi kontakti maahan vaihtamalla apuelektrodin paikkaa. Mittaustarkkuus kärsii jonkin verran, kun siirretään jänniteapuelektrodi pois mittaussuoralta, jonka virta-apuelektrodi ja mitattavan maadoitusjärjestelmän keskipiste muodostavat. Kuvasta 21 kuitenkin nähdään, että mittaussuoralta poikkeamisesta johtuva mittausrvirhe on melko pieni, mikäli virta-apuelektrodin ja mitattavan maadoituksen välinen etäisyys on riittävä ja mittauskulma on alle 15 astetta.

Mikäli elektrodin siirtäminen tai painaminen syvemmälle eivät tuota riittävän alhaista apuelektrodin maadoitusresistanssia, voidaan apuelektrodin rinnalle asentaa lisäelektrodeja. Myös apuelektrodiä ympäröivän maaperän kastelu on periaatteessa vaihtoehto apuelektrodin maadoitusresistanssin alentamiseksi. Maadoitusmittaajilla on kuitenkin harvoin mukanaan ylimääräisiä elektrodeja ja vielä harvemmin vesikanisteria, jolla kastella apuelektrodiä ympäröivää maata. Maadoitusmittauksia tehdessä joudutaan usein kävelemään pitkiä matkoja joskus vaikeakulkuisessakin maastossa ja siksi kaikki ylimääräinen paino pyritään jättämään mittauskalustosta pois.

Joissain paikoissa apuelektrodin työntäminen maaperään voi olla mahdotonta. Tällaisia paikkoja ovat mm. asfaltoidut alueet. Tällöin voidaan joutua turvautumaan epäluotettavampiin menetelmiin tai kaapelitutkukseen. AEMC Instruments on maadoitusmittauksia käsittelevässä ohjeessaan [35] esittänyt, että tällaisissa paikoissa voitaisiin elektrodit korvata eräänlaisilla metalliverkoilla, jotka asennetaan asfaltin tai vastaavan pinnan päälle.

Joissain lähteissä esitetään, että mittaussuojimien välinen induktiivinen kytketyminen voi aiheuttaa virhettä mittaustuloksissa. Esimerkiksi käännepistemenetelmässä virta-apuelektrodin mittajohtimessa kulkeva virta indusoi jänniteapuelektrodin mittajohtimeen

virran, joka summautuu suoraan mitattavaan jännitteeseen ja aiheuttaa virhettä. Tämä vaikutus voi olla 50-60 Hz taajuista mittausvirtaa käytettäessä jopa $0,1 \Omega / 100 \text{ m}$ suuruusluokkaa. Mitä suurempi maadoitus on, sitä pidempiä mittajohtimia on käytettävä, jotta saadaan luotettava mittaustulos. Maadoituksen maadoitusresistanssi on myös sitä pienempi, mitä laajempi maadoitus on. Suomessa voimajohtopylväiden maadoitusresistanssit ovat kuitenkin niin suuria, että induktiivisen kytkeytymisen aiheuttaman virheen voidaan katsoa olevan merkityksetön. Induktiivisen kytkeytymisen aiheuttama virhe voisi hyvinkin muodostua ongelmaksi jonkin todella laajan maadoituksen, jolla on pieni maadoitusimpedanssi, mittaamisessa esimerkiksi käännepistemethodella. Sähköasemien maadoitusruudukot ovat tyypillisesti tällaisia maadoituksia, mutta niiden mittaamiseen käytetään pääasiassa voltti- ampeerimenetelmää, jota käytettäessä kyseistä ongelmaa ei esiinny. Ongelman poistamiseksi voitaisiin käyttää myös suojattuja mittajohtimia. [38, s. 8]

5.6 Yhteenveto maadoitusresistanssin mittaamenetelmistä

Maadoitusresistanssin mittaamiseen on kehitetty monia menetelmiä, joilla jokaisella on omat etunsa ja rajoitteensa. Maadoitusresistanssin mittaaminen on ammattitaitoa vaativaa työtä, jonka suorittajan on ymmärrettävä maadoitusten, mittaustapojen ja mittauskohdeiden erot ja osattava valita paras mittaamenetelmä kullekin mitattavalle pylväälle ja maadoitukselle.

Maadoitusresistanssi voi vaihdella ympäristötekijöiden seurauksena, esimerkiksi kosteuden ja lämpötilan muutokset voivat vaikuttaa huomattavastikin maadoitusresistanssin arvoon. Syvämaadoituselektrodeilla maadoitusresistanssin arvo voi vaihdella jopa 20 % [29, s. 3]. Suomessa voimajohtopylväiden maadoitukset sijaitsevat pääasiassa pintamaassa, joka reagoi sääolosuhteiden muutoksiin vielä herkemmin kuin maaperän syvemmät kerrokset [14]. Näistä syistä maadoitusresistanssimittauksissa kohtuullista esimerkiksi 30 % mittausrvirhettä voidaan pitää hyväksyttävänä. Kohtuullinen mittausrvirhe esimerkiksi voimajohdon vaarajännitetarkastelussa ei ole kokonaisuuden kannalta merkittävä. Poikkeuksena ovat tilanteet, joissa mittausrvirheiden jakauma on selkeästi vinoutunut. [25]

Mittaajan ammattitaidon tärkeys korostuu maadoitusresistanssimittauksissa. Mittaajan tulee kyetä arvioimaan jokaiselle pylväälle parhaiten soveltuva menetelmä ja suorittamaan mittaukset mahdollisimman luotettavasti ja turvallisesti. Lisäksi mittaajan täytyy osata arvioida saamiaan mittaustuloksia. Tarvittaessa tulee mittausta suorittaa uudelleen, eri suuntaan tai toista mittaamenetelmää käyttäen, mittaustuloksen

oikeellisuuden varmistamiseksi. Maadoitusmittausta suorittavalla henkilöllä tulisikin olla hyvät tiedot sähkötekniikasta, erityisesti maadoitukseen ja mittaustekniikkaan liittyen.

6. MAADOITUSRESISTANSSIMITTAUSTEN LUOTETTAVUUS TILASTOJEN VALOSSA

Tässä työssä tutkittiin maadoitusresistanssin mittausten menetelmien luotettavuutta vertailemalla tilastoituja maadoitusmittaustuloksia. Eltel on mitannut tuhansien voimajohtopylväiden maadoitusresistansseja osana voimajohtojen kunnossapitoa. Käytettävissä oli siis runsaasti dataa voimajohtopylväiden maadoitusresistanssimittauksista useiden vuosien ajalta. Maadoitusresistanssimittaukset suoritetaan Ertelin sisäisten sekä mahdollisten asiakkaan omien ohjeistuksien mukaisesti. Ohjeistuksissa pylväät on luokiteltu mm. maadoitusten laajuuden ja pylvään materiaalin mukaan sekä esitetty suositellut menetelmät eri tyyppisten pylväiden ja maadoitusten maadoitusresistanssin mittaamiseen. Tilastollisen aineiston ja työssä esitellyn teorian perusteella oli tavoitteena löytää keinoja, joilla erityisesti maadoitusresistanssin mittauksen luotettavuutta voitaisiin parantaa.

Maadoitusresistanssin mittaustuloksen lisäksi virhettä voi aiheuttaa myös väärä vertailuarvo. Voimajohtojen maadoitus suunnittelussa on käytetty pääasiassa homogeenista maaperämallia. Vaihtoehtoinen ja oletettavasti parempi maaperämalli maadoitusten mitoituksessa ja maadoitusresistanssin laskennassa olisi kaksikerrosmalli. Suomessa maaperän resistiivisyysmittaukset tehdään tyypillisesti Wenner-menetelmällä 1, 2, 4, 8 ja 16 m elektrodiväleillä. Pintamaan merkitys painottuu huomattavasti, kun maaperä oletetaan homogeeniseksi ja resistiivisyys oletetaan näillä elektrodiväleillä mitattujen resistiivisyyksien keskiarvoksi. Pintamaahan haudatun elektrodin maadoitusresistanssin voisi ajatella riippuvan pääasiassa pintamaan resistiivisyydestä. Kuitenkin monissa lähteissä on esitetty, että maadoitusresistanssin arvo on voimakkaammin riippuvainen maan syvempien kerrosten resistiivisyydestä. Tässä työssä verrattiin mittaustuloksia eri maaperämalleilla laskettuihin maadoitusresistansseihin. Työn rajaamiseksi tässä luvussa on esitetty vain suunnittelu arvojen ja kaksikerrosmallin mukaisilla vertailuarvoilla saadut tulokset.

6.1 Aineisto ja mittaustulosten ryhmittely

Tilastollista vertailua varten kerättiin maadoituspöytäkirjat ja maadoitusmittauspöytäkirjat yhteensä 547 pylväältä. Liitteessä A on esitetty esimerkit maadoituspöytäkirjasta ja maadoitusmittauspöytäkirjasta tietoinen. Maadoituspöytäkirjoista kerättiin tiedot

maadoitusresistanssiin vaikuttavista tekijöistä ja eri mittausten menetelmillä saadut maadoitusresistanssin mittaustulokset. Kaikkiaan mittaustuloksia oli 691 kpl. Aineistoa pyrittiin keräämään siten, että eri tyyppisiä pylväitä ja maadoituksia sekä mittausten menetelmiä olisi luotettavien tulosten saamiseksi riittävä määrä. Tarkastelusta karsittiin pois seuraavanlaiset pylväät:

- maadoitus suunnitelmaa tai maadoitusmittauspöytäkirjaa ei ollut saatavilla
- maadoitus suunnitelmasta puuttui odotettavissa oleva maadoitusresistanssin arvo eli suunnittelu arvo
- maadoitus suunnitelmasta puuttui mitatut maan resistiivisyyden arvot
- maadoitus tarkastuksessa oli havaittu puutteita, kuten vaurioituneita maadoituselektrodeja tai huonoja liitoksia.

Jokaisen pylvään maadoitus suunnitelmasta ja maadoitusmittauspöytäkirjasta kirjattiin ylös seuraavat tiedot, joiden avulla pylväitä voitiin ryhmitellä:

- suunniteltu maadoitusresistanssin arvo
- Wenner -menetelmällä mitatut resistanssiarvot elektrodiväleillä 1, 2, 4, 8 ja 16 m
- asennetun maadoituskuparin määrä ja poikkipinta-ala
- pylvään tyyppi ja materiaali
- tiedot potentiaalinojauselektrodeista, lisäsiteiden määrästä ja yhdistyksistä muiden pylväiden tai sähköasemien maadoituksiin
- maadoitusresistanssin mittaustulos kaikilla menetelmillä, joilla maadoitusresistanssi ko. pylväällä oli mitattu.

Kaikkien eri elektrodiväleillä laskettujen resistiivisyyksien keskiarvon perusteella pylväät ryhmiteltiin hyvin johtavassa maaperässä (alle 500 Ω) sijaitseviin ja huonosti johtavassa maaperässä (yli 1500 Ω) sijaitseviin pylväisiin. Väliin jäävät pylväät, jotka eivät sijainneet selkeästi hyvin tai huonosti johtavassa maaperässä ryhmiteltiin omaksi ryhmäkseen.

Pylväät ryhmiteltiin myös maadoitusten laajuuden perusteella siten, että suppeiksi maadoituksiksi katsottiin alle 25 m ja laajoiksi maadoituksiksi yli 50 m kuparimäärästä koostuvat maadoitukset.

Mittaustuloksia verrattiin maadoituspöytäkirjoissa esitettyihin suunnitteluarvoihin sekä kaksikerrosmallin mukaisiin maadoitusresistanssiarvoihin. Kaksikerrosmallin mukaiset maadoitusresistanssit laskettiin Wenner -menetelmällä mitattujen resistanssien avulla määritettyjen resistiivisyyksien sekä asennetun kuparimäärän ja tämän poikkipinnan perusteella.

Vertailussa käytettiin laskentatarpeen vähentämiseksi luvussa 4.6 esitettyjä kaavoja yksinkertaisempaa menetelmää kaksikerrosmallin määrittämiseksi. Kaksikerrosmalli määritettiin negatiivisilla heijastuskertoimen K arvoilla kaavalla (6.1) ja positiivisilla heijastuskertoimen arvoilla kaavalla (6.2) [12]

$$\rho = \frac{\rho_1}{\left(1 + \left(\frac{\rho_1}{\rho_2} - 1\right) \left(1 - e^{-\frac{1}{K(h_1 + 2h)}}\right)\right)} \quad (6.1)$$

$$\rho = \rho_2 \left(1 + \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} - 1\right) \left(1 - e^{\frac{-1}{K(h_1 + 2h)}}\right)\right) \quad (6.2)$$

Pintamaan resistiivisyydeksi ρ_1 oletettiin maadoituspöytäkirjoista saatujen 2 m ja 4 m resistiivisyyksien keskiarvo, syvämaan resistiivisyydeksi ρ_2 16 m resistiivisyys ja elektrodin upotussyvyyden oletettiin olevan 0,7 m ja pintamaan syvyyden h_1 oletettiin kaikissa tapauksissa olevan 8 m.

Tarkoituksena oli selvittää, vastaako kaksikerrosmallin mukaisen resistiivisyyden avulla laskettu maadoitusresistanssi paremmin mitattuja arvoja kuin suunnitteluarvo. Jokaiselle pylväälle laskettiin maaperän heijastuskertoimen kaavalla (4.8) ja pylväät ryhmiteltiin selkeästi kerrostuneessa maaperässä sijaitseviin ja homogeenisemmässä maaperässä sijaitseviin pylväisiin. Kerrostuneisuus määritettiin heijastuskertoimen avulla siten, että ne pylväät, joilla heijastuskertoimen itseisarvo oli yli 1/3 sijaitsivat selkeästi kerrostuneessa maaperässä. Toisin sanoen maaperä katsottiin selkeästi kerrostuneeksi, mikäli pinta- ja syvämaan suhde oli yli 2 tai alle 1/2.

6.2 Mittausaineiston analysointi

Mittaustuloksia verrattiin maadoitussuunnitelman mukaiseen maadoitusresistanssiin ja kaksikerrosmallin mukaisiin maadoitusresistansseihin. Jokaiselle mittaukselle laskettiin virhe (6.3), virheprosentti (6.4) ja virheprosentin itseisarvo

$$\text{Virhe} = R_{\text{mitt}} - R_m \quad (6.3)$$

$$\text{Virhe \%} = \frac{\text{Virhe}}{R_m} 100 \% \quad (6.4)$$

missä R_{mitt} on maadoitusresistanssin mittausrvo ja R_m on maadoitusresistanssin arvo, johon mittausrvoa verrataan, eli ns. vertailuarvo. Virheen ja virheprosentin negatiiviset arvot tarkoittavat siis, että mittaustulos on ollut pienempi kuin vertailuarvo.

Mittaukset ryhmiteltiin eri pylvästyypin mukaan menetelmittain. Ryhmittelyn avulla voitiin laskea eri pylvästyypeille virheprosenttien ja näiden itseisarvojen keskiarvot sekä virheprosentin otoskeskihajonta (6.5) menetelmittain.

$$\text{Otoskeskihajonta} = \sqrt{\frac{\sum(x-\bar{x})^2}{(n-1)}} \quad (6.5)$$

missä x on virheprosentin otoskeskiarvo,

$$\bar{x} = \sum_1^n \frac{x_i}{n} \quad (6.6)$$

ja n on otoksen suuruus.

Virheprosenttien keskiarvo kertoo mittausvirheen suunnasta. Negatiivinen virheprosentin keskiarvo esimerkiksi tarkoittaa, että mittaustulokset ovat keskimäärin pienempiä kuin vertailuarvo. Virheprosentin itseisarvojen keskiarvo ja otoskeskihajonta kuvaavat sitä, kuinka hajallaan mittaustulokset ovat. Mitä suurempia nämä arvot ovat, sitä epäluotettavampaa maadoitusresistanssin mittaaminen keskimäärin on.

6.3 Tulokset

Mittaukset ryhmiteltiin mm. mittausmenetelmän, vertailuarvon sekä pylväs- ja maaperätyypin mukaan. Tavoitteena oli löytää selkeitä eroja keskimääräisessä luotettavuudessa erityyppisten pylväiden ja maadoitusten mittaustuloksista. Tässä luvussa on esitetty tilastollisen vertailun keskeisimmät tulokset. Tuloksia on analysoitu ja tulkittu perusteellisemmin luvussa 6.5.

6.3.1 Suunnitteluarvojen ja kaksikerrosmallin mukaisten maadoitusresistanssien vertailukelpoisuus

Kaksikerrosmallin mukaiset maadoitusresistanssit määritettiin automaattisesti pelkkien maan resistiivisyystietojen, asennetun kuparimäärän ja tämän poikkipinta-alan perusteella. Suunnitteluarvoissa on siis todennäköisesti huomioitu tarkemmin maadoitusresistanssiin mahdollisesti vaikuttavat muut tekijät. Tästäkin huolimatta

kaksikerrosmallin mukainen maadoitusresistanssi vastasi keskimäärin huomattavasti paremmin mitattuja maadoitusresistanssien arvoja koko aineistolla.

Kaikkien mittaustulosten virheprosenttien keskiarvot, virheprosenttien itseisarvojen keskiarvot ja otoskeskihajonta on esitetty suunnitteluarvolle ja kaksikerrosmallin mukaiselle vertailuarvolle Taulukossa 6.

Taulukko 6. Vertailuarvon vaikutus mittausvirheeseen, otantana koko aineisto (691 mittaustulosta).

vertailuarvo	virhe %	virhe %	hajonta (%)
Suunnitteltu Rm	38,4	66,0	92,6
2-kerrosmalli	1,9	50,6	75,2

Taulukosta nähdään, että mittausvirheet ja hajonta ovat keskimäärin huomattavasti pienempiä, kun vertailuarvona on kaksikerrosmallin mukainen maadoitusresistanssi. Hajonta on kuitenkin suuri myös kaksikerrosmallin vertailuarvolla.

Suunnitteluarvoissa on todennäköisesti huomioitu myös potentiaalinhjauselektrodien vaikutus. Kaksikerrosmallin mukaiset maadoitusresistanssit on laskettu olettamalla asennettu kuparimäärä vaakasuoraksi upotetuksi johtimeksi. Taulukossa 7 nähdään mittausvirheet, kun potentiaalinhjauselektrodeilla varustetut pylväät on poistettu vertailusta.

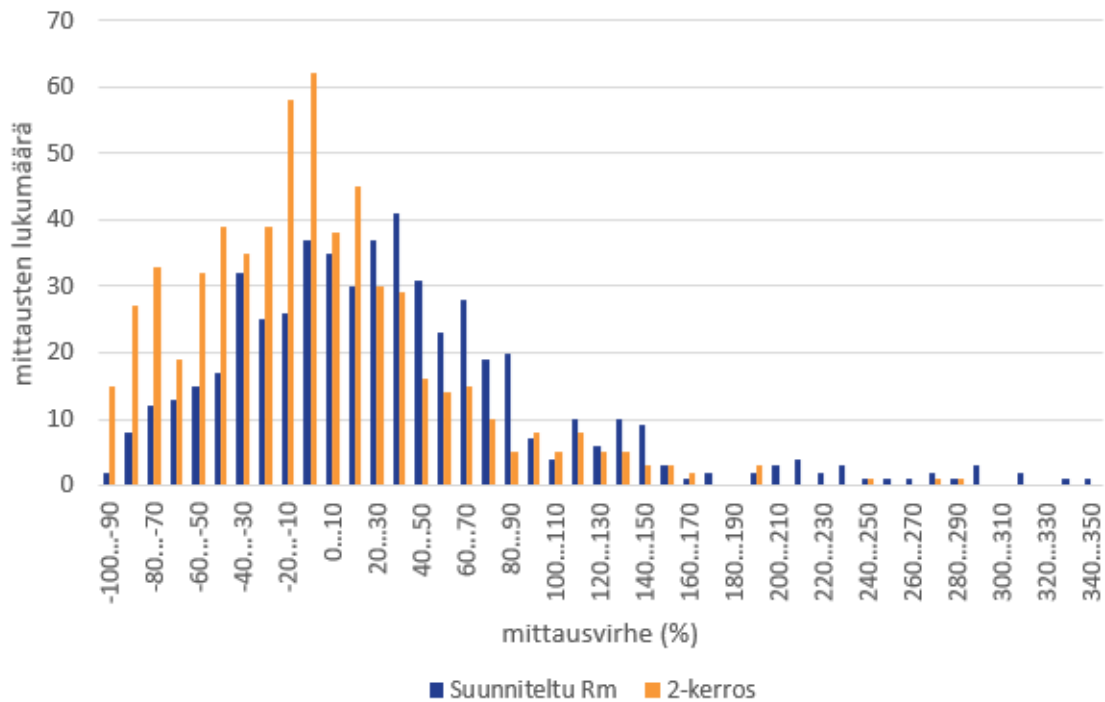
Taulukko 7. Vertailuarvon vaikutus mittausvirheeseen, potentiaalinhjauselektrodipylväät poistettu (608 mittaustulosta).

vertailuarvo	virhe %	virhe %	hajonta (%)
Suunnitteltu Rm	43,3	66,1	91,8
2-kerrosmalli	-2,1	45,1	64,2

Huomataan, että homogeenisen mallin ja kaksikerrosmallin vertailuarvoilla, mittausvirheet ja hajonta ovat pienemmät kuin koko aineistolla. Keskimääräinen virheprosentin itseisarvo ja hajonta ovat kuitenkin edelleen hyvin suuria.

Suunnitteluarvot ja kaksikerrosmallin mukaiset maadoitusresistanssit ovat vertailukelpoisempia, kun poistetaan pylväät, joilla on potentiaalinhjauselektrodit, koska kaksikerrosmallin maadoitusresistanssit on laskettu vaakaelektrodin maadoitusresistanssin kaavalla (2.11) käyttäen elektrodipituutena L maadoituspöytäkirjoissa ilmoitettuja kuparimääriä. Potentiaalinhjauselektrodipylväillä näin laskettu maadoitusresistanssi ei ole realistinen, sillä potentiaalinhjauselektrodeilla saavutettava maadoitusresistanssi on samalla elektrodipituudella huomattavasti suurempi kuin vaakaelektrodeilla. Maadoitussuunnittelussa potentiaalinhjauselektrodin kuparimäärästä huomioidaan maadoitusresistanssin laskennassa noin 60 %.

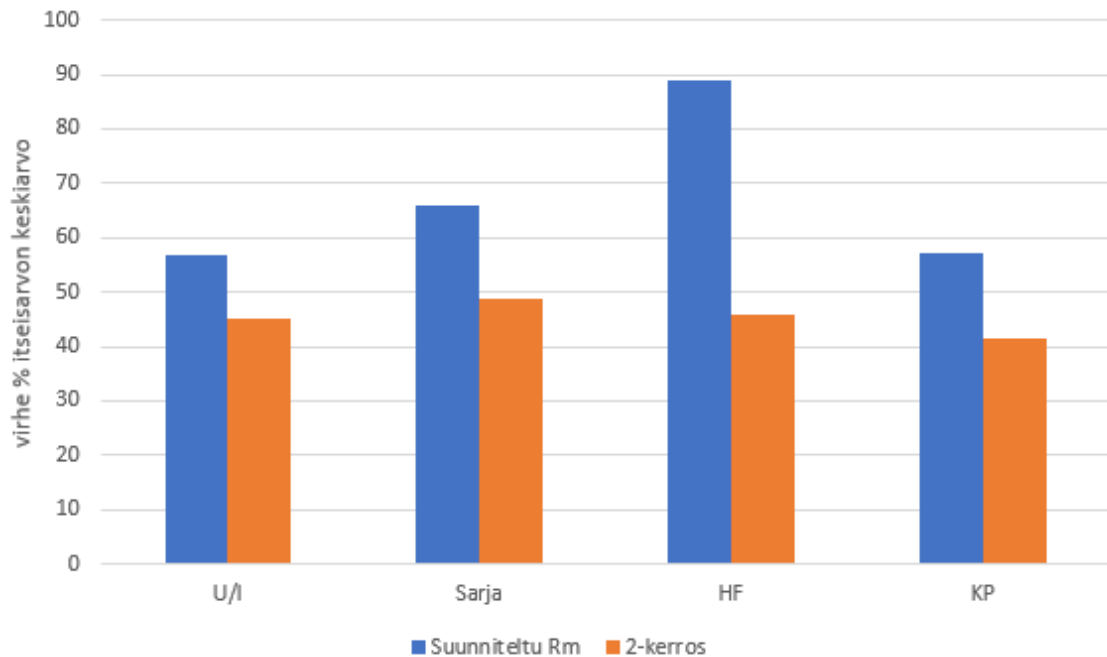
Kuvassa 26 nähdään mittausvirheiden jakautuminen vertailuarvoittain, kun potentiaalinhjauselektrodeilla varustetut pylväät on poistettu aineistosta.



Kuva 26. Mittausvirheen jakautuminen vertailuarvoittain, kun potentiaalinhjauselektrodipylväät on poistettu aineistosta.

Kuvasta nähdään, että mittausvirhe on kaksikerrosmalliin verrattaessa huomattavasti useammin negatiivinen kuin suunnitteluarvoon verrattaessa. Nähdään myös, että mittausvirheet ovat kaksikerrosmallin mukaisella vertailuarvolla keskittyneet selkeämmin 0 %:n ympäristöön kuin suunnitteluarvoon verrattaessa. Mittausvirheiden jakautuminen on esitetty menetelmittain liitteessä B.

Keskimääräinen virheprosentin itseisarvo oli menetelmästä riippumattakin pienin, kun vertailuarvona oli kaksikerrosmallin mukainen maadoitusresistanssi. Tämä on nähtävissä Kuvasta 27, jossa on esitetty virheprosenttien itseisarvojen keskiarvot menetelmittäin. Vertailusta on poistettu potentiaalinojauselektrodeilla varustetuilla pylväillä tehdyt mittaukset.



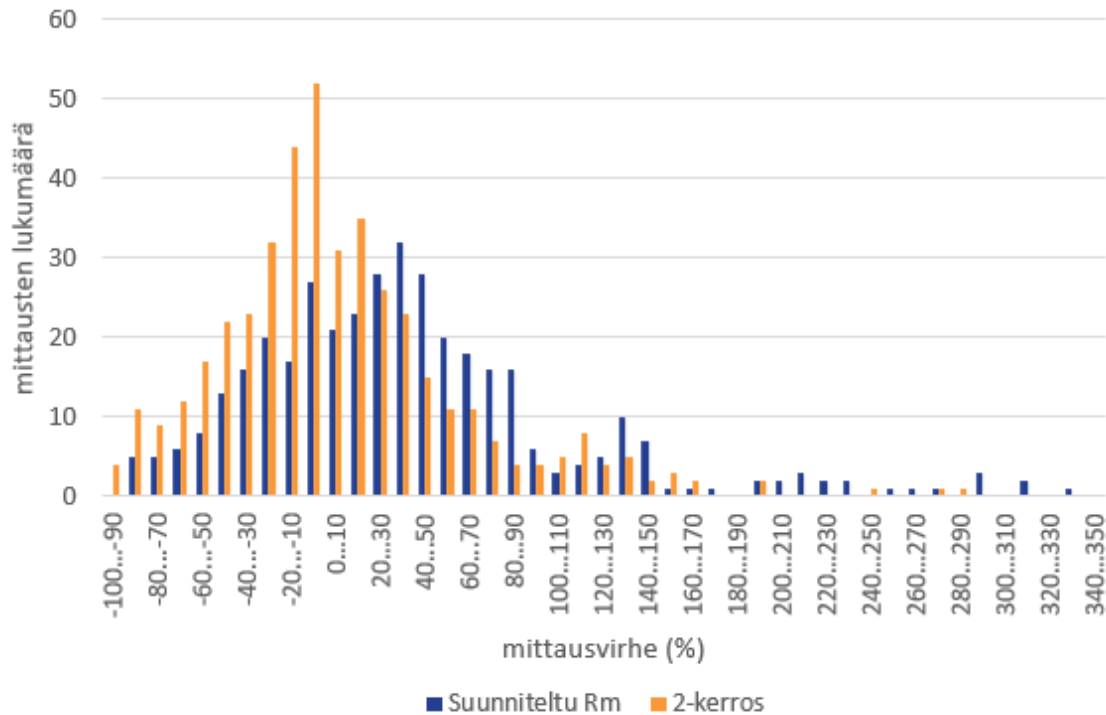
Kuva 27. Virheprosentin itseisarvojen keskiarvot menetelmittäin, kun potentiaalinojauselektrodipylväät on poistettu aineistosta.

Kuvasta nähdään, että keskimäärin mittaustulokset ja suunnitteluarvot poikkeavat menetelmästä riippumatta toisistaan huomattavasti. Erytisen suuri ero mittaustulosten ja suunnitteluarvon välillä on HF-menetelmän kohdalla. Kaksikerrosmallin mukaisella vertailuarvolla keskimääräinen virheprosenttien itseisarvojen keskiarvo ei vaihtelee merkittävästi menetelmien välillä.

6.3.2 Pylvästyypin vaikutus mittausvirheeseen

Esitetyn teorian mukaan on mahdollista, että varsinkin sarjamittausperiaatteella toimivien mittausmenetelmien luotettavuus heikkenee, jos mitattava pylväs on sellainen, että mittausvirta voi ohittaa mittausvirtapiirin. Vapaasti seisovat pylväät ovat yhteydessä maahan perustustensa kautta, jolloin ainakin osa mittausvirrasta voi ohittaa mittauspiirin perustusten kautta. Sarjamittausmenetelmän onnistumisen edellytys on, että mitattava maadoitus ja ”apumaadoitus” sijaitsevat riittävän etäällä toisistaan. Tämä ehto ei välttämättä toteudu sellaisilla pylväillä, jotka sijaitsevat lähellä jonkin toisen voimajohdon tai sähköaseman maadoituksia. Kuvassa 28 on esitetty mittauksien

lukumäärä virheprosentin mukaan, kun aineistosta on poistettu vapaasti seisovat pylväät ja pylväät, jotka ovat yhteydessä muiden johtojen tai sähköasemien maadoituksiin.



Kuva 28. Mittausvirheen jakautuminen vertailuarvoittain, kun potentiaalinhjauselektrodipylväät, vapaasti seisovat pylväät ja yhdistyspylväät on poistettu aineistosta.

Kun verrataan Kuvaa 28 ja Kuvaa 26 huomataan, että erityisesti kaksikerrosmallin mukaisella vertailuarvolla, suuret negatiiviset virheet vähenivät huomattavasti, kun vapaasti seisovat pylväät ja yhdistyspylväät poistettiin. Suurin vaikutus vapaasti seisovien ja yhdistyspylväiden poistamisella oli U/I- ja sarjamittausmenetelmien virheiden jakaumiin. Merkittävä osa suurista negatiivisista mittausvirheistä oli siis mitattu näillä menetelmillä. Mittausvirheiden jakautuminen on esitetty menetelmittäin liitteessä B.

6.3.3 Kaksikerrosmaaperän ja heijastuskertoimen vaikutus mittausvirheeseen

Pylväät ryhmiteltiin maaperän heijastuskertoimen mukaan selkeästi kerrostuneessa maaperässä sijaitseviin pylväisiin ja homogeenisemmassa maaperässä sijaitseviin pylväisiin. Taulukkoon 8 on koottu virheprosenttien keskiarvot, virheprosenttien itseisarvojen keskiarvot, otoskeskihajonnat ja otosten koot suunnitteluarvolla ja kaksikerrosmallilla.

Taulukko 8. Kaksikerrosmaan ja heijastuskertoimen vaikutus mittausvirheeseen, kun vertailuarvona oli suunnitteluarvo, potentiaalinohjauspylväät poistettu, pos = positiivinen heijastuskerroin, neg = negatiivinen heijastuskerroin, K = maaperä selkeästi kerrostunut.

Heijastuskerroin	Suunniteltu Rm			2-kerros			Otanta
	virhe %	virhe %	hajonta	virhe %	virhe %	hajonta	
pos	56,8	73,1	91,6	-5,5	44,2	60,2	436
neg	11,9	50,1	84,4	6,5	46,9	72,1	186
K	63,8	85,7	111	-6,8	47,8	64,6	263
K & pos	83	95,8	110,5	-4,9	49,3	68,1	202
K & neg	0,2	52,4	86,5	-13	43	51,5	61

Nähdään, että suunnitteluarvolla mittausvirhe oli keskimäärin merkittävästi suurempi kuin kaksikerrosmallilla, kun heijastuskertoimen arvo oli positiivinen (**pos**). Selkeästi kerrostuneessa (**K**) maassa mittausvirhe oli keskimäärin huomattavasti suurempi suunnitteluarvolla kuin kaksikerrosmallilla. Lisäksi kaksikerrosmallin mukaisella vertailuarvolla, mittausvirheen keskiarvo selkeästi kerrostuneessa maaperässä, jonka heijastuskerroin on negatiivinen (**K & neg**), oli huomattavan pieni (-13 %).

6.3.4 Maan resistiivisyyden ja maadoitusten laajuuden vaikutus mittausvirheeseen menetelmittäin

Tässä luvussa on esitetty sellaisten mittaustulosten, joiden virheprosentin itseisarvo oli alle 30, määrä ja suhteellinen osuus kaikista mittauksista mittaamenetelmittäin ja vertailuarvoittain. Potentiaalinohjauselektrodeilla varustetuilla pylväillä tehdyt mittaukset on poistettu vertailusta.

U/I-menetelmällä mitattuja pylväitä oli yhteensä 170 kpl. Näistä pylväistä huonosti johtavassa maaperässä sijaitsi 80 kpl (47,1 %) ja hyvin johtavassa maaperässä 54 kpl (31,8 %). Mitatuista pylväistä 114 (67,1 %) pylväällä oli laajat maadoitukset ja 24 (14,1 %) pylväällä oli suppeat maadoitukset. Mittaustuloksia, joiden virheprosentin itseisarvo oli 30 tai alle vertailuarvoittain:

- **Suunnitteluarvo:** 65 kpl (38,2 %), joista
 - huonosti johtavassa maaperässä 38 kpl (58,5 %)
 - hyvin johtavassa maaperässä 14 kpl (21,5 %)
 - laajoja maadoituksia 47 kpl (72,3 %)

- suppeita maadoituksia 8 kpl (12,3 %)
- **Kaksikerrosmalli:** 71 kpl (41,8 %), joista
 - huonosti johtavassa maaperässä 28 kpl (39,4 %)
 - hyvin johtavassa maaperässä 27 kpl (38,0 %)
 - laajoja maadoituksia 46 kpl (64,8 %)
 - suppeita maadoituksia 14 kpl (19,7 %)

Sarjamenetelmällä mitattuja pylväitä oli yhteensä 196 kpl. Näistä pylväistä huonosti johtavassa maaperässä sijaitsi 102 kpl (52,0 %) ja hyvin johtavassa maaperässä 51 kpl (26,0 %). Mitatuista pylväistä 128 (65,3 %) pylväällä oli laajat maadoitukset ja 30 (15,3 %) pylväällä oli suppeat maadoitukset. Mittaustuloksia, joiden virheprosentin itseisarvo oli 30 tai alle oli vertailuarvoittain seuraavasti:

- **Suunnittelu-arvo:** 61 kpl (31,1 %), joista
 - huonosti johtavassa maaperässä 47 kpl (77,0 %)
 - hyvin johtavassa maaperässä 5 kpl (8,2 %)
 - laajoja maadoituksia 49 kpl (80,3 %)
 - suppeita maadoituksia 1 kpl (1,6 %)
- **Kaksikerrosmalli:** 78 kpl (39,8 %), joista
 - huonosti johtavassa maaperässä 35 kpl (44,9 %)
 - hyvin johtavassa maaperässä 22 kpl (28,2%)
 - laajoja maadoituksia 53 kpl (67,9 %)
 - suppeita maadoituksia 10 kpl (12,8 %)

HF-menetelmällä mitattuja pylväitä oli yhteensä 112 kpl. Näistä pylväistä huonosti johtavassa maaperässä sijaitsi 21 kpl (18,8 %) ja hyvin johtavassa maaperässä 77 kpl (68,8 %). Mitatuista pylväistä 37 (33,0 %) pylväällä oli laajat maadoitukset ja 26 (23,2 %) pylväällä oli suppeat maadoitukset. Mittaustuloksia, joiden virheprosentin itseisarvo oli 30 tai alle oli vertailuarvoittain seuraavasti:

- **Suunnittelu-arvo:** 31 kpl (27,7 %), joista

- huonosti johtavassa maaperässä 10 kpl (32,3%)
- hyvin johtavassa maaperässä 16 kpl (51,6 %)
- laajoja maadoituksia 13 kpl (41,9 %)
- suppeita maadoituksia 10 kpl (32,3 %)
- **Kaksikerrosmalli:** 55 kpl (49,1 %), joista
 - huonosti johtavassa maaperässä 4 kpl (7,3 %)
 - hyvin johtavassa maaperässä 46 kpl (83,6 %)
 - laajoja maadoituksia 10 kpl (18,2 %)
 - suppeita maadoituksia 15 kpl (27,3 %)

Käännepestemenetelmällä mitattuja pylväitä oli yhteensä 130 kpl. Näistä pylväistä huonosti johtavassa maaperässä sijaitsi 60 kpl (46,2 %) ja hyvin johtavassa maaperässä 36 kpl (27,7 %). Mitatuista pylväistä 105 (80,8 %) pylväällä oli laajat maadoitukset ja 5 (3,8 %) pylväällä oli suppeat maadoitukset. Mittaustuloksia, joiden virheprosentin itseisarvo oli 30 tai alle oli vertailuarvoittain seuraavasti:

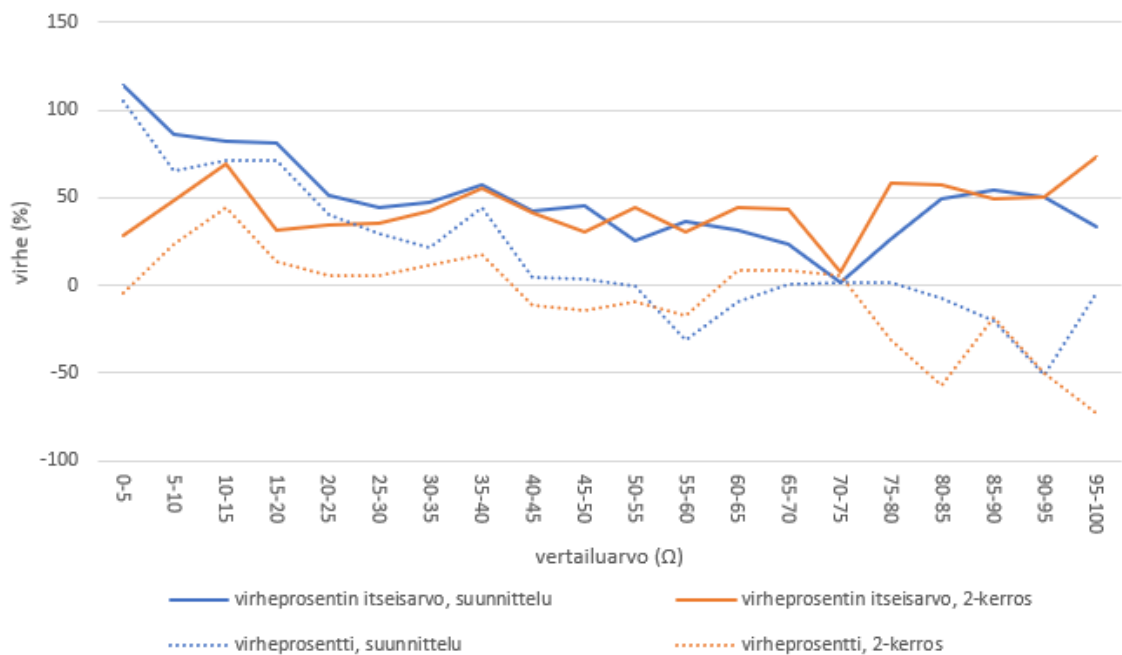
- **Suunnittelu-arvo:** 51 kpl (39,2 %), joista
 - huonosti johtavassa maaperässä 26 kpl (51,0%)
 - hyvin johtavassa maaperässä 10 kpl (19,6 %)
 - laajoja maadoituksia 46 kpl (90,2 %)
 - suppeita maadoituksia 0 kpl (0,0 %)
- **Kaksikerrosmalli:** 68 kpl (52,3 %), joista
 - huonosti johtavassa maaperässä 25 kpl (36,8 %)
 - hyvin johtavassa maaperässä 20 kpl (29,4 %)
 - laajoja maadoituksia 56 kpl (82,4 %)
 - suppeita maadoituksia 5 kpl (7,4 %)

Onnistuneiden mittausten osuus (virheprosentin itseisarvo alle 30) oli mittausten menetelmästä riippumatta suurempi, kun mittaustuloksia verrattiin kaksikerrosmallin mukaiseen maadoitusresistanssiin. Suunnittelu-arvoon verrattessa onnistuneiden mittausten joukossa oli selkeästi enemmän huonosti johtavassa

maaperässä sijaitsevien pylväiden mittauksia kuin hyvin johtavassa maaperässä sijaitsevien pylväiden mittauksia. Kaksikerrosmallin mukaisella vertailuarvolla huonosti johtavassa maaperässä sijaitsevat pylväät ja laajat maadoitukset olivat selkeästi aliedustettuja onnistuneiden mittausten joukossa, kun taas hyvin johtavassa maaperässä sijaitsevat pylväät olivat yliedustettuina. Käännepistemittausten joukosta ei noussut esiin ali- tai yliedustettuja ryhmiä kummallakaan vertailuarvolla.

6.3.5 Maadoitusresistanssin vaikutus mittausvirheeseen

Todellisella maadoitusresistanssilla on esitellyn teorian mukaan vaikutusta ainakin HF-menetelmän mittaustarkkuuteen. Kuvassa 29 nähdään kaikkien mittausten virheprosenttien ja virheprosenttien itseisarvojen keskiarvot vertailuarvona olevan maadoitusresistanssin suuruuden mukaan. Potentiaalinoihjauselektrodeilla varustetut pylväät poistettiin vertailusta, jotta tulokset olisivat vertailukelpoisia.



Kuva 29. Maadoitusresistanssin vaikutus mittausvirheeseen, potentiaalinoihjauspylväät poistettu.

Kuvaajasta nähdään, että virheprosentit ja niiden itseisarvot olivat hyvin pienillä maadoitusresistansseilla keskimäärin noin 100 % luokkaa, kun vertailuarvona oli suunnitteluarvo. Molemmat pienenevät maadoitusresistanssin kasvaessa. Kaksikerrosmallin mukaisilla vertailuarvoilla virheprosenttien keskiarvo pysyy lähellä 0 % noin 70 Ω maadoitusresistanssiin asti, minkä jälkeen virheprosenttien keskiarvo näyttäisi pienenevän voimakkaasti. Virheprosenttien itseisarvo pysyy melko tasaisesti noin 50 % tasolla maadoitusresistanssin muutoksista huolimatta.

Taulukko 9. Vertailuarvona olevan maadoitusresistanssin vaikutus mittausrvirheeseen menetelmittain, potentiaalinhjauspylväät poistettu.

R_m (Ω)	menetelmä	suunnittelu		2-kerros	
		virhe%	virhe %	virhe%	virhe %
0...25	U/I	66,1	74,1	15,9	42,1
	Sarja	80,8	94,0	24,4	52,3
	HF	80,1	95,6	2,7	38,3
	KP	52,3	61,2	23,1	38,8
25...50	U/I	-0,1	35,8	6,5	41,8
	Sarja	25,8	46,7	6,5	41,3
	HF	1,8	46,2	7,0	60,9
	KP	51,1	60,6	18,9	42,5
50...75	U/I	-9,4	26,5	-5,3	37,1
	Sarja	-9,0	27,2	-4,6	39,0
	HF	-17,3	18,9	-27,4	35,2
	KP	3,6	33,0	11,7	32,0
75...100	U/I	-34,0	49,8	-38,7	55,4
	Sarja	-3,9	34,5	-40,5	51,4
	HF	-38,4	38,4	-73,3	73,3
	KP	17,2	31,6	20,8	41,6
100...	U/I	-20,8	49,8	-51,4	59,4
	Sarja	-7,8	40,9	-39,2	56
	HF	-40,8	40,8	-78,4	78,4
	KP	-20,4	38,2	-53,1	53,1

Nähdään, että maadoitusresistanssin arvoilla 0...25 Ω kaksikerrosmallilla virheet ovat keskimäärin selkeästi pienempiä kuin suunnitteluarvolla. Virheprosentti kaksikerrosmallilla kasvaa maadoitusresistanssin kasvaessa. HF-menetelmällä tämä näkyy selkeimmin keskimääräisen virheen kasvaessa merkittävästi, kun maadoitusresistanssi nousee yli 50 Ω . On tosin huomattava, että HF-mittausten määrä yli 50 Ω suunnitteluarvolla on melko pieni johtuen siitä, että Eltelin maadoitusmittausohjeen mukaan HF-mittausta ei voida pitää luotettavana pylväillä, joiden maadoitusresistanssi on yli 50 Ω .

Kuvasta 29 ja Taulukosta 9 nähdään, että suunnitteluarvo ja kaksikerrosmalli näyttäisivät olevan jokseenkin vertailukelpoisia, kun maadoitusresistanssi on välillä 25...75 Ω . Pienillä maadoitusresistanssin arvoilla kaksikerrosmalliin verrattujen mittaustulosten virhe on keskimäärin pienempi kuin suunnitteluarvoon verrattujen, kun taas suurilla maadoitusresistanssien arvoilla tilanne on päinvastainen.

6.4 Tulosten tulkinta

Maadoitusresistanssin mittaustulokseen vaikuttavia tekijöitä on lukuisia, eikä kaikkia tekijöitä voida tuntea tai niiden vaikutusta sulkea pois. On myös muistettava, että

maadoitustarkastusten tarkoituksena ei ole ollut kerätä tietoa tilastollista vertailua varten, vaan maadoitusten kunnan tarkastaminen. Tästä syystä kaikkia mittaustulokseen mahdollisesti vaikuttavia tekijöitä, kuten sääolosuhteita ei ole kirjattu pöytäkirjoihin ja mittaus oli suurimmalla osalla pylväistä tehty vain yhtä menetelmää käyttäen. On myös mahdollista, että esimerkiksi virheellisestä mittaustekniikasta tai huolimattomuudesta johtuvia virheellisiä mittaustuloksia on mukana aineistossa, vaikka aineistosta pyrittiin rajaamaan pois tällaiset mittaustulokset. Aineisto koostuu eri vuosikymmenillä suunnitelluista, rakennetuista ja mitatuista pylväistä aina 1960- luvulta 2010 -luvulle asti. Tässä ajassa on väistämättä tapahtunut muutoksia suunnittelun, rakentamisen ja mittaamisen käytännöissä, kuten laskennassa ja merkitsemistavoissa. Yksittäisen muuttujan vaikutusta on vaikea arvioida, koska monet muuttujat ovat keskinäisriippuvaisia. Esimerkiksi maan resistiivisyys vaikuttaa epäsuorasti maadoitusten laajuuteen, koska huonosti johtavaan maaperään joudutaan asentamaan laajoja maadoituksia, jotta turvallisuusvaatimukset täyttyvät.

Suuri hajonta oli maadoitusresistanssiin vaikuttavien muuttujien valtaisan määrä vuoksi osittain odotettavissa. Maadoitusresistanssin mittaaminen on tulosten perusteella tällä hetkellä kuitenkin yllättävän epäluotettavaa suunnitteluarvoon verrattaessa. Hajonta on suuri ja mittausvirheen itseisarvo keskimäärin kymmeniä prosentteja. Suunnitteluarvot olivat keskimäärin noin 40 % suuremmat kuin mittausarvot, otoskeskihajonta suunnitteluarvolla oli noin 91,9 % ja vaihteluväli on noin 751,3 %. Yksinkertaisella kaksikerrosmallilla lasketut maadoitusresistanssit ja mittausarvot olivat keskimäärin lähempänä toisiaan, mutta myös kaksikerrosmallilla mittausvirheen otoskeskihajonta ja vaihteluväli ovat huomattavan suuria (83,5 % ja 671,6 %). Mittausvirheen keskiarvo oli kaksikerrosmallilla kuitenkin vain noin 3,3 %. Suunnitteluarvolla mittausvirheet keskittyvät 40 % ympäristöön, kun kaksikerrosmallisissa mittausvirheet keskittyvät lähemmäs 0 %:a.

On mahdollista, että suunnitteluarvoissa pintamaan vaikutus on ylikorostunut. Voimajohtojen maadoitusten suunnittelussa on yleisesti käytetty maaperämallia, jossa maaperän oletetaan olevan homogeeninen ja sen resistiivisyys on laskettu Wennermenetelmällä mitatuista resistansseista elektrodiväleillä $a = 2 \text{ m}$, 4 m ja 16 m . On kuitenkin esitetty, että maadoitusresistanssiin vaikuttaisi pintamaan resistiivisyyden sijaan enemmän maaperän syvemmällä olevat kerrokset. Taulukosta 8 nähdään, että mittaustulokset vastasivat suunnitteluarvoja erityisen huonosti sellaisilla pylväillä, jotka sijaittivat maaperässä, jossa pintamaa oli paremmin johtavaa kuin syvämaa. Mitatuista pylväistä 379/547 kpl (69,3 %) sijaitsi tällaisessa maaperässä. Lisäksi selkeästi

kerrostuneessa maaperässä sijaitsevista pylväistä 232/289 kpl (80,3 %) sijaitsi tällaisessa maaperässä. Tämä tukee teoriaa, jonka mukaan maaperän syvempien kerrosten resistiivisyys vaikuttaa enemmän maadoitusresistanssiin kuin pintamaan resistiivisyys.

Kaksikerrosmallilla laskettujen maadoitusresistanssien keskiarvo oli noin 73,0 Ω ja maadoitussuunnitelmien mukaisten maadoitusresistanssien keskiarvo oli noin 41,8 Ω . Suunnitteluarvot olivat siis keskimäärin noin 42,8 % pienempiä kuin kaksikerrosmallilla lasketut maadoitusresistanssit. Todettakoon, että käytetty kaksikerrosmalli tuotti keskimäärin hieman mittaustuloksia suurempia arvoja etenkin huonosti johtavassa maaperässä, joten ero suunnitteluarvon ja todellisen maadoitusresistanssin välillä on oletettavasti keskimäärin alle 40 %.

Todelliset maadoitusresistanssit vaikuttaisivat siis olevan keskimäärin huomattavasti suurempia kuin on suunniteltu. Havainto on huolestuttava, sillä todellisen maadoitusresistanssin suunniteltua suurempi arvo tarkoittaisi, että myös vaarajännitteet olisivat todellisuudessa suunnittelun aikana tehtyjen vaarajännitelaskelmien mukaisia jännitteitä suurempia.

U/I- ja sarjamenetelmät

Aineiston perusteella sarjamittausmenetelmä vaikuttaa olevan luotettavampi kuin maadoitusresistanssin mittaamista käsittelevissä ohjeissa annetaan ymmärtää. Sarjamittausta pidetään epäluotettavana [38], mutta aineiston perusteella sarjamittausmenetelmä ja U/I -menetelmät ovat kuitenkin vertailukelpoisia luotettavina pidettyjen menetelmien kanssa. Tulosten valossa ne vaikuttivat paikoin jopa paremmilta.

Sarjamenetelmän luotettavuutta heikentäviksi tekijöiksi mainitaan esimerkiksi maadoitusmittauslaitteita valmistavan Meggerin mittausohjeessa [51] apumaadoituksen liian suuri maadoitusresistanssi ja se että mitattava maadoitus ja apumaadoitukset ovat toistensa vaikutusalueella. Voimajohtopylvään tapauksessa apumaadoitus tarkoittaa mitattavan pylvään rinnalle kytkettyvien pylväiden maadoituksia. Teräsalumiinisilla ukkosjohtimilla ja sähköisesti luotettavilla liitoksilla varustetulla johdolla apumaadoituksen resistanssi on hyvin pieni verrattuna keskimääräiseen voimajohtopylvään maadoitusresistanssiin. Voimajohtopylväät (110 kV) sijaitsevat myös keskimäärin noin 250 m etäisyydellä toisistaan, jolloin ne eivät kovinkaan usein sijaitsi toistensa vaikutusalueella.

Esitetyn teorian mukaan U/I- ja sarjamenetelmiä ei voida pitää luotettavana sellaisten pylväiden mittaamiseen, jotka ovat galvaanisessa yhteydessä maahan perustustensa kautta (vapaasti seisovat pylväät) tai joiden maadoitukset on yhdistetty rinnakkaisen voimajohdon tai sähköaseman maadoituksiin. Negatiivisten mittausrvirheiden määrä väheni huomattavasti, kun aineistosta poistettiin tällaisten pylväiden mittaustulokset. Tilastollisen analyysin voidaan siis sanoa tukevan esitettyä teoriaa.

Lisäksi huomattiin, että mitatut tulokset poikkesivat toisistaan keskimäärin noin 7,9 % (1,9 Ω) niillä pylväillä, joilla maadoitusresistanssi oli mitattu molemmilla menetelmillä (113 kpl). Molemmissa menetelmissä mittaussiirit ovat samat. Erona menetelmien välillä on, että U/I -menetelmässä jännitteenä käytetään virtajohtimien indusoimaa jännitettä, kun sarjamenetelmässä mittaussjännite tuotetaan mittarilla.

HF-menetelmä

Kaksikerrosmallin mukaisella vertailuarvolla sellaisilla pylväillä, joiden maadoitusresistanssi oli pieni (0...25 Ω), HF-menetelmä oli luotettavin kaikista menetelmistä. Menetelmä oli vertailukelpoinen muiden menetelmien kanssa sellaisilla pylväillä, joiden kaksikerrosmallin mukainen maadoitusresistanssi oli välillä (25...50 Ω), mutta tätä suuremmilla maadoitusresistansseilla menetelmän luotettavuus heikkenee. Tilastollisen tarkastelun tulokset siis tukevat esitettyä teoriaa, jonka mukaan HF-menetelmää ei voida pitää luotettavana pylväillä, joiden maadoitusresistanssi on yli 50 Ω . Menetelmä vaikuttaa tulosten perusteella olevan luotettava nimenomaan suppeiden maadoitusten maadoitusresistanssien mittauksissa.

HF-menetelmän epäluotettavuus on siinä mielessä huolestuttavaa, että se on tällä hetkellä ainoa teräsrakenteisten pylväiden maadoitusresistanssin mittaamiseen suositeltu menetelmä, minkä lisäksi käytännössä kaikki uudet voimajohtopylväät ovat juurikin teräsrakenteisia. Luvussa 5.4 esitelty selektiivinen maadoitusresistanssin mittaamenetelmä vaikuttaa lupaavalta vaihtoehdolta HF-menetelmälle teräsrakenteisten pylväiden maadoitusresistanssien mittaamisessa. Menetelmässä maadoitusresistanssi määritetään maadoitusten kautta kulkevan virran avulla, jolloin mittausspiirin ohittava virta ei vääristä mittaustulosta.

Käännepistemenetelmä

Menetelmä vaikuttaa aineiston perusteella yleisesti ottaen luotettavalta menetelmältä. Kaikista mittaustuloksista yli puolet (52,3 %) oli sellaisia, että virheprosentin itseisarvo oli 30 tai pienempi. Mitatuista pylväistä ei myöskään noussut esiin mitään ryhmää, joilla

käännepistemittaukset olisivat olleet erityisen epäluotettavia. On kuitenkin todettava, että käännepistemenetelmällä mitatut pylväät olivat yksinomaan puupylväitä. Tämä johtuu siitä, että maadoitusmittausohjeen mukaan käännepistemenetelmä ei sovellu teräspylväille. Lisäksi teräspylväiden mittaamiseen ohjeen mukaan soveltuva HF-menetelmä on huomattavasti vaivattomampi ja nopeampi.

Mittaustulosten kirjaamisen yhteydessä huomattiin lisäksi, että käännepistemenetelmän mittauskäyrät olivat harvoin lähellä Kuvan 19 ideaalimuotoa, vaan muistuttivat pikemminkin enemmän Kuvan 23 käyrää. Tämä viittaisi siihen, että maadoitusmittausohjeen mukainen 200 m virta-apuelektrodin etäisyys mitattavan maadoituksen keskeltä ei useimmiten ole riittävä luotettavan mittaustuloksen saamiseksi.

7. YHTEENVETO

Tämän työn tavoitteena oli kehittää maadoitusmittausprosessia Eltel Networks Oy:ssä. Pää tavoitteena oli parantaa luotettavuutta maadoitusresistanssin mittaamisessa. Työssä etsittiin myös keinoja tehostaa maadoitusmittausprosessia ja maadoitusmittauksilla saadun tiedon hyödyntämistä. Työssä perehdyttiin maadoittamista ja maadoitusmittaamista koskeviin määräyksiin ja standardeihin, niitä käsittelevään tutkimuskirjallisuuteen ja käytännön toteutukseen. Lisäksi tutkittiin maadoitusresistanssin mittausten menetelmien luotettavuutta vertailemalla tilastoituja maadoitusresistanssimittaustuloksia. Näiden perusteella muodostettiin käsitys maadoitusmittausprosessin ongelmakohdista ja esitettiin toimenpiteitä ongelmien ratkaisemiseksi.

Esitelly maadoitusresistanssin mittaamista käsittelevä teoria ja tilastollisen analyysin tulokset tukivat pääosin toisiaan. Sarjaperiaatteella toimivat menetelmät osoittautuivat epäluotettaviksi sellaisilla pylväillä, joita ei voida luotettavasti erottaa maasta. Lisäksi HF-menetelmän luotettavuus heikkeni ennustetusti, kun mitattavan maadoituksen maadoitusresistanssi kasvoi ja käänne pistemenetelmä oli tulosten perusteella yleisesti ottaen luotettava. Nykyiseen ohjeistukseen ei siis ole syytä tehdä suuria muutoksia eri kohteille suositeltujen mittausten menetelmien osalta. Käänne pistemenetelmä on lähtökohtaisesti luotettavin menetelmä sellaisten pylväiden mittaamiseen, jotka voidaan luotettavasti erottaa maasta. Mikäli käänne pistemittaus ei onnistu esimerkiksi pylvään ympäristössä sijaitsevien esteiden vuoksi, voidaan U/I- ja sarjamenetelmiä pitää hyvinä vaihtoehtoina käänne pistemittaukselle. HF-menetelmä oli teorian ja tilastollisen analyysin perusteella ainoa käytössä oleva menetelmä, jolla sellaisten pylväiden, jotka ovat galvaanisessa yhteydessä maahan, voidaan luotettavasti mitata. Ongelmaksi muodostuvat kuitenkin ne pylväät, joiden todellinen maadoitusresistanssi on suuri (50 Ω ja yli). Näiden pylväiden mittaamiseen paremmin soveltuvalla menetelmällä on tarve, koska niiden määrä ja suhteellinen osuus kaikista mitattavista pylväistä kasvaa jatkuvasti. Selektiivinen käänne pistemenetelmä, johon tässä työssä tutustuttiin, vaikuttaa lupaavalta vaihtoehdolta HF-menetelmälle ja se tullaan lisäämään Eltelissä käytettävien mittausten menetelmien rinnalle.

Mittaajan ammattitaidon merkitys korostui erityisesti maadoitusmittauksiin liittyvän teorian monitahoisuuden, mutta myös omakohtaisen maadoitusmittauskokemuksen kautta. Mittauksia suorittaville henkilöille annettavassa ohjeistuksessa ja koulutuksessa

tulisi esittää keinoja arvioida saadun mittaustuloksen luotettavuutta. Odotettua huomattavasti pienempi mittaustulos U/I- ja sarjamenetelmällä voi olla merkki siitä, että mittaussuunta ohittaa mitattavan maadoituksen. Käännepistemenetelmällä riittävän virta-apuelektrodin etäisyyden ja mittaussuunnan merkitystä tulisi korostaa. Lisäksi maadoituksen laajuuden ja maadoituksen keskipisteen käsitteitä tulisi selventää. Yksiselitteisten ja yleispätevien ohjeiden antaminen mittauksista on vaikeaa ja useimmiten esimerkiksi mittaussuunnista täytyy valita ”vähiten huono” vaihtoehto. Mittausohjeissa ja perehdytyksessä on nykyiselläänkin tuotu esiin mittauksiin vaikuttavia tekijöitä, mutta näiden merkittävyysjärjestykseen ei ole juurikaan otettu kantaa. Esimerkiksi käännepistemenetelmällä lievä mittaussuoralta poikkeaminen on huomattavasti parempi vaihtoehto kuin virta-apuelektrodin etäisyyden pienentäminen. Mittaustulosten arviointiin liittyvää ohjeistusta ja koulutusta tullaan lisäämään ja täsmentämään.

Maadoittamista käsittelevissä teoksissa [24, s. 30] on jo ainakin 60-luvulla esitetty, että maaperän mallintaminen homogeenisena massana ei anna riittävää kuvaa maaperästä maadoittamisen kannalta. Tilastollisen tutkimuksen tulokset tukivat vahvasti tätä teoriaa. Mittausvirheet olivat huomattavasti pienempiä, kun mittaustuloksia verrattiin suunnitteluarvojen sijaan kaksikerrosmallin mukaisiin maadoitusresistansseihin. Toisaalta mittaustulos oli huomattavasti useammin vertailuarvoa pienempi kaksikerrosmallilla kuin suunnitteluarvoon verrattaessa. Erityisesti maaperissä, joiden resistiivisyys oli suuri, käytetty kaksikerrosmalli vaikuttaisi tuottavan pessimistisiä arvoja maan resistiivisyydelle. Tulosten perusteella voidaan kuitenkin sanoa, että suurimmassa osassa tapauksista karkeakin kaksikerrosmalli antaa todennäköisesti tarkemman kuvan maaperän ominaisuuksista ja näin ollen paremmat edellytykset voimajohtojen maadoitusten laadukkaalle suunnittelulle. Kehittyneemmän kaksikerrosmallin käyttöönottoa tullaan harkitsemaan voimajohtojen maadoitussuunnittelussa laadukkaamman lopputuloksen aikaansaamiseksi. Maadoitussuunnittelussa tapahtuvat muutokset näkyvät maadoitusmittauksissa kuitenkin vasta pitkän ajan kuluttua ja vanhempien johtojen suunnitteluarvoon sillä ei ole vaikutusta. Tulevaisuudessa vertailuarvona voidaan kuitenkin käyttää myös kaksikerrosmallin mukaista maadoitusresistanssia, mikäli maadoitustarkastuksessa ei havaita maadoitusresistanssiin vaikuttavia puutteita, mutta mitattu arvo poikkeaa selvästi suunnitteluarvosta.

Luvussa 4.4 esitelty Boys -menetelmä maan resistiivisyyden mittaamiseen vaikuttaa hyvin lupaavalta. Menetelmää käsittelevän raportin mukaan maan

resistiivisyysmittauksen suorittamiseen kuluva aika on menetelmää käytettäessä noin puolet Wenner -mittaukseen kuluva ajasta. Samassa ajassa voitaisiin siis mitata maan resistiivisyys esimerkiksi suunnitellun pylvään molemmilta puolilta. Tällöin maadoitussuunnittelijalla olisi huomattavasti paremmat edellytykset toimivan maadoituksen suunnittelulle kustannusten kuitenkin lisääntymättä. Boys -menetelmän täysimittainen käyttöönotto vaatii kuitenkin vielä syvempää perehtymistä menetelmään ja mittauksia suorittavien henkilöiden perehdytystä.

Kaksikerrosmallin mukaisten maadoitusresistanssien keskiarvo oli noin 40 % suurempi kuin suunnitteluarvojen. Tästä voidaan päätellä, että kaksikerrosmallin käyttöönotto tulisi monessa tapauksessa lisäämään maadoitustarvetta huomattavasti, mikä tarkoittaa materiaali- ja työkustannusten lisääntymistä voimajohtohankkeissa. Toisaalta maadoituksista aiheutuvat kustannukset ovat voimajohtohankkeissa kokonaiskustannuksiin nähden pieniä ja oikein mitoitettuja ja asennettuja maadoitukset ovat verrattain pieniä kustannussäästöjä tärkeämpi asia. Voimajohdon maadoitusten lisääminen elinkaaren myöhäisemmissä vaiheissa on myös huomattavasti suurempi kustannus kuin rakentamisvaiheessa oikein mitoitettuja maadoitukset. Varsinaisiin mittauksiin esitetyt kehitystoimenpiteet kohdistuvat pääasiassa maadoitusresistanssin mittauksiin ja niiden vaikutus on keskimääräistä mittaustarkkuutta parantava. Mittausten luotettavuuden parantaminen voi joissain tapauksissa tarkoittaa mittauksiin kuluvan ajan pitenemistä. Diplomityön ensisijainen tavoite kuitenkin oli parantaa maadoitusmittausten luotettavuutta, eikä pienentää kustannuksia. Maadoitusmittausten luotettavuuden paraneminen hyödyttää Eltelin asiakkaita laadukkaamman maadoitussuunnittelun ja tarkempien vaarajänniteselvitysten muodossa. Asiakkaille toimitetun laadun paranemisella on positiivisia vaikutuksia, kuten imagohyötyä myös Eltelille.

Maadoitusmittauksiin liittyvä suomalainen aineisto käsittelee useimmiten lähinnä maadoitusmittausten suorittamista käytännössä, eikä taustalla olevaa teoriaa juurikaan avata. Aiheeseen perehdyttäessä täytyikin kääntyä kansainvälisen tutkimuksen ja kirjallisuuden puoleen. Valtaosa tutkimuksesta on tehty maissa, joissa maadoitusolosuhteet ovat huomattavasti suotuisammat kuin Suomessa. Voimajohtopylväitä ei suurimmassa osassa maailmaa maadoiteta samassa mittakaavassa kuin Suomessa, missä käytännössä jokaisella pylväällä on vähintään 10 m vaakamaadoituselektrodi ja lisämaadoitussäteiden käyttö on hyvin yleistä. Joissain lähteissä [19][24, s. 6] on esimerkiksi todettu, että maaperän resistiivisyys yleensä pienenee syvemmälle mentäessä, mikä ei Suomen tapauksessa pidä useinkaan paikkaansa.

Selkeä haaste tilastollisessa tutkimuksessa oli datan yhdenmukaistaminen. Aineisto koostui eri vuosikymmenillä suunnitelluista, rakennetuista ja mitatuista voimajohtopylväistä. Suunnittelua on tehty eri vuosikymmenten aikana eri suunnittelijoiden toimesta. Esimerkiksi maadoitusresistanssin laskentaa on voitu tehdä eri tavalla. Maadoitusmittaajien käytännöt, esimerkiksi havaintojen kirjaamisessa ja suunnitelmien tulkinnassa, ovat varmasti myös vaihtelevia. Tästä syystä aineistossa voi olla mukana tuntemattomia virheen aiheuttajia, kuten pylväitä, joiden paaluperustusten mukana on maahan upotettu pystyelektrodit, joita ei kuitenkaan ole huomioitu maadoituspöytäkirjassa esitetystä kuparimäärästä. Aineisto oli melko laaja, jolloin satunnaiset virheet keskiarvottuvat. Tulosten perusteella tehdyt johtopäätökset koskevat mittausten keskimääräistä luotettavuutta, joten tutkimustuloksia voidaan pitää luotettavina.

Tilastollisen tutkimuksen aineisto koostui voimajohtojen kunnossapitotarkastusten yhteydessä tehdyistä mittauksista. Tämän vuoksi valtaosalta pylväistä oli käytössä vain yhdellä mittausmenetelmällä saatu mittaustulos. Eri menetelmien soveltuvuuden vertailu erityyppisten maadoitusten ja pylväiden mittaamiseen olisi luotettavampaa, jos eri menetelmillä saatuja mittaustuloksia voitaisiin vertailla samoilla pylväillä. Tällöin olisi helpompi arvioida yksittäisten muuttujien vaikutusta eri menetelmien luotettavuuteen.

LÄHTEET

- [1] Boys P. Resistivity testing for earthing safety. In: Down to Earth Conference, DTEC 2016. Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc; 2016. p. 21–30.
- [2] Curdts E. Some of the fundamental aspects of ground resistance measurements. *Trans Am Inst Electr Eng Part I Commun Electron.* 2013;77(5):760–7.
- [3] Dawalibi F, Mukhedkar D. Resistance Measurement Of Large Grounding Systems. *IEEE Trans Power Appar Syst.* 1979;PAS-98(6):2348–54.
- [4] Dawalibi F, Mukhedkar D. Ground Electrode Resistance Measurements in Non Uniform Soils. *IEEE Trans Power Appar Syst.* 1974;PAS-93(1):109–15.
- [5] Dwight H. Calculation of resistances to ground. *Electr Eng.* 1936;55(December):1319–28.
- [6] Elovaara J, Haarla L. *Sähköverkot 2.* Helsinki: Otatiето; 2015.
- [7] Hänninen M. Maan ominaisresistanssiarvo pylväsmaadoitusten suunnittelussa - Muistio. Imatran Voima Oy; 1989.
- [8] Huhtanen U. Vikavirrat eri järjestelmissä, Powerpoint -esitys. Fingrid Oyj; 2019.
- [9] Joshi H. Earthing Systems and Principles. In McGraw-Hill Education; 2008. Available from: <https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9780070620988/chapter/chapter1>
- [10] Ladanyi J, Smohai B. Influence of auxiliary electrode arrangements on earth resistance measurement using the Fall-of-Potential method. *IYCE 2013 - 4th Int Youth Conf Energy.* 2013;(4):1–6.
- [11] Mukhedkar D. Parametric analysis of grounding grids. *IEEE Trans Power Appar Syst.* 1979;PAS-98(5):1659–68.
- [12] Nassereddine M, J R, G N. Soil Resistivity Data Computations; Single and Two - Layer Soil Resistivity Structure and Its Implication on Earthing Design. *Int J Electr Comput Energ Electron Commun Eng.* 2013;7(1).
- [13] Palmer L. Examples of geoelectric surveys. *Proc IEE Part A Power Eng.* 1959;106(27):231–41.
- [14] Papadopoulos T, Ceylan O, Papagiannis G. Two-layer earth structure parameter estimation and seasonal analysis. *Proc - 2018 53rd Int Univ Power Eng Conf UPEC 2018.* 2018;1–6.
- [15] Pesonen A. *Ukkosjohtimet, pylväsmaadoitukset ja vaarajännitteet.* Helsinki: Insinöörijärjestöjen koulutuskeskus; 1976.
- [16] Pesonen A. *Maavirtailmiöt.* In: *Sähkölaitostekniikan lisensiaattiseminaari syksy 1988 - kevät 1989.* Teknillinen korkeakoulu: Sähkölaitos - ja valaistustekniikan laboratorio; 1989.

- [17] Pesonen A. Suppeahkojen maadoitusten suunnittelu ja mittaus. Helsinki: Voima ja Valo 5-6; 1960.
- [18] Reeve W. Principles and Practice of Earth Electrode Measurements. 2008;4:0–38.
- [19] Rüdénberg R. Grounding principles and practice I — Fundamental considerations on ground currents. In: Electrical Engineering. Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc; 1945. p. 1–13.
- [20] Sandholm F. Maadoitukset. 1968.
- [21] Seedher HR, Arora J. Estimation of two layer soil parameters using finite wenner resistivity expressions. IEEE Trans Power Deliv. 1992;7(3):1213–7.
- [22] Sipiläinen A. Suunnittelupäällikkö, Eltel Networks Oy, Espoo. Haastattelu 23.05.2020.
- [23] Southey R, Dawalibi F. Improving the reliability of power systems with more accurate grounding system resistance estimates. PowerCon 2002 - 2002 Int Conf Power Syst Technol Proc. 2002;1:98–105.
- [24] Tagg G. Earth Resistances. London: Newnes; 1964. 258 p.
- [25] Tagg G. Measurement of earth-electrode resistance with particular reference to earth-electrode systems covering a large area. Proc Inst Electr Eng. 1964;111(12):2118.
- [26] Tiainen E, Nurmi T, Koivisto P. Maadoituskirja. Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto STUL ry; 2014.
- [27] Tleis N. An introduction to the analysis of short-circuit earth return current, rise of earth potential and electrical interference. Power Syst Model Fault Anal. 2008;550–604.
- [28] Välimaa K. Pylväspotentialin leviäminen mittaustulosten perusteella. IVO International Oy; 1995.
- [29] Working Group C4.2.02. Methods for measuring the earth resistance of transmission towers equipped of earth wires. Cigre; 2005.
- [30] Vaihtosähköilmajohdot yli 1 kV jännitteellä. Osa 2-7 Suomen kansalliset velvoittavat määrittelyt = Overhead electrical lines exceeding AC 1 kV. Part-2-7: National Normative Aspects (NNA) for Finland. SFS-EN 50341-2-7. Suomen standardoimisliitto SFS ry. 2015.
- [31] Vaihtosähköilmajohdot yli 1 kV jännitteillä. Osa 1: Yleiset vaatimukset. Yhteyset määrittelyt = Overhead electrical lines exceeding AC 1kV. Part 1: General requirements. Common specifications. SFS-EN 50341-1. Suomen standardoimisliitto SFS ry. 2014.
- [32] Maadoitus - S23701E1. Fingrid Oyj;
- [33] Suurjännitesähköasennukset = High-voltage electrical installations. SFS 6001. Suomen standardoimisliitto SFS ry. 2018.

- [34] Suomen maaperän synty. Geologian tutkimuskeskus. verkkosivu (viitattu 12.12.2019): <http://weppi.gtk.fi/aineistot/mp-opas/maapera.htm> [Internet]. Available from: <http://weppi.gtk.fi/aineistot/mp-opas/maapera.htm>
- [35] Understanding ground resistance testing. Chauvin Arnoux, Inc.;
- [36] Roudan syvyys. Suomen ympäristökeskus. verkkosivu. Saatavissa (viitattu 3.5.2020): <http://wwwi3.ymparisto.fi/i3/paasivu/fin/routa/routa.htm>.
- [37] AC Transmission Line Reference Book-200 kV and Above, Third Edition, Chapter 6. In Electric Power Research Institute; 2005. p. 1–92.
- [38] Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System. Vol. 2012, IEEE Power and Energy Society. New York: IEEE; 2012.
- [39] Maadoitusohjeet - S23702E1. Fingrid Oyj;
- [40] Fingrid Oyj:n yleiset liittymisehdot YLE2017. Fingrid Oyj; 2017.
- [41] 110...400 kV Voimajohtojen pylväsmadoitusten teko - J5.23. Eltel Networks Oy;
- [42] Sähköturvallisuuslaki. 1135/2016. 2016. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2016/20161135>.
- [43] VHV-ohje 05: Vaarajännitesuojaus. Maapotentiaali. Vaara- ja häiriöjännitevaliokunta; 1994.
- [44] VHV-ohje 02: Vaarajännitesuojaus: Induktio. Vaara- ja häiriöjännitevaliokunta; 1991.
- [45] Earthing of power installations exceeding 1 kV A.C. SFS-EN 50522. Suomen standardoimisliitto SFS ry. 2011.
- [46] Effects of current on human beings and livestock. IEC TS 60479. 4.1. Geneva: International Electrotechnical Commission; 2016. 66 p.
- [47] Pylväsmadoitusmittaus - S51016E4. Fingrid Oyj;
- [48] Pylväsmadoitusten resistanssimittaus ja madoituselektrodin kunnan määräaikaistarkastus - J5.21. Eltel Networks Oy; 2006. p. 8.
- [49] HF-Earth Resistance Measuring Instrument HW2S Operating Instructions. ABB;
- [50] DET Series. Earth ground electrode testers - User guide. Megger;
- [51] Getting down to earth - A practical guide to earth resistance testing. Megger; 2010. 1–77 p.
- [52] Maadoitusvastuksen mittausopas. Chauvin Arnoux, Inc.;

LIITE A: MAADOITUSPÖYTÄKIRJA JA MAADOITUSTARKASTUSPÖYTÄKIRJA

IMATRAN VOIMA OY		PYLVÄSMAADOITUKSET										Pylvään laatu: P-IV-H/TBJ								
110 kV johto		Pylväs n:o										(198-n:o 5022)								
Maadoitusten suunnittelumittaukset					Pylvään luonn.maadoitusvastus					R _m :sta laskettu				Läikkimittaus 23.05.2012 Maaila 19						
18.5.1989					R _{mi} = ... Ω					Ω m										
Pka:		A		B		C		D		E										
Maa:		SORA		MUSTA																
α	R	ε _r	ε _a	R	ε _r	ε _a	R	ε _r	ε _a	R	ε _r	ε _a	R	ε _r	ε _a	c =	b	R	R	R
m	Ω	Ω m	Ω m	Ω	Ω m	Ω m	Ω	Ω m	Ω m	Ω	Ω m	Ω m	Ω	Ω m	Ω m	m	m	Ω	Ω	Ω
1	133	838		295	186											40				
2	703	839		193	241											20				
4	44	1100		159	388											40				
8	218	1090		130	650											60				
16	143	1430		123	1770											80				
																100				
																120				
																140				
																R _{tot} = 29.9				
Maadoitusuunnitelma:					Maadoitusyö:															
Odotettavissa R _m ≈ 12 Ω					Valmistunut 8 5 19 90 (T)															
16 mm ² Cu-käyttö 105 + (8) m					16 mm ² Cu-käyttö 105 + (8) m															
mm ² -käyttö m					mm ² -käyttö m															
mm ² -käyttö m					mm ² -käyttö m															
1" putkia kpl = m					1" putkia kpl = m															
Huom. SÄTEET YHÖISTETÄÄN PÄISTÄÄN.					Huom.					Huom.										

Suhte 1: 500

PYLVÄSMAADOITUSTEN TARKASTUSPÖYTÄKIRJA

SuuTun:

110 kV johto _____ pylvis n:o _____ mitaaja/pvm _____ 1.23.05.2018

1. Pöytäkirjan karttaluonnos

- läydennetty
 uusittu
 ei muutettu

2. Maadoituselektrodin kunnon tarkastus

- mittaamalla
 tutkaamalla
 silmämääräisesti

3. J-tenkkien ehjyys

- ehjät 4 kpl
 vaurioitunut
 ei J-tenkkejä

4. J-tenkkien materiaali

- Cu 96 mm² 4 kpl
 Cu mm² kpl
 Fe mm² kpl

5. Pullitiliitosten ehjyys

- ehjät
 vaurioitunut
 ei todettavissa (maan alla)

6. Sähköisesti luotettavat liitokset

- on
 ei

7. Pylvään materiaali

- Puu
 Teräs
 Alumiini

8. Haruseristykset

- on
 ei
 viallinen
 harustamaton

9. Alastuontijohtimet

- Fe 35 mm²
 Cu mm²
 ei alastuontijohtimia

Käännepestemenetelmä:

b / m	R / Ω
20	
40	
60	
80	
100	
120	
140	
160	

Rm = _____ Ω

Lyhyt käännepestemenetelmä:

c / m	b / m

Rm = _____ Ω

Virtajännitemittaus:

Virta Ik = _____ mA (AC)
 Jännite Uo = _____ V (AC)
 Rm = _____ Ω

Sarjamittaus: " 2699

Rm = 29,9 Ω

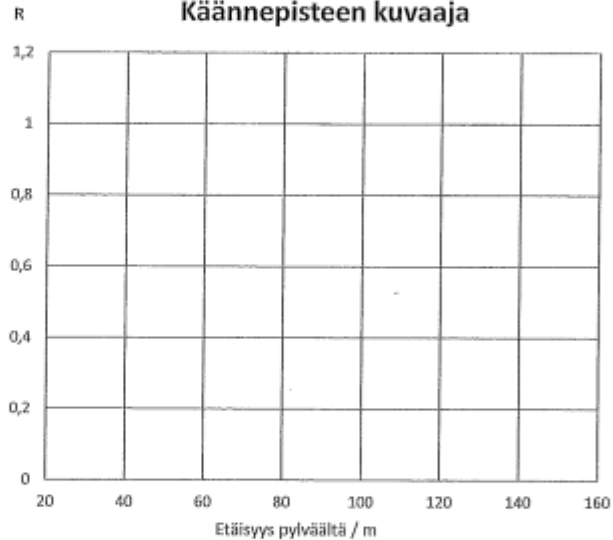
Tasavirtamittaus: " 0127

DC = 2,5 mA

HF-mittaus:

Rm = _____ Ω

Käännepesteen kuvaaja



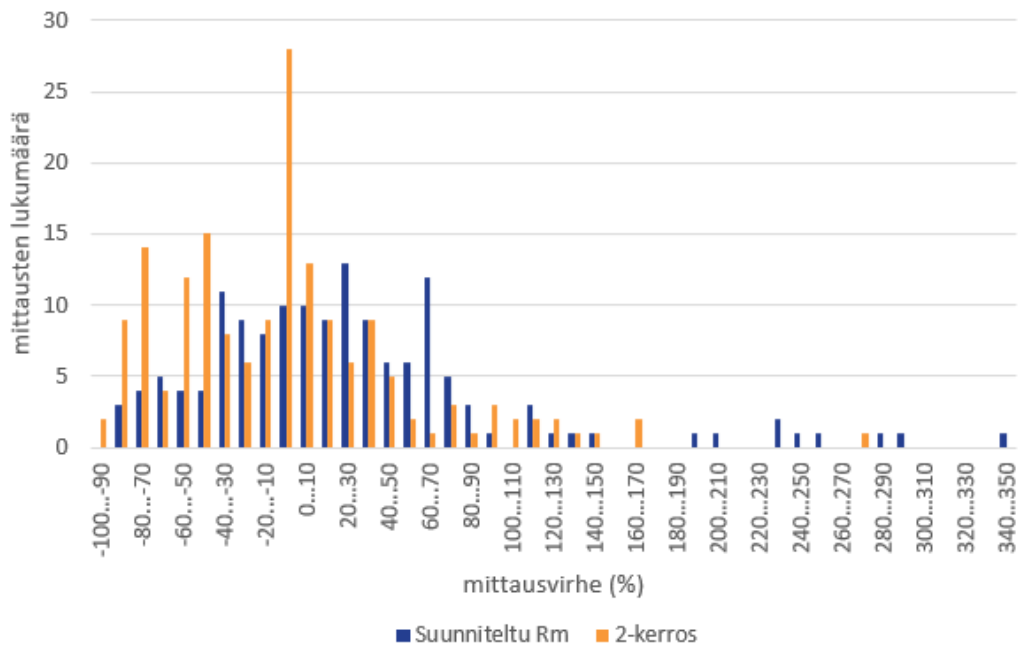
HAVAITUT VIAT:

- Korjattu
 Korjaamatta

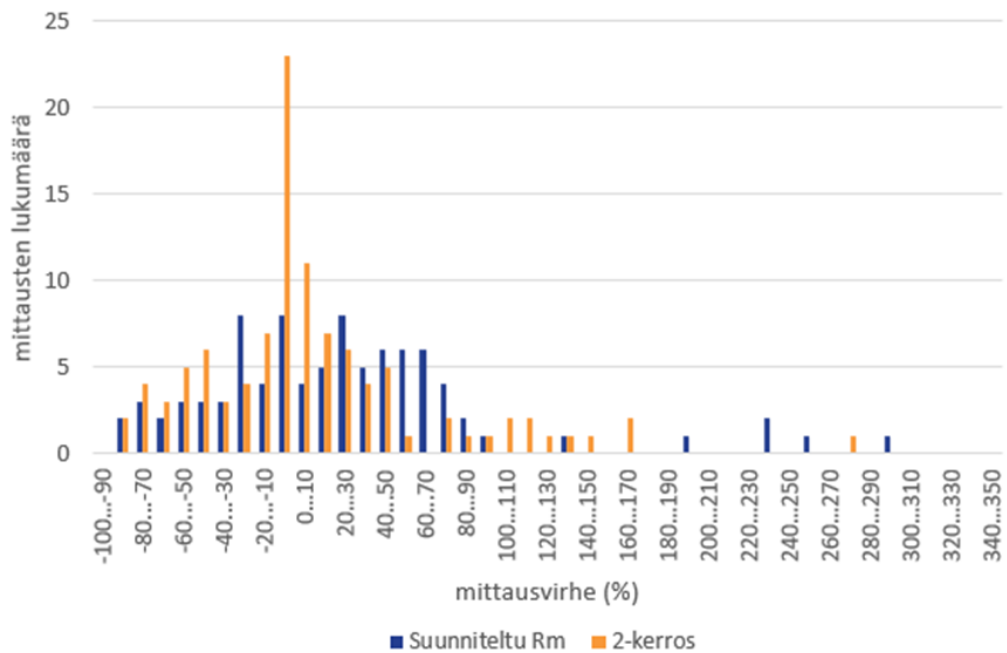
HUOMAUTUKSET: 2x35 SHIET MUKAVU, OK

MAAPERÄ OLETTAVAN LUONNOMMUN JOHTAVAA

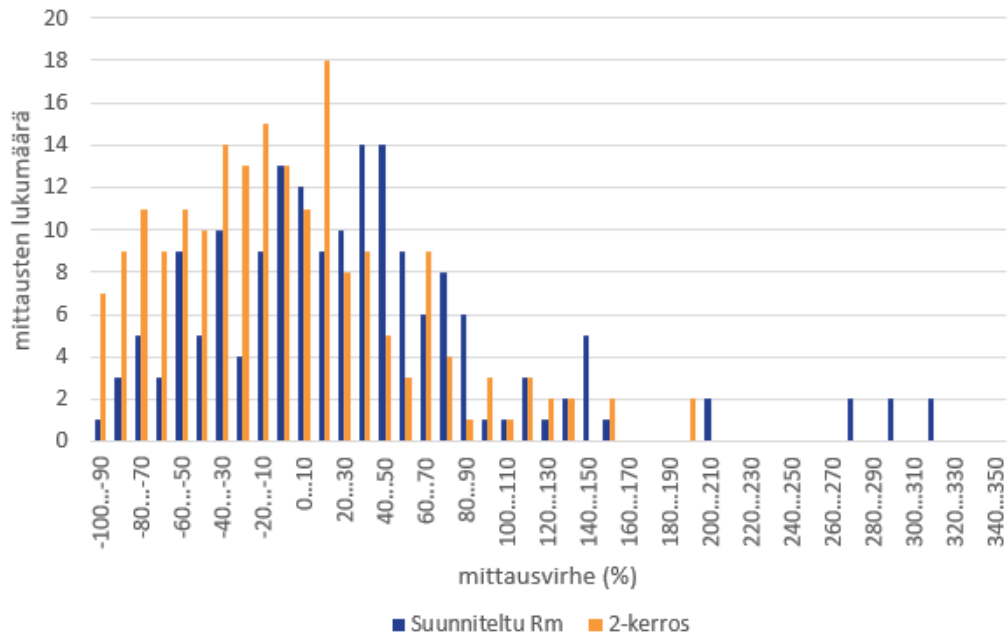
LIITE B: MITTAUSVIRHEIDEN JAKAUTUMINEN MENETELMITTÄIN



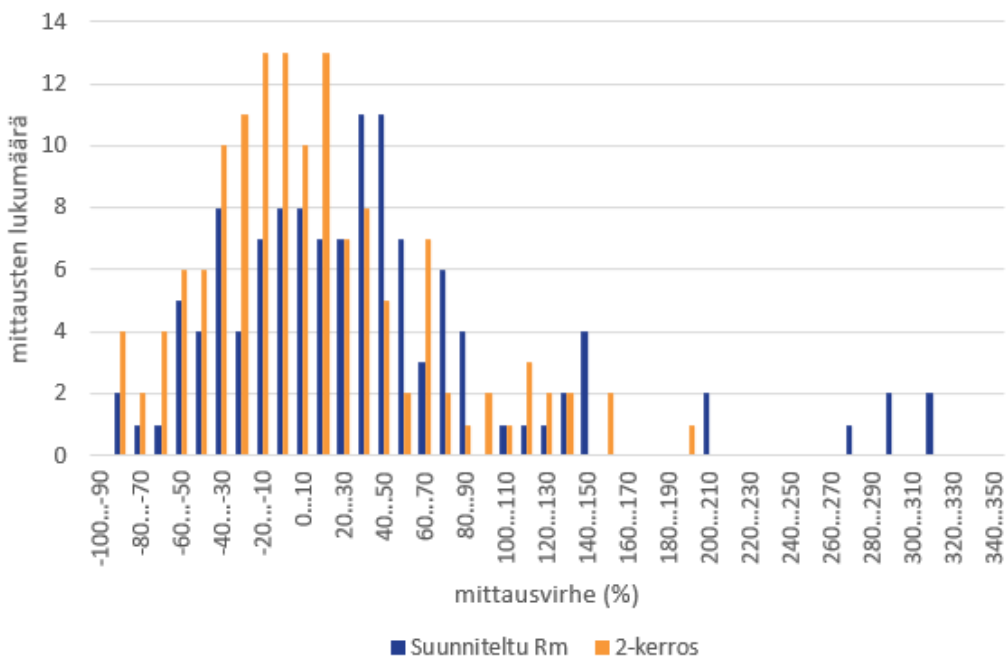
Mittausvirheiden jakautuminen U/I -menetelmällä, potentiaalinhjauselektrodipylväät poistettu.



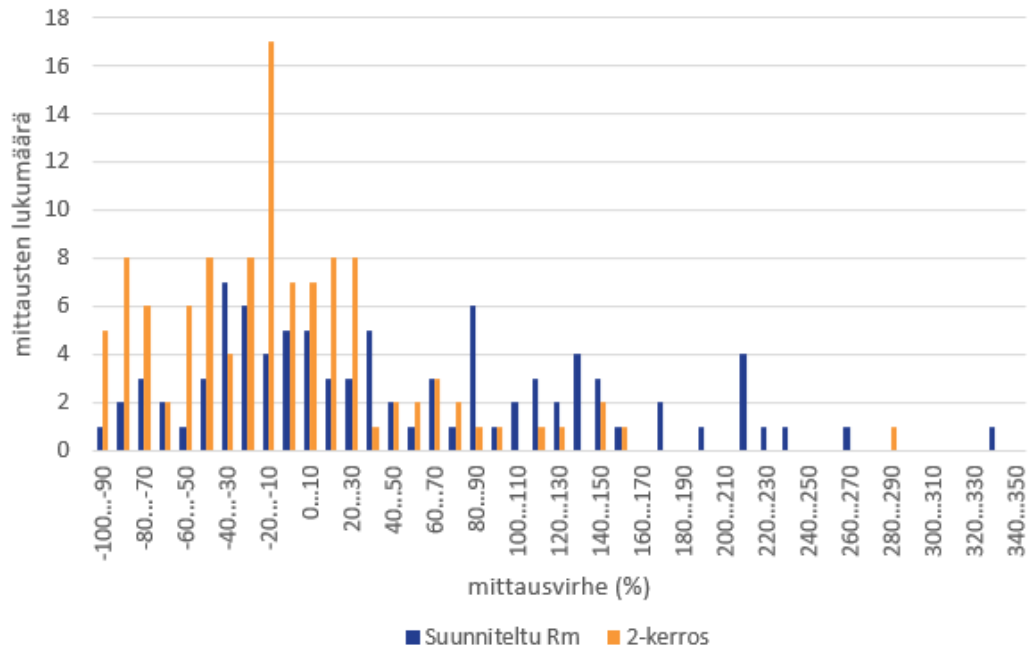
Mittausvirheiden jakautuminen U/I -menetelmällä, potentiaalielektrodi-, vapaasti seisovat ja yhdistyspylväät poistettu.



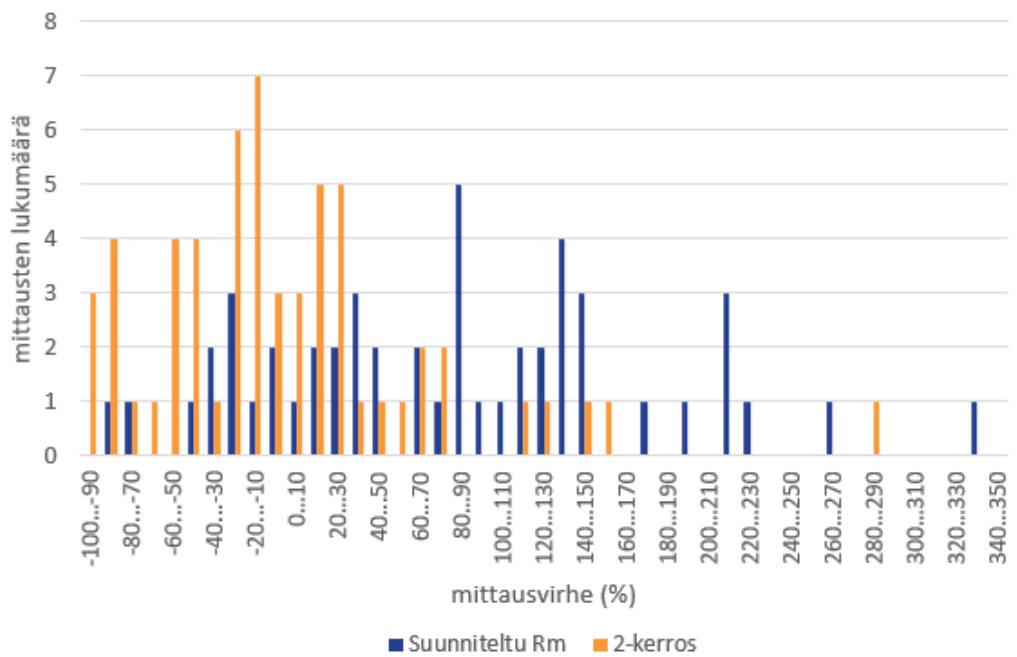
Mittausvirheiden jakautuminen sarjamenetelmällä, potentiaalinelektrodipylväät poistettu.



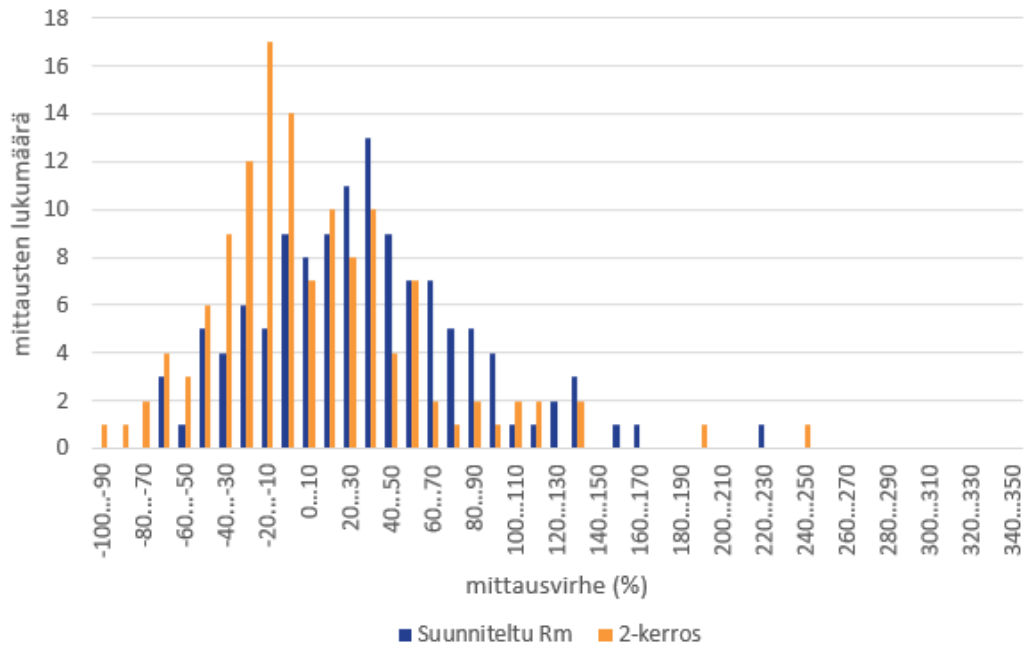
Mittausvirheiden jakautuminen sarjamenetelmällä, potentiaalinelektrodi-, vapaasti seisovat ja yhdistyspylväät poistettu.



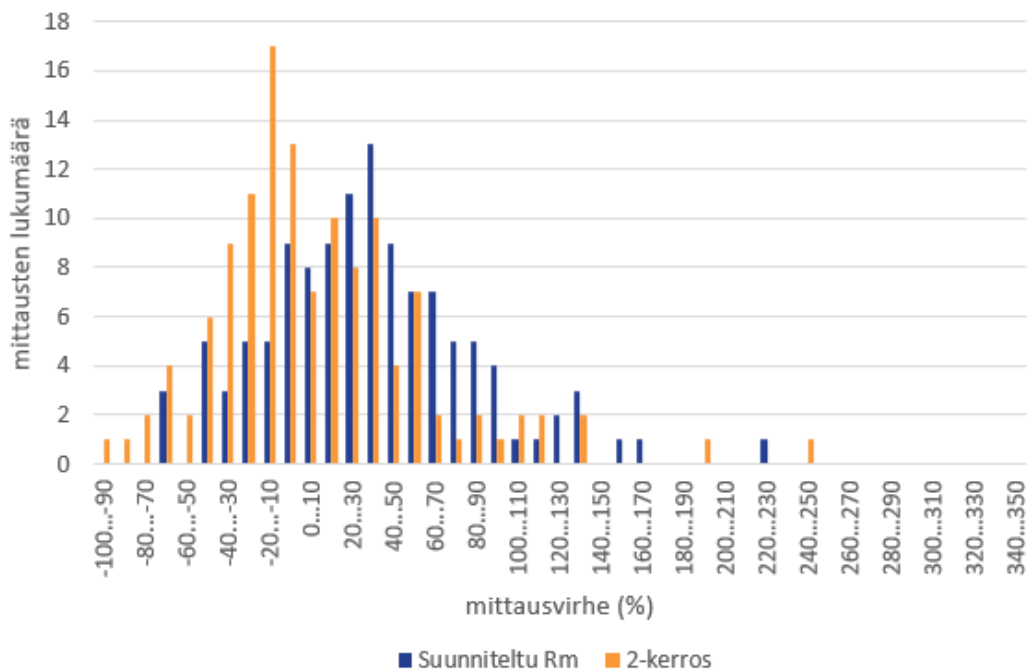
Mittausvirheiden jakautuminen HF-menetelmällä, potentiaalinelektrodipylväät poistettu.



Mittausvirheiden jakautuminen HF-menetelmällä, potentiaalinelektrodi-, vapaasti seisovat ja yhdistyspylväät poistettu.



Mittausvirheiden jakautuminen käännepistemethodella, potentiaalinojauselektrodipylväät poistettu.



Mittausvirheiden jakautuminen käännepistemethodella, potentiaalielektrodi-, vapaasti seisovat ja yhdistyspylväät poistettu.