

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU

Sähkövoimatekniikka

Tutkintotyö

Matti Suuronen

Maadoituksen mittaustapojen soveltuvuuden arviointi

Työn valvoja  
Työn teettäjä  
Tampere 2006

Tampereen Ammattikorkeakoulu, Eerik Mäkinen  
Vattenfall Verkko Oy, Ohjaajana Kimmo Järvinen

Suuronen, Matti	Maadoituksen mittaustapojen soveltuvuuden arviointi
Tutkintotyö	66 sivua + 3 liitesivua
Työn valvoja	Eerik Mäkinen
Työn teettäjä	Vattenfall Verkko Oy, ohjaajana Kimmo Järvinen
Huhtikuu 2006	
Hakusanat	Maadoitusmittaus, käännepestemenetelmä, maadoituselektrodi

## TIIVISTELMÄ

Työssä on perehdytty maadoituksen mittaustapojen vertailuun. Käytettävät mittaustavat ovat pihtivastus-, sarja- ja käännepestemittaus. Mittaukset tehdään kahdessa eri muuntopiirissä. Työ painottuu käännepestemenetelmän tutkimiseen ja tarkoituksena on ollut selvittää oikea virtaelektrodin etäisyys mitattavasta maadoituselektrodi -järjestelmästä. Vertailun vuoksi mitataan koko muuntopiirin resitoiva maadoituksen arvo. Mittaustulosten ja teorian perusteella valitaan oikea mittaustapa.

Työn alussa on selvitetty käsitteitä mitkä on tunnettava maadoitusmittauksia suorittaessa. Työssä on selvitetty virran käyttäytymistä maassa ja maaperän resistiivisyyden muuttumisen vaikutusta mittaustulokseen sekä muiden virhetekijöiden vaikutuksia.

Lopputyön tekemisen ajankohta ei ollut paras mahdollinen. Työhön tehdyt mittaukset suoritettiin syksyllä 2005. Talvesta johtuen mittauksia ei pystytty uusimaan ja vertaamaan aiemmin mitattuihin tuloksiin.

Suuronen, Matti                      Comparing the methods of the earthing measurements  
Thesis                                      66 page + 3 appendix page  
Supervisor                                Erik Mäkinen  
Commissioning Company    Vattenfall Verkko Oy, Supervisor Kimmo Järvinen  
April 2006

## **ABSTRACT OF THESIS**

The purpose of this work was comparing the methods of the earthing measurements. There was three ways to measure earthing system. Those were series measurement, clamp-on measurement and fall-of-potential measurement. The main stress is in fall-of-potential method and finds the correct distance of the current electrode.

The begin of the work are clarify some details of measurements of earthing system. In this work is told how current behaving in the earth. There are many difficulties and sources of error which making distorted results.

Autumn and winter was not well-timed to do this work. All the measurements completed in the autumn 2005.

## SISÄLLYS

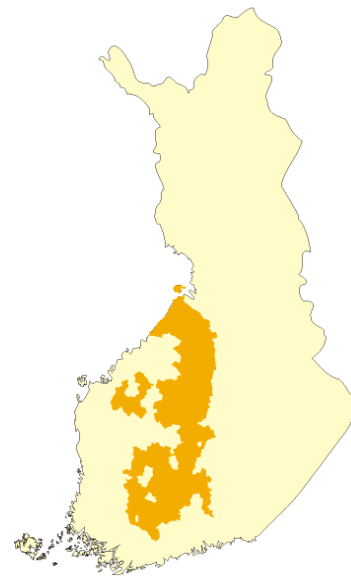
<b>TIIVISTELMÄ</b> .....	<b>2</b>
<b>ABSTRACT OF THESIS</b> .....	<b>3</b>
<b>1 JOHDANTO</b> .....	<b>6</b>
<b>2 MAADOITUS</b> .....	<b>7</b>
2.1 MAADOITUKSEN TARKOITUS .....	7
2.2 MAADOITUKSEN LUONNE .....	7
2.3 MAADOITUSRESISTANSI /1 JA 4/ .....	8
2.3.1 <i>Palloelektrodi jatkuvassa väliaineessa /4/</i> .....	9
2.3.2 <i>Palloelektrodi maanpinnassa /4/</i> .....	10
2.3.3 <i>Palloelektrodi tietyssä syvyydessä /4/</i> .....	11
2.3.4 <i>Maadoitusresistanssien yhtälöitä</i> .....	12
2.4 MAAPERÄN RESISTIIVISYYS /4/ .....	14
2.5 MAADOITUSJÄRJESTELMÄN RAKENNE.....	16
2.5.1 <i>Säteittäinen maadoitusjärjestelmä</i> .....	16
2.5.2 <i>Verkkomainen maadoitusjärjestelmä</i> .....	16
2.6 MAADOITUSELEKTRODIN ASENNUSTAPOJA .....	16
2.7 MAADOITUKSILLE ASETETUT VAATIMUKSET /1/ .....	17
2.7.1 <i>Mekaaninen lujuus ja korroosionkestävyys /1, s. 71/</i> .....	17
2.7.2 <i>Termisen lujuuden kestävyden mitoitus /1/</i> .....	18
2.7.3 <i>Suurin sallittu maadoitusjännite</i> .....	21
<b>3 YLEISTÄ MAADOITUSTEN MITTAAMISESTA /1 JA 2/</b> .....	<b>25</b>
3.1 MAADOITUKSEN MITTAUSTAVAT .....	26
3.1.1 <i>Käännepistemenetelmä /2/</i> .....	28
3.1.2 <i>Mittaus virta-jännitemenetelmällä</i> .....	34
3.1.3 <i>Voltti-ampeerimenetelmä</i> .....	34
3.1.4 <i>Maasulkumittausmenetelmä</i> .....	35
3.1.5 <i>Sarjamittaus</i> .....	35
3.2 CHAUVIN ARNOUX 6425- MAADOITUSMITTARI .....	36

<b>4 KÄÄNNEPISTEMENETELMÄMITTAUKSEN VIRHETEKIJÖITÄ.....</b>	<b>38</b>
4.1 KAKSIKERROSMaan VAIKUTUS /11/.....	38
4.2 MITTAUS ELEKTRODIN PÄÄLLÄ.....	40
4.3 MITTAUS MIELIVALTAISESTA ALOITUSPISTEESTÄ .....	42
4.4 YHDYSJOHTIMEN RESISTANSSIN VAIKUTUS MITTAUSTULOKSEEN .....	43
<b>5 MITTAUKSET .....</b>	<b>43</b>
5.1 MITTAUSPAIKKOJEN VALINTA JA MITTAUSSUUNNAT .....	44
5.2 SUORITETTAVAT MITTAUKSET .....	47
5.2.1 Käännepestemittaus, Oinasniemi.....	47
5.2.2 Sarja- ja referenssimittaus, Oinasniemi .....	51
5.2.3 Pihtivastusmittaus, Oinasniemi.....	53
5.2.4 Käännepestemittaus, Höytämö .....	54
<b>6 TULOSTEN TARKASTELU .....</b>	<b>56</b>
6.1 KÄÄNNEPISTEMENETELMÄN TULOKSET .....	57
6.2 MAA-AINEEN MUUTTUMISEN VAIKUTUS MITTAUSTULOKSEEN .....	60
6.3 ERI MITTAUSTAVALLA SAATUJEN TULOSTEN VERTAILU .....	60
<b>7. YHTEENVETO .....</b>	<b>61</b>
<b>LÄHDELUETTELO .....</b>	<b>66</b>
<b>LIITTEET.....</b>	<b>66</b>

## 1 JOHDANTO

Vattenfall AB on kokonaan Ruotsin valtion omistama. Vattenfall on Euroopan viidenneksi suurin sähkön tuottaja ja suurin lämmön tuottaja. Yhtiö toimii sähkön tuotannossa, siirrossa, jakelussa ja myynnissä. Lisäksi Vattenfall tuottaa, siirtää ja myy lämpöä. Konsernilla on n. 33 000 työntekijää ja liikevaihto on 12 586 M€ ja voitto ennen veroja ja vähemmistöosuutta on 1 927 M€. Konsernin sähköntuotanto vuonna 2004 on 167,1 TWh.

Suomessa toimii Vattenfall Oy. Vattenfall Oy:n tytäryhtiöitä ovat VAMY Oy, Vattenfall Verkko Oy, Sähkön myynti Oy, Kaukolämpö Oy ja Sähköntuotanto Oy. Lopputyöntilaaaja on Vattenfall Verkko Oy. Vattenfall Verkko Oy työllistää 330 henkilöä ja sen päätoimipaikka on Tampereella. Vattenfall Verkko Oy:llä on asiakkaita 365 000, joiden osuus markkinoista on 12 %. Yhtiön liikevaihto on 165 M€. Sähköä siirretään asiakkaille 5,7 TWh vuodessa. VFV Oy:n toimenkuvaan kuuluvat sähkönmyynti, käyttöpalvelun tarjoaminen, käyttökeskuksen ylläpitäminen, verkon suunnittelu, tekninen suunnittelu, rakennuttaminen ja uusien liittymien tarjoaminen.



Kuva 1 Vattenfallin toimialue Suomessa

Maadoitusten mittaaminen on työllistää suuresti Vattenfall Verkko Oy:tä. Maadoitusmittauksia on suoritettu pitkään ja 1960 -luvulla Englannissa tutkittiin maadoitusresistanssimittauksia. Siitä lähtien eivät mittaushjeistukset ole muuttuneet, mutta maadoitusten tavoitearvot ovat tiukentuneet SFS 6001 voimaantumisen jälkeen. Tämän työn tarkoituksena on puuttua mittaustapojen vertailuun ja löytää paras tapa/-tavat, joilla mittauksesta saadaan riittävän luotettava tulos mahdollisimman taloudellisella ja yksinkertaisella tavalla. Lisäksi on kiinnitettävä huomiota mittauksen käytännöllisyyteen.

## 2 MAADOITUS

Maadoitus on sähköjärjestelmien turvallisuutta lisäävä tekijä. Maadoitusten toteutuksista on annettu määräykset SFS-standardeissa. Maadoitusjärjestelmä koostuu maadoituselektrodeista, maadoitus- ja potentiaalintasausjohtimista. Potentiaalintasausjohtimella yhdistetään virtapiiriin kuulumattomat johtavat osat maadoitusjärjestelmään. Maadoitusjohdin muodostaa yhteyden maadoituselektrodiin ja elektrodi muodostaa sähköisen yhteyden maahan. Kaikkien maadoitusten osat on liitettävä suoraan tai välillisesti maadoituskiskoon.

### 2.1 Maadoituksen tarkoitus

Maadoituksen tarkoitus on varmistaa käyttö- ja työturvallisuus.

Maadoitusjärjestelmän on toimittava kaikissa olosuhteissa ja varmistettava ihmisten turvallisuus paikoissa, joissa heillä on oikeus liikkua. /1, s.70./

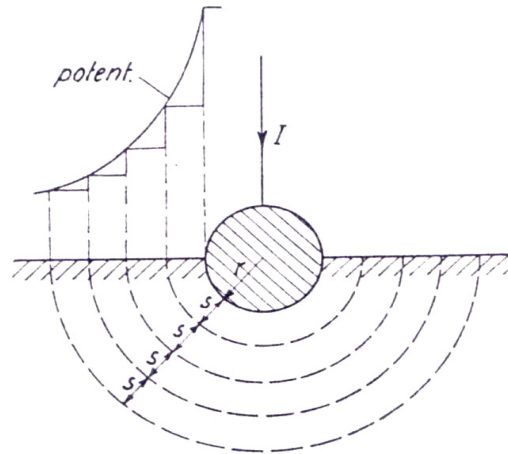
Maadoitusten tarkoitus on estää vaarallisten kosketusjännitteiden syntyminen laitteen tai järjestelmän vikatapauksissa. Tällöin laitteen jännitteelle alttiit osat on oltava yhdistettynä sähköverkon suojamaadoitukseen. Maadoituksilla estetään häiriöiden syntyminen tietoliikenne- ja elektroniikkajärjestelmissä. Oikein mitoitettut maadoitukset vähentävät ilmastollisten ylijännitteiden aiheuttamia vaurioita ja vaaratilanteita. Maadoitukset takaavat sähköverkon vikavirralla luotettavan reitin ja varmistavat suojalaitteiden luotettavan ja nopean toiminnan. /2, s.37./

Ylijännitesuojien maadoituksissa on pyrittävä pieneen aaltovastuksen arvoon, mikä on tarpeen transientihäiriöiden ja -ylijännitteiden vaimentamisessa, kun taasen suojamaadoituksissa tavoitteena on pieni maadoitusresistanssin arvo. /2, s.37./

### 2.2 Maadoituksen luonne

Maadoitusimpedanssi on vastusta itse maaperässä olevan elektrodin pinnan ja etäällä olevien maakohtien välillä. Maadoituselektrodin kuvitellaan muodostavan potentiaalirenkaita ympärilleen. Kuva kaksi esittää pallonmuotoisen puoliksi maahan upotetun maadoituselektrodin potentiaalirenkaiden muodostumisen. Täysin

homogeenisessa maassa virta jakautuu tasaisesti joka suuntaan elektrodista.  
Ympäriälle syntyvät tasapotentiaalipinnat ovat saman keskeisiä palloja.



Kuva 2 Tasapotentiaalipintojen muodostuminen palloelektrodissa

Maanpinta on jaettu samanpaksuisiin kerroksiin. Virran kulkiessa kerrosten läpi syntyy niissä jännitehäviöitä. Jännitehäviöiden suuruuteen vaikuttaa kerroksen paksuus. Paksummassa kerroksessa on pienemmät häviöt. Elektrodin kokonaispotentiaali koostuu kerroksien jännitehäviöiden summasta.

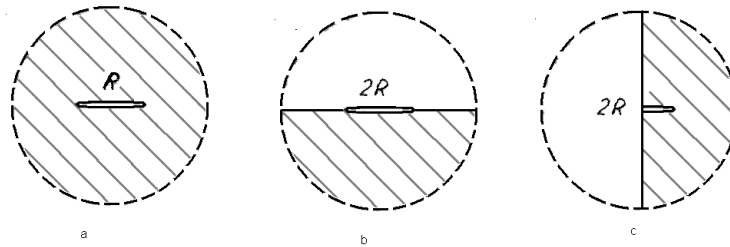
### **2.3 Maadoitusresistanssi** /1 ja 4/

Maadoituselektrodin maadoitusresistanssi  $R_E$ :n arvo on riippuvainen maaperän ominaisvastustuksesta, elektrodin mitasta, ulkomuodosta ja sijoittelusta.

Maadoituselektrodin poikkipinnalla ei ole, niin suurta vaikutusta maadoitusresistanssin suuruuteen kuin sen ulottuvuudella. Kuvan kolme a) kohdassa maadoituselektrodi on sijoitettu homogeeniseen maahan.

Maadoitusresistanssin arvo on  $R$ . Kohdassa b) sama elektrodi on sijoitettu maan pinnalle pitkittäin, ja se saa arvon  $2R$ . Kohdassa c) sama elektrodi on katkaistu keskeltä kahtia ja asennettu pystyyn. Maadoitusresistanssin arvo on  $2R$ . Elektrodin asennustapa ja fyysinen pituus vaikuttaa maadoitusresistanssin arvoon kuvan kaksi mukaisesti.

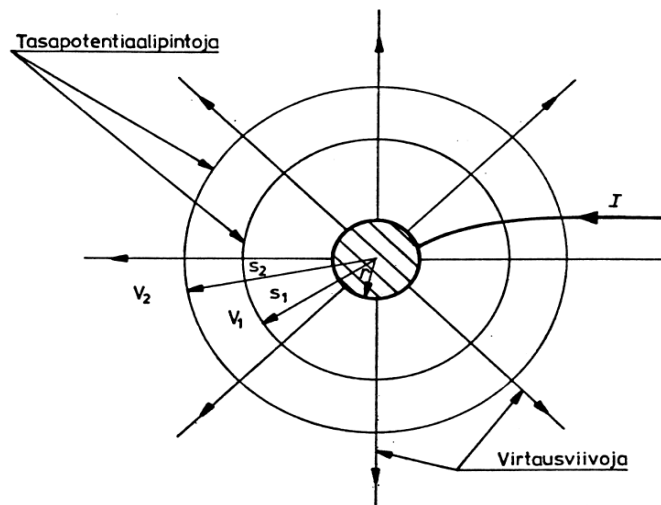




Kuva 2 Maadoituselektrodin arvo jatkuvassa väliaineessa

### 2.3.1 Palloelektrodi jatkuvassa väliaineessa /4/

Oletetaan pallonmuotoisen elektrodin olevan täysin homogeenisessa jatkuvassa väliaineessa. Pallon säde on  $r$  ja elektrodin viety virta  $I$ . Väliaineen resistiivisyys on  $\rho$ . Kuvassa 3 on poikkileikkaus palloelektrodista ja sen muodostamista potentiaalipinnoista.



Kuva 3 Palloelektrodi jatkuvassa väliaineessa /4/

Väliaineen homogeenisuuden vuoksi palloelektrodin ympärille syntyvät tasapotentialipinnat ovat elektrodin muotoisia. Tasapotentialipinnan ala määräytyy tasapotentialipinnan ja elektrodin keskipisteen välisestä etäisyydestä  $s$

$$A = 4 \cdot \pi \cdot s^2 \quad (1)$$

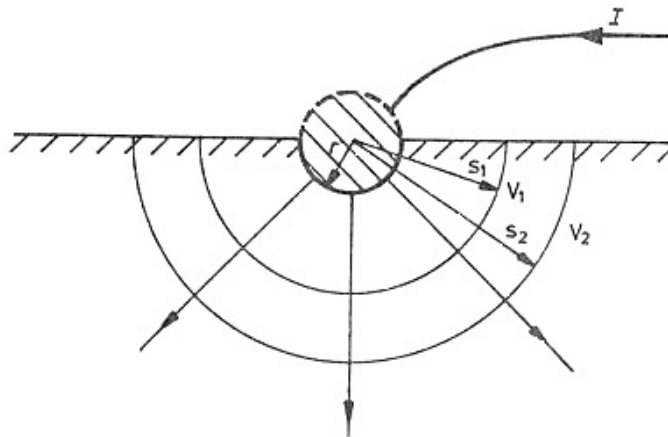
Elektrodin potentiaali  $V$  ja maadoitusresistanssi  $R_E$  saadaan yhtälöistä 2 ja 3.

$$V = \int_r^{\infty} \frac{\rho \cdot I}{4 \cdot \pi \cdot s^2} \cdot ds = \frac{\rho \cdot I}{4 \cdot \pi \cdot r} \quad (2)$$

$$R_E = \frac{V}{I} = \frac{\rho}{4 \cdot \pi \cdot r} \quad (3)$$

### 2.3.2 Palloelektrodi maanpinnassa /4/

Kuvassa neljä on kuvan kolme palloelektrodi asennettu puolittain maahan. Maan resistiivisyys on  $\rho$  ja elektrodiin syötetty virta on  $I$ .



Kuva 4 Palloelektrodin poikkileikkaus ja elektrodin muodostamat potentiaalirenkaat

Tällöin elektrodin potentiaali  $V$  ja maadoitusresistanssi  $R_E$  saadaan seuraavasti

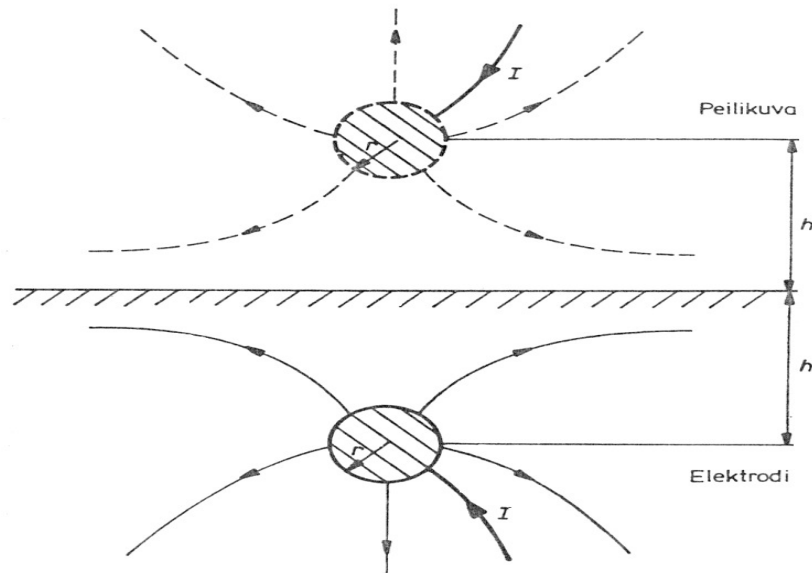
$$V = \int_r^{\infty} \frac{\rho \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot s^2} \cdot ds = \frac{\rho \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot r} \quad (4)$$

$$R_E = \frac{V}{I} = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot r} \quad (5)$$

Asennustavasta johtuen palloelectroodin jännite ja maadoitusresistanssi nousevat kaksinkertaisiksi verrattuna jatkuvassa väliaineessa olevaan palloelectrodiin.

### 2.3.3 Palloelectrodi tietyssä syvyydessä /4/

Palloelectrodi on upotettu maahan, syvyyteen  $h$ . Tällöin sen maadoitusresistanssi ja jännitesuppilo saadaan selville peilikuvamenetelmällä. Virtauksen tullessa elektrodista maan pintaa päin, se kääntyy maanpinnassa maan suuntaiseksi. Ilma toimii eristeenä. Kenttäkuva muodostuu kahdesta vastakkaisesta virtauksesta, jotka ovat toistensa peilikuvia.



Kuva 4 Peilikuvaperiaate

Kuvassa 4 on kuvan 3 palloelectrodi upotettuna maahan syvyyteen  $h$ . Maan resistiivisyys on  $\rho$ . Oletetaan syvyyden  $h$  olevan huomattavasti suurempi kuin pallon säteen  $r$ . Palloelectroodin potentiaaliksi jatkuvassa väliaineessa saadaan

$$V_{11} = \frac{\rho \cdot I}{4 \cdot \pi \cdot r} \quad (6)$$

Elektroodin peilikuvan aiheuttama potentiaali on

$$V_{12} = \frac{\rho \cdot I}{4 \cdot \pi \cdot 2 \cdot h} \quad (7)$$

Peilikuvan aiheuttamalla lisäpotentiaalilla otetaan huomioon maanpinnan läheisyys. Peilikuva periaatteessa virtaukset eivät läpäise maakerrosta vaan heijastuvat siitä takaisin. Lisäämällä peilikuvan potentiaali palloelektrodin potentiaalin saadaan kokonaispotentiaaliksi palloelektrodille

$$V = V_{11} + V_{12} = \frac{\rho \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot r} \cdot \left( 0,5 + \frac{r}{4 \cdot h} \right) \quad (8)$$

Maadoitusresistanssi lasketaan palloelektrodille seuraavasti

$$R_E = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot r} \cdot \left( 0,5 + \frac{r}{4 \cdot h} \right) \quad (9)$$

### 2.3.4 Maadoitusresistanssien yhtälöitä









Erilaisilla maadoitusjohtimilla ja niiden asennustavan mukaisesti maadoitusresistanssit ovat erisuuruisia. Taulukossa 1 erimuotoisten maadoituselektrodien laskentakaavoja.

Taulukko 1 Erimuotoisten maadoituselektrodien laskentakaavoja /1/

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

Maadoitusmittauksella saatu käännepisteen tuloksen pitäisi olla sama kuin teoreettisesti laskettu. Teoreettisesti ideaalisen maadoituselektrodin käyrämuoto ei ole helpoin mallintaa. Teoriassa käännepistemittauksen käyrämuoto on mallinnettavissa, mutta harvoin se vastaa käytännön mittauksella saatua käyrämuotoa. Taulukossa kaksi on nähtävissä erimuotoisten maadoitusresistanssien suhteet verrattuna suoraan johtimeen.

Taulukko 2. Samalla maadoituselektrodin kokonaispituudella saavutettavan maadoitusresistanssin suhde suoran johtimen maadoitusresistanssiin. /1/

Elektrodin pituus $L$ (m)	20	60	200	600
Elektrodin muoto	Maadoitusresistanssin suhde suoran johtimen maadoitusresistanssiin			
	100	100	100	100
0,2 m 2 m 20 m 	133 109 92	144 123 98	155 135 109	159 143 119
	103	103	102	102
	107	106	106	105
	116	115	114	112
	136	135	132	129
	159	158	154	148
	109	108	107	106

## 2.4 Maaperän resistiivisyys /4/

Maaperän resistiivisyys ilmoittaa yksikköpinta-alaisen maakuution resistanssin pituusyksikköä kohti  $\Omega m$ . Maaperä on hyvin epähomogeeninen ja koostumus voi vaihdella hyvin lyhyelläkin matkalla niin pysty- kuin sivusuunnassa. Vuodenajat ja epämääräiset paikalliset olosuhteet aiheuttavat maaperän koostumuksen vaihtelua. Maaperän resistiivisyyden vaihtelua aiheuttavia tekijöitä ovat:

- maalaji
- maalajin tiiviys
- raesuurus ja sen jakautuma
- maan kosteuspitoisuus
- maan sisältämään veteen liuenneiden suolojen kemiallinen koostumus
- lämpötila

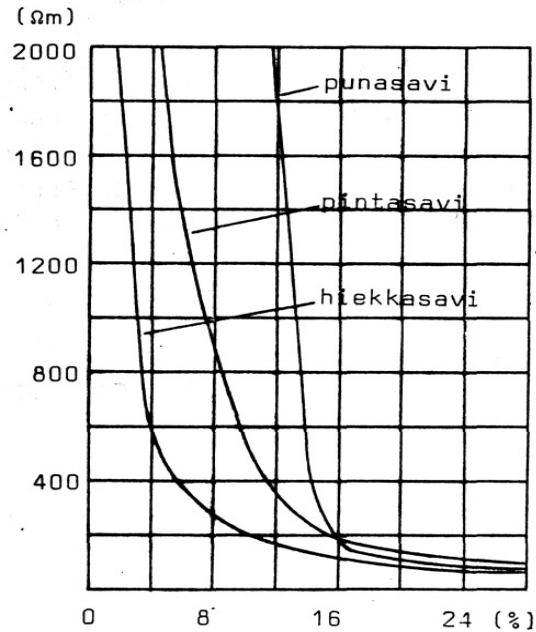
Sähkövirran kulku maassa on luonteeltaan elektrolyyttistä lukuun ottamatta tiettyjä mineraaleja, jotka johtavat sähköä metallipitoisuuden vuoksi. Maaperä saattaa koostua huonosti johtavista tai jopa eristeisistä aineosista, mutta maassa oleva kosteus parantaa maaperän sähkönjohtavuutta. Maahan johdettu virta leviää laajalle alalle, joten maan todellinen resistanssi on melko pieni.

Suomessa käytetään  $2300 \Omega m$  keskimääräisenä maaperän vastusarvona. Taulukossa 3 on esitetty eräiden maalajien keskimääräiset resistiivisyydet vaihtelurajoinen.

Taulukko 3 Maan ominaisresistanssin suuruksia

Aine	Keskimääräinen $\Omega m$	Vaihteluväli $\Omega m$
Savi	40	25 - 70
Savensekainen hiekka	100	40 - 300
Lieju, turve, multa	150	50 - 250
Hiekka, hieta	2000	1000 - 3000
Moreenisora	3000	1000 - 10 000
Harjusora	15 000	3000 - 30 000
Graniittikallio	20 000	10 000 - 50 000
Järvi- ja jokivesi	250	100 - 400
Merivesi (Suomen lahti)	2,5	1 - 5

Maan sisältämän veden jäätyessä vastusarvo kasvaa nopeasti. Routarajan alapuolella resistiivisyys ei muutu läheskään niin paljon. Vaikuttavimpia tekijöitä routarajan alapuolella ovat lämpötila ja kosteuspitoisuus. Kuvassa 5 on vertailu esimerkkinä savimaalajien resistiivisyyden muutos kosteuspitoisuuden vaihdellessa. Kuvaajasta huomataan maanominaisvastuksen kokevan muutoksia.



Kuva 5 Eräiden savimaalajien resistiivisyys kosteuspitoisuuden funktiona /4/

Maadoitusresistanssin laskentaan voidaan käyttää seuraavia likiarvokaavoja:  
 syvämaadoituselektrodi:

$$R = \frac{\rho_E}{h} \quad (10)$$

vaakamaadoituselektrodi:

$$R = 2 \cdot \frac{\rho_E}{l} \quad (11)$$

jossa

$\rho_E$  on maaperän resistiivisyys ( $\Omega\text{m}$ )

$h$  on syvämaadoituselektrodin syvyys (m)

$l$  on vaakamaadoituselektrodin pituus (m)

Edellä mainittuja kaavoja voidaan käyttää ainoastaan tasalaatuaisessa maaperässä.

## **2.5 Maadoitusjärjestelmän rakenne**

Maadoitusjärjestelmä koostuu maadoituselektrodista, maadoitusjohtimesta ja suojattavasta järjestelmästä. Maadoituselektrodit koostuvat useista vaaka-, pysty- tai vinoelektrodeista, jotka on kaivettu tai lyöty maahan /1, s.74/.

Maadoitusjärjestelmissä käytetään kahta perusratkaisua, jotka ovat säteittäinen ja verkkomainen rakenne. Maadoitusjärjestelmään on yleensä yhdistetty muuntajan suojamaadoitus pj-verkon käyttömaadoituksen lisäksi. Mahdollinen yhteys on havaittavissa pylvällä tai puistomuuntajan maadoituskiskossa. Pylvällä maadoituselektrodi on tuotu pylvästä pitkin alas ja kaivettu maahan. Puistomuuntajalla maadoituselektrodi on yhdistetty maadoituskiskoon.

### **2.5.1 Säteittäinen maadoitusjärjestelmä**

Säteittäinen verkko muodostuu yksittäistä maadoituselektrodeista, jotka on yhdistetty toisesta päästä toisiinsa ja maa yhdistää toiset päät. Tällöin maadoitusresistanssit ovat rinnankytkettyjä.

### **2.5.2 Verkkomainen maadoitusjärjestelmä**

Laajat maadoitusjärjestelmät ovat verkkomaisia. Useat galvaaniset yhteydet tekevät niistä verkkomaisia. Tällöin resultoivan maadoituksen arvo on pienempi kuin säteittäisen ja maadoitus on tällöin entistä parempi.

## **2.6 Maadoituselektrodin asennustapoja**

Maadoituselektrodeja on olemassa erityyppisiä asennustavan mukaan. Yleisin käytössä oleva maadoituselektrodi on vaakasuora. Maadoitus voi olla sauvamaadoitus, maadoituselektrodina toimiva kaapeli, perustuksiin upotettu maadoituselektrodi, luonnollinen maadoituselektrodi ja potentiaalinohjauselektrodi. Viimeksi mainittua ei käytetä aikaansaamaan tiettyä maadoitusresistanssia vaan pääasiassa potentiaalinohjaukseen. Pystyelektrodeja käytetään maaperän ominaisvastuksen pienentyessä, kun syvyys kasvaa. Maadoituselektrodi kuvitellaan pistemäisenä johtimena sen asennustavasta huolimatta.



## **2.7 Maadoituksille asetetut vaatimukset /1/**

Maadoitusjärjestelmille on täytettävä neljä vaatimusta, jotka ovat:

- a) Riittävä mekaaninen lujuus ja korroosionkestävyys.
- b) Suurimman vikavirran kestävyys termisesti (suurin vikavirta saadaan yleensä laskemalla).
- c) Omaisuuden ja laitteiden vaurioitumisen estäminen.
- d) Henkilöiden turvallisuuden varmistaminen suurimman maasulkuvirran aikana maadoitusjärjestelmissä esiintyvien jännitteiden suhteen.

Maadoitusjärjestelmän mitoituksen kannalta oleellimmat tekijät ovat vikavirran arvo, vian kesto aika ja maaperän ominaisuudet. Verkon laajuuden kasvaessa kasvaa myös maasulkuvirran suuruus.

### **2.7.1 Mekaaninen lujuus ja korroosionkestävyys /1, s. 71/**

Suoraan maan kanssa kosketuksissa oleva maadoituselektrodi on valmistettava korroosion kestävästä materiaaleista. Korroosion kestävyydellä tarkoitetaan kemiallisten tai biologisten syöpymien, hapettumien, elektrolyyttiparien muodostumien ja elektrolyysien kestämistä. Maadoituselektrodien on myös kestävä mekaanisia rasituksia asennuksen ja normaalikäytön aikana. Betoniperustuksiin upotettuja teräksiä ja teräspaaluja tai muita luonnollisia maadoituselektrodeja voidaan käyttää maadoitusjärjestelmän osana parantamaan maadoitusresistanssia.

Liitteessä [1] esitetään tarkemmin maadoitusjohtimien vaadittavat poikkipinnat. Yleisohje maadoitusjohtimien vähimmäispoikkipinnat mekaanisen kestävyuden ja korroosion takia ovat:

Kuparilla  $16 \text{ mm}^2$ .

Alumiinilla  $35 \text{ mm}^2$ .

Teräksellä  $50 \text{ mm}^2$ .

### 2.7.2 Termisen lujuuden kestävyuden mitoitus /1/

Termisen lujuuden laskemiseksi tarvitaan vikavirran suuruus ja vian kesto aika. Alle 5 sekuntia kestävillä vikavirroilla maadoitusjohtimen vähimmäispoikkipinta-ala lasketaan kaavan 12 mukaan. Alkulämpötilana käytetään Suomessa 20 °C.

$$A = \frac{I}{K} \sqrt{\frac{t}{\ln \frac{\theta_f + \beta}{\theta_i + \beta}}} \quad (12)$$

jossa

$A$  = poikkipinta ( $mm^2$ )

$I$  = johtimen virran tehollisarvo (A)

$t$  = vikavirran kesto aika (s)

$K$  = virrallisen osan materiaalista riippuva vakio; taulukossa neljä esitetään yleisimmille materiaaleille  $K$  olettaen alkulämpötilan olevan 20 °C

$\beta$  = virrallisen osa resistanssin lämpötilakertoimen käänteisarvo lämpötilassa 0 °C; taulukossa 4 lämpötilakertoimet

$\theta_i$  = alkulämpötila (°C). Alkulämpötilana käytetään yleensä 20 °C

$\theta_f$  = loppulämpötila (°C)

Mitoitettavan johtimen käyttötarkoitus ja suurjännitejärjestelmän maadoitustapa määräävät käytettävän virran laskentakaavan taulukon 5 mukaan. Taulukon mukaan maadoituselektrodi ei tarvitse mitoittaa termisen lujuuden kannalta maasta erotetuille ja sammutetuille järjestelmille, vaan liitteen [1] vähimmäispoikkipinnat ovat riittäviä.

Taulukko 4 Materiaalista riippuvien vakioiden arvot

Materiaali	$\beta$ (°C)	$K(A \times \sqrt{s} / mm^2)$
Kupari	234,5	226
Alumiini	228	148
Teräs	202	78

Alkulämpötilana käytetään  $20\text{ °C}$  ja loppulämpötilana  $300\text{ °C}$ . Yleensä maadoituselektrodit ja -johtimet ovat kuparia. Kaavasta 12 saadaan poikkipinta-alaksi

$$A = \frac{I}{K} \sqrt{\frac{t}{\ln \frac{\theta_f + \beta}{\theta_i + \beta}}} = \frac{I}{226} \sqrt{\frac{t}{\ln \frac{300\text{ °C} + 234,5\text{ °C}}{20\text{ °C} + 234,5\text{ °C}}}} \quad (13)$$
$$A \approx 5,137 \cdot I \cdot \sqrt{t}$$

Ratkaistaan kaavasta virta

$$I = \frac{A}{5,137 \cdot \sqrt{t}} \quad (14)$$

Liitteen [1] mukaan tiedetään elektrodin pinta-ala ja lasketaan kaavasta virran suurin arvo. Kaavassa 14 poikkipinta-ala on  $mm^2$ :na ja aika sekunteina. Tällöin virta on kiloampeereina. Virran laskennassa käytetyt arvot ja kaavat löytyvät liitteestä [2] ja vaadittavat poikkipinnat liitteestä [1]

Taulukko 5 Maadoitusjärjestelmien suunnitteluun liittyvät virrat

Suurjännitejärjestelmän tyyppi		Termiseen kuormitukseen liittyvä virta <sup>1)</sup>		Maadoitusjännitteeseen ja kosketusjännitteisiin liittyvät virrat
		maadoitus-elektrodi	maadoitus-johdin	
Maasta erotetut järjestelmät		– <sup>6)</sup>	$I''_{KEE}$ <sup>9)</sup>	$I_E = r \times I_C$ <sup>7)</sup>
Sammutetut järjestelmät	Sähköasemat, joissa sammutuskelat	– <sup>6)</sup>	$I''_{KEE}$ <sup>3) 9)</sup>	$I_E = r \times \sqrt{I_L^2 + I_{Res}^2}$ <sup>2)</sup>
	Sähköasemat ilman sammutuskeloja			$I_E = r \times I_{Res}$
Impedanssin kautta maadoitetut järjestelmät		$I''_{k1}$ <sup>4)</sup>	$I''_{k1}$	$I_E$ <sup>5)</sup>
Sammutetut järjestelmät ja väliaikaisesti impedanssin kautta maadoitetut järjestelmät	Sähköasemilla, joilla tähtipiste on väliaikaisesti maadoitettu	$I''_{k1}$ <sup>4)</sup>	$I''_{k1}$ <sup>8)</sup>	$I_E$ <sup>5)</sup>
	Muilla sähköasemilla	– <sup>6)</sup>	$I''_{KEE}$ <sup>3)</sup>	$I_E = r \times \sqrt{I_L^2 + I_{Res}^2}$ <sup>2)</sup>
				ilman sammutuskeloja

<sup>1)</sup> Liitteen A mukaiset vähimmäispoikkipinnat on otettava huomioon.

<sup>2)</sup> Kaavaa voidaan soveltaa vain järjestelmiin, joissa kompensointiaste on korkea. Kun kompensoitua järjestelmää käytetään selvästi sivussa resonanssitaajuuudesta, on otettava huomioon myös vikapaikassa kulkevan virran loiskomponentti.

<sup>3)</sup> Sammutuskelojen mitoitusvirrat on otettava huomioon myös kelojen maadoitusjohtimien suunnittelussa.

<sup>4)</sup> Maadoituselektrodijärjestelmän suunnittelussa voidaan ottaa huomioon virran jakautuminen jos on käytössä useita reittejä.

<sup>5)</sup> Yleistä laskentakaavaa ei ole käytössä (ks. esimerkiksi kuva 2.2).

<sup>6)</sup> Liitteen A mukaiset vähimmäispoikkipinnat ovat riittäviä.

<sup>7)</sup> Jos paikallisissa suurjännitejärjestelmissä, esimerkiksi teollisuuslaitoksissa, maasulun todennäköinen kestoaika on huomattavan pitkä, esim. useita tunteja, on syytä käyttää arvoa  $I''_{KEE}$  arvon  $I_E$  asemasta.

<sup>8)</sup> Käytetään suurempaa arvioista  $I''_{KEE}$  ja  $I''_{k1}$ .

<sup>9)</sup> Jos maadoitusjohdinta rasittava maasulun kokonaiskestoaika on alle 1 s, voidaan käyttää virtaa  $I_C$  tai  $I_{Res}$ .

Taulukon 5 merkkien selitykset:

$I_C$  Laskettu tai mitattu kapasitiivinen maasulkuvirta.

$I_{Res}$  Maasulun jäännösvirta (ks. kuva 2.3b). Jos tarkkaa arvoa ei ole käytettävissä, arvoksi voidaan olettaa 10 % arvosta  $I_C$ .

$I_L$  Kyseisen sähköaseman rinnakkaisten sammutuskelojen nimellisvirtojen summa.

$I''_{KEE}$  Kaksoismaasulkuvirta, joka on laskettu standardin HD 533 mukaisesti (virralle  $I''_{KEE}$  voidaan käyttää maksimiarvona 85 % symmetrisestä alkuoikosulkuvirrasta).

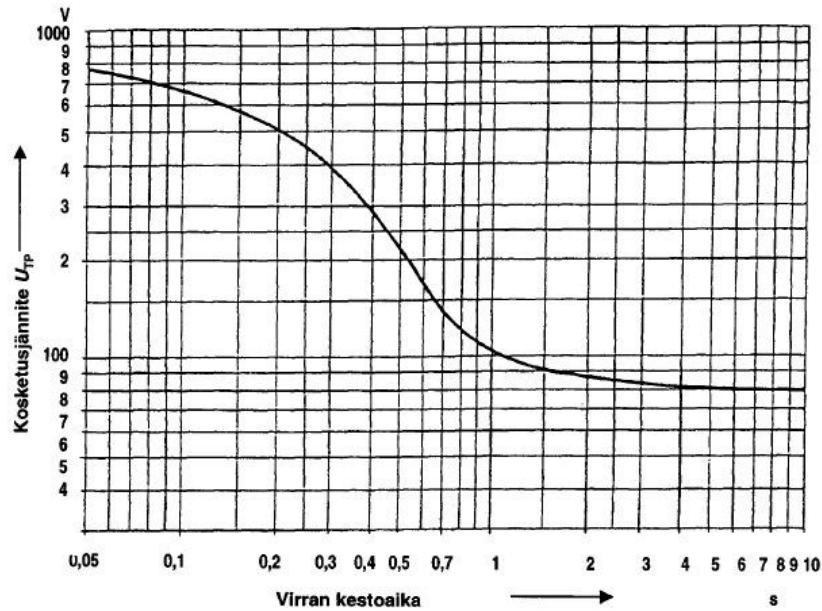
$I''_{k1}$  Vaiheen ja maan välisen oikosulun (vikaresistanssi on 0) symmetrinen alkuoikosulkuvirta, joka on laskettu standardin HD 533 mukaisesti.

$I_E$  Maaperään siirtyvä virta (ks. kuva 2.2).

$r$  Reduktiokerroin (ks. liite J). Jos sähköasemalta lähtevillä johdoilla ja kaapeleilla on eri reduktiokertoimet, on määritettävä asianmukainen virta (liitteen N mukaisesti).

### 2.7.3 Suurin sallittu maadoitusjännite

SFS 6001 asettaa vaatimuksen suurimmalle sallitulle kosketusjännitteelle  $U_{TP}$ , jonka avulla olosuhteiden mukaisesti lasketaan sallitut maadoitusjännitteet  $U_E$  tai mitataan paikalla todellinen kosketusjännite  $U_T$  ja verrataan sitä sallittuun kosketusjännitteeseen. Vian oletetaan syntyvän suurjännitejärjestelmässä. Todellisen kosketusjännitteen  $U_T$  mittaaminen on mahdollista suurjännitesähköasemien erillisten maadoitusjärjestelmien yhteydessä, mutta sitä ei voi soveltaa yhdistettyjen kj- ja pj-maadoitusten yhteydessä. Kosketusjännitteet on esitetty vikavirran kestoajan funktiona kuvan viisi mukaisesti. /7/



Kuva 6 Kosketusjännitteen suurimmat sallitut arvot, kun maasulku tapahtuu suurjännitejärjestelmissä /1/

Seuraava taulukko on laadittu SFS 6001:n kuvan 6 perusteella helpottamaan kosketusjännitteen suuruutta, kun tiedetään laukaisuajat.

Taulukko 6 Sallitut kosketusjännitteiden arvot /7/

Laukaisuaika s	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	2,0	5,0	10
$U_{TP}$ Volttia	390	280	215	160	132	120	110	102	85	80	80

Maadoitusjännitteet lasketaan suurimman sallitun kosketusjännitteen perusteella. Vaadittava maadoitusjännite, kun muuntamolla on vain yksi maadoitus

$$U_E \leq U_{TP} \quad (13)$$

Jos pienjänniteverkon PEN-johdin tai suojamaadoitusjohdin on maadoitettu useassa paikassa tähtipisteessä vaikuttavan jännitteen rajoittamiseksi, maadoitusjännitteen arvo voi olla kaksinkertainen verrattuna arvoon  $U_{TP}$ .  $2U_{TP}$ -tavassa muuntamolla on maadoituselektrodi, mutta potentiaalintasausrengas ei ole välttämätön. Pj-verkon elektrodit ovat jakokaapeilla ja yli 200 metrin haarojen päässä. Elektrodien välimatka suositus on 500 metriä. Sallittu maadoitusjännite on

$$U_E \leq 2 \times U_{TP} \quad (14)$$

$4U_{TP}$ -tapaa käytetään, jos voidaan täyttää seuraavat ehdot:

Tarvittavat etäisyydet on täytettävä vaarajännitteiden välttämiseksi ja jokaisessa pj-verkon haarassa on tehty ainakin yksi standardin SFS 6000-8-801 mukainen johtohaaran maadoitus.

$$U_E \leq 4 \times U_{TP} \quad (15)$$

Erityistapauksissa voidaan käyttää maadoitusjännitteen arvona viisinkertaista  $U_{TP}$ :n arvoa. Erityistapauksena pidetään muuntopiiriä, johon on kytketty vain yksi liittymä (tietoliikennemasto tai vastaava). Tällöin maaperän täytyy olla kauttaaltaan huonosti johtavaa (esim. hiekkaa, soraa, moreenia tai kalliota). Järjestelmässä on useita elektrodeja ja muuntamolla on maadoituselektrodi ja potentiaalinojausrengas. On suositeltavaa, että pj-liittymien maadoituselektrodi liitetään liittymissä olevien rakennusten pääpotentiaalintasausjärjestelmään. Mikäli ei ole mahdollista liittää rakennuksen pääpotentiaalintasaukseen, suositellaan maadoituselektrodina käytettäväksi rakennuksen perustuksen ympärille asennettavaa rengasta. //

$$U_E \leq 5 \times U_{TP} \quad (16)$$

Vanhoille maadoitusryhmille, jotka on rakennettu ennen standardin SFS 6001 voimaan tulemistä, käytetään taulukon seitsemän sallittuja maadoitusjännitteiden enimmäisarvoja, StM 10§.

Taulukko 7 Maadoitusjännitteen enimmäisarvot SFS 6001:n mukaan /1/

Ryhmä	Maadoitusjännite V	
	Maasulku kytketään itsetoimivasti pois ajassa $t$	Maasulkua ei kytketä itsetoimivasti pois
<i>a</i>	$750 / \sqrt{t}$	125
<i>b</i>	$2000 / \sqrt{t}$	250
<i>c</i>	$3000 / \sqrt{t}$	400
<i>d</i>	$500 / \sqrt{t}$	100
<i>e1</i>	$750 / \sqrt{t}$	125
<i>e2</i>	$1000 / \sqrt{t}$	150

Maadoitusryhmä jaotellaan seuraavasti:

Ryhmä A:

Laitteiston suojamaadoitettu osa tai sen maadoitukseen johtavassa yhteydessä oleva metalliosa, kuten rataakisko tai metalliputkisto, joka on kosketusetäisyydellä maasta, johtavalta lattialta tai vastaavalta alustalta. Laitteiston suojamaadoitettu osa tai sen maadoitukseen muuten johtavassa yhteydessä oleva metalliosa, joka sijaitsee siten, että sitä ja erilliseen elektrodiin maadoitettua tai maahan muuten johtavassa yhteydessä olevaa toista metalliosaa voi samanaikaisesti koskettaa maasta, lattialta tai vastaavalta alueelta.

Ryhmä B:

Laitteiston suojamaadoitettu osa tai sen maadoitukseen muuten johtavassa yhteydessä oleva metalliosa, joka on kosketeltavissa muualta kuin maasta, johtavalta lattialta tai vastaavalta alustalta.

Laitteiston suojamaadoitettu osa tai sen maadoituksen muuten johtavassa yhteydessä oleva metalliosa, joka sijaitsee siten, että sitä ja erilliseen elektrodiin maadoitettua tai maahan muuten johtavassa yhteydessä olevaa toista metalliosaa voi samanaikaisesti koskettaa vain esimerkiksi pylvääseen

nousten, kuten pylväsmuuntamolla, mutta ei maasta, lattialta tai vastaavalta alustalta. Tällöin kuitenkin edellytetään sellaisten rakenteiden käyttämistä, että kahden tässä tarkoitetun osan samanaikaisen koskettamisen mahdollisuus on vähäinen.

Ryhmä C:

Maanpinnan alapuolella sijaitseva maadoituselektrodi.

Ryhmä D:

Laitteiston suojamaadoitettu osa ja enintään 1000 V:n järjestelmän käyttömaadoitukseen yhdistetty osa silloin, kun näiden maadoittamiseen käytetään yhteistä elektrodia ja kyseessä oleva enintään 1000 V:n järjestelmä on ainakin osittain ensiksi mainitun laitteiston tai sen käsittämän alueen ulkopuolella. Tähän ryhmään rinnastetaan tapaus, jossa enintään 1000 V:n järjestelmän käyttömaadoituselektrodiin siirtyy yli 1000 V:n järjestelmän maadoituselektrodin aiheuttamasta potentiaalikerästä maadoitusjännite.

Ryhmä E:

Enintään 1000 V:n järjestelmään nollattu tai muuten suojamaadoitettu osa, joka on alttiina yli 1000 V:n järjestelmän jännitteelle. Jännite voi päästä ensiksi mainittuun järjestelmään lähinnä yli 1000 V:n johtimen koskettaessa yhteisiä pylväitä

käytettäessä siihen kuuluvaa johdinta, kannatusköyttä tai metallivaippaa (alaryhmä e1) taikka eristysvian sattuessa järjestelmien välisessä muuntajassa suoraan käämityksestä toiseen (alaryhmä e2). Jos jännitteelle altis enintään 1000 V:n järjestelmä on maadoitettu, sen (PEN-johtimen) maadoitusjännite on mainitunlaisessa eristysviassa maasulkupaikasta mitatun maadoitusimpedanssin ja

kyseessä olevan yli 1000 V:n järjestelmän maasulkuvirran tulo. Jos jännitteelle altis enintään 1000 V:n järjestelmä on maadoittamaton, voi jännite nousta niin suureksi, että eristysvian vaara on ilmeinen. Viimeksi



mainitussa tapauksessa maadoitusjännite on vastaavan suojamaadoitusimpedanssin ja kyseessä olevan yli 1000 V järjestelmän maasulkuvirran tulo.

### **3 YLEISTÄ MAADOITUSTEN MITTAAMISESTA /1 ja 2/**

Maadoitusresistanssi on mitattava uusista laitteistoista käyttöönoton yhteydessä. SFS 6001:n mukaan on suositeltavaa varmistaa maadoituksen arvo mittaamalla 6 vuoden välein, mikäli maadoitus on yhden maadoituselektrodin varassa ja 12 vuoden välein maadoituksen ollessa useamman kuin yhden elektrodin varassa. Mittaukset on suoritettava silloin, kun maa ei ole roudassa. Maadoitukset on rakennettava hyväksi tunnetun tavan mukaisesti käyttökuntoon ennen käyttöönottoa /3, s. 5/.

Maadoitusresistanssi on mitattava silloin, kun sille on asetettu suurin sallittu arvo. Mittaamalla saatu arvo ei saa ylittää suurinta sallittua arvoa. Suurin sallittu maadoitusresistanssin arvo määräytyy maasulkuvirrasta ja maadoitusjännitteestä. Maadoitusmittauksia tehdään seuraaville maadoituksille:

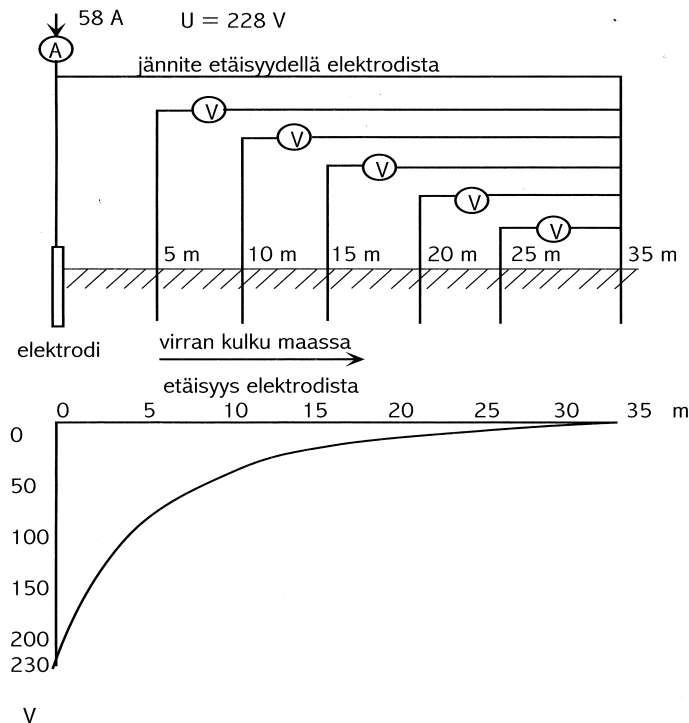
- suurjännite-erottimen suojamaadoitus
- muuntajan suurjännitepuolen suojamaadoitus
- sähköaseman maadoitus
- enintään 1000 V:n jakeluverkon maadoitus silloin, kun järjestelmä on alttiina yli 1000 V:n jännitteille
- edellä mainittujen järjestelmien yhteinen maadoitus

### 3.1 Maadoituksen mittaustavat

Maadoitusresistanssin mittaamiseen on käytettävissä useita eri menetelmiä. Yleisin käytetty tapa mittaamiseen on syöttää samansuuruista virtaa mitattavaan maadoituselektrodiin kautta ja mittaamalla tämän jälkeen maadoituselektrodiin yli vaikuttava jännite. Tällöin Maadoitusresistanssi saadaan laskettua ohmin lailla. /10/

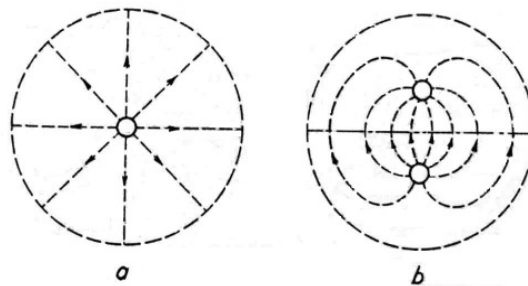
$$R = \frac{U}{I} . \quad (17)$$

Virta jakautuu maadoituselektrodistä siten, että virran tiheys on suurin välittömästi elektrodin läheisyydessä. Maahan kulkeva virta aiheuttaa maadoituselektrodin läheisyydessä jännite-eroja, jotka myös ovat suurimpia elektrodin välittömässä läheisyydessä. Jännitteen jakautumista esittää kuva seitsemän.



Kuva 7. Jännitteen jakautuminen maaperässä /10/

Maadoitusresistanssin mittauksessa virta-apuelektrodi sijoitetaan  $x$  matkan päähän elektrodista ja jänniteapuelektrodilla mitataan arvo 50 %:n kohdalta virtaelektrodin etäisyydestä. Suppeahkoissa maadoitusten mittauksissa tulokseksi saadaan suhteellisen oikea arvo. Teoriassa arvo on kuitenkin n. 10 % liian pieni, mikä johtuu mittausvirran ahtautumisesta virta-apuelektrodin läheisyydessä. Oikeellinen mittaustulos saadaan jänniteapuelektrodin ollessa 62 % virta-apuelektrodista. Kuvassa kahdeksan on esitetty virran kulku teoreettisesti ja käytännön menetelmässä. Teoreettisesti oikeassa tapauksessa 8a, jossa mittavirta kulkee elektrodista hyvin suuren puolipallon pinnalle. Kuvassa 8b on käytännön tapaus, missä mittavirta kulkee elektrodin ja lähellä olevan virta-apupiikin välillä. Elektrodi ja virta-apupiikki oletetaan samanlaisiksi, jolloin symmetriataso niiden puolivälissä on nollapotentialissa. A-kohdassa saadaan mittaustulokseksi elektrodi ja puolipallon välinen vastus eli oikea arvo. Jälkimmäisessä tapauksessa saadaan elektrodin ja symmetriatason välinen vastus, mikä on jonkin verran pienempi. Mittaustulosta voidaan suurentaa siirtämällä jänniteapupiikkiä nollapotentialikohdan yli lähemmäksi virta-apupiikkiä. Jännitepiikin teoreettisesti oikea etäisyys on tällöin 62 % virtapiikin etäisyydestä elektrodista. Tällöin mittaesarvo on lähempänä oikeaa tulosta. /5/



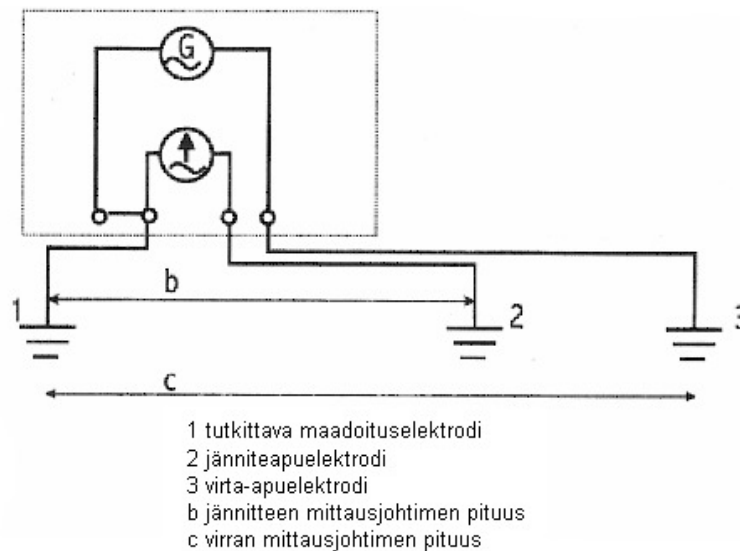
Kuva 8 Mittausvirran kulku maassa. a) teoreettinen tapaus, b) todellinen tapaus /5/

### 3.1.1 Käänne pistemenetelmä /2/

Käänne pistemenetelmässä mitataan maadoitusresistanssin arvoja. Saaduista arvoista sovitetaan käyrä ja käyrän käänne pisteestä saadaan mitatun maadoituselektrodin tai elektrodijärjestelmän resistanssiarvo.

Mittausta varten on kehitetty maadoitusresistanssi mittalaitteita, jotka toimivat kompensatioperiaatteella. Laite syöttää 100 - 500 V suuruisen vaihtojännitteen, laitteen valmistajasta riippuen, taajuuden vaihdelta 70 - 140 Hertsiin. Taajuuden valinnassa on tärkeää, että ei käytetä valtakunnallisen verkon taajuuden 50 Hz kerrannaisia.

Mitta-apuelektrodit eivät saa sijaita mitattavan elektrodin päällä, eikä vaikutusalueella saa olla muita metallisia vesijohtoja tms. Maadoituksen koostuessa useasta eri osaelektrodista on mittaushetkiä valittava mahdollisimman keskeltä järjestelmää. Mittauskytkentä on kuvan yhdeksän mukainen.



Kuva 9 Käänne pistemenetelmän mittauskytkentä /2/

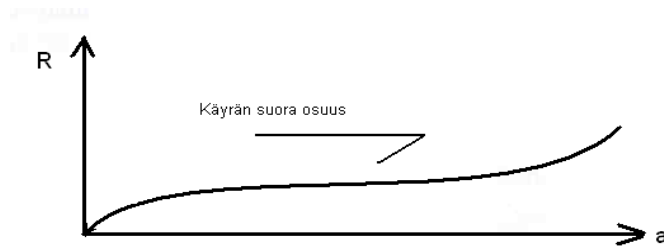
Mittauksessa mittarin sisäinen virtalähde syöttää virtaa mitattavaan maadoituselektrodiin (1). Virta kulkee maan kautta virta-apuelektrodiin (3) ja sieltä takaisin mittalaitteeseen. Mitattavan elektrodin (1) ja jännite-apuelektrodin (2) välille syntyy potentiaaliero. Mittaustekniikka perustuu siltamittaukseen, jossa mittarin sisällä on muuttuva resistanssi, joka muuttuu mitattavan elektrodin suhteen.

Sisäinen silta-kytkentä hakee tasapainotilan muuttuvan ja mitattavan resistanssin suhteen. Tasapainotilassa saadaan luettua resistanssin arvo mittalaitteen näytöltä. Siltakytkennän ansiosta mittalaite kompensoi jännite- ja virtajohtimien resistanssit. Viedessä jänniteapuelektrodiä kohti virta-apuelektrodiä kasvaa mitattavan elektrodin ja jänniteapuelektrodin potentiaaliero. Virran ollessa vakio, muuttuu elektrodin ja jänniteapuelektrodin välinen resistanssi. Mitta-apujohtimien on sijaittava samalla suoralla mitattavan maadoituselektrodin kanssa.

Mittaus tapahtuu viemällä virta-apuelektrodi etäisyyden  $c$  kohdalle, joka voi olla  $50, 100, 200$  tai  $400$  m. Lähtökohtana on SFS 6001 standardin mukaan virta-apuelektrodin etäisyyden olisi oltava 4 kertaa maadoituselektrodin pituus. Yleisin käytetty maadoituselektrodi on vaakasuoralla ja pituudeltaan  $25$  m. Virta-apuelektrodin asennuksen jälkeen mitataan maadoitusresistanssi eri etäisyyksillä, siirtämällä jännite-apuelektrodin paikkaa. Jännite-apuelektrodiä siirretään  $5, 10$  tai  $20$  metrin välein riippuen virta-apuelektrodin etäisyydestä. Mittaustuloksista muodostetaan resistanssikäyrä jännite-apuelektrodin etäisyyden funktiona. Liitteessä [3] on esitetty maadoitusmittauksen dokumentointi-kortti.

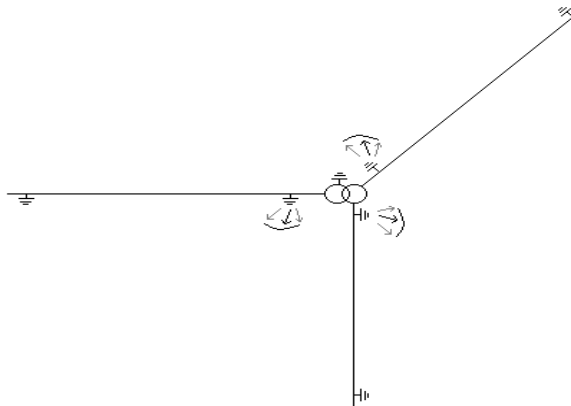
Headpowerin ohjeen mukaan mittausjohtimien on sijaittava vähintään  $0,5$  metrin päässä toisistaan. Tällöin estetään keskinäisten kapasitanssien ja induktanssien vaikutukset. Taggin tekemän tutkimuksen mukaan  $100$  metrin virtajohtimen itseinduktio on  $2,42$  mH,  $60$  metrin jännitejohdin itseinduktio on  $1,57$  mH ja näiden keskinäisinduktio on  $0,89$  mH. Kapasitiivisyys johtojen välillä on  $0,0028$   $\mu$ F. Impedanssit ovat pienet, joten virhettä voi syntyä vain pienissä maadoituselektrodin  $0,1 - 0,2$   $\Omega$ :n arvoilla, joten mittajohtimien etäisyydellä ei ole suurta merkitystä mittaustulokseen. /11/

Käyrän suorasta osasta on luettavissa maadoitusresistanssi arvo. Mikäli käyrällä ei ole havaittavissa vaakasuoraa osaa, mutta selvä käännepiste, voidaan maadoitusresistanssin arvo ottaa tästä kohdasta. Maaperän ollessa elektrodin läheisyydessä riittävän homogeeninen, voidaan maadoitusresistanssi määrittää ns.  $62$  % säännöllä virta-apuelektrodin etäisyydestä. /9/



Kuva 10 Ihanteellinen käännepistemenetelmän käyrämuoto

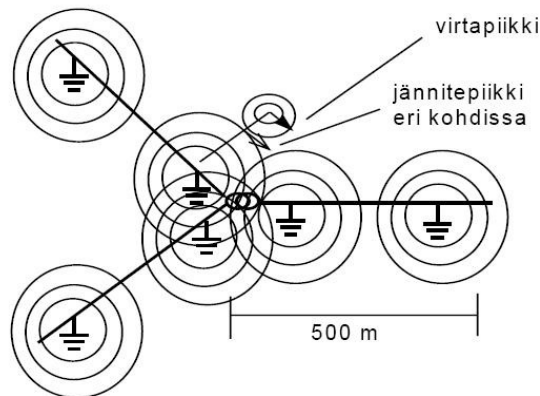
Käyrämuodon ollessa epäsäännöllinen, on mittaus tehtävä uudelleen toiseen suuntaan tai mittaamalla kokonaan toisesta paikasta järjestelmää tai käyttämällä pitempiä mittausetäisyyksiä. Kuvassa 11 on muuntopiirin mahdolliset mittauspajat ja -suunnat mitattaessa muuntamon läheisyydestä.



Kuva 11 Mahdolliset mittauspajat ja -suunnat muuntopiirin läheisyydestä mitattaessa

Ilmajohtoalueen muuntopiireissä, jotka sijaitsevat huonosti johtavalla maaperällä, käytetään pitkiä vaakamaadoituselektrodeja. Muuntajan  $k_j$ -suojavaadoitus ja muuntopiirin  $p_j$ -käyttömaadoitus ovat lähes aina yhdistetty. Muuntamon ympärillä on usein noin 100 metrin etäisyyksillä toisistaan useita elektrodeja.

Kuvasta 12 nähdään mittauksessa käytetyn virta-alueelektrodin ympärille muodostuvia vastakkaismerkkisen potentiaalinen tasausrenkaita. 200 metrin mittausuoralla on vaikeata löytää neutraalimaata potentiaalinen tasausrenkaiden välistä neutraalivyöhykettä. /3, s. 5./



Kuva 12 Muuntopiirin maadoitusten- ja virta-apuelektrodien potentiaalilin  
 taseusrenkaita /3/

Käytännöllisesti katsoen on mahdotonta määrittää tarkasti missä mitattava maadoituselektrodin tai -elektrodijärjestelmän sähköinen keskipiste sijaitsee. Tästä johtuen matkan määrittäminen virta-apuelektrodiin niin, että voidaan suorittaa 62 % -mittaus on hankalaa.

Potentiaaliero tutkittavan elektrodin ja jänniteapuelektrodin välillä on

$$U_m = \frac{I \cdot \rho}{2 \cdot \pi} \cdot \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{C-r} - \frac{1}{P} + \frac{1}{\sqrt{P^2 + C^2 - 2 \cdot P \cdot C \cdot \cos \theta}} \right) \quad (18)$$

$P$  on jänniteapuelektrodin etäisyys mitattavasta elektrodista

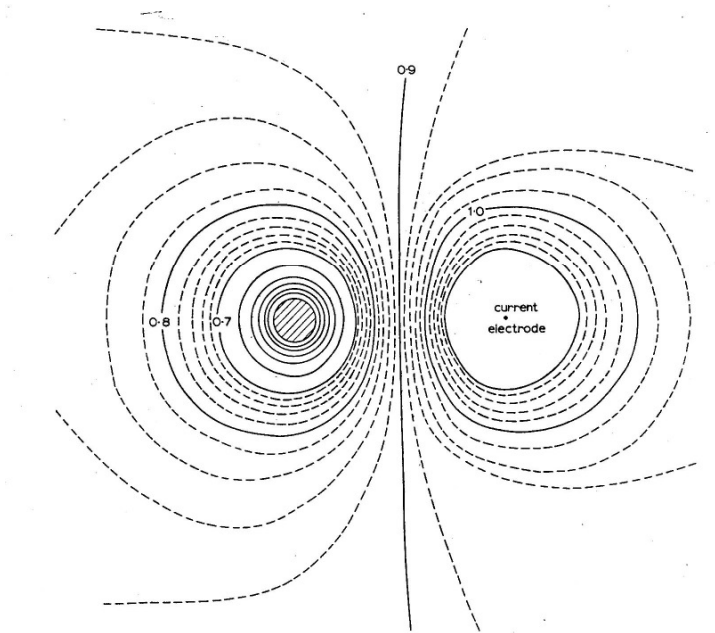
$C$  on virta-apuelektrodin etäisyys mitattavasta elektrodista

$I$  on syötettävä virta

$r$  on elektrodin säde

$\cos \theta$  on virta-apuelektrodin ja jänniteapuelektrodin välinen kulma.

Oletetaan virran,  $I$  olevan 0,1 ja maan resistiivisyyden,  $\rho = 2300 \Omega\text{m}$ . Virta-  
 apuelectroodin etäisyys,  $C$  on 100 metriä ja jännite-apuelectroodia,  $P$  siirretään 10  
 metrin välein lähestyen virta-apuelectroodia. Virta- ja jänniteapuelectrodit  
 sijaitsevat samalla suoralla, joten  $\cos\theta = 1$ . Taulukossa 8 on lasketut arvot.



Kuva 13 Puolipallon muotoisen resistanssin vaikutusalueet /12/

Kuva 13 kuvaa käännepistemenetelmän elektrodien vaikutus alueita. Kuvasta on  
 luettavissa taulukon kahdeksan saadut resistanssien suhteiden arvot. Kuvasta näkyy  
 myös käännepisteen muodostuminen 61,8 %:n kohdalle.

Taulukko 8 Jännitepotentiaalit ja resistanssien suhteet

$C / \text{m}$	$U_m / \text{V}$	$R_m / R_\infty$
10	36,240	0,990
20	36,431	0,995
30	36,499	0,997
40	36,538	0,998
50	36,569	0,999
60	36,599	1,000
70	36,639	1,001
80	36,706	1,003
90	36,894	1,008

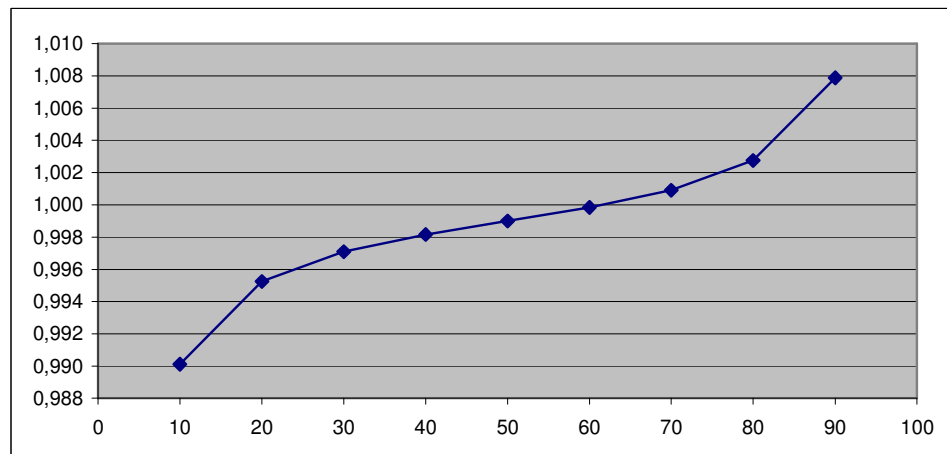


Maadoituksen todellinen resistanssi on  $R_{\infty} = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot r}$ , kun merkitään  $b = P/r$  ja  $c =$

$C/r$  ja oletetaan  $C \gg r$  sekä käytetään hyväksi kaavaa 18. Saadaan mitatun ja todellisen resistanssin suhteeksi

$$\frac{R_m}{R_{\infty}} = 1 - \frac{1}{c} - \frac{1}{b} + \left( \frac{1}{\sqrt{b^2 + c^2 - 2 \cdot b \cdot c \cdot \cos \theta}} \right) \quad (19)$$

Laskemalla resistanssien suhteet saadaan taulukossa 8 olevat arvot. Tuloksista huomataan, että 60 metrin kohdalla mittauskäyrässä resistanssien suhde on 1, joten käännepisteen on oltava samassa kohtaa. Taulukosta 8 nähdään myös Headpowerin ohjeistuksissa puhutusta maadoitusmittaus käyrän tasaisesta osasta. Tasainen osuus saadaan käyrään silloin, kun resistanssien suhde on lähellä 1. Taulukon kahdeksan arvoilla tasainen osuus syntyy 40, 50, 60 ja 70 metrin välillä. Kuvassa 14 se on havaittavissa ja samoin nähdään käännepiste 60 metrin kohdalla. X-akselilla on jännitepiikin etäisyys metreinä virtapiikin etäisyydestä. /11/



Kuva 14 Todellisen ja mitatun maadoitusresistanssin teoriassa saatu suhteiden käyrämuoto

Kaava 18 ja 19 antavat aina saman käyrämuodon eri pituisista mittajohtimista huolimatta.

### 3.1.2 Mittaus virta-jännitemenetelmällä

Maadoitusresistanssi voidaan mitata käyttämällä maadoitetun jakeluverkon jännitettä. Maadoituselektrodiin johdetaan vaihtovirta, jonka suuruus vaihtelee mitattavan maadoitusresistanssin mukaan. Etäisyys mitattavan maadoituselektrodin ja virta-apuelektrodin välillä tulee olla minimissään 20 m. Tätä mittaustapaa kutsutaan virta-jännitemenetelmäksi.

Mittauksessa käytetty verkkojännite ei saa aiheuttaa vaaratilanteita, esim. synnyttää vaarallista kosketusjännitettä. Uudemmissa mittalaitteissa on yleensä suojaus, joka keskeyttää mittauksen kosketusjännitteen noustessa yli 50 V. Virta-jännitemenetelmää voidaan käyttää ilman verkkojännitettä, mikäli mittalaite itse kehittää vaihtojännitteen.

### 3.1.3 Voltti-ampeerimenetelmä

Voltti-ampeerimenetelmässä mitataan tutkittavan maadoituselektrodin kautta kulkevaa mittausvirtaa ja elektrodin yli vaikuttavaa jännitettä. Kyseinen mittaamenetelmä jäljittelee parhaiten todellista maasulkutilannetta.

Virransyöttömuuntaja syöttää mittausvirtaa  $I_m$  maadoitukseen avojohtoa myöten kilometrien päästä. Virta kulkee kauempana sijaitsevan vastamaadoituselektrodin ja mitattavan maadoituselektrodin kautta takaisin mittarille. Jännitemittaus tapahtuu apuelektrodin ja maadoituksen väliltä. Mitattu jännite on suoraan maadoitusjännite, koska virtaa ei viedä jänniteapuelektrodin kautta eikä jänniteapuelektrodi ole maadoituselektrodikenttien vaikutusalueella.

Maadoitusimpedanssi saadaan laskettua jännitteen ja virran avulla

$$Z_E = \frac{U_{EM}}{I_M \cdot r} \quad (20)$$

missä

$U_{EM}$  on maadoitusjärjestelmän ja referenssimaassa olevan maapiikin välinen maadoitusjännite

$I_M$  on mitattu testausvirta ampeereina

$r$  on referenssimaan maadoituselektrodiin kulkevan johdon reduktiokerroin

### 3.1.4 Maasulkumittausmenetelmä

Maasulkumittauksessa mitataan maasulkuvirta ja maadoituselektrodin yli vaikuttava maadoitusjännite. Mittaus on mahdollista suorittaa ainoastaan sellaisessa verkossa, jossa on laukaiseva maasulkusuojaus. Resistanssi lasketaan yhtälöstä

$$R = \frac{U}{I} \quad (21)$$

Jänniteapuelektrodi on vietävä riittävän kauaksi mitattavasta maadoituselektrodista. Käytännössä mittaus suoritetaan kahdella eri jänniteapuelektrodin etäisyyden arvolla; mittaustulos ei saa muuttua. Koska työ tehdään jännitteellisenä, on noudatettava jännitetöistä annettuja määräyksiä.

### 3.1.5 Sarjamittaus

Sarjamittauksessa mitataan muuntopiirin maadoitusresistanssia. Yksittäinen maadoituselektrodi irrotetaan järjestelmän nollajohtimesta ja mitataan käännepestemenetelmällä  $R_1$  arvo. Irrotetun maadoituselektrodin ja nollajohtimen väliin kytketään maadoitusresistanssin mittalaite ja mitataan koko muuntopiirin resultoiva vastusarvo  $R_s$ . Yhteen maadoitusverkkoon kytketyt erilliset maadoitukset ovat kytketty rinnan maapotentiaaliin.

Referenssimittauksella yhteinen maadoitusvastus  $R_k$  voidaan laskea seuraavalla kaavalla:

$$\frac{1}{R_k} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n} \quad (22)$$

Sarjamittauksella saatu tulos yhdestä maadoituksesta voidaan laskea seuraavasti:

$$R_s = R_1 + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n}, \quad (23)$$

jossa rinnan olevat resistanssit merkitään  $R_a$ . Tämä helpottaa kaavan käsittelyä.

$$R_a = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n} \quad (24)$$

Tästä seuraa, että

$$R_s = R_1 + R_a. \quad (25)$$

Tässä vaiheessa on tarkistettava, että voidaanko yhteisen maadoitusvastuksen arvoa laskea kyseisestä mittauspisteestä.

$$R_a = R_s - R_1, \quad (R_a > 0, \text{ kun } R_s > R_1) \quad (26)$$

mikäli  $R_a$ :n arvoksi tulee negatiivinen luku, niin kokonaismaadoitusvastusarvoa ei voida määrittää tästä pisteestä kaavan 25 avulla. Tällöin vastusarvo on laskettava kaavalla 22.

Yhteisen maadoitusvastuksen arvo voidaan lausua kahden vastuksen rinnankytkentänä.

$$\begin{aligned} \frac{1}{R_k} &= \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_a} \\ \Rightarrow & \\ R_k &= \frac{R_1 \cdot R_a}{R_1 + R_a} \end{aligned} \quad (27)$$

### **3.2 Chauvin Arnoux 6425- maadoitusmittari**

Chauvin Arnoux 6425 on maadoitus- ja maanominaisvastusmittari. Mittarilla voi mitata maadoitusresistanssin käännepistemennelmällä ja sarjamittauksena.

Mittarilla voi myös mitata maanominaisvastuksen *Wenner*- menetelmällä. Kuvassa 15 on mittauksissa käytetty mittari. Mittarin punaiseen *H* -napaan kytkettiin virtaapuelektrodi, siniseen *S* -napaan jänniteapuelektrodi. *E* -napa oikosuljettiin *EH* -navan kanssa ja siihen kytkettiin mitattava maadoituselektrodi. Resistanssin arvo saadaan näkyviin näytölle painettaessa *TEST* -nappia.



Kuva 15 Maadoitusvastusmittari Chauvin Arnoux 6425

Mittari käyttää lähdejännitteenä 10,5 VAC, kun ilmanlämpötila on 23 °C.

Mittausvirta vaihtelee mittausalueen mukaan seuraavasti:

- 0,00 ... 19,99 Ω                      10 mA
- 20,00 ... 199,99 Ω                      1 mA
- 200,00 ... 1999 Ω                      100 mA

Taulukko 9 Ulkoisten häiriötekijöiden aiheuttamat vääristymät mittauksessa /6/

ULKOISTEN TEKIJÖIDEN AUHEUTTAMAT VÄÄRISTYMÄT		Toiminta-alue
Lämpötila		-10 ... + 55
Suhteellinen kosteus		20 ... 90 %
Toimintajännite		8,8 ... 12,5 V
Jännitepiirin kuorma <sup>1)</sup>		50 kΩ
Virtapiirin kuorma <sup>2)</sup>	0,00 ... 19,99 Ω	30 kΩ
	20,00 ... 199,9 Ω	30 kΩ
	200,0 ... 1999 Ω	50 kΩ
Tasajännite		0 ... 20 V <sup>3)</sup>
Häiröjännite (AC) liittimessä H		0...23 V <sub>rms</sub>
Häiröjännite (AC) liittimessä S		0...9 V <sub>rms</sub>

1) Mitattu vastus tai sauvojen ja ES ja S sekä johtimien vastus yhteensä .

2) Mitattu vastus tai sauvojen ja EH ja H sekä johtimien vastus yhteensä.

3) ”High Noise” -valo mahdollisesti vilkkuu yli 4,5 V jännitteillä.

#### 4 Käänepistemennetelmämittauksen virhetekijöitä

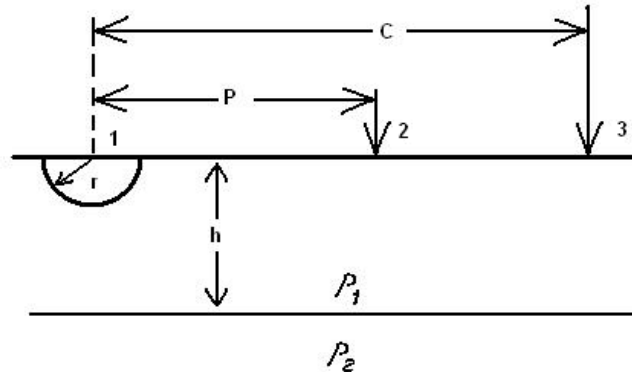
Mittausmenetelmissä on mahdollista tapahtua mittaustuloksen vääristymiä. Mittaamalla maadoitusresistanssia käänepistemennetelmällä on syytä tietää virhetekijöitä, joita ovat mm. maan epähomogeenisuus, ulkoisten lähteiden aiheuttamat häiriöjännitteet ja johtavat esineet maaperässä. Mittarin ja maadoituselektrodin välinen yhdysjohdin lisää maadoitusresistanssin arvoa. Yhdysjohtimen resistanssi on vähennettävä mittaustuloksesta. Suurin virhetekijä on kuitenkin mittaaaja ja mittauspaikan valitseminen. /4/

Mittauksessa on hyvä tietää mitattavan elektrodin fyysinen ulottuvuus. Ohjeistuksena on, että mittauksessa käytetyn virta-apuelektrodin etäisyys olisi nelinkertainen mitattavaan maadoituselektrodin fyysiseen pituuteen nähden. /3/ Maadoitukset on dokumentoitu ainoastaan paikkatietoina, joten niistä ei tiedetä asennussuuntaa, fyysistä pituutta eikä elektrodin kokoa. Tästä johtuen oikean virta-apuelektrodin pituutta ei voida tietää. Käytännössä on hankala määrittää maadoituksen ulottuvuutta. Maadoituksen laajuus voidaan käsittää koko maadoitusjärjestelmän tai yksittäisen maadoituselektrodin laajuisena. Mikäli laajuudella tarkoitetaan koko järjestelmää, on miltei mahdotonta määrittää maadoituksen uloin vaikutusalue. Vesijohtoputket ja muut maassa sijaitsevat rautaesineet auttavat virran johtumista maaperässä ja aiheuttaa mittaustuloksen vääristymää.

Maadoituksen ollessa muodoltaan neliömäinen, on virta-apuelektrodin suositeltava etäisyys vähintään sivun pituuden verran, kuitenkin ylittämättä kaksinkertaista sivunpituutta. /11/

##### **4.1 Kaksikerrosmaan vaikutus** /11/

Kuvassa 16 maadoitusresistanssin mittaus tapahtuu kaksikerrosmaassa. Kaksikerrosmaan eri kerrokset ovat erisuuruisia ominaisvastukseltaan. Maakerroksen vastustuksen muuttuessa muuttuu myös mittausvirran kulku. Laskuesimerkissä maadoituselektrodi on puolipallon muotoinen ja sijaitsee maakerroksessa, jonka resistiivisyys on  $\rho_1$ . Syvyydessä  $h$  resistiivisyys muuttuu arvoksi  $\rho_2$ .



Kuva 16 Mittauskuva kaksikerrosmaassa

Mitatun ja todellisen maadoitusresistanssin käyrä saadaan selville seuraavasti

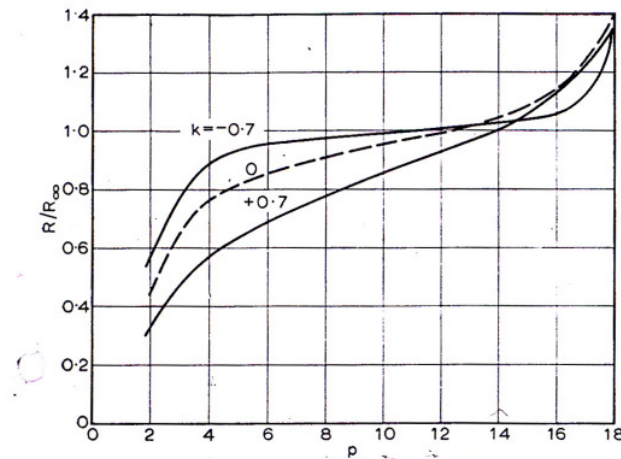
$$\frac{R}{R_{\infty}} = \frac{1 - \frac{1}{c} - \frac{1}{p} + \frac{1}{c-p} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} k^n F}{1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k^n}{2 \cdot n \cdot X}} \quad (28)$$

missä

$$F = \frac{1}{2 \cdot n \cdot X} - \frac{1}{\sqrt{c^2 + (2 \cdot n \cdot X)^2}} - \frac{1}{\sqrt{p^2 + (2 \cdot n \cdot X)^2}} + \frac{1}{\sqrt{(c-p)^2 + (2 \cdot n \cdot X)^2}}$$

$c = C/r$ ,  $p = P/r$   $X = h/r$  ja  $k$  on heijastuskerroin  $(\rho_2 - \rho_1) / (\rho_2 + \rho_1)$ .

Heijastuskerroin voi vaihdella  $-1$  ja  $+1$  välillä. Käytännössä heijastuskerroin saavuttaa harvoin nämä arvot. Kuvan 14 käyrät ovat laskettu  $k = \pm 0,7$ ,  $X = 2$  ja  $c = 20$ . Katkoviivalla esitetty käyrä on homogeenisessa maassa sijaitsevan elektrodin käyrämuoto. Alemman käyrän tilanteessa kaksikerrosmaan alempi kerros on enemmän johtavaa heijastuskerroin on  $+ -$ merkkistä. Taulukossa 10 on kuvan 17 käyristä laskettu tulokset todellisen ja mitatun resistanssin suhteille.



Kuva 17. Kaksikerrosmaan vaikutus mittaustulokseen /11/

Taulukko 10 Kaksikerrosmaan virheet /11/

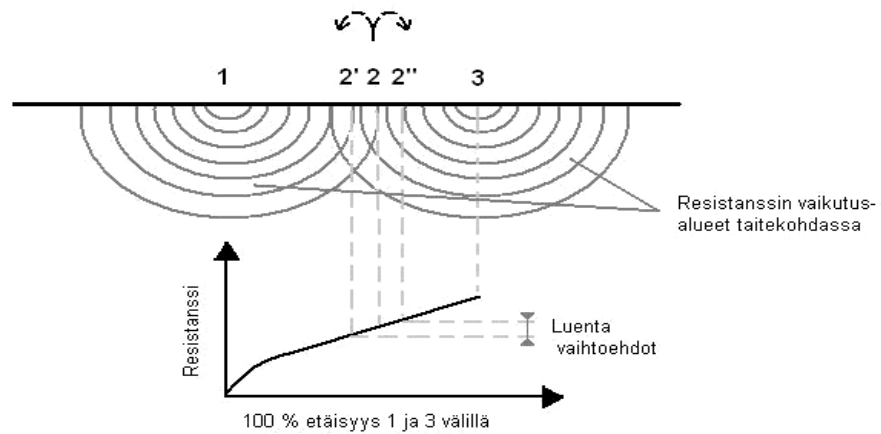
P / R	$k = + 0,7$		$k = - 0,7$	
	$R / R_{\infty}$	virhe / %	$R / R_{\infty}$	virhe / %
0,2, 0,4, 0,6, 0,8	0,9529	- 4,71	1,0045	+ 0,45
0,4, 0,5, 0,6, 0,8	0,9487	- 5,13	1,0016	+ 0,16
0,4, 0,5, 0,6, 0,7	0,9553	- 4,47	0,9954	- 0,46
0,5, 0,6, 0,7, 0,8	0,9720	- 2,80	0,9792	- 2,08

Tuloksista huomataan suuremman virheen syntyvän, kun alempi kerros on huonommin johtavaa ( $k = + 0,7$ ). Virhe on pienempi, jos pintakerros on paremmin johtavaa ( $k = - 0,7$ ).

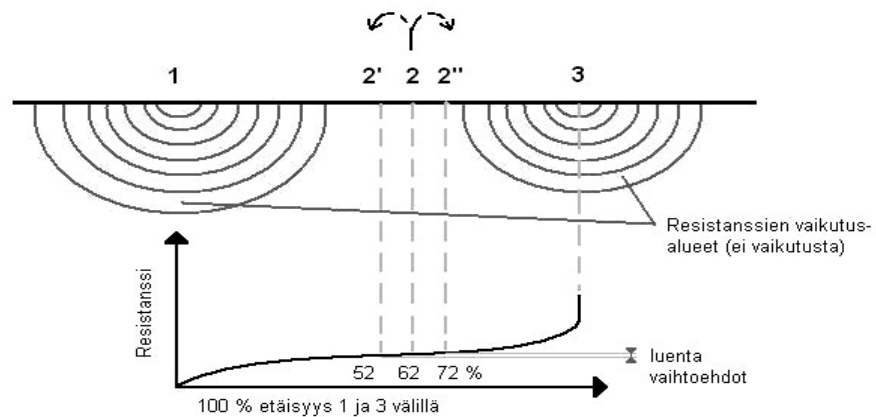
#### 4.2 Mittaus elektrodin päällä

Mittaustuloksen käyrämuodosta on mahdollista huomata mittauksen virheellisyys, jos mittaus on tapahtunut elektrodin vaikutusalueella. Kuvassa 18 numeroinnit vastaavat käännepistemenetelmän elektrodeja, 1 on mitattava maadoituselektrodi, 2 on jänniteapuelektrodi ja 3 on virta-apuelektrodi. Kuvassa 19 on esitetty oikea mittausetäisyyden vaikutus mittaustulokseen.





Kuva 18 Käännepistemittauksessa virta-apuelektrodi on mitattavan elektrodin vaikutusalueella /8/



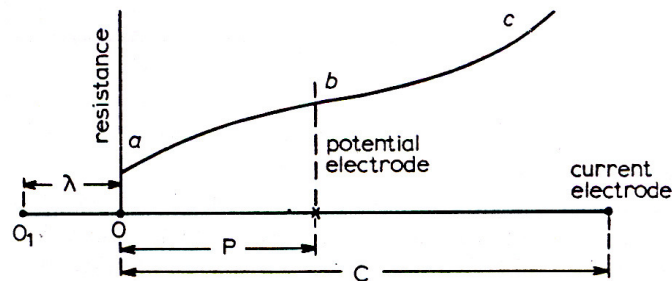
Kuva 19 Käännepistemetelmässä on valittu oikea virta-apuelektrodin pituus /8/

Elektrodijärjestelmän maadoitusresistanssia mitattaessa järjestelmän sähköisen keskipisteen määrittäminen tarkasti on hankalaa ja aiheuttaa virhettä mittaustulokseen. Laajojen maadoitusjärjestelmien tapauksissa mittajohtimet saattavat jäädä järjestelmän vaikutusalueelle, jos mittaus tehdään oletetusta keskipisteestä. /4/

### 4.3 Mittaus mielivaltaisesta aloituspisteestä

Oikean mittausaloituspaikan määrittäminen on hankalaa. Sähköisen keskipisteen toteaminen ei ole helppoa ja tämä löytyessä ei mittausta aina ole mahdollista suorittaa kyseisestä paikasta. Sähköinen keskipiste on elektrodijärjestelmän parhaiten maadoittava osio. Pelkästään fyysinen koko ei ole määräävä tekijä maadoituselektrodin sähköisen keskipisteen määrittämiseksi maadoitusjärjestelmässä, vaan elektrodin ympärillä oleva maaperä on suurin vaikuttaja.

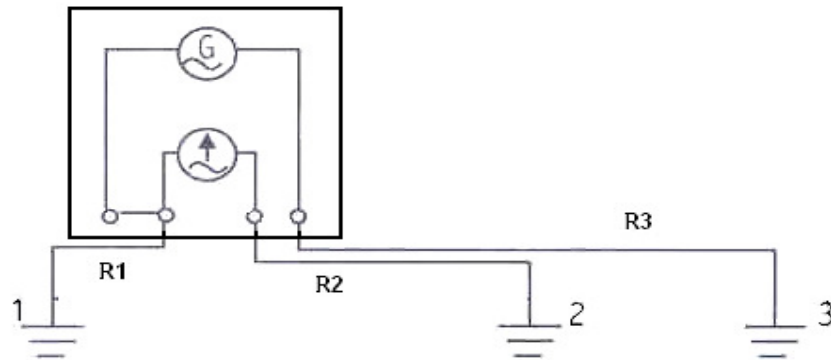
Mittaus suoritetaan mielivaltaisesta pisteestä  $O$  ja elektrodin sähköinen keskipiste on  $O_1$ . Pisteiden välinen etäisyys on  $\lambda$ . Tällöin käyrä  $abc$  on kuvan 20 kaltainen. Käännepiste esiintyy lähempänä mitattavaa elektrodia, kuvassa  $b$  on n. 40 %:n kohdalla. Mittauskäyrästä luetaan maadoitusresistanssin arvoksi käännepisteessä oleva arvo. Mittauskäyrässä ei ole nähtävissä käyrän  $S$ -muotoa, sillä sähköinen keskipiste saavutetaan liikkua mittakäyrällä  $y$ -akselin toiselle puolelle. /12/



Kuva 20 Maadoitusresistanssikäyrä mitattaessa mielivaltaisesta pisteestä /12/

#### 4.4 Yhdysjohtimen resistanssin vaikutus mittaustulokseen

Yhdysjohtimella tarkoitetaan mittalaitteen ja maadoituselektrodin välistä johdinta. Yhdysjohtimen resistanssilla on vaikutus mittaustulokseen. Mittauslaitteen kytkentä kompensoi virta- ja jännitejohtimien resistanssit, mutta yhdysjohtimen resistanssi on vähennettävä mittaustuloksesta sarja kytkennän takia. Kuvasta 21 selviää johtimien resistanssit. Yhdysjohtimen resistanssi on  $R_1 = 5 \Omega$  ja mittaamalla saatu  $R_E = 15 \Omega$ . Mittaustuloksesta vähennetään yhdysjohtimen resistanssi ja tulokseksi saadaan todellinen  $R_E = 10 \Omega$ .



Kuva 21 Johtimien resistanssit mittaauksessa

Yhdysjohtimen resistanssiin vaikuttaa johtimen pituus, liittimet ja liitos. Johdon ollessa lyhyt ja liittimien kiinnitykset ovat kunnossa saadaan yhdysjohtimen resistanssiksi pienempi arvo. Suositus yhdysjohtimen resistanssiksi on  $R_1 \approx 0 \Omega$ .

## 5 MITTAUKSET

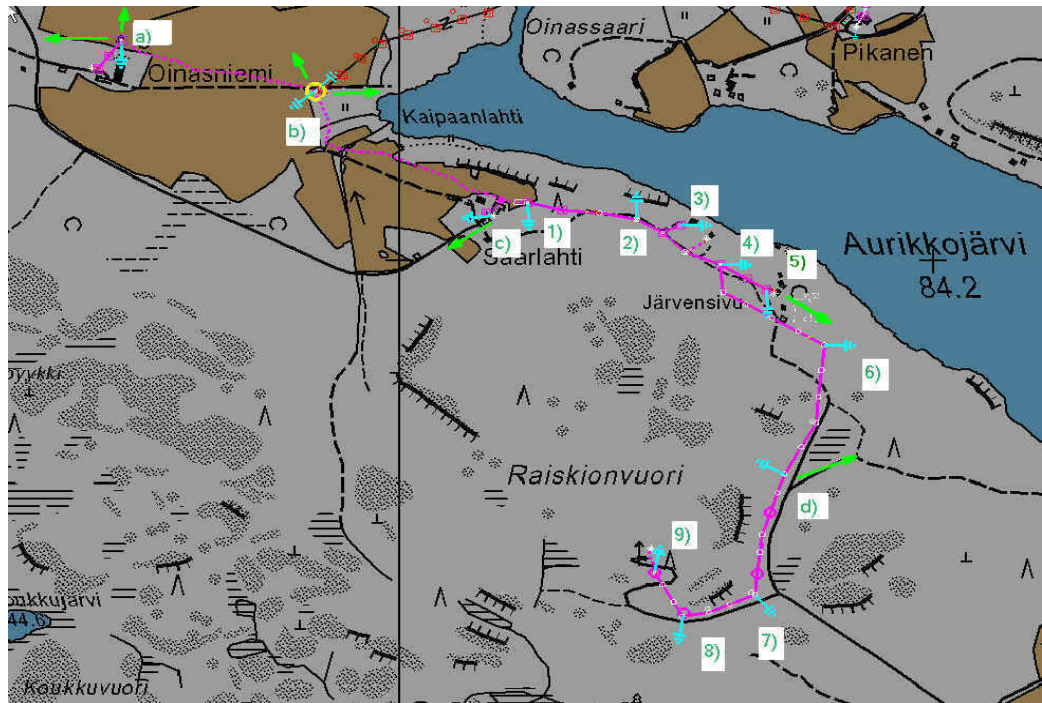
Mittaukset on suoritettava kesän ja syksyn aikana, jolloin maa ei ole roudassa. Sillä routa aiheuttaa maaperässä olevan veden jäätyminen ja mittaustulokset vääristyvät. Mittausapupiikin lyöminen on myös hankalampaa. Tarkoituksena on valita erilaisista muuntopiireistä yhdestä kolmeen mittauskohdetta ja mitata maadoitus käännepestemenetelmällä, sarjamittauksella ja pihtivastusmittarilla vertailun vuoksi. Mittaukset suoritetaan maadoitusvastusmittarilla Chauvin Arnoux 6425 ja pihtivastusmittarilla Chauvin Arnoux 6413.

### 5.1 Mittauspaikkojen valinta ja mittaussuunnat

Tarkoituksena on löytää suppea muuntopiiri, jossa pj-verkon maadoituksia on enemmän kuin kuluttajien maadoituksia eikä muuntopiiriin maadoitukseen ole yhdistetty toisten muuntopiirien maadoituksia. Tällöin voidaan suorittaa sarjamittaus, referenssimittaus ja laskea verkon maadoitusresistanssi sekä mitata maadoitusresistanssi käännepestemenetelmällä eri maadoitusjohtimista. Kyseisessä Oinasniemen muuntopiirissä on 16 maadoitusta verkon puolella ja vähintään yksi maadoitus kuluttajaa kohden. Tässä tapauksessa referenssimittauksella saatu kokonaisvastusarvo on lähempänä todellista arvoa. Maadoitusten pääpaino on verkonpuolella olevilla maadoituksilla.

Kohde Orivedellä UNIBASE masto+5 kuluttajaa, yksi muuntopiiri

Muuntaja	Nimi	Osoite	Maadoitusryhmä
X1308A25	Oinasniemi	Oinasniemi 108	D

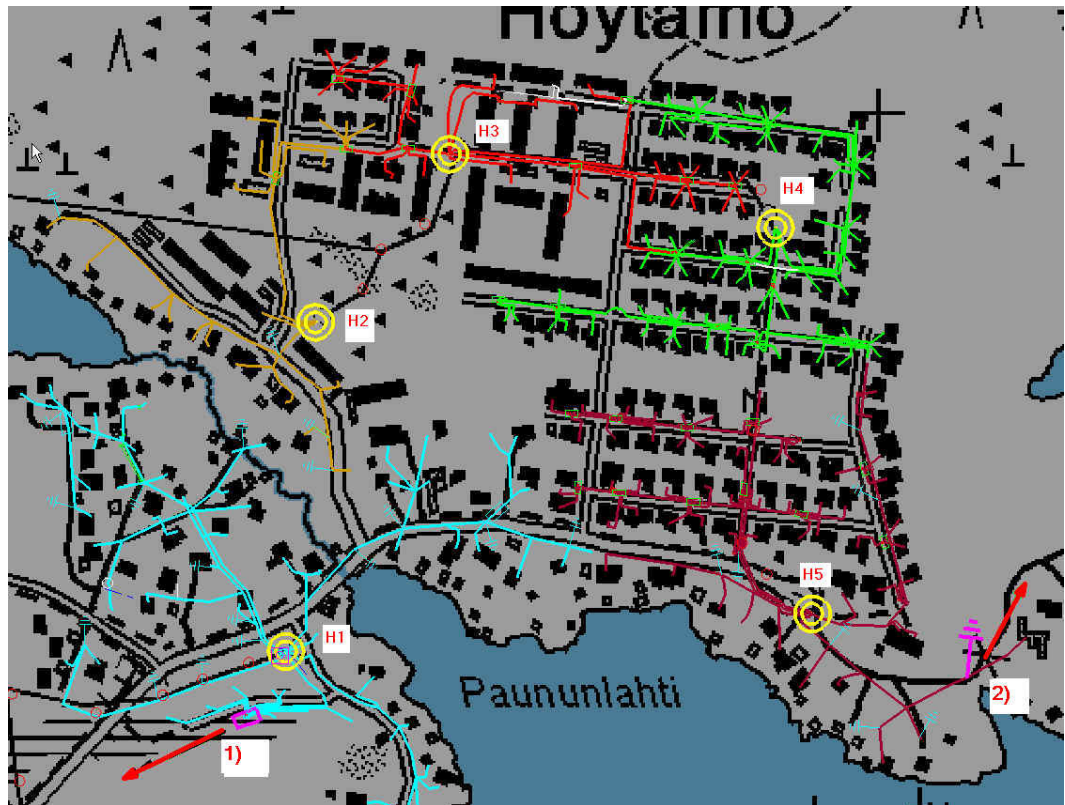


Kuva 22. Oinasniemen muuntopiiri, X1308A25 Xpower kartta.

Käännepestemenetelmä- ja referenssimittauksien mittauskohteet ja -suunnat.

Mittauspaikan kaksi kohdalla ei ole maadoitusta vaikka Xpowerilta otetusta kuvasta 22 se löytyy. Vihreät nuolet osoittavat mittauspaikat ja -suunnat. Muuntaja on kuvattu keltaisella ympyrällä ja kj-johdot tulevat koillisen suunnasta muuntajalle. Vaaleanpunainen viiva on pj-johtoa. Katkoviivalla esitetty johto on maakaapelia ja yhtenäinen viiva on AMKA- johtoa. Käännepestemenetelmille mittauspaikoiksi valittiin kohdat  $a, b, c$  ja  $d$ . Valinnassa kiinnitettiin huomiota maanominaisuuteen ja mittausjohtimien vetosuuntaan, koska pisin veto on 200 metriä. Paikanpäällä mahdolliset kivikot, tiheät risukot ja muuten vaikeakulkuiset paikat rajoittivat mittaussuuntia. Mittauspaikat on numeroitu karttaan.

Toisena kohteena on laaja maadoitusjärjestelmä Höytämössä, johon kuuluu viisi muuntopiiriä, jotka ovat taulukossa 11. Laajassa maadoitusjärjestelmässä muuntopiirit on yhdistetty 2-3 galvaanisella yhteydellä. Yhden yhteyden tekee 20 kV keskijännite johdin ja loput yhteydet on toteutettu pj-puolen nollajohtimissa. Mittausalue on suurimmalta osaltaan maakaapelialuetta. Kaikki muuntopiirit ovat maadoitusryhmältään  $D$  eli yhdistetty maadoitus. Muuntopiirejä ei voi yhdistää toisiinsa, mikäli yksikin olisi erillismaadoitettu. Sähköisestä keskipisteestä mittaaminen on mahdotonta huonon maaperän, maakaapeli alueen ja asutuksen takia.



Kuva 23 Höytämön mittauskohteen Xpower -kartta sekä käännepistemenetelmä mittauskohteet ja -suunnat

Kartassa punaiset nuolet näyttävät mittaussuunnan ja numerointi maadoituksen vieressä kertoo mittauspaikan. Höytämön kartassa H1, H2 jne. tarkoittavat muuntamon numeroa.

Taulukko 11 Höytämön mittauskohteen yhdistetyt muuntopiirit

	<b>Muuntaja</b>	<b>Nimi</b>	<b>Osoite</b>	<b>Maadoitusryhmä</b>
H1	X1708C22	Paununlahti	Mustaniementie 2	D
H2	X1708C28	Simunantie	Simunantie 6	D
H3	X1708C27	Laurintie	Laurintie	D
H4	X1708C33	Paununpolku	Élsanraitti 11	D
H5	X1708C24	Paununniemi	Höytämöntie 62	D

## **5.2 Suoritettavat mittaukset**

Järjestelmän resuloiva  $R_E$  mitataan käännepestemittauksella virtajohtimien etäisyyksillä 50, 100 ja 200 metriä. Vertailun vuoksi lisätään virta- ja jännitemittapiikeille rinnakkaisjohtimet. Osassa mittauspaikoissa mittaus suoritetaan eri suuntaan.

Toinen mittaustapa on suorittaa yksittäinen käännepestemittaus 100 metrin virtapiikillä jokaiselle maadoituselektrodille erikseen, referenssimittaus. Maadoituselektrodi irrotetaan verkosta ja mitataan sen vastusarvo. Jokainen yksittäinen maadoituselektrodi samassa muuntopiirissä on rinnankytketty toisiin maadoituselektrodeihin. Kokonaismaadoitusarvo lasketaan laskemalla yhteen rinnakkain olevat vastusarvot. Tulos ei ole suoraan verrattavissa koko muuntopiirille tehdyille mittaukselle, koska referenssimittauksessa ei voida mitata kuluttajien maadoitusarvoja. Näin saadun todellisen kokonaisvastusarvon on oltava pienempi kuin koko muuntopiiriltä saatu vastusarvo, johon on huomioitu kuluttajien maadoitukset.

Sarjamittauksessa mitataan muuntamon suojamaadoituksen resistanssi sekä käyttö- ja suojamaan yhteinen maadoitusresistanssi. Suojamaadoituksen resistanssiarvo mitataan käännepestemenetelmällä. Suoja- ja käyttömaadoituksen yhteinen vastusarvo mitataan yksittäisen elektrodin ja nollajohtimen välistä. Yhteisestä arvosta vähennetään suojamaadoituksen resistanssiarvo, saadaan muuntopiirin käyttömaadoituksen maadoitusresistanssin arvo.

### **5.2.1 Käännepestemittaus, Oinasniemi**

Käännepestemittaus suoritettiin eripituisilla virtajohtimilla ja maaston salliessa mittausjohtimet vedettiin erisuuntiin. Taulukkoon 12 on merkattu mittajohtimien vetosuunnat ilmansuunnittain. Käännepestemenetelmän mittaustulokset ovat taulukossa 13. Tuloksista on vähennetty yhdysjohtimen resistanssi.

Taulukko 12 Mittaussuunnat käännepistemittauksille

kohde	mittaussuunta
a	Länsi
b 1. mittaus	Itä
b 2. mittaus	Pohjoinen
c	Lounas
d	Koillinen
5	Kaakko

- a) Mittauspaikka oli otollinen peltoalue. Maaperä oli savimaata ja kosteata. Johtimien vedossa ei ollut vaikeuksia.
- b) Mittauspaikka oli kostea peltoalue, jossa oli saviperäinen maa. Mittajohtimien vetosuunta järvelle päin. 50 metrin johtimilla mitattiin eri suuntaan. Ei katsottu tarpeelliseksi suorittaa rinnanmittausta, sillä maaperä on hyvin johtavaa.
- c) Mittauspaikka oli suhteellisen kivikkoinen ja mittaus suoritettiin tien hiekkatien vieressä kulkevassa ojassa. Ojassa oli puita ja kiviä. Maan pintakerroksen alla oli peruskallio.
- d) Mittauspaikka oli heinikkoinen oja tien vieressä. Oja on hyvin lähellä kalliota ja maan pintakerroksen alta paljastui kiviä, jotka huomattiin iskiessä mittaalektrodeja maahan.
- 5) Mittauspaikka pihamaa, jonka jälkeen mittajohtimet menivät metsään. Mittauspaikka lähellä kalliota.

Taulukko 13 Käännepistemenetelmällä saadut mittaustulokset

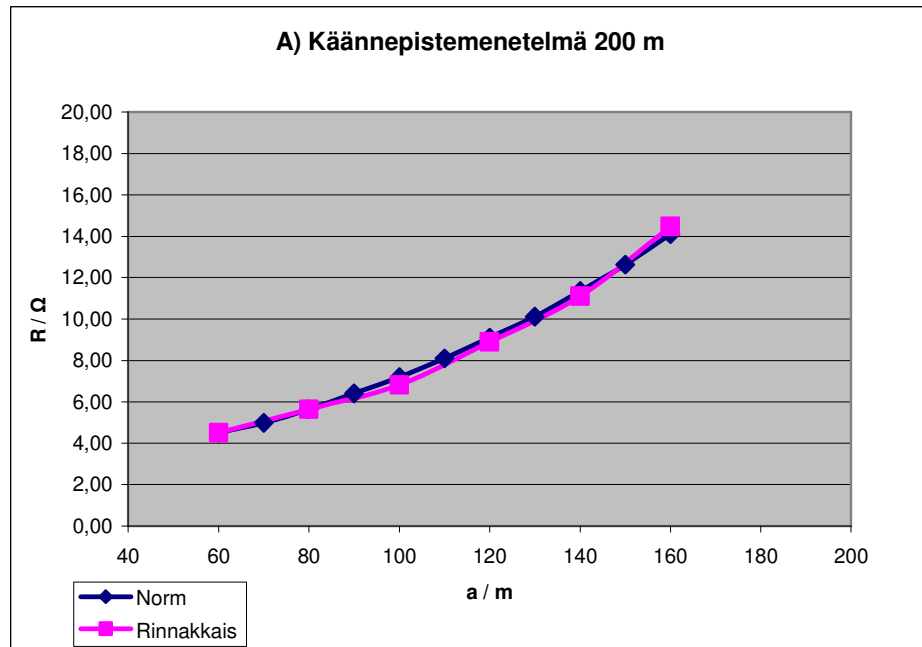
mittaustaipaikka	$R_E$ / ohm 50m	$R_E$ / ohm 50m rinnan	$R_E$ / ohm 50m eri suunta	$R_E$ / ohm 100m	$R_E$ / ohm 100m rinnan	$R_E$ / ohm. 200m	$R_E$ / ohm 200m rinnan
a	6,75	-	-	6,00	6,00	6,40	6,80
b	5,00	-	6,60	4,60	5,20	5,20	-
c	26,00	-	-	16,00	-	6,00	7,00
d	22,00	-	-	21,00	-	13,00	-
5	14,10	14,05	-	16,90	16,90	11,40	10,40

Mittauspaikka kertoo mistä maadoituselektrodista mittaus on suoritettu ja  $R_E$  maadoitusresistanssin arvon sekä suoritettujen mittausten tavan. Seuraavalla sivulla on selvitetty taulukon selitteitä.

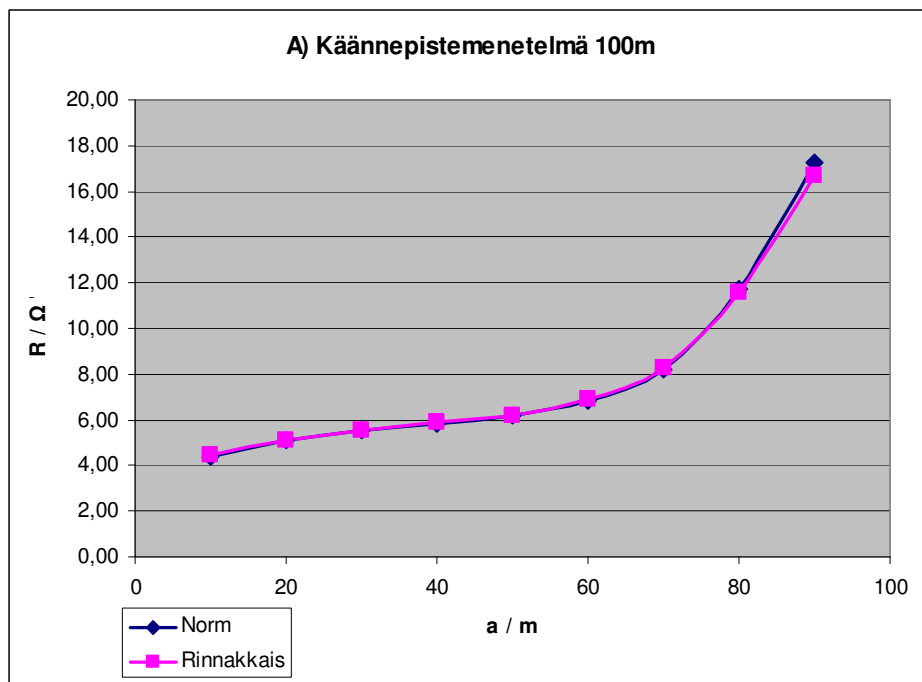


50 m	Virtajohdin 50 m etäisyydellä mittauskohteesta
50 m rinnan	Virtajohdin 50 m etäisyydellä mittauskohteesta. Lisäksi virta- ja jännitejohtimille lisätty apuelektrodi rinnalle.
50 m eri suunta	Virta- ja jännitejohdin on vedetty eri suuntaan kuin alkuperäinen.
100 m	Virtajohdin 100 m etäisyydellä mittauskohteesta.
100 m rinnan	Virtajohdin 100 m etäisyydellä mittauskohteesta. Lisäksi virta- ja jännitejohtimille lisätty apuelektrodi rinnalle.
200 m	Virtajohdin 200 m etäisyydellä mittauskohteesta.
200 m rinnan	Virtajohdin 200 m etäisyydellä mittauskohteesta. Lisäksi virta- ja jännitejohtimille lisätty apuelektrodi rinnalle.

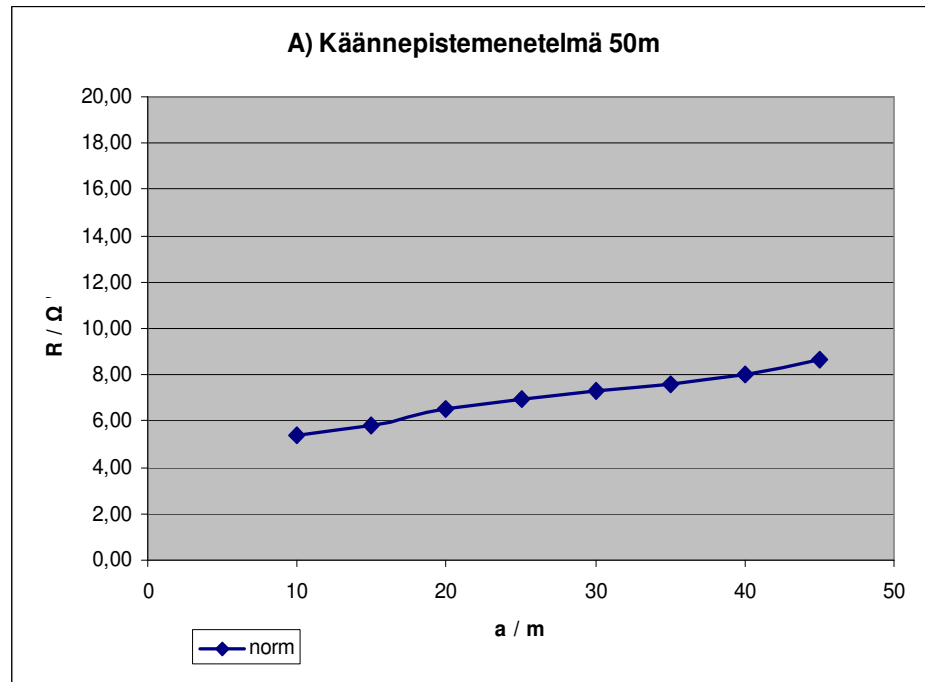
Kuvissa 24, 25 ja 26 on piirretty maadoitusresistanssin kuvaaja jännitepiikin etäisyyden funktiona, mittauspaikasta  $a$ . Maadoitusresistanssin arvo on katsottu käännepisteestä tai käyrän suorasta osasta. Mikäli kumpaakaan ei käyrässä ole, on maadoitusresistanssi ilmoitettu 62 %:n sääntöä käyttäen. Kuvissa sininen käyrä on mitattu yksittäisillä apuelektrodeilla ja vaaleanpunainen rinnakkaispiikkejä käyttäen.



Kuva 24 Käänne pistemittauksen tuloskäyrä 200 m virtapiikillä



Kuva 25 Käänne pistemittauksen tuloskäyrä 100 m virtapiikillä



Kuva 26 Käänne pistemittauksen tulokäyrä 50 m virtapiikillä

### 5.2.2 Sarja- ja referenssimittaus, Oinasniemi

Sarjamittaus Oinasniemin muuntopiirissä suoritettiin muuntamolta.

Maadoitusmittari kytkettiin sarjaan maadoituselektrodin ja pj-verkon nollajohtimen välin. Mittarin jännite- ja virtanapa, ( $S$  ja  $H$ ) oikosuljettiin ja samoin tehtiin maadoitusnavoille,  $ES$  ja  $E$ . Jännite- ja virtanapoihin liitettiin verkon nollajohdin ja maadoitusnapoihin vastaavasti yksittäinen maadoituselektrodi. Tämän jälkeen suoritettiin mittaus. Mittausarvona saatiin sarjamittausresistanssiarvo,  $R_s$ .

Käänne pistemittaus suoritettiin yksittäiselle elektrodille 100 metrin virtapiikillä ja mittaussuunta oli sama kuin käänne pistemittauksen kohdan b) järven suuntaan, ilmansuuntana itä. Tulokseksi saatiin sarjaresistanssille,  $R_s$  ja suojamaadoituksen resistanssille,  $R_1$

$$R_s = 15,25 \Omega \text{ ja } R_1 = 7,43 \Omega.$$

Kaavalla 23 ratkaistaan resistanssin,  $R_A$ :n arvo

$$\begin{aligned} R_a &= R_s - R_1 = 15,25 \Omega - 7,43 \Omega \\ R_a &= 7,82 \Omega \end{aligned} \quad (23)$$

Kaavalla 24 ratkaistaan maadoitusresistanssin arvo

$$\begin{aligned} R_k &= \frac{R_1 \cdot R_a}{R_1 + R_a} = \frac{7,43 \Omega \cdot 7,82 \Omega}{7,43 \Omega + 7,82 \Omega} \\ R_k &= 3,81 \Omega \end{aligned} \quad (24)$$

Referenssimittauksessa jokainen maadoituselektrodi irrotettiin pj-verkon nollajohtimesta ja mitattiin käännepistemelmällä 100 metrin virtapiikillä. Poikkeuksen muodostivat mittauspaikka 9, joka nousi kalliolle. Pieni hiekkatie johti Unibase -mastolle. Mittaukset jouduttiin tekemään 50 metrin virtapiikillä huonon maaston takia. Mittaelektrodit iskettiin parhaimpaan mahdolliseen kohtaan. Tulokset ovat taulukossa 14.

Taulukko 14 Koko muuntopiirin  $R_E$ :n mittaustulokset ja -ilmansuunnat

kohde	$R_{kp} / \Omega$	mittaussuunta
a	6,7	Länsi
b	7,4	Itä
c	41,4	Lounas
d	23,7	Koillinen
1	14,1	Luode
3	868,0	Kaakko
4	14,5	Kaakko
5	58,9	Kaakko
6	127,3	Luode
7	32,7	Etelä
8	1022,0	Koillinen
9	28,0	Etelä

Mittauspaikat ovat kuvan 20 numeroinnin mukaisia. Mittauspaikka 2 kohdalla ei ole maadoitusta laisinkaan. Mittaustuloksista lasketaan kaavan avulla kokonaisuomadoituksen resistanssiarvo

$$R_k = \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5} + \frac{1}{R_6} + \frac{1}{R_7} + \frac{1}{R_8} + \frac{1}{R_9} + \frac{1}{R_a} + \frac{1}{R_b} + \frac{1}{R_c} + \frac{1}{R_d} \right)^{-1}$$

$$R_k = \left( \frac{1}{14,12 \Omega} + \frac{1}{868 \Omega} + \frac{1}{14,50 \Omega} + \frac{1}{58,90 \Omega} + \frac{1}{127,3 \Omega} + \frac{1}{32,7 \Omega} + \frac{1}{1022 \Omega} + \frac{1}{28 \Omega} + \frac{1}{6,68 \Omega} + \frac{1}{7,43 \Omega} + \frac{1}{41,4 \Omega} + \frac{1}{23,7 \Omega} \right)^{-1}$$

$$R_k = 1,71 \Omega$$

### 5.2.3 Pihtivastusmittaus, Oinasniemi

Pihtivastusmittaus suoritettiin verkon todellista maadoitusvastusta määrittäessä.

Pihtivastusmittari indusoi jännitteen mitattavaan elektrodiin ja mittaa sen avulla piirissä kulkevaa virtaa ja resistanssia. Pihtivastusmittauksen tulokset ovat esitetty taulukossa 15.

Taulukko 15 pihtivastusmittauksen tulokset

kohde	ennen irroitus R / Ω	irroituksen jälkeen R / Ω
a	16,3	15,9
b	8,2	8,6
c	21,7	21,7
d	45,0	51,5
1	43,0	43,0
3	700,0	700,0
4	9,0	8,6
5	57,0	57,0
6	94,0	92,0
7	4,7	4,6
8	0,9	0,9
9	410,0	400,0

#### 5.2.4 Käännepistemittaus, Höytämö

Höytämössä muuntopiirejä oli yhdistetty toisiinsa viisi kappaletta.

Mittauspaikkojen valinta tuotti hankaluuksia maantieteellisistä syistä. Luotettava mittaus pystyttiin suorittamaan vain kahdesta paikasta. Mittauspaikat näkyvät kuvassa 23 ja mittaustulokset on esitetty taulukossa 16.

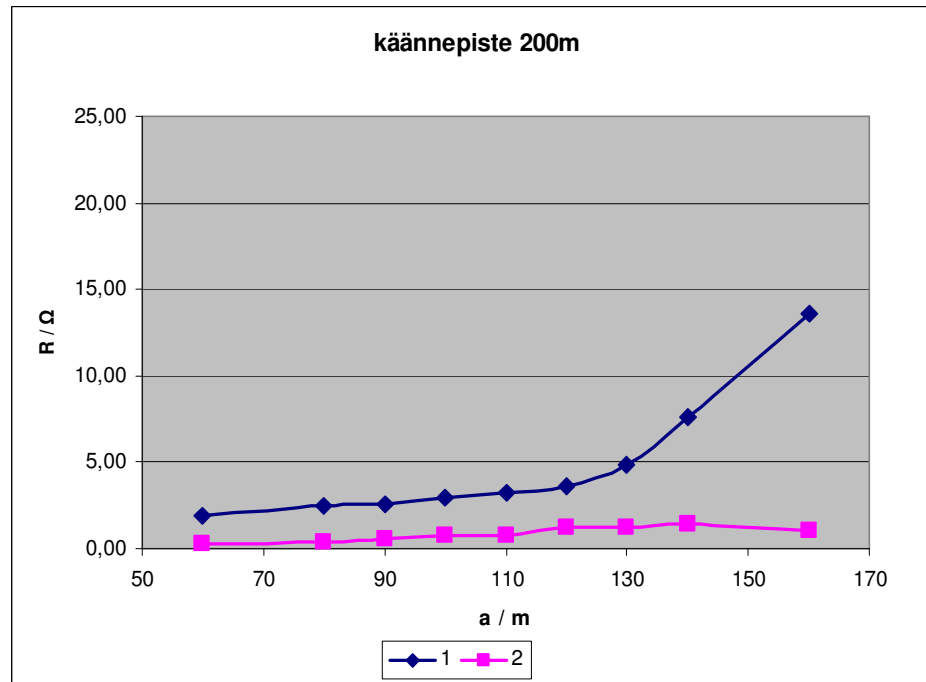
Mittauskohde	Mittaussuunta
1	Lounas
2	Koillinen

- 1) Mittauspaikka oli sekametsän ja hiekkatien välinen oja. Maasto oli kostea. Elektrodi oli yhdistetty amkaan.
- 2) Mittauspaikka oli päättyvän tien lopussa, kallion reunalla. Mittaus suoritettiin lepikköön. Maadoitus alkoi jakokaapista.

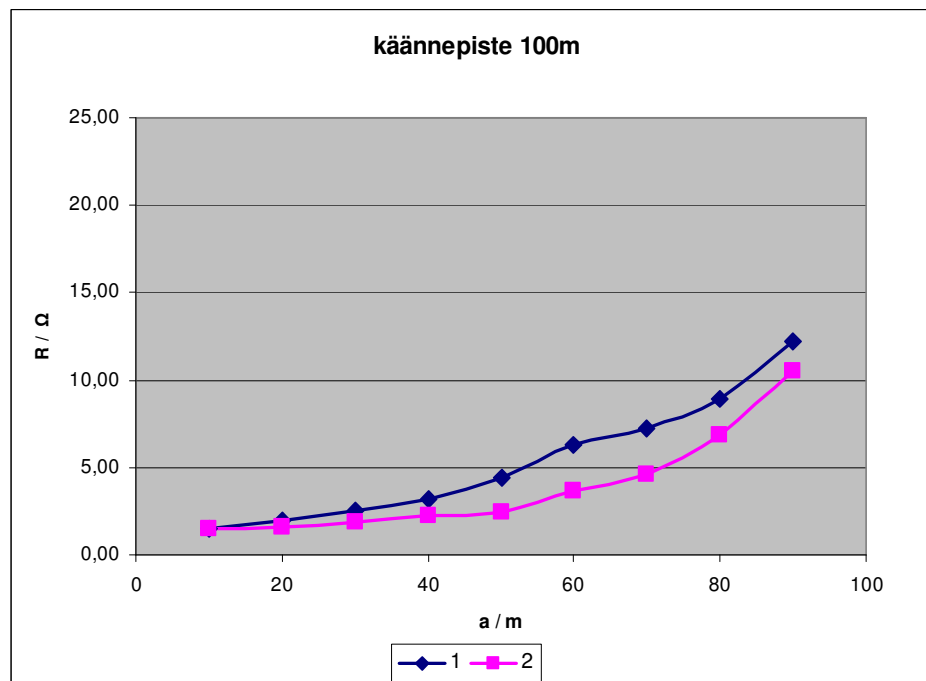
Taulukko 16 Höytämön käännepistemittauksen maadoitusresistanssin tulokset

Kohde	mittausmenetelmä	$R_E$ / ohm
1	50m	6,86
	100m	6,27
	200m	3,68
2	50m	9,29
	100m	2,43
	200m	0,79

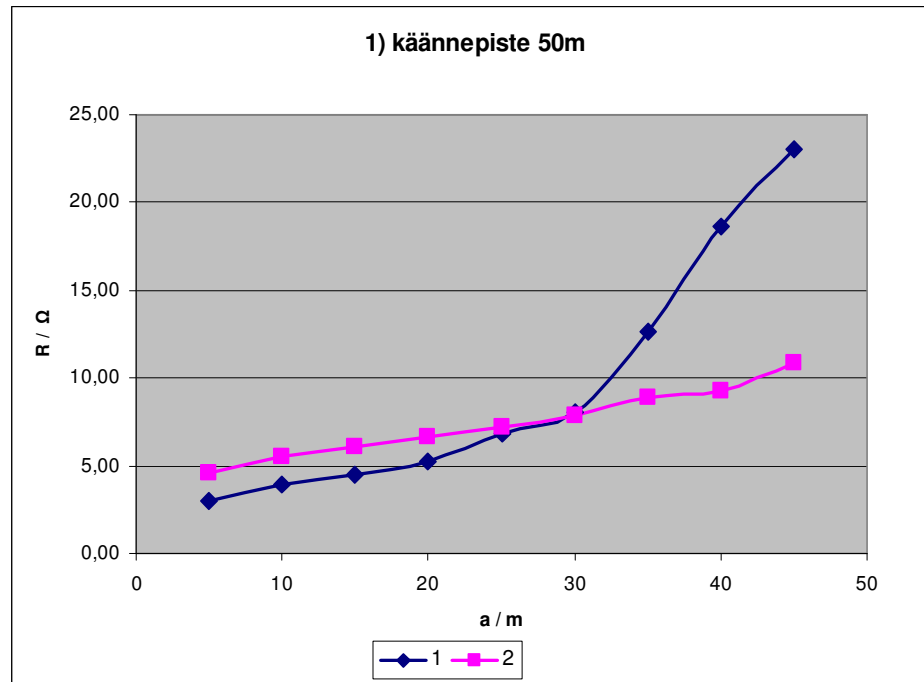
Kuvissa 27, 28 ja 29 on Höytämön käännepiste mittausten maadoitusresistanssi-kuvaajat. Sininen käyrä on mittauskohteen 1 kuvaaja ja vaaleanpunainen kohteen 2.



Kuva 27 Käännepestemittauksen tulokäyrä 200 m virtapiikillä



Kuva 28 Käännepestemittauksen tulokäyrä 100 m virtapiikillä



Kuva 29 Käänneastemittauksen tulokäyrä 50 m virtapiikillä

## 6 Tulosten tarkastelu

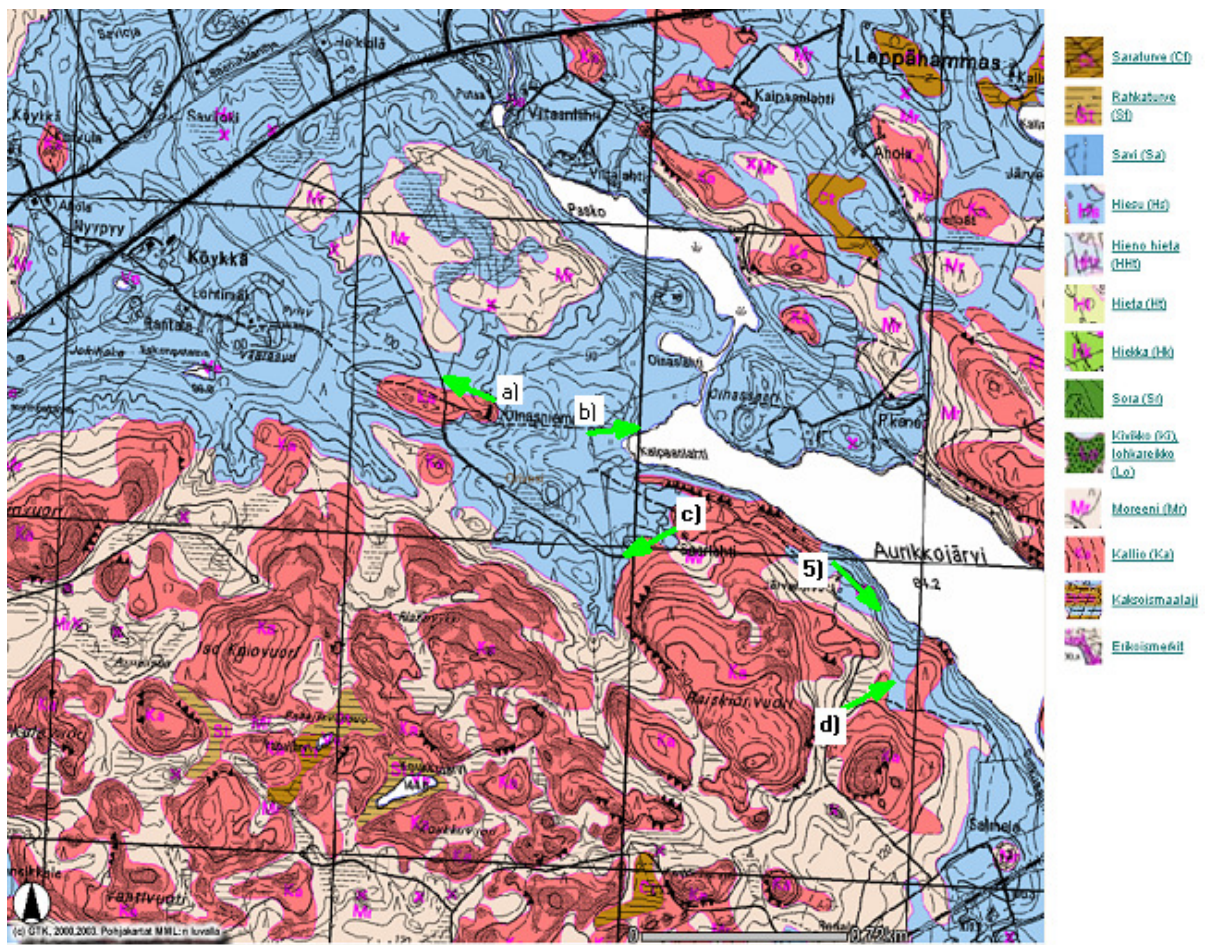
Suurin sallittu maadoitusresistanssi voidaan määrittää, kun tiedetään muuntopiirin maadoitustapa ja sähköaseman lähdön maasulun poiskytkentäaika itsetoimivasti. Jotta mitattuja tuloksia voidaan vertailla sallittuihin arvoihin, on täytynyt laskea sallittuarvo.

Tuloksista on mahdollista löytää teoriaa tukevia virhetekijöitä. Yleisesti käänneastemittauksituloksista on havaittavissa, että mittauskäyrät eivät ole muodoltaan samanlaisia kuin teoreettinen ihannekäyrä. Sähköisen keskipisteen löytäminen maadoitusjärjestelmästä on hankalaa ja tämän takia käyrän resistanssiarvot eivät ala nolasta. Tällöin käyrän suora osuus on havaittavissa, mutta käyrän S-muotoa ei saada näkyviin.



### 6.1 Käännepistemenetelmän tulokset

Taulukon 13 mukaan mittaustuloksissa on suuria eroja riippuen mittaustaikinan valinnasta. Teorian mukaan muuntopiirin maadoituksen arvo mittaustaikina riippumatta ja maan ollessa homogeenista pitäisi olla sama. Käytännössä näin ei ole koskaan, sillä maaperä voi muuttua pienelläkin matkalla huomattavasti. Maaperän vaikutus on suuri maadoitusresistanssin suuruuteen arvoon. Kuvassa 30 nähdään Oinasniemen muuntopiirin maaperän ominaisuudet. Vaaleanpunainen väri on kalliota ja sininen väri vastaa savimaata. Karttaan on merkattu mittaustaikinat ja -suunnat.



Kuva 30 Oinasniemen muuntopiirin maaperän ominaisuudet. /13/

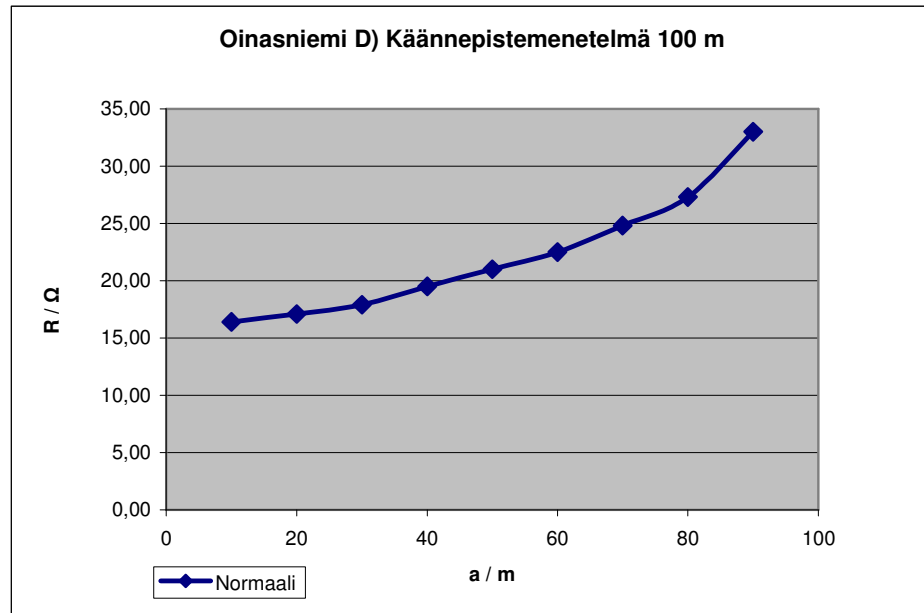
Tarkastellessa asiaa maaperän ominaisuuden valossa huomataan maadoitusresistanssi arvojen olevat suuremmat mittauskohdissa *c* ja *d*. Kohteen 5 tulos on myös suurempi kuin kohdissa *a* ja *b*. Maadoitusresistanssin arvo

mittauspaikassa  $c$  on  $26,00 \Omega$  ja paikassa  $b = 5,00 \Omega$ . Mittauspaikan valinnalla on suuri merkitys mittaustulokseen.

Maaperälajilla on vaikutus mittaustuloksiin. Mitattaessa 100 metrin virtajohtimella paikoista  $c$ ,  $d$  ja  $5$ , saa  $R_E$  arvot  $16,00 \Omega$ ,  $21,00 \Omega$  ja  $16,90 \Omega$ . Verrattaessa tuloksia 200 metrin käänneaste arvoihin, ovat ne huomattavasti suuremmat. Huonosti johtavalla maaperällä virtajohtimen etäisyys vaikuttaa merkittävästi mittaustulokseen. Hyvin johtavalla maaperällä ei virtajohtimen etäisyydellä ole merkitystä mittaustulokseen. Mitattaessa savimaassa on riittävä etäisyys virtajohtimelle 50 metriä.

Kuvassa 32 käyrämuotoa parhaiten tukisi mittausta mielivaltaisesti valitseminen. Tulokset viittaavat siihen, että mittaus ei ole tehty järjestelmän sähköisestä keskipisteestä. Maadoitusresistanssin arvo luettaisiin käänneasteesta 30 metrin kohdalta,  $R_E = 17,9 \Omega$ . Headpowerin mittaushetkillä neuvotaan näin tekemään. Mikäli käyrältä ei löydy käänneasteita merkataan  $R_E$ :n arvoksi 62 % kohdalla oleva mittaustulos.

Oinasniemen muuntopiirin sähköinen keskipiste sijaitsee muuntamolla, mittausta  $b$ . Sähköisen keskipisteen sijainti selittää yksittäisen maadoituselektrodien mittaustuloksissa saatu maadoitusresistanssin pienin arvo. Kuvasta 30 huomataan, että mittausta  $b$  maaperä on savimaata ja maadoitukset sijaitsevat järven rannalla. Tällöin maan kosteus on suurempi kuin muualla savimaassa. Kappaleessa 2.4 *Maaperän resistiivisyys* esitetty kosteuden vaikutus maanominaisvastuksen suuruuteen tukee saatua tulosta.



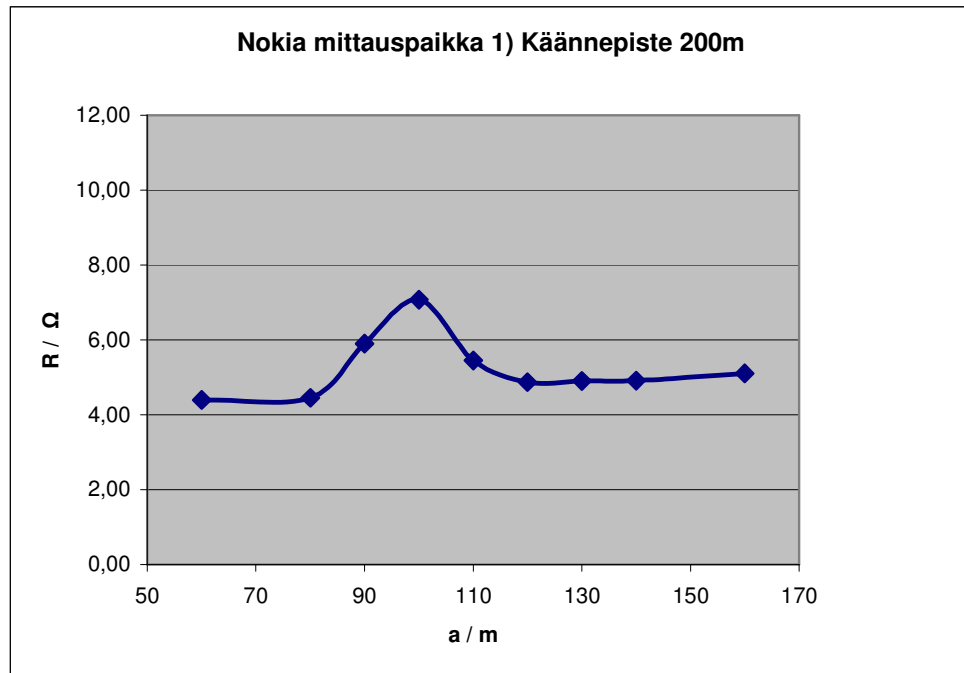
Kuva 31 Oinasniemen muuntopiirin mittaustulos, mittauspaikkana D kuvan 13 mukaan.

Oinasniemen muuntopiirin mittaustuloksista huomattavaa, että mittauspaikassa  $a$  maaperä on melko homogeenista ja hyvin johtavaa. Tällöin ei mittaussuunnan valinnalla eikä virtaelektrodin etäisyydellä ole suurta merkitystä saatuun tulokseen. Käännepistearvot ovat hyvin lähellä toisiaan.

Verrattaessa mittauspaikan  $a$  eripituisten virtajohtimien mittaustuloksien käyrämuotoja huomataan eroavaisuuksia. Ainoastaan 100 metrin etäisyydellä mitattu käännepisteen käyrämuoto on lähellä ihanteellista mallia ja selvä käännepiste on havaittavissa 62 % kohdalla virta-apuelektrodin etäisyydestä. 200 metrin mittauksessa käyrän lineaarisen nousun selityksenä on virta-apuelektrodin paikka pellon reuna-alueella hiekkatien läheisyydessä. Maaperä ei ole tarpeeksi homogeenista oikeellisen mittaustuloksen saavuttamiseksi. Oinasniemen muuntopiirin alueella olevia taloja ei ole liitetty kunnallistekniikkaan, joten maaperässä ei myöskään ollut mittausrvirheen aiheuttamia tekijöitä esimerkiksi vesiputkea tai muita johtavia metalleja.

### 6.2 Maa-aineen muuttumisen vaikutus mittaustulokseen

Maanpintalajin rajut muutokset aiheuttavat mittaustuloksen vääristymisen. virtaelektrodien välisellä alueella. Kuvassa 32 on käännepistemittauksen tulokset 200 metrin virtaelektrodin etäisyydellä. Mittaus suoritettiin keskellä peltoa, jonka läpi kulki kaistale kivikkoista maata.



Kuva 32 Maan muutoksen vaikutus mittaustulokseen

Mittarin antama tulos kivikkoalueella oli noin kaksi ohmia suurempi. Kuvaajasta ei ole mahdollista lukea käännepistettä. Mittaus on suoritettava uudestaan, joko eri suuntaan tai lyhentämällä virtajohtimen etäisyyttä.

### 6.3 Eri mittaustavalla saatujen tulosten vertailu

Mittaukset suoritettiin kolmella eri tavalla. Käännepistemennetelmällä antoi kaikkein luotettavimmat tulokset. Muuntopiirin todellinen maadoituksen arvo oli  $1,71 \Omega$ . Verrattaessa sitä muihin mittaustuloksiin oli sen arvo huomattavasti pienempi. Aikaisemmin esitetyn teorian mukaan on sen oltavakin. Tähän tulokseen ei ole laskettu muuntopiirin asiakkaiden maadoitusten arvoja.

Pihtivastusmittauksen tulokset poikkesivat huomattavasti käänne pistemenetelmän tuloksista. Pihtivastusmittauksen arvoja verrattiin 100 ja 200 metrin käänne pistemittauksen tuliksiin. Mittauspaikoissa *a, b, c, d* ja 5 pihtivastusmittauksen arvo oli 3 - 40  $\Omega$  suurempi kuin käänne piste tulos (taulukko 17).

Taulukko 17 Pihtivastus- ja käänne pistemittauksen tulokset

kohde	ennen irroitusta	kiinnityksen jälkeen	100m kp $R_E / \Omega$	200m kp $R_E / \Omega$
	R / $\Omega$	R / $\Omega$		
a	16,3	15,9	6,00	6,40
b	8,2	8,6	4,60	5,20
c	21,7	21,7	16,00	6,00
d	45,0	51,5	21,00	13,00
1	43,0	43,0	16,90	11,40

## 7. YHTEENVETO

Lopputyön aiheen kannalta ei talvi ollut paras ajankohtana tutkia aihetta. Standardien ja ohjeiden mukaan maadoitusmittaukset on suoritettava silloin, kun maa ei ole roudassa. Mitattavat kohteet ja mittaukset suoritettiin syksyllä, jolloin maa ei ollut roudassa. Mittaustulosten tulkinta ja vertailu tapahtui talven aikana, joten tarvittavia uusinta-/täydentäviä mittauksia ei pystytty suorittamaan. Työn loppuvaiheessa mittaukset olisi ollut hyvä suorittaa uudestaan ja verrata tuloksia keskenään. Tämän työn tutkimusten pohjalta kannattaisi jatkaa maadoitusmittausten tutkimista. Jatkotutkimuksissa olisi syytä kiinnittää huomiota mittaustekniikkaan, maan ominaisvastuksen ja maadoituselektrodin laajuuden tutkimiseen. Maadoitusresistanssin laajuutta ja virtajohtimen etäisyyttä on parasta tutkia mittaamalla maadoituselektrodi eripituisilla virtajohtimilla erisuuntiin.

Hyvänä parannusehdotuksena pidän dokumentointia mittaustuloksen, mittauksen vetosuunnan ja käytetyn virtajohtimen etäisyyden merkitsemistä gps -tekniikalla, jolloin uusintamittaukset ovat helppo suorittaa. Tällöin tiedettäisiin edellisen mittauksen mittauspaiikka, -suunta ja virtajohtimen etäisyys mitattavasta maadoituselektrodista. Mikäli näitä ei tiedetä, ei tulosten vertaileminen ole

luotettavaa. Mittaajan tiedossa ei välttämättä tarvitse olla edellisen mittauksen tulosta vaan virtajohtimen pituus ja mittaussuunta riittävät.

Tutkimusten perusteella sarjamittaus on vertailukelpoinen käännepestemenetelmän kanssa, mutta pihtivastusmittauksen tulosta ei voi verrata kumpaankaan.

Sarjamittaus on jätetty työlään suorituksen takia pois, ja joka paikasta ei sarjamittauksella ole mahdollista saada tulosta. Samoin totesin sitä suorittaessa.

Mitattaessa sarjamittauksella tarvitaan valtuutettu sähköverkkoasentaja, joka saa irrottaa maadoituselektrodin maadoitusjohtimesta. Valmistajan ohjeistuksen mukaan pihtivastusmittarilla on mahdollista todeta erottimen potentiaalirenkaan ja maadoitusten ehjyys. Tähän tarkoitukseen se on nopea ja luotettava tapa.

Pihtivastusmittauksella ei ole mahdollista saada luotettavaa maadoitusresistanssin arvoa. Mikäli mittari ei anna tulosta on virtapiirissä katkos.

Mielestäni paras tapa maadoituselektrodin mittaamiseksi on

käännepestemenetelmä, mutta mietinnän kohteena on ollut virtaelektrodin etäisyys mitattavasta maadoituselektrodista. Käytettävän virtaelektrodien etäisyys vaihtelee sähköyhtiöittäin. Vattenfall Verkkoyhtiöllä käytetty virtajohtimen etäisyys on 100 metriä.

Maadoitusten mittaaminen on ammattitaitoa vaativa työtä. Tärkeätä on ymmärtää se mitä on mitaamassa ja mitkä asiat vaikuttavat mittaustulokseen sekä mittaustavan periaate. Ennen mittauksen suorittamista olisi hyvä tietää muuntopiirin maadoitukset sekä maadoitusten sähköinen keskipiste.

Mittaustuloksen oikeellisuuteen nähden sähköisen keskipisteen määrittäminen on tärkeätä. Käytännössä se ei ole helppoa, mutta ei mahdotontakaan. Vallitsevasta maalajista on mahdollista päätellä maan johtavuus ja sen avulla sähköisen keskipisteen sijainti. Yleensä sähköinen keskipiste sijaitsee muuntamalla, missä maadoitusten merkitys on suuri. Sähköinen keskipiste voi yhtä hyvin sijaita muuallakin esim. kostealla ja hyvin johtavalla maaperällä, joten mittaukset kannattaa suorittaa kosteista paikoista. Mitta-apujohtimet on vedettävä parhaimpaan mahdolliseen suuntaan, missä ei epäillä olevan häiritseviä tekijöitä, kuten maakaapeleita, kaukolämpöputkia, rautateitä jne. Mikäli häiritseviä tekijöitä

on mittausjohtimien läheisyydessä on syytä mitata eri suuntaan. Mikäli se ei ole mahdollista on syytä mitata pidemmällä johtimilla ja verrata tuloksia keskenään. Tällöin valitaan parempi tulos. Maakaapelin päälle mitattaessa on mittaustuloksista mallinnettu käyrä pitkältä matkaa samaa arvoa ja mahdollisesti nousee loppupäästä. Mittauksen fyysisen aloituspisteen on oltava mahdollisimman lähellä mitattavaa maadoituselektrodia.

Mikäli mittalaite viedään kauemmaksi yhdysjohtimen avulla, on yhdysjohtimen resistanssi vähennettävä mittaustuloksesta. Tällöin myös käänneaste muodostuu eri kohtaan. Yhdysjohtimen resistanssi tulisi aina vähentää mittaustuloksesta, sillä liittimet lisäävät resistanssia huomattavasti. Tällä keinolla on mahdollista pienentää yhtiön kustannuksia. Mittaustuloksen ollessa sallitun arvon yli, on mahdollista, että vähentämällä yhdysjohtimen resistanssi saadaan arvo alle sallitun arvon.

Mitattaessa 100 metrin tai 200 metrin johtimilla ei johtojen itse- ja keskinäisinduktioilla ole suurta merkitystä mittaustulokseen, joten johdot voivat sijaita vierekkäin maastossa. Mittausta suorittaessa on muistettava, että mitta-apuelektrodit sijaitsevat rivissä mitattavan maadoituselektrodin kanssa.

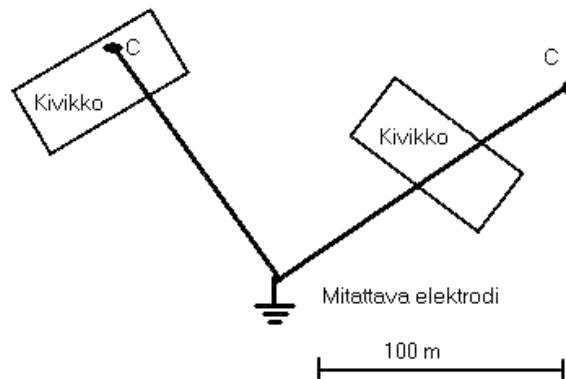
Maaperällä on hyvin suuri vaikutus mittaustulokseen. Huonosti johtavalla maaperällä, kuten kallio, on mielestäni käytettävä pidempää virtajohtimen pituutta. Mittaustulosten mukaan huonosti johtavalla maalla virtapiikin suuntaa-antava vähimmäisetäisyys pitäisi olla 200 metriä. Rajan asettaminen käytettävälle virtaelektrodin etäisyydelle on mahdotonta määrittää saaduilla mittaustuloksilla. Myöskään virtajohtimen pituuden määräävä muuttuja ei ole tiedossa, vaan sen selvittämiseksi olisi tutkittava aihetta lisää. Mittaustulosten perusteella hyvin johtavalla maaperällä esim. savimaalla riittää virtapiikin etäisyydeksi 50 metriä mitattavasta maadoituselektrodista. Vaikka virta-apuelektrodin etäisyyttä pidennettäisiin, ei käänneasteen arvo muuttuisi konkreettisesti. Esimerkkinä mittauspaikan valinnan merkityksestä maadoitusresistanssin arvoon on 100 metrin virtajohtimella mitattu maadoitusresistanssin arvo kalliolla 15  $\Omega$ :a suurempi kuin savimaalla. Virhe on suuri, jos maadoitusresistanssi  $R_E$  saa samassa muuntopiirissä pienimmillään arvon 5  $\Omega$ . Mittaustulokset muuttuivat mitattaessa pidemmällä virtajohtimella kallioidella maaperällä. Mitattaessa kalliolla 200 metrin

virtajohtimella mittaustulos sai saman arvon kuin savimaalla. Mittauspaikan valinnalla ja virtajohtimen pituudella on suuri merkitystä mittaustulokseen.

Virtaelektrodin vähimmäispituutena on syytä pitää 100 metriä, sillä 50 metrin johtimella on suurempi todennäköisyys mitata maadoituksen päällä. Pitkällä virtaelektrodin etäisyydellä maaperän resistiivisyyden muutokset tulevat näkyviin mittaustuloksissa ja aiheuttava virhettä. Mittausalueelle on suurempi todennäköisyys esiintyä muita häiritseviä tekijöitä. Lisäksi pitkät johtimet vaikeuttavat mittaajien työtä ja aina ei ole mahdollista käyttää 200 metrin pituista virtajohtinta. Maan ominaisvastuksen suuret muutokset aiheuttavat suuremman virheen. Maadoituksen laajuuden toteaminen oli hankalaa ja näin ollen sen merkityksen uskotaan olevan vähäinen Oinasniemen muuntopiirin mittauksissa. Suositeltava virtajohtimen pituus käännepistemittauksessa on riippuvainen maaperän johtavuudesta. Huonosti johtavalla maalla suositeltava virtajohtimen pituus olisi 200 metriä ja hyvin johtavalla maalla 100 metriä. Jännite- ja virtaelektrodien rinnakkaispiikkien käyttö ei ole tarpeellista hyvin johtavalla maaperällä. Rinnakkaispiikkien käyttö on vartenotettavaa huonosti johtavalla maaperällä silloin, kun mittalaitteen varoitusvaloista *fault* -valo palaa tai vilkkuu. *Fault* -valon palaessa yhteys on huono elektrodien välillä ja johtavuus on parannettavissa lisäämällä rinnakkaiselektrodit mittaelektrodeille. Lisäämällä rinnakkaispiikit saadaan luotettavampi tulos, mutta arvo ei tule muuttumaan radikaalisesti. Rinnakkaispiikkien lisääminen ei kuitenkaan ole keino olla käyttämättä pidempiä mittajohtimia.

Mittajohtimien vetosuunta aiheuttaa ongelmia käytännössä. Mitattavan elektrodin sijaitessa huonossa maastossa ja ainoat mahdolliset johtimien vetosuunnat ovat kuvan 33 mukaiset. Tässä tapauksessa on vietävä virtajohtin, C kivikkoon ja mitattava resistanssi normaalisti. Mielestäni tällöin pienennetään mittauksen virhettä. Maadoitusresistanssin arvo kasvaa huomattavasti, kun jännite-elektrodi tuodaan kivikkoon. Mittaustulos luetaan käännepisteestä tai 62 %:n kohdalta. Mittaustulosta ei saa lukea alueelta, jossa jännite-elektrodi on sijainnut kivikossa. Tällöin arvo on suurempi kuin todellinen.





Kuva 33 Mittaussuunnan valinta

Mikäli virtajohdinta ei ole mahdollista viedä muualle kuin kivikon yli on jännite-elektrodin paikaksi valittava aina paras mahdollinen paikka, missä on vähiten kiviä. Jos tulosta ei pystytä lukemaan käyrästä suoritetaan mittaus uudestaan lyhyemmällä virtaelektrodin etäisyyttä mitattavasta elektrodista.

Mittauksessa käyrämuoto saadaan hyvin harvoin vastaamaan teoreettista muotoa. Mittaustulos luetaan aina käännepisteestä tai suorasta osasta. Käännepisteen havaitseminen käyrällä on hankalaa ja sen luetaan tulee kiinnittää huomiota. Mikäli mittauksia on tehty eri suuntiin ja eripituisilla johtimilla eikä käännepistettä löydy on maadoitusresistanssin arvo luettava 62 %:n kohdalta virtaelektrodin etäisyydestä.

## LÄHDELUETTELO

### Painetut lähteet

- /1/ SFS 6001 Suurjänniteasennukset. Suomen Standardoimisliitto, 1999.
- /2/ Maadoituskirja. Sähkö- ja teleurakointiliitto 2001.
- /3/ Sähkönjakeluverkkojen Maadoitusmittaukset, Verkostosuositus TJ 1:15. Energiateollisuus
- /4/ Sähköverkkojen maadoitusten suunnittelu, rakentaminen ja mittaaminen, Insinöörijärjestöjen koulutuskeskus, 1979.
- /5/ Pesonen, A.J., Suppeahkojen maadoitusten suunnittelu ja mittaus. Voima ja Valo 5-6/1960, s.104 – 110.
- /6/ Käyttöohje Chauvin Arnoux 6425, SLO, 15 s.
- /7/ Pylväserotinasemien ja muuntopiirien maadoitus standardin SFS6001 mukaan, Verkostosuositus RJ 19:02, Energiateollisuus
- /8/ Technical Assistance (800) 343-1391 Chauvin Arnoux, AEMC instruments
- /9/ Maadoituskoulutus, KS Valo Asenus Oy, 1999
- /10/ Sähköturvallisuusmääräykset käytännössä 5, Artikkelij- ja tulkintakokelma, Henkilö- ja Yritysarviointi Seti Oy
- /11/ Tagg, Proceedings Of The Institution Of Electrical Engineers, December 1964 volume 111 nro 12.
- /12/ Tagg, Proceedings Of The Institution Of Electrical Engineers, March 1969 volume 116 nro 3.

### Painamattomat lähteet

- /13/ <http://geokartta.gtk.fi/>

## LIITTEET

- [1] SFS 6001 Liite A; Maadoituselektrodin materiaalit ja vähimmäismitat mekaanisen lujuuden ja korroosionkestävyyden kannalta
- [2] SFS 6001 Liite B; Maadoitusjohtimien ja -elektrodien nimellisvirran laskenta
- [3] Vattenfall Verkko Oy:n käyttämä maadoitusmittauksen dokumentointi kortti

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

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

**Maadoitusjohtimien ja -elektrodien nimellisvirran laskenta**

Alle 5 sekuntia kestäville vikavirroilla maadoitusjohtimen tai maadoituselektrodin poikkipinta on laskettava seuraavasta yhtälöstä B.1 (ks. EN 60724:1984, yhtälö F1):

$$A = \frac{I}{K} \sqrt{\frac{t}{\ln \frac{\theta_f + \beta}{\theta_i + \beta}}} \quad (\text{B.1})$$

missä

$A$  poikkipinta ( $\text{mm}^2$ )

$I$  johtimen virran tehollisarvo (A)

$t$  vikavirran kestoaika (s)

$K$  virrallisen osan materiaalista riippuva vakio; taulukossa B.1 esitetään arvot yleisimmille materiaaleille olettaen alkulämpötilan olevan  $20\text{ }^\circ\text{C}$

$\beta$  virrallisen osan resistanssin lämpötilakertoimen käänteisarvo lämpötilassa  $0\text{ }^\circ\text{C}$  (ks. taulukko B.1)

$\theta_i$  alkulämpötila ( $^\circ\text{C}$ ). Alkulämpötilana käytetään yleensä  $20\text{ }^\circ\text{C}$ . Suomessa voidaan käyttää standardin IEC 60287-3-1 mukaan myös arvoa  $15\text{ }^\circ\text{C}$ .

$\theta_f$  loppulämpötila ( $^\circ\text{C}$ )

Taulukko B.1 Materiaalista riippuvien vakioiden arvot

Materiaali	$\beta$ ( $^\circ\text{C}$ )	$K$ ( $A \times \sqrt{s}/\text{mm}^2$ )
Kupari	234,5	226
Alumiini	228	148
Teräs	202	78

Tavallisissa olosuhteissa, missä maadoitusjohdin on ilmassa ja maadoituselektrodi maassa, oikosulkuvirran tiheytenä  $G$  ( $= I/A$ ) voidaan käyttää kuvasta B.1 saatavia arvoja alkulämpötilan ollessa  $20\text{ }^\circ\text{C}$  ja loppulämpötilan  $300\text{ }^\circ\text{C}$ .

Yli 5 sekuntia kestäville vikavirroille (kuten maasta erotetuissa tai sammutetuissa järjestelmissä), sallitut poikkipinnat esitetään kuvassa B.2. Jos loppulämpötilaksi valitaan muu kuin  $300\text{ }^\circ\text{C}$  (ks. taulukko B.2 sekä suorat 1, 3 ja 4), virta voidaan laskea taulukosta B.2 valitulla kertoimella. Alempia loppulämpötiloja suositellaan esimerkiksi eristetyille johtimille ja betoniin upotetuille johtimille.

Taulukko B.2 Muunnoskerroimet jatkuvan virran loppulämpötilasta  $300\text{ }^\circ\text{C}$  muuhun loppulämpötilaan

Loppulämpötila ( $^\circ\text{C}$ )	Muunnoskerroin
400	1,2
350	1,1
300	1,0
250	0,9
200	0,8
150	0,7
100	0,6

