



TAMPEREEN
AMMATTIKORKEAKOULU

MAADOITUSMITTAUKSET KAIVOKSEN JA- KELUVERKOSSA

Eero Ojala

Opinnäytetyö
Toukokuu 2016
Sähkötekniikan koulutusohjelma
Sähkövoimatekniikka



TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Sähkötekniikan koulutusohjelma
Sähkövoimatekniikka

OJALA, EERO:

Maadoitusmittaukset kaivoksen jakeluverkossa

Opinnäytetyö 81 sivua, joista liitteitä 3 sivua
Toukokuu 2016

Työ toteutettiin Pyhäsalmi Mine Oy:n tehdaspalvelun sähkökunnossapidolle Pyhäsalmen kaivoksella. Työssä perehdyttiin maadoitusmittauksiin ja maadoitusten kuntotarkasteluun yhtiön jakeluverkossa. Työssä määritettiin yhtiön jakeluverkon maadoituksille soveltuvat mittaus- ja tarkastelutavat. Työssä myös tuotettiin suunnitelma maadoitusten kunnonvalvontaohjelmaan.

Pyhäsalmen kaivos on Suomen vanhin toiminnassa oleva kaivos. Kaivoksen jakeluverkolle on kertynyt ikää tähän mennessä paikoitellen yli 50 vuotta, joten maadoitusten oikeanlainen tarkastelu on tärkeää turvallisuuden ja laitteistojen toiminnan ylläpitämiseksi.

Työssä selvitettiin aluksi maadoitusten rakennetta, mittaustekniikoita sekä niiden toimintaa vian aikana. Tämän jälkeen perehdyttiin kaivosalueen sähköverkon ja maadoitusten rakenteeseen. Tietojen pohjalta suoritettiin koemittauksia, joiden perusteella havainnoitiin toimivimpia tekniikoita ja mittausten luotettavuuksia. Tarkasteluun otettiin muutamia kohteita erityyppisistä ympäristöistä. Mittausten perusteella maadoituksille määriteltiin kohdetyyppeihin soveltuvat mittaustavat ja tarkasteltiin maadoitusten toimintaa. Työssä pohdittiin myös maadoituksille tehtäviä parannustoimenpiteitä.

Mittausmenetelmiksi valittiin käännepiste- ja silmukkamittausmenetelmät. Koemittauksien perusteella todettiin, että silmukkamittaus toimii parhaiten verkkomaisten maadoitusjärjestelmien yhdysjohdinten tarkastuksissa. Käännepistemittauksen todettiin toimivan parhaiten säteittäisemmissä maadoitusjärjestelmissä yksittäisten muuntamoiden maadoitusjärjestelmiä ja -elektrodeja mitattaessa. Molemmissa mittausmenetelmissä on useita tekijöitä, jotka vaikuttavat saatavan mittaustuloksen luotettavuuteen merkittävästi. Käännepistemenetelmän todettiin toimivan hyvin myös kaivoksessa lujitepulttien avulla mitattaessa.

Jakeluverkon ikä ja ympäristö toivat omat haasteensa mittausten toteuttamiseen ja maadoitusten toiminnan tarkasteluun. Työssä käytettiin osin arvioituja suureita, mutta ne määritettiin siten, että laskennasta saatava tulos ei ollut liian optimistinen. Työn pohjalta on ajatuksena tuottaa tarkempi kunnossapito-ohjeistus yhtiön tietojärjestelmään. Maadoitusvastusmittausten tuloksia voitaisiin vertailla myös maan ominaisvastusmittauksilla määritettyihin arvoihin. Tällöin mittausten todellisia luotettavuuksia voitaisiin havainnoida paremmin.

Asiasanat: maadoitus, maadoitusmittaus, kaivos, kunnossapito

ABSTRACT

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

OJALA, EERO:

Earthing systems' measurements at the mining area's supply network

Bachelor's thesis 81 pages, appendices 3 pages

May 2016

The purpose of the thesis was to research correct and working measurement, and inspection methods for the mining area's earthing systems. Another purpose was to build a layout for earthing systems' quality tests.

The Pyhäsalmi mine is the oldest operating mine in Finland and electrical supply network's age is over 50 years old. Circumstances at the mining area are also quite different from normal electrical supply systems. Correct earthing systems' inspection methods are important for common safety and to prevent electrical devices' breakdowns.

The research began by examining documents of earthing systems in general. After basic research the project continued by studying the structure of the mining area's electrical network and earthing systems. Earthing systems' measurement methods were tested and analyzed on the basis of gathered information. The purpose of the measurements was to compare measurement methods for different kinds of earthing systems and factors that affect to the measurement results.

The functions of the earthing systems were examined by calculation so that the systems meet the requirements. Correct testing methods for examining earthing systems' quality were defined by the basis of surveying. Improving solutions were recommended on the basis of detected issues.

Loop and 3-pole earth ground measurements methods were used in this research. The findings indicate that loop method work better for the net type earthing systems and 3-pole method for the line type earthing systems and single electrodes. It is important to know the factors that influence the reliability of the measurements.

The supply network's age and circumstances brought some challenges in taking the measurements and calculations. Some of the values were approximated so that results were not too accurate. The measurements' reliability could be tested better by comparing them to results that are defined by soil resistivity measurements.

Key words: earthing measurement, earthing system, mine, quality test

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	8
2	PYHÄSALMI MINE OY.....	9
3	MAADOITUKSET	10
3.1	Tarkoitus	10
3.2	Rakenne	11
3.3	Maadoitusjärjestelmä	15
4	TARKASTELTAVAT ASIAT	16
4.1	Maadoitusimpedanssi.....	16
4.2	Kosketusjännite.....	18
4.3	Maadoitusjännite.....	21
4.4	Siirtyvät jännitteet.....	24
4.5	Maasulkuvirta	24
4.5.1	Maasta erotettu verkko.....	26
4.5.2	Sammutettu verkko	28
4.5.3	Impedanssin kautta maadoitettu verkko.....	29
4.6	Maahan kulkeva virta.....	30
5	KUNNOSSAPITO	32
6	MITTAUSMENETELMÄT.....	34
6.1.1	Käännepistemenetelmä	35
6.1.2	Silmukkamittausmenetelmä.....	37
7	KAIVOSALUEEN MAADOITUKSET	40
8	KÄYTETTÄVISSÄ OLEVAT MITTALAITTEET.....	41
8.1	Fluke 1621 -maadoitusvastusmittari.....	41
8.2	Fluke 1654B -asennustesteri.....	42
8.3	Chauvin Arnoux 6145 -silmukkavastustesteri.....	43
9	MITTAUKSET	44
9.1	Apuelektrodien vertailu	45
9.2	Silmukkatesterin kalibrointi.....	45
9.3	Ulkoalueet.....	46
9.4	Piha-alue	56
9.5	Rikastamo	58
9.6	Kaivos	60
9.7	Erilliset maadoituskiskot.....	64
10	TOIMINTA VIAN AIKANA	65
10.1	Kosketusjännitelaskenta.....	65
10.2	Parannustoimenpiteet.....	70

11 ALUEKOHTAINEN KUNNONVALVONTA	71
11.1 Ulkoalueet	71
11.2 Piha-alue	72
11.3 Rikastamo	73
11.4 Kaivos	73
11.5 Erilliset maadoituskiskot.....	74
12 POHDINTA.....	75
LÄHTEET.....	77
LIITTEET	79
Liite 1. Pyhäsalmen kaivoksen maanalainen infrastruktuuri ja malmio (Centre for Underground Physics in Pyhäsalmi)	79
Liite 2. Rikastamon ja piha-alueen maadoituskaavio (Pyhäsalmi Mine Oy 1984)	80
Liite 3. Maanalaisen kaivoksen maadoituskaavio (Outokumpu Mining Oy 2001)	81

ERITYISSANASTO

Askeljännite U_S	Henkilön jalkojen maan kosketuspisteiden välinen potentiaaliero
Kosketusjännite U_T	Kahden johtavan kappaleen välillä vaikuttava jännite
Laaja maadoitusjärjestelmä	Riittävän tiheä verkkomainen maadoitusjärjestelmä, jossa maadoitusjärjestelmän osien välinen potentiaaliero jää pieneksi
Maadoitusimpedanssi Z_E	Maadoitusjärjestelmän jonkin pisteen ja maan välinen impedanssi
Maadoitusjännite U_E	Maadoitusjärjestelmän jonkin pisteen ja referenssimaan välinen jännite vian aikana
Maadoitusresistanssi R_E	Maadoituselektrodin kytkentäpisteen ja referenssimaan välinen resistanssi, maadoitusimpedanssin reaaliosa
Maahan kulkeva virta I_E	Maasulkuvirran osa, joka kulkee maadoitusten läpi maahan muodostaen maadoitusjännitteen
Maasulkuvirta I_{ef}	Suurjänniteverkossa maavian aikana syntyvä vikavirta, jonka suuruus riippuu verkon maadoitustavasta ja vikaresistanssista
Paikallinen maadoitusjärjestelmä	Maadoitusjärjestelmä, jonka muodostavat yksittäisen muuntamon ja muuntamolta lähtevän pienjänniteverkon maadoitukset
Prospektiivinen kosketusjännite U_{vTp}	Kosketusjännite, jossa lisäresistanssit otetaan huomioon

Referenssimaa	Maadoitusjärjestelmästä riittävän etäällä oleva maan johtava osa, jonka potentiaaliksi on voidaan olettaa olevan nolla, toiselta nimeltään neutraalimaa
Reduktiokerroin r	Maahan kulkevaa virtaa pienentävä kerroin, jonka suuruus riippuu maadoitusjärjestelmän liittyvistä ukkosjohtimista ja keskusköysistä
Sallittu kosketusjännite U_{Tp}	Kosketusjännitteelle sallittu arvo, jossa lisäresistansseja ei oteta huomioon

1 JOHDANTO

Opinnäytetyön toimeksiantajana on Pyhäsalmi Mine Oy ja työ tehdään tehdaspalvelun sähkökunnossapidolle. Työn tarkoituksena on kaivosympäristöön soveltuvan maadoitusmittaustavan tutkiminen ja maadoitusten toimivuuden toteaminen. Työn tarkoituksena on myös kehittää maadoitusten kunnossapitoa ja tuottaa mittausten pohjalta maadoituksille kunnossapitosuunnitelma, jota voidaan hyödyntää jatkossa.

Pyhäsalmen kaivoksella on käytössä 6 kV keskijänniteverkko, jota syötetään 110 kV siirtoverkosta. Kaivoksen sähkönjakeluverkko on alun perin rakennettu 50- ja 60-luvun taitteessa, vaikka myöhemmin verkkoa on päivitetty vastaamaan nykyisiä tarpeita. Sähköverkkoa on laajennettu tarpeen vaatiessa, mm. uuden malmion löydyttyä syvemmältä viime vuosituhaten lopulla. Alueen sähkönjakeluverkon määritelmä on moninainen. Rikastamon ja piha-alueen sähköverkko on teollisuusverkkomainen, maanalaisessa kaivoksessa jakeluverkon ja teollisuusverkon välimaastosta ja teollisuusalueen ulkoalueilla jakeluverkkomainen.

Jakeluverkon iän vuoksi osalle kaivoksen maadoituksista on kertynyt käyttöikä, jolloin hyvän tarkastelutavan tutkiminen on aiheellista. Maadoitusten tarkastelusta haastavaa tekee verkon rakenne ja ikä, sillä verkkoon on tehty muutoksia ajan kuluessa ja kaikkea dokumentaatiota ei ole välttämättä saatavilla. Myös kaivosympäristö itsessään tuo omat haasteensa normaalista poikkeavilla olosuhteillaan. Maadoitusten oikeanlainen kunnonvalvonta on tärkeää, jotta turvallinen työskentely alueella voidaan varmistaa. Toimivalla maadoitusjärjestelmällä voidaan estää myös laitteistojen vaurioituminen vikojen aikana.

2 PYHÄSALMI MINE OY

Pyhäsalmi Mine Oy on kaivosalan yhtiö, joka toimii Pyhäsalmen kaivoksella Pyhäjärvellä Pohjois-Pohjanmaalla. Pyhäsalmen kaivos työllistää noin 230 työntekijää, sekä useita kymmeniä aliurakoitsijoita. Pyhäsalmi Mine Oy:n toimintoihin kuuluu malmin nosto, rikastus ja myynti. Kaivoksen päätuotteita ovat kupari-, sinkki- ja pyriittirikasteet. Kaivoksen on omistanut vuosien mittaan eri yhtiöt, aluksi Outokumpu Oyj, vuosituhaten vaihteesta Inmet Mining Corporation ja nykyään First Quantum Minerals Ltd. Kanadalaisella First Quantum Minerals Ltd. emoyhtiöllä on toimintoja Euroopassa, Afrikassa, Australiassa, sekä Etelä- ja Keski-Amerikassa. (First Quantum Minerals Ltd.)

Pyhäsalmen malmion löysi paikallinen asukas kaivaessaan pihalleen kaivoa vuonna 1958. Tuotanto saatiin käyntiin 1962 ja malmia louhittiin aluksi avolouhoksesta. Myöhemmin malmin ollessa syvemmillä siirryttiin vaiheittain maanalaiseen toimintaan ja nosto toteutettiin hissillä. Vuosituhannen vaihteessa uuden malmion löydyttyä malmin nostoa varten tehtiin uusi nostokuilu, joka ulottuu noin 1450 metriä maan pinnan alapuolelle. Kaivoksen malmion ja tunneliverkoston rakennetta on esitelty liitteessä 1. Pyhäsalmen kaivos on vanhimpia ja syvin toiminnassa oleva metallikaivos Euroopassa. Kaivos on kokoluokassaan maailman tehokkaimpia korkean käyntiasteen ja automatisoidun prosessin ansiosta. Hyvän käyntiasteen taustalla on tehokas kunnossapitotoiminta, jolla taataan laitoksen keskeytymätön toiminta. Kaivos on myös merkittävä taloudellinen vaikuttaja lähialueella. (Luukkonen, K. ym.)

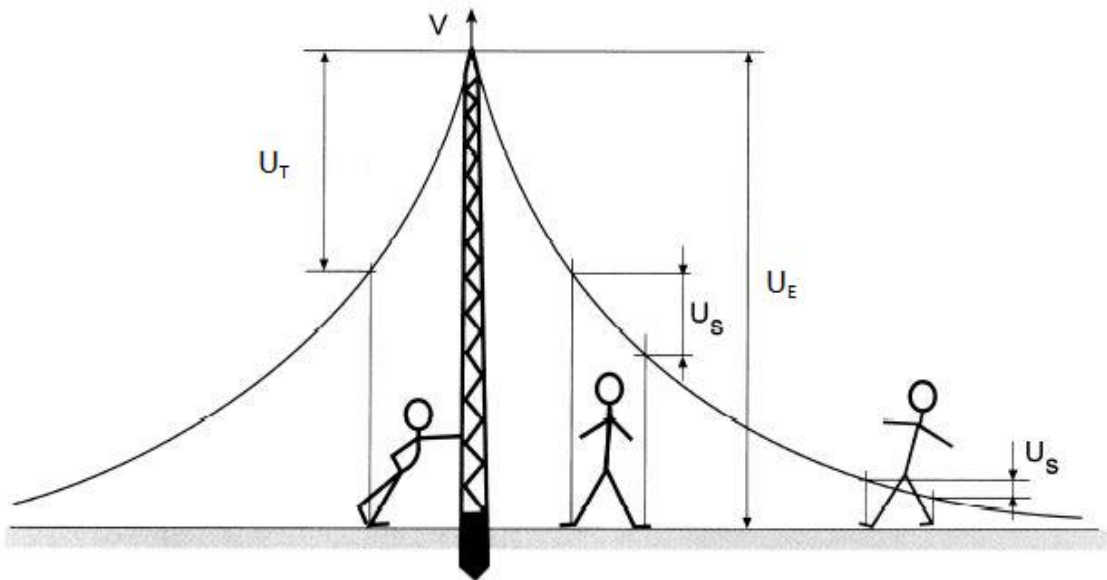
Kaivoksen alueella toimii CUPP- tutkimuskeskus, jossa suoritetaan erilaisia fysiikan tutkimuksia. Tutkimuskeskuksen keskeisimpiä hankkeita ovat tällä hetkellä maanalaisen fysiikan ja EMMA-kokeen tutkimukset. Kaivokseen on kaavailtu myös monenlaisia muita hankkeita, muun muassa Laguna-hanketta, Calliolab-tutkimuskeskusta (Calliolab), sekä säätövoimana toimivaa pumppuvoimalaitosta (Turkuenergia). Maan alla alhainen taustasäteilyn määrä tukee hyvin muun muassa erilaisten hiukkastutkimusten toteuttamista. (Centre for Underground Physics in Pyhäsalmi)

3 MAADOITUKSET

Maadoitukset ovat olennainen osa sähköjärjestelmää. Oikeanlaisella maadoittamisella taataan sähkön siirtämisen ja käytön turvallisuus. Suurjänniteverkon maadoituksissa noudatetaan SFS 6001- standardin määräyksiä. Kun käytössä on suurjännite- ja pienjänniteverkkojen yhteinen maadoitus, on otettava huomioon myös SFS 6000- standardin vaatimukset (SFS-käsikirja 600–1 2012, 302). Jotta maadoituksia voidaan tarkastella ja niiden merkitys ymmärretään, on hyvä tuntee erinäisiä asioita sähköverkon ominaisuuksista. (SFS 6001 2015)

3.1 Tarkoitus

Maadoitusten tarkoitus on estää jännitteelle alttiiden ja kosketeltavien osien kosketusjännitteiden ja askeljännitteiden nouseminen liian suureksi. Ympäristössä on monia tekijöitä, jotka voivat aiheuttaa sähköverkon vikatilanteita ja tällöin maadoitusten toiminta on tärkeässä asemassa. Maadoituksia tarkasteltaessa riittää kuitenkin kosketusjännitteen tarkastelu, sillä askeljännite jää laskennallisesti pienemmäksi. Oikeanlaisella maadoittamisella varmistetaan sähkönjakelujärjestelmän alueella liikkuvien henkilöiden turvallinen liikkuminen ja työskentely. Maadoittamisella estetään myös häiriöiden syntyminen laitteistoissa. Kuvassa 1 on havainnollistettu, miten maadoitus-, kosketus- ja askeljännitteet muodostuvat maasulkuvian aikana jännitteisen osan etäisyyden suhteen. (SFS 6001 2015, 91–92)



KUVA 1 Maadoitus-, kosketus- ja askeljännitteen muodostuminen vian aikana (Partanen, J. 2011, 11, muokattu)

Kuvassa 1 esitetyt käyrät maston ja maan välillä kuvastavat jännitteen muodostumista vikapaikan etäisyyden suhteen. Symbolilla U_S tarkoitetaan askeljännitettä. Kuvan tapauksessa askeljännite syntyy henkilön jalkojen maan kosketuspisteiden välille ja askeljännitteen suuruus on näiden pisteiden potentiaaliero. Symboli U_T kertoo, kuinka suuri kosketusjännite vaikuttaa kahden eri kosketuspinnan välillä. Kuvassa kosketusjännite vaikuttaa henkilön käden kosketuskohdan ja jalan maapotentiaalini väli. Symbolilla U_E tarkoitetaan maadoitusjännitettä, joka vaikuttaa jännitteisen osan ja referenssimaan välillä.

3.2 Rakenne

Maadoitusjärjestelmä koostuu järjestelmän kaikista sähköisistä liitoksista ja laitteista, jotka ovat yhteydessä maadoituksiin. Maadoitusten komponentteja ovat muun muassa maadoituselektrodit, maadoitusjohtimet, maadoitus- ja lisäkiskot, pienjännitepiirin käyttömaadoitukset, maadoituksiin liitetyt potentiaalintasausjohtimet ja -kiskot, sekä potentiaalinhjousjohtimet. (SFS 6001 2015)

Suomessa käytetään yleensä suur- ja pienjännitejärjestelmien yhteistä maadoitusta, jolloin muuntamon suurjännitepuolen suojamaadoitukset ja pienjännitejärjestelmän käyttömaadoitukset kytketään yhteen. Suur- ja pienjännitejärjestelmien maadoitukset voidaan jättää myös kytkemättä yhteen. Erotetuissa järjestelmissä on huomioitava maadoi-

tusjärjestelmien läheisyys, jolloin maadoitusten välillä voi olla potentiaaliero. (SFS 6001 2015)

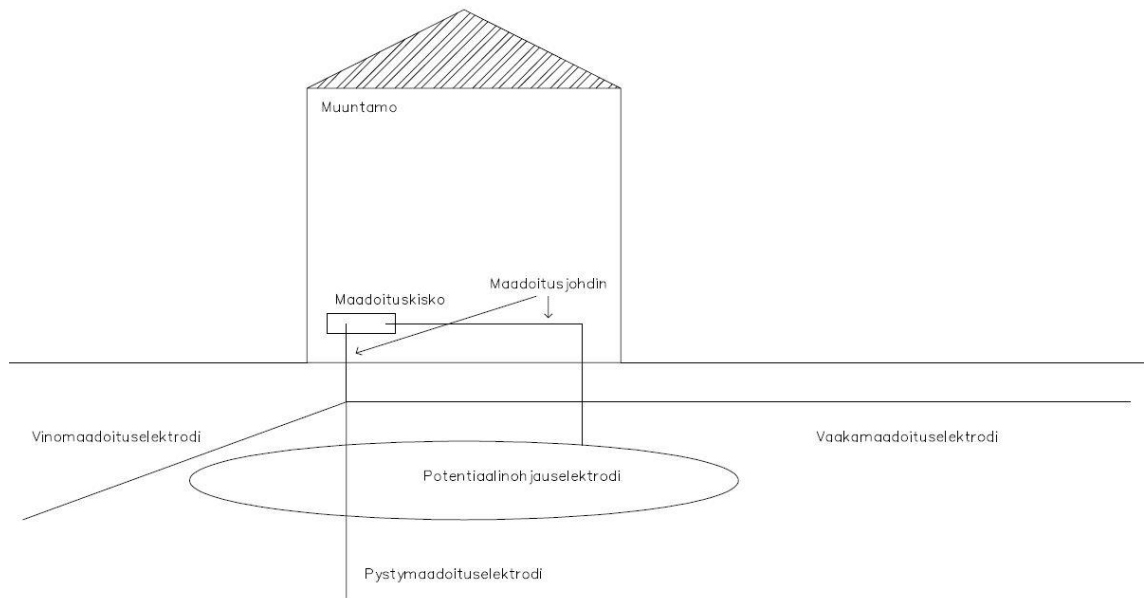
Maadoitusten rakenteessa huomioon otettavia asioita ovat maadoitusjärjestelmän riittävä mekaaninen lujuus, korroosionkesto ja terminen lujuus. Maadoitusten on myös kyettävä estämään laitteistoille ja omaisuudelle syntyviä vahinkoja, sekä otettava henkilöturvallisuuden täyttymien huomioon. (SFS-käsikirja 601 2015, 96)

Maadoitusjohtimella käsitetään päämaadoituskiskon ja maadoituselektrodin välistä johdinyhteyttä (Tiainen E. 2014, 37). Maadoitusjohtimet pyritään yleensä rakentamaan mahdollisimman lyhyiksi suurtaajuisten häiriöiden estämiseksi. Maadoitusjohtimien minimi poikkipinta-alat yleisimmin käytetyillä materiaaleilla on esitetty taulukossa 1. (SFS 6001 2015, 89 & 127)

TAULUKKO 1 Maadoitusjohtimien minimi poikkipinta-alat (SFS 6001 2015, 92)

Materiaali	Poikkipinta-ala (mm^2)
Kupari	16
Alumiini	35
Teräs	50

Maadoituselektrodilla tarkoitetaan maadoitusjärjestelmään kytkettyä maahan upotettua johdinta, jolla maadoitukset muodostavat johtavan yhteyden neutraaliin maahan. Maadoituselektrodit ovat rakenteeltaan yleensä vaaka-, pysty-, vino- tai perustuselektrodeja. Elektrodina voidaan käyttää myös maan alle sijoitettua metalliputkistoa tai muuta johtavaa rakennetta. Kuvassa 2 on esitetty jakelumuuntamoille tyypillisiä elektrodityyppejä. (SFS 6001 2015, 21, 25 & 127)



KUVA 2 Tyypillisiä elektrodeita muuntamolla

Maadoituselektrodeille on määritelty minimi poikkipinta-alat materiaalista ja tyypistä riippuen. Maadoituselektrodien minimimitat teräksellä ja kuparilla on esitetty taulukossa 2. (SFS 6001 2015, 110)

TAULUKKO 2 Maadoituselektrodien minimimitat (SFS 6001 2015, 110)

Materiaali		Elektrodityyppi	Halkaisija (mm)	Poikkipinta-ala (mm ²)
Teräs	Kuumasinkitty	Nauha		90
		Profiili		90
		Putki	25	
		Sauvaelektrodin pyörötanko	16	
		Vaakamaadoituselektrodin pyöreä lanka	10	
	Lyijyvaippa	Vaakamaadoituselektrodin pyöreä lanka	8	
	Päällystetty kuparivaippa	Sauvaelektrodin pyörötanko	15	
	Elektrolyyttikuparivaippa	Sauvaelektrodin pyörötanko	14,2	
	Kupari	Paljas	Nauha	
Vaakamaadoituselektrodin pyöreä lanka				25*
Köysi			1,8	25*
Putki			20	
Tinattu		Köysi	1,8	25*
Sinkitty		Nauha		50
Lyijyvaippa		Köysi	1,8	25*
		Pyöreä lanka		25*

Taulukossa 2 osaan vaadituista poikkipinta-aloista on merkitty symboli *. Näissä kohdissa elektrodin poikkipinta-alana voidaan käyttää 16 mm², kun ympäristössä tiedetään olevan pieni korroosion ja mekaanisen vaurioitumisen riski. Suurjännitstandardissa on annettu myös minimivaatimukset pinnoitettujen elektrodin pinnoitteiden paksuuksille. (SFS 6001 2015, 110)

Vaakamaadoituselektrodit asennetaan yleensä kaapeliojaan tai perustuksille kaivettuun monttuun alle metrin syvyyteen routarajan alapuolelle. Elektrodi voi olla rakenteeltaan nauhaa, pyörötankoa tai köyttä. Elektrodi voidaan asentaa säteittäisesti, rengasmaisesti, verkkomaisesti tai näiden yhdistelmänä. Elektrodi voidaan kytkeä molemmista päistä maadoituskiskoon, jolloin sitä voidaan käyttää myös potentiaalinhjauselektrodina. (SFS 6001 2015, 25, 115 & 127)

Pysty- ja vinomaadoituselektrodit lyödään maan sisään ja elektrodien välisen etäisyyden on hyvä olla suurempi, kuin niiden pituuksien. Pystymaadoituselektrodien käyttö on

järkevää, kun maaperän resistiivisyys pienenee syvemmälle mentäessä. (SFS 6001 2015, 115, 127)

3.3 Maadoitusjärjestelmä

Maadoitusjärjestelmän rakenne vaikuttaa maadoitusten toimintaan vikatilanteessa. Tämä vaikuttaa myös maadoitusten mittaamisen tarpeellisuuteen, sekä siihen, miten mittaukset voidaan toteuttaa. (SFS 6001 2015, 92 & 95)

Suurjännitessandardissa SFS 6001 laaja maadoitusjärjestelmä määrittää maadoitusalueeksi, jossa ei ole lainkaan tai on vain vähäisiä potentiaalieroja. Laajassa maadoitusjärjestelmässä paikalliset maadoitukset on kytketty yhteen, eli muuntamon maadoitukset ovat yleensä yhteydessä vähintään kahden muun muuntamon maadoitukseen. Tällöin yhden yhdysjohtimen katkeaminen ei aiheuta muuntamon irtaantumista maadoitusjärjestelmästä. (SFS 6001 2015, 136)

Maadoitusyhteyksiä voi muodostaa läheisten muuntamoiden maadoitusten lisäksi muuntamolta lähtevien pienjänniteverkkojen maadoitukset. Laaja maadoitusjärjestelmä on siis tiheä verkkomainen maadoitusjärjestelmä, jossa paikalliset maadoitukset on kytketty keskenään yhteen. Tyypillisiä laajoja maadoitusjärjestelmiä muodostavat yleensä tiheään rakennetut taajamat ja laajat teollisuusalueet, joissa muuntamoiden maadoitusten tiheä verkosto estää vaarallisten kosketusjännitteiden syntymisen. Laajan maadoitusjärjestelmä voidaan määrittellä mittaamalla tai laskennallisesti. Tällöin todetaan maadoitusten eri osien välisten potentiaalierojen jääminen riittävän pieniksi. (SFS 6001 2015, 23 & 136)

Laajaa maadoitusjärjestelmää ei muodosta kuitenkaan jononaiset maadoitusjärjestelmät, joissa paikalliset maadoitukset ovat kytketty yhteen, mutta sijaitsevat jononaisesti etäällä toisistaan. Tällöin maadoitukset eivät muodosta laajalle maadoitusjärjestelmälle tyypillistä verkkomaista rakennetta. Paikallisesti maadoitetut järjestelmät, jotka sijaitsevat etäällä toisistaan eivät myöskään muodosta laajaa maadoitusjärjestelmää, sillä niiltä puuttuu verkkomainen rakenne. (Tiainen, E. ym. 2014, 70–71)

4 TARKASTELTAVAT ASIAT

Maadoitusjärjestelmän kaikkine komponentteineen on kestettävä vikavirran aiheuttama rasitus suojalaitteiden toiminta-aikojen mukaan. Maadoitusten toimivuuden toteamiseksi on tunnettava tutkittavassa kohteessa vaikuttava maadoitusimpedanssi, maahan kulkeva virta sekä syntyvä kosketusjännite, joka voidaan määrittää maadoitusjännitteestä. Maadoitusjännitteen suuruus määräytyy maahan kulkevan virran ja maadoitusimpedanssin suuruuksista. (SFS 6001 2015)

4.1 Maadoitusimpedanssi

Maadoitusimpedanssilla tarkoitetaan maadoitusjärjestelmän ja referenssimaan välistä impedanssiarvoa. Maadoitusimpedanssi koostuu maadoituselektrodien maadoitusresistansseista ja maadoitusjohtimien impedansseista. Maadoitusjohtimien impedanssit on laskettavissa kaapeleille ilmoitettujen impedanssiarvojen avulla tai mittaamalla. (SFS 6001 2015)

Maadoitusresistanssi kertoo, kuinka suuri vastus on maadoituselektrodin liityntäpisteen ja referenssimaan välillä. Maadoitusresistanssin suuruuteen vaikuttavat maadoituselektrodin mitat, asennustapa sekä maaperän resistiivisyys. Maadoituselektrodin pituudella on suurempi vaikutus kuin poikkipinta-alalla. Maadoitusresistanssi kertoo, kuinka hyvin maadoitukset pystyvät johtamaan vikavirran neutraaliin maahan. Resistanssin arvo vaikuttaa suoraan vikatilanteessa syntyvän maadoitusjännitteen suuruuteen. Maadoitusresistanssi voidaan määrittää mittaamalla tai laskennallisesti. Maadoitusresistanssin laskennalliset arvot voivat poiketa jonkin verran maaperän epähomogeenisuuden, elektrodin rakenteen ja sijoittelun epäsäännöllisyydestä johtuen. (SFS 6001 2015)

Maaperän resistiivisyydellä on oleellinen vaikutus maadoitusresistanssin suuruuden muodostumiseen. Taulukossa 3 on esitetty yleisimpien maa-ainesten resistiivisyysarvoja. (SFS 6001 2015)

TAULUKKO 3 Maa-ainesten, betonin ja veden resistiivisyysarvoja (SFS 6001 2015, 148)

Aine	Keskimäärin Ωm	Tavallisimmat vaihteluvälit Ωm
Savi	40	25...70
Saven sekainen hiekka	100	40...300
Lieju, turve, multa	150	50...250
Hiekka, hieta	2 000	1 000...3 000
Moreenisora	3 000	1 000...10 000
Harjusora	15 000	3 000...30 000
Graniittikallio	20 000	10 000...50 000
Betoni tuoreena tai maassa	100	50...500
Betoni kuivana	10 000	2 000...100 000
Järvi- ja jokivesi	250	100...400
Pohja- kaivo- ja lähdevesi	50	10...150
Merivesi (Suomenlahti)	2,5	1...5

Taulukon 3 arvoista havaitaan, että maa-ainesten resistiivisyyden vaihteluväli on suuri. Resisttiivisyyden suuruuteen vaikuttavat aineen tyyppi, raekoko, tiheys ja kosteus. (SFS 6001 2015, 148)

Suunniteltaessa maadoituksia, maadoitusresistanssi voidaan määrittää laskennallisesti, kun tiedetään maan ominaisvastus, sekä elektrodin rakenne ja asennussyvyys. Taulukossa 4 on esitetty maadoitusresistanssin laskentakaavat erilaisilla maadoituselektrodityypeillä. (SFS 6001 2015)

TAULUKKO 4 Maadoitusresistanssin laskentakaavoja erilaisilla elektrodityypeillä (SFS 6001 2015, 149)

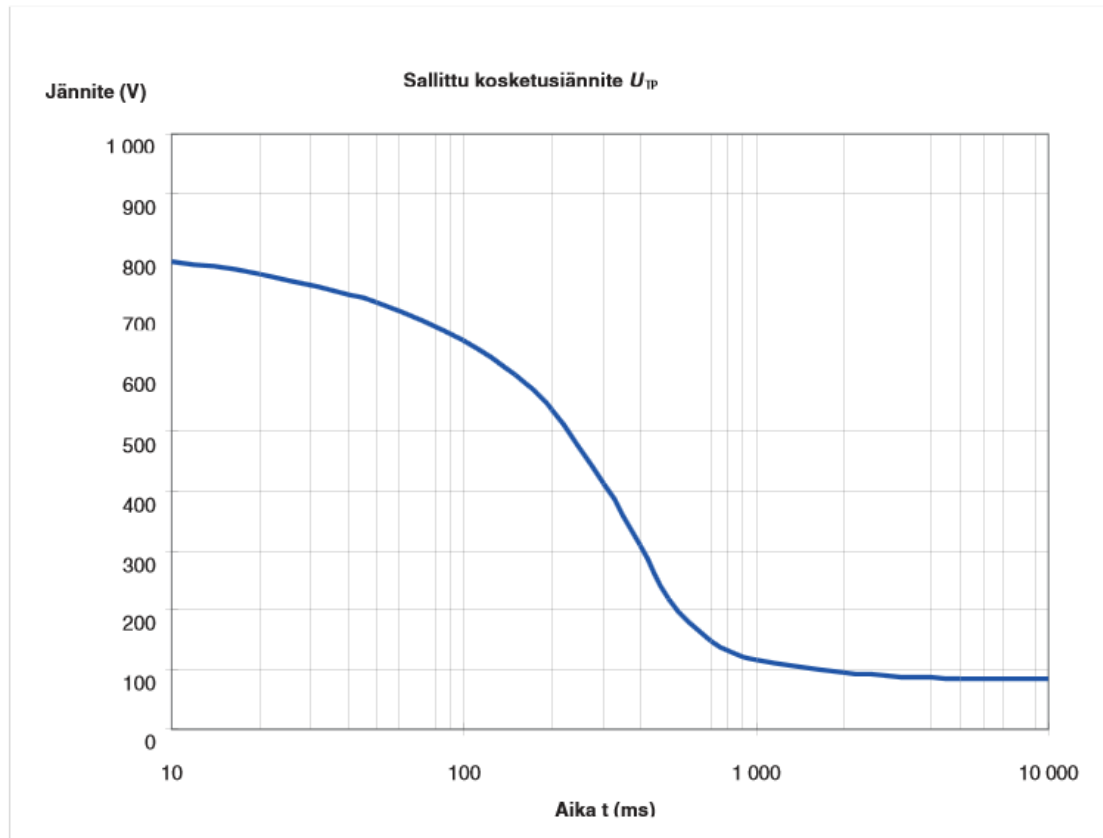
Elektrodin laatu	Kaava	Huomautukset
Pallo pinnassa	$R_E = \frac{\rho_E}{\pi D}$	
Levy pinnassa	$R_E = \frac{\rho_E}{2D}$	$s \ll D$
Pystysuora tanko tai putki pinnassa	$R_E = \frac{\rho_E}{2\pi L} \ln \frac{4L}{1,36 \times d}$	$d \ll L$
Pystysuora tanko tai putki upotettuna	$R_E = \frac{\rho_E}{2\pi L}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

Taulukon 4 symboli ρ_E tarkoittaa maan resistiivisyyttä, L elektrodin pituutta, d ja D johtimen halkaisijaa ja s levyn paksuutta. Maaperän resistiivisyys voidaan määrittää esimerkiksi mittaamalla. (SFS 6001 2015)

4.2 Kosketusjännite

Kosketusjännitteellä U_T kuvataan johtavien kappaleiden, esimerkiksi laitteen rungon ja maan välille syntyvää jännitettä maavian aikana. Kosketusjännitteitä käsiteltäessä puhutaan sallitusta ja prospektiivisestä kosketusjännitteestä. Sallittu kosketusjännite voidaan määrittellä tarkasteltavan ympäristön olosuhteiden ja ihmisen läpikulkevan virtatien mukaan. (SFS 6001 2015)

Sallittu kosketusjännite U_{Tp} kertoo, kuinka suuri johtuvien osien välinen jännite saa olla. Kuvassa 3 on esitetty standardin mukainen sallittu kosketusjännite ilman kehon impedanssin huomioon ottamista. (SFS 6001 2015)



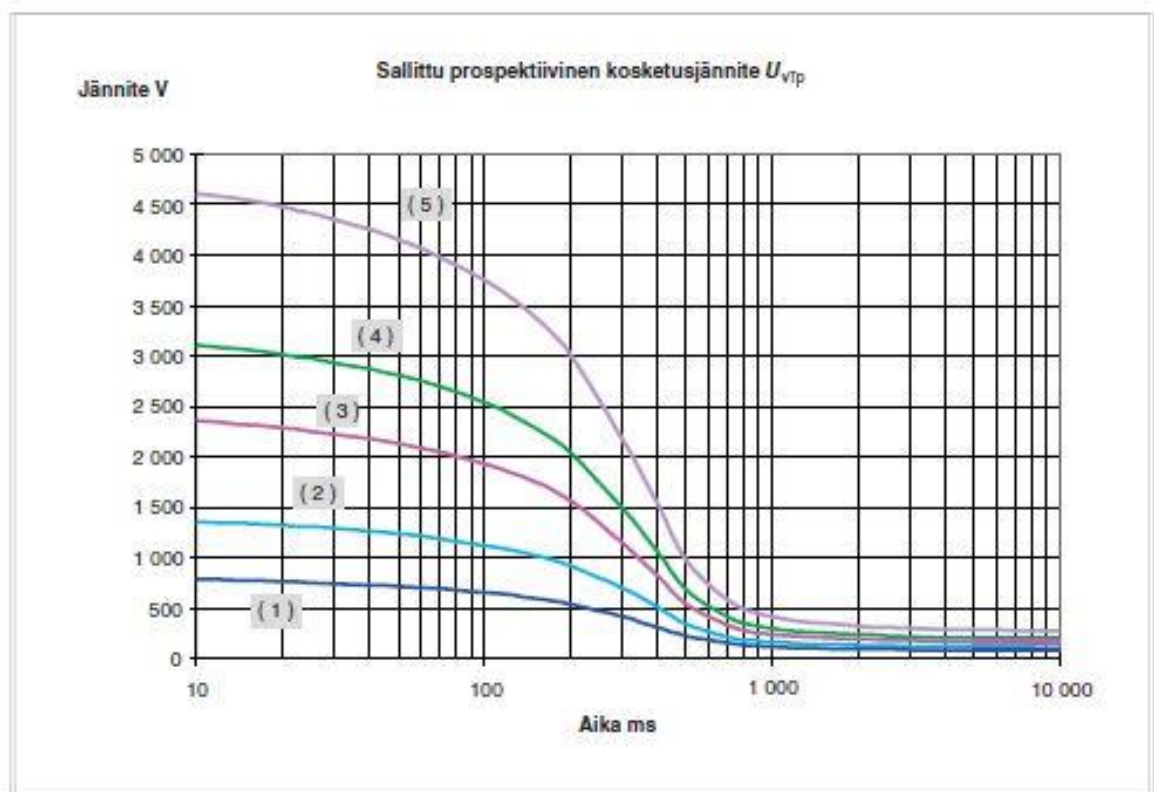
KUVA 3 Sallitun kosketusjännitteen suuruus vian kestoajan suhteen (SFS 6001 2015, 97)

Vikatilanteen kestäessä enemmän kuin 10 sekuntia, voidaan kosketusjännitteen arvona pitää 80V. Sallitun kosketusjännitteen suuruus pienenee maasulkuvian kestoajan pidentyessä. Maasulkusuojauksen asettelulla voidaan vaikuttaa sallitun kosketusjännitteen määräytymiseen. Esimerkiksi maasulkusuojan poiskytkentäajan ollessa yksi sekunti (1000 millisekuntia), saa kosketusjännite kuvan 3 mukaan olla noin 110V. Taulukossa 5 on koottuna kuvan 3 pohjalta sallittujen kosketusjännitteiden suuruudet vian kestoajan mukaan. (SFS 6001 2015, 97)

TAULUKKO 5 Sallittu kosketusjännite vian kestoajan mukaan (SFS 6001 2015, 107)

Vian kesto aika t (s)	Sallittu kosketusjännite U_{TP} (V)
0,05	716
0,10	654
0,20	537
0,50	220
1,00	117
2,00	96
5,00	86
10,00	85

Prospektiivisella kosketusjännitteellä U_{vTp} ihmisen kehon impedanssin lisäksi huomioon otetaan huomioon lisävastus R_F , joka voi olla esimerkiksi jalkineiden ja maan pinnan resistanssi. Prospektiivisella kosketusjännitteellä tarkoitetaan kosketusjännitteen arvoa silloin, kun johtuviin osiin ei kosketa. Prospektiivisen kosketusjännitteen raja-arvo määräytyy tarkasteltavan ympäristön käyttöolosuhteiden mukaan. Tarkasteltaessa maadoituksia prospektiivisen kosketusjännitteen kautta, mittaukset toteutetaan ihmisen impedanssia vastaavan lisäimpedanssin avulla. Kuvassa 4 on esitetty sallittujen prospektiivisten jännitteiden suuruudet vian kestoajan suhteen. (SFS 6001 2015, 109)



KUVA 4 Sallitut prospektiiviset kosketusjännitteet vian kestoajan suhteen (SFS-käsikirja 601 2015, 113)

Kuvassa 4 kosketusjännitteet eri lisävastuksilla on esitetty numeroituna. Lisäresistanssien suuruudet on esitetty taulukossa 6. Kuvan 4 käyrä 1 on sama, kuin sallitun kosketusjännitteen kuvaaja ilman lisäresistanssia (KUVA 3).

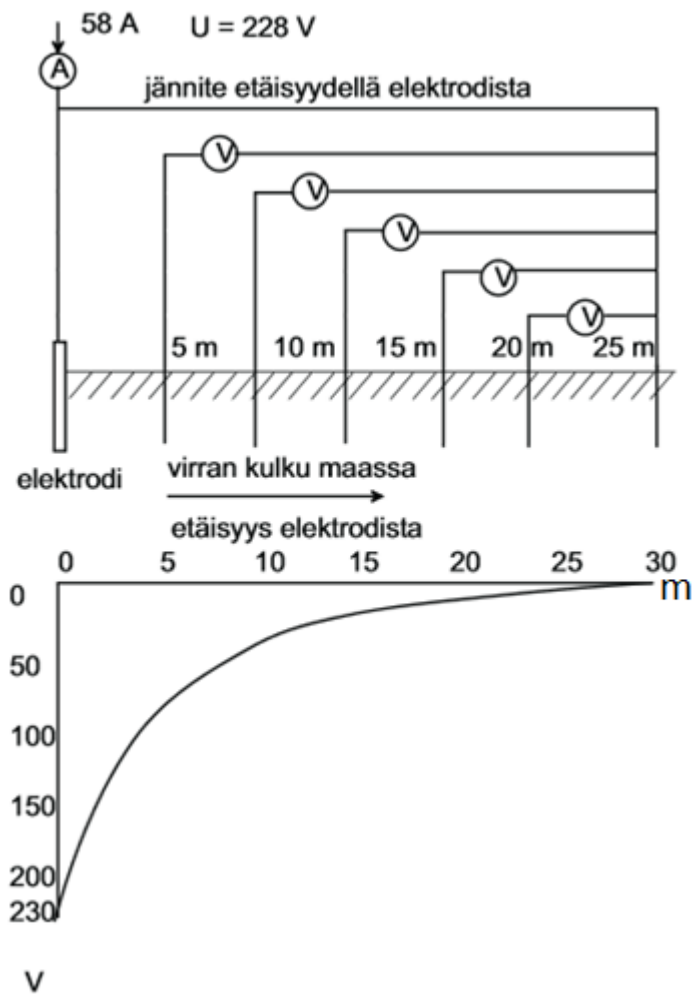
TAULUKKO 6 Kosketusjännitekäyrien lisävastukset (SFS 6001 2015, 109)

Käyrä	Lisävastus R_F (Ω)
1	0
2	750
3	1750
4	2500
5	4000

Taulukon 6 käyrä 1 vastaa ympäristöä, jossa ihmiset voivat oleskella esimerkiksi ilman jalkineita. Käyrä 2 vastaa ympäristöä, jossa esimerkiksi maan ominaisvastuksen voidaan olettaa olevan suurempi. Käyrät 3–5 vastaavat tilannetta, joissa maan resistiivisyyden voidaan todeta olevan suurempi ja jalkineiden lisävastus otetaan huomioon. (SFS-käsikirja 601 2015, 113)

4.3 Maadoitusjännite

Maadoitusjännitteellä U_E tarkoitetaan vian aikana maadoitusjärjestelmän ja referenssi-maan välillä vaikuttavaa jännitettä. Maadoitusjännitteelle on määritelty raja-arvoja syntyvän kosketusjännitteen suuruuden rajoittamiseksi. Kuvassa 5 on esitetty maadoitusjännitteen suuruus maavian aikana maadoituselektrodin etäisyyden suhteen. (SFS 6001 2015)



KUVA 5 Maadoitusjännitteen suuruus maadoituselektrodin etäisyyden suhteen (Sähköinfo Oy, 2, muokattu)

Sallitun maadoitusjännitteen suuruus voidaan määrittää sallitun kosketusjännitteen pohjalta seuraavasti:

$$U_E = F \cdot U_{Tp} \quad (1)$$

, missä

F on sallitun kosketusjännitteen kerroin

U_{Tp} on sallittu kosketusjännite. (SFS 6001 2015, 130)

Suosituksena on, että Suomen oloissa maadoitusjännitteen arvo on enintään $2U_{Tp}$. Vian kestoajan ollessa enemmän kuin 10 sekuntia, suurin sallittu maadoitusjännite on kuitenkin enintään 150 V. Jos vaadittuun arvoon ei päästä, on suoritettava lisätoimenpiteitä, joilla kosketusjännitteen pysyminen sallituissa arvoissa voidaan todeta. Suurjännite-

standardista löytyy kaavio ja jatko-ohjeistus tehtävistä lisätoimenpiteistä. (SFS 6001 2015, 98, 146)

Maadoitusjännite saa olla $4U_{Tp}$, kun järjestelmä täyttää kaikki seuraavana mainitut ehdot yhtä aikaa. Muuntopiirin maaperän voidaan olettaa olevan pääosin huonosti johtavaa ja syöttävän suurjänniteverkon suojaus on toteutettu laukaisevalla maasulkusuojauksella. Muuntajalla käytetään virtaa rajoittavia ylijännitesuojia, sekä eristetään muuntajan jännitteiset osat. Muuntamalla käytetään jotain standardin SFS 6001 liitteessä E mainittuja erityistoimenpiteitä tai vaihtoehtoisesti potentiaalinojauselektrodeja (SFS 6001 2015, 115). Pienjänniteverkon jokaisessa haaraan on tehty maadoitukset ja kaikki pienjänniteverkon maadoitukset noudattavat SFS 6000-9-801 vaatimuksia. Pienjänniteverkosta ei saa syöttää myöskään koulurakennuksia ja muita alueita, joilla oletetaan oleskelevan suuria ihmismääriä usein. (SFS 6001 2015, 146)

Maadoitusjännite saa olla $5U_{Tp}$, kun edellä mainittujen $4U_{Tp}$ - ehtojen lisäksi seuraavat ehdot täyttyvät. Muuntajalla syötetään yksittäistä rakennusta tai sähkölaitteistoa. Syötettävässä kohteessa on maadoituselektrodiin kytketty pääpotentiaalintasaus tai perustusten ympärille asennettu rengasmaisen maadoituselektrodi. Näiden lisäksi maaperän on oltava huonosti johtavaa paikoissa, joissa sähkölaitteita todennäköisesti käytetään. (SFS 6001 2015, 146)

Maadoitusjännite voidaan laskea mitatun tai lasketun maadoitusimpedanssin ja maadoitusten läpi maahan kulkevan virran mukaan seuraavasti:

$$U_E = Z_E \cdot I_E \quad (2)$$

, missä

Z_E on mitattu tai laskettu maadoitusimpedanssi

I_E on maahan kulkeva virta. (SFS 6001 2015, 130)

Laskettaessa pienen tai keskisuuren maadoitusjärjestelmän maadoitusjännitettä, maadoitusimpedanssi koostuu likimäärin elektrodin tai elektrodien maadoitusresistansseista. Kun maadoitusjärjestelmään liittyy rinnakkaisia maadoitusyhteyksiä, koostuu maadoitusimpedanssi maadoituselektrodien maadoitusresistansseista ja maadoitusjohtimien impedansseista. (SFS 6001 2015)

4.4 Siirtyvät jännitteet

Maadoitusjärjestelmissä on otettava huomioon suurjännitejärjestelmistä pienjännitejärjestelmiin siirtyvät jännitteet. Siirtyville jännitteille asetettujen vaatimusten oletetaan täyttyvän, kun maadoitukset kuuluvat laajaan maadoitusjärjestelmään. Vaatimusten oletetaan täyttyvän myös silloin, kun maadoitukset on kytketty useasta pisteestä symmetrisen järjestelmän suurjännitepuolen keskipistejohtimeen. (SFS-käsikirja 601 2015, 103)

Mikäli edellä mainittuja ehtoja ei täytetä, on maadoitusten yhdistämisen ehdoiksi annettu rasisusjännitteen raja-arvot maasulkuvian kestoajan mukaan. Taulukossa 7 on esitetty rasisusjännitteille asetetut suositusraja-arvot. (SFS-käsikirja 601 2015, 103)

TAULUKKO 7 Maadoitusten yhdistämiseksi asetetut rasisusjännitteiden rajat (SFS-käsikirja 601, 2015, 103)

Vian kesto aika t (s)	Sallittu rasisusjännite U_E (V)
$\leq 5s$	1200
$> 5s$	250

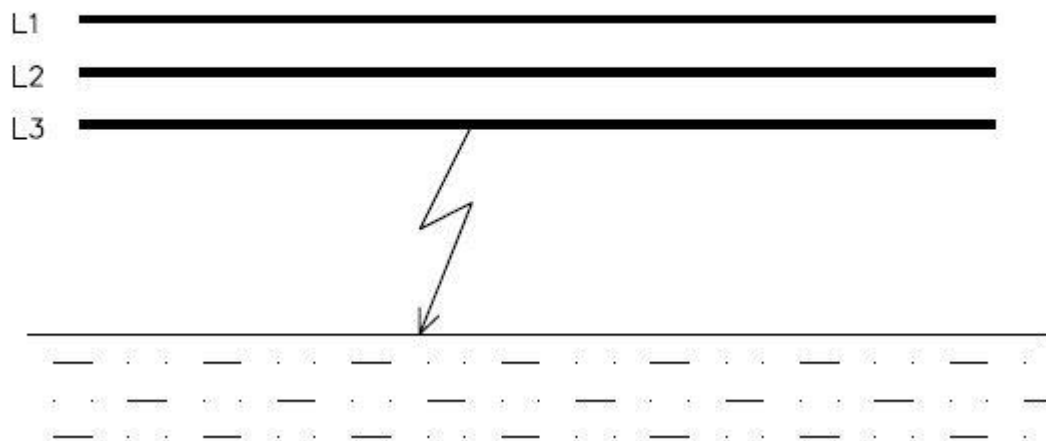
Sallitulla rasisusjännitteellä tarkoitetaan maadoitusjärjestelmän maadoitusjännitteen arvoa. Vian kestoajalla tarkoitetaan maasulkuvian poiskytkentäaikaa. Raja-arvot ovat yhteneviä kaikissa pienjännitejärjestelmissä (TN-, TT- ja IT-järjestelmät). (SFS 601 2015, 103)

4.5 Maasulkuvirta

Maahan kulkevan virran määrittämiseksi on selvitettävä tarkasteltavassa kohteessa vaikuttava maasulkuvirta. Maasululla tarkoitetaan jännitteisen johtimen kytketymistä maahan tai maadoituksiin. Tällöin johtimen ja maan välillä vaikuttaa vikaresistanssi, joka on tilanteesta riippuvainen. (SFS 6001 2015, 24 & 27–29)

Maasulkutilanteessa syntyvän maasulkuvirran suuruuteen vaikuttaa maasulun kytketymistapa. Maasulun kytketymistapoja ovat yksi- ja kaksivaiheinen maasulku, sekä kaksoismaasulku. Kuvissa 6, 7 ja 8 on esitetty maasulkujen kytketymistavat. Maasulkuvian havaitseminen ja poiskytkeminen on tärkeää liian suurien kosketusjännitteiden estämiseksi. (SFS 6001 2015, 28–29 & 33)

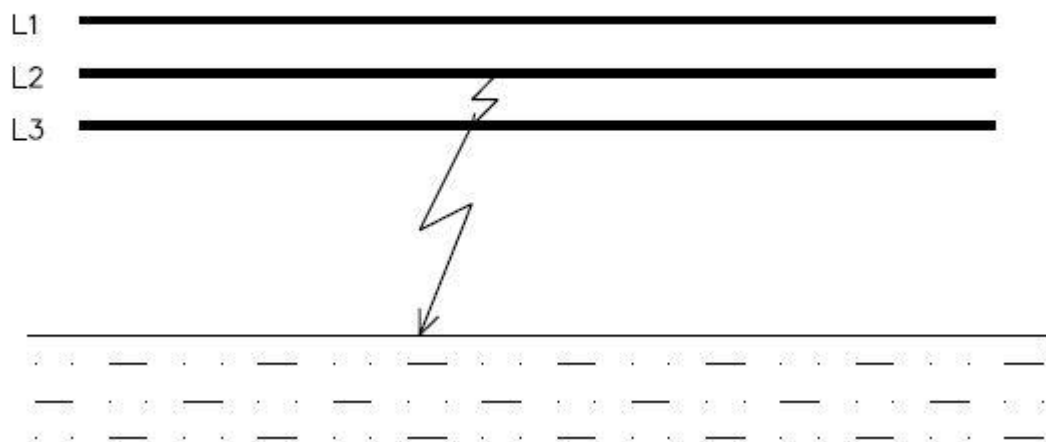
Yksivaiheinen maasulku



KUVA 6 Yksivaiheisen maasulun kytkeytymistapa

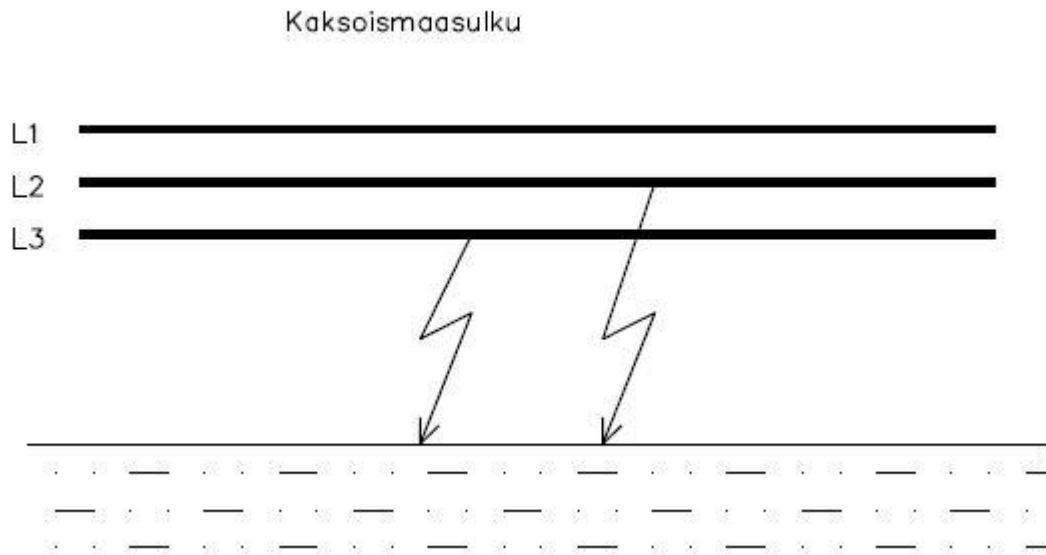
Yksivaiheisessa maasulussa jakeluverkon yksi johdin on yhteydessä maahan suoraan tai vikavastuksen välityksellä.

Kaksivaiheinen maasulku



KUVA 7 Kaksivaiheisen maasulun kytkeytymistapa

Kaksivaiheisessa maasulussa jakeluverkossa kaksi vaihetta on keskenään oikosulussa. Oikosulun lisäksi vaiheet ovat yhteydessä myös maahan suoraan tai vikavastuksen välityksellä.



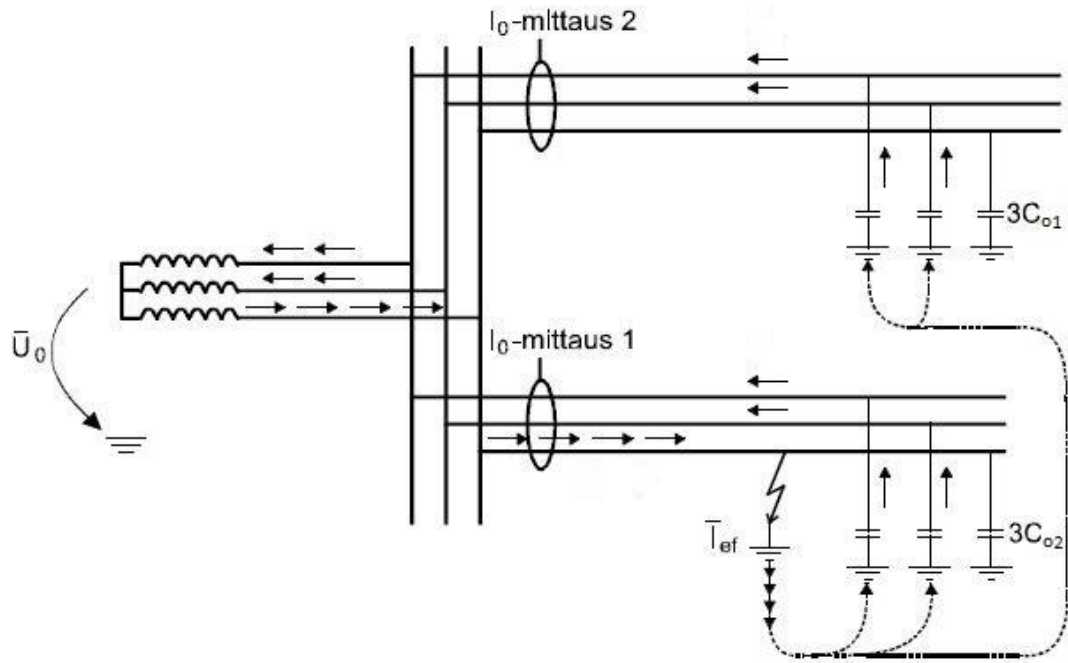
KUVA 8 Kaksoismaasulun kytkeytymistapa

Kaksoismaasulkuutilanteessa jakeluverkon kaksi vaihetta ovat erikseen maayhteydessä suoraan tai vikavastuksen välityksellä. Vikavirtatie syntyy vaiheiden välille maayhteyden välityksellä.

Maasulkuvirran suuruuteen vaikuttaa maasulun kytkeytymistavan lisäksi verkon tähtipisteen maadoitustapa. Maasulkuvirta kulkee verkon vaiheesta maahan ja kiertää takaisin maadoitustavasta riippuvalla tavalla. Maasulkuvirran havaitseminen voi olla vaikeaa, jos vikaresistanssi on suuri. Maasulkuvika on katkaistava automaattisesti tai vähintään havaittava. Hälytystä käytettäessä vika on kytkettävä pois manuaalisesti. (SFS 6001 2015, 28–29 & 52)

4.5.1 Maasta erotettu verkko

Maasta erotetussa verkossa syöttävän muuntajan tähtipiste on ”kelluva”, eli sillä ei ole johtavaa yhteyttä maan potentiaaliin. Maasulkuvian aikana tähtipisteen ja maan välille syntyy nollasta poikkeava jännite. Nollajännite johtuu vaiheiden epätasaisesta kuormituksesta. Kuvassa 9 on esitetty maasta erotetun verkon rakenteellinen kuva ja maasulkuvirran käyttäytyminen vian aikana.



KUVA 9 Maasta erotettu verkko maasulussa (ABB Oy 2000, muokattu)

Verkossa tapahtuvan maavian aikana maasulkuvirran kulkureitti syntyy viallisen ja rinnakkaisten lähtöjen kaapelien maakapasitanssien kautta vikapaikkaan. Maasta erotetussa verkossa maasulkuvirta on kapasitiivista. (SFS 6001 2015) Kun vikavastus on nolla, maasulkuvirta voidaan laskea kaavalla:

$$I_{ef} = 3\omega C_0 U_v \quad (3)$$

, missä

ω on verkon kulmataajuus ($2\pi f$)

C_0 on verkon yhden vaiheen maakapasitanssi

U_v on verkon vaihejännite. (ABB Oy 2000)

Kun maasulkutilanteessa on vikaresistanssia, maasulkuvirran I_{ef} suuruus voidaan laskea kaavalla:

$$I_{ef} = \frac{\sqrt{3}\omega C_0}{\sqrt{1+(3\omega C_0 R_f)^2}} U \quad (4)$$

, missä

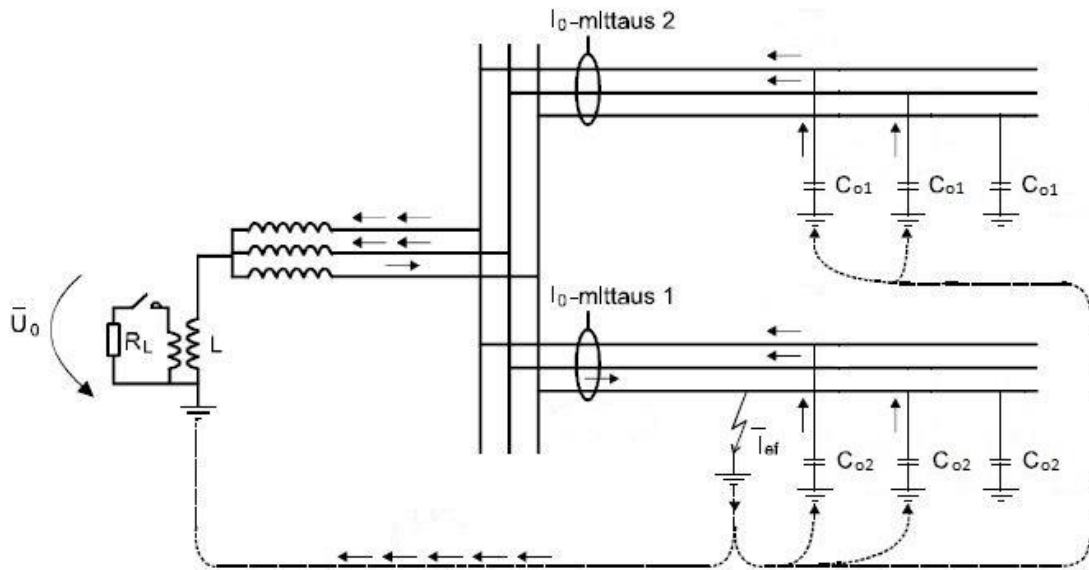
ω on verkon kulmataajuus

C_0 on verkon yhden vaiheen maakapasitanssi

R_f on vikapaikan vikaresistanssi. (ABB Oy 2000)

4.5.2 Sammutettu verkko

Sammutetussa verkossa syöttävän muuntajan tähtipiste on induktanssin ja resistanssin rinnankytkennän välityksellä yhteydessä maahan. Kuvassa 10 on esitetty sammutetun verkon rakenteellinen kuva ja maasulkuvirran kulkureitin syntyminen vian aikana.



KUVA 10 Sammutettu verkko maasulussa (ABB Oy 2000)

Vian aikana maasulkuvirta kulkee viallisen ja rinnakkaisten lähtöjen kaapelien maakapasitanssien, sekä sammutuskuristimen ja resistanssin rinnankytkennän kautta vikapaikkaan. Sammutuskela kompensoi kaapelien maakapasitanssia muodostaen resonanssipiirin. Resonanssitilanteessa virran suuruus määräytyy vika- ja tähtipisteen ja maan välisen resistanssin mukaan. Sammutetun verkon jäännösmaasulkuvirran suuruus voidaan laskea kaavalla:

$$I_{ef} = \frac{\sqrt{1 + R_L^2 \left(3\omega C_0 - \frac{1}{\omega L}\right)^2}}{\sqrt{(R_f + R_L)^2 + R_f^2 R_L^2 \left(3\omega C_0 - \frac{1}{\omega L}\right)^2}} U_v \quad (5)$$

, missä

R_L on sammutuskelan kanssa rinnan kytketty vastus

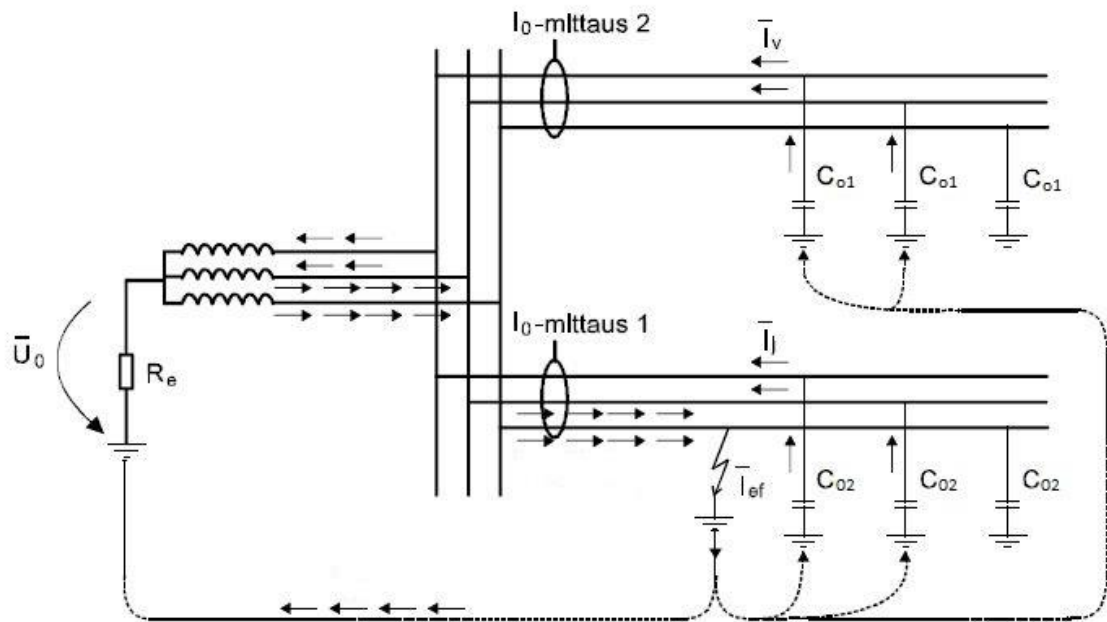
ω on verkon kulmataajuus

C_0 on verkon yhden vaiheen maakapasitanssi

R_f on vikapaikan vikaresistanssi. (ABB Oy 2000)

4.5.3 Impedanssin kautta maadoitettu verkko

Verkkoa syöttävän muuntajan tähtipiste voidaan maadoittaa myös impedanssin välityksellä. Tällöin maadoitus voidaan toteuttaa suuren vastuksen kautta tai jäykästi, jolloin impedanssin arvo on mahdollisimman pieni. Kuvassa 11 on esitetty impedanssin kautta maadoitetun verkon rakenne ja maasulkuvirtatien muodostuminen.



KUVA 11 Impedanssin kautta maadoitettu verkko maasulussa (ABB Oy 2000)

Vian aikana vikavirta kulkee samalla tavalla, kuin sammutetussa verkossa, mutta kelan sijaan tähtipisteessä on ainoastaan resistanssia. Impedanssin kautta maadoitetun verkon maasulkuvirta saadaan laskettua kaavalla:

$$I_{ef} = \frac{\sqrt{1+(R_e 3\omega C_0)^2}}{\sqrt{(R_f+R_e)^2+(R_f R_e 3\omega C_0)^2}} U_v \quad (6)$$

, missä

R_e on muuntajan tähtipisteen maadoitusresistanssi

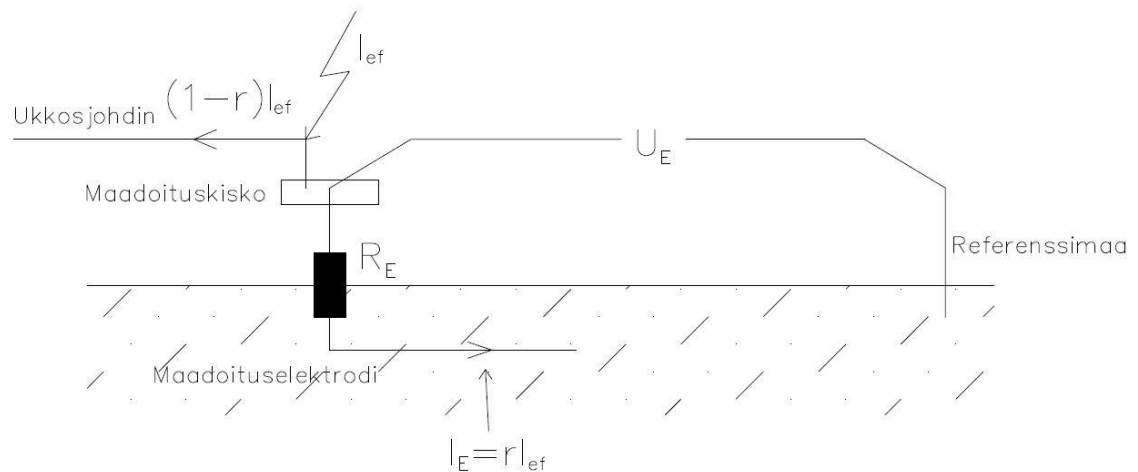
ω on verkon kulmataajuus

C_0 on verkon yhden vaiheen maakapasitanssi

R_f on vikapaikan vikaresistanssi. (ABB Oy 2000)

4.6 Maahan kulkeva virta

Muuntamoon liittyvien ilmajohtojen ukkosjohtimien, maakaapeleiden metallivaippojen ja keskusköysien vaikutuksesta maadoitusten kautta kulkee vain osa maasulkuvirrasta. Tällöin maahan kulkevaa virtaa laskettaessa huomioon otetaan kaapelien aiheuttama reduktiokerroin. Kuvassa 12 on esitetty maasta erotetun verkossa maadoitusten kautta maahan kulkevan virran muodostumisperiaate. (SFS 6001 2015, 27 & 121)



KUVA 12 Maahan kulkevan virran muodostuminen

Kuvassa 12 ukkosjohtimen lauseke $(1 - r)I_{ef}$ tarkoittaa ukkosjohtimen tai esimerkiksi maadoitusköyden kautta kulkevan virran suuruutta. Kuvassa on myös esitetty maadoitusjännitteen muodostuminen maadoituselektrodin liityntäpisteen ja referenssimaan välillä.

Maadoitusjärjestelmän rinnakkaisjohtimen aiheuttama reduktiokerroin voidaan laskea seuraavasti:

$$r = \frac{I_E}{3I_0} \quad (7)$$

, missä

I_E on maahan kulkeva virta

$3I_0$ on nollapiirivirtojen summa. (SFS 601 2015, 121)

Maasta erotetussa verkossa nollapiirivirtojen summa muodostuu maasulkuvirrasta ($3I_0 = I_{ef}$). Tällöin maasta erotetussa verkossa maahan kulkeva virta voidaan laskea kaavalla:

$$I_E = r * I_{ef} \quad (8)$$

, missä

r on reduktiokerroin

I_{ef} on kapasitiivinen maasulkuvirta. (SFS 6001 2015, 94)

Reduktiokertoimen suuruus riippuu kaapelin tyypistä. Reduktiokertoimet on mahdollista saada myös kaapelivalmistajalta. Tyypillisiä reduktiokertoimia 10 ja 20 kV kaapeleilla on esitetty taulukossa 8. (SFS 6001 2015, 122 & 148)

TAULUKKO 8 Kaapeleiden tyypillisiä reduktiokertoimia (SFS 6001 2015, 122)

Kaapeli	Reduktiokerroin
Paperieristeiset	
Cu 95mm ²	0,2-0,6
Al 95mm ²	0,2-0,3
PEX- eristeiset	
Cu 95mm ²	0,5-0,6

Kun maadoitusten liittyvien kaapelien reduktiokertoimia ei voida määrittää tai maadoituksilla ei ole rinnalla ukkosjohtimia, maakaapeleiden metallivaippoja tai keskusköysiä, voidaan reduktiokertoimenä käyttää arvoa yksi. Tällöin laskennasta saatava arvo on ns. turvallisella puolella.

5 KUNNOSSAPITO

Maadoituksia suunniteltaessa huomioon otettavia asioita ovat maadoitusjärjestelmän korroosion, mekaanisen ja termisen rasitteen kesto (SFS 6001 2015). Kaivoksen teollisuusympäristössä korroosion ja mekaanisen lujuuden merkitys korostuu kunnossapitoa ajatellen.

Alueella esiintyvä korroosiota voimistavia aineita kuten erilaisia mineraaleja, rikasteita ja kemikaaleja. Kaivoksesta nostettava rikkipitoinen kiviaines edistää laitteistojen ja maadoitusten kulumista. Mekaanista lujuutta kuormittavat erilaiset työkoneiden käytöt ja työskentely maadoitusten lähetyvillä, räjäytystyöt sekä seismiset tapahtumat. Terminen kesto määritellään maadoitusjärjestelmää suunniteltaessa, jolloin maadoitukset on mitoitettu kestämaan vikavirran aiheuttamat lämpörasitteet. Maadoitukset ovat kuitenkin alttiina vaurioitumiselle niiden eliniän kasvaessa, jolloin niiden tarkastelu määräajoin on aiheellista.

Maadoitusten kunnossapitoa voidaan suorittaa sopivin väliajoin suoritettavilla kuntotarkastuksilla. Tarkastuksissa maadoituksille suoritetaan mittauksia ja aistinvaraisia tarkastuksia. (Energiateollisuus ry)

Mittauksilla todetaan maadoitusten vian johtokyky maahan sekä laajan maadoitusjärjestelmän osien liityntöjen eheys. Kuntotarkastuksissa laajaan maadoitusjärjestelmään kuuluvien osien mittaamiseen riittää yleensä yksi 60 % käännepistemittaus, kunhan se suoritetaan samassa mittauspisteessä kuin aiemmin. (Energiateollisuus ry)

Aistinvaraisilla tarkastuksilla voidaan tarkastella näkyvillä olevien maadoituskomponenttien mekaanista kuntoa ja kulumista, eli mm. liitosten eheyksiä, korroosiota ja johdin katkeamia. Aistinvaraiset tarkastukset voidaan suorittaa kuntotarkastusten mittauksen ohella. (Energiateollisuus ry)

Kuntotarkastusten väli on yleensä 6–12 vuotta riippuen maadoitusjärjestelmän rakenteesta (SFS 6001 2015, 147). Maadoituksille suoritettavien kuntotarkastusten väli on kuusi vuotta, jos maadoitus- tai potentiaalinhjauselektrodi on liitetty vain yhdellä yhteydellä maadoituskohteeseen. Jos maadoituskohteella, esimerkiksi muuntamolla on

useita maadoitus- tai potentiaalintasausedelektrodeja tai elektrodiyhteys on rakennettu kahdella maadoitusjohtimella, on 12 vuoden tarkastusväli riittävä. (Energiateollisuus ry)

6 MITTAUSMENETELMÄT

Maadoitusresistanssi on mitattava yleensä silloin, kun uusi järjestelmä otetaan käyttöön. Maadoituksille on hyvä tehdä myös määräaikaistarkastuksia, joista voidaan todeta ovatko maadoitukset pysyneet toimintakuntoisena. Maadoitusresistanssia ei tarvitse kuitenkaan mitata, jos kyseessä on laaja maadoitusjärjestelmä, johon lisätään uusia maadoituksia. Tällöin kuitenkin on varmistettava uusien osien liittyminen järjestelmään esimerkiksi mittauksin. Maadoituksia ei tarvitse myöskään mitata, jos niiden toimivuus voidaan todeta muulla tapaa. (SFS 6001 2015)

Maadoitusresistanssimittauksia tehdään yleensä sähköaseman maadoituksille, muuntajan suurjännitepuolen tai suurjännite-erottimen suojamaadoituksille, sekä pienjänniteverkon maadoituksille, kun järjestelmä on alttiina yli 1000V jännitteille. Maadoitusresistanssi on mitattava myös, jos kyseessä on edellä mainittujen järjestelmien yhteiset maadoitukset. (Tiainen, E. ym. 2014, 139)

Maadoitusresistansseja voidaan mitata usealla eri tavalla. Mittaustavan valintaan vaikuttaa tutkittavan maadoitusjärjestelmän rakenne, mittaussympäristö ja mittauksen tarkoitus. Mittausten ajankohtaan on myös kiinnitettävä huomiota, sillä mittausten tekeminen voi olla vaikeaa talvella ja keväällä, kun maa on roudassa. (SFS 6001 2015, 129)

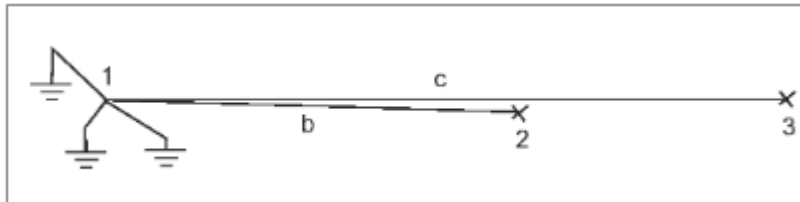
Sopivan mittaamenetelmän valinta on tärkeää, jotta mittausta on riittävän luotettava ja järjevä toteuttaa. Yleisimpiä maadoitusten mittaamenetelmiä ovat käännepiste-, virtajännite-, silmukka- ja voltti-ampeerimittaus sekä maasulkumittaamenetelmä. (Tiainen, E. ym. 2014, 140–144; Energiateollisuus ry)

Maadoitusmittauksia varten perehdyttiin erilaisiin mittaustekniikoihin ja selvitettiin kohteeseen järjevimmin toteutettavissa olevien mittausten suoritustavat. Tutkimuksen pohjalta päädyttiin käännepiste- ja silmukkamittaamenetelmiin. Nämä mittaustavat soveltuvat parhaiten teollisuusympäristössä toteutettaviksi mittaustavoiksi. Voltti-ampeerimenetelmä soveltuu hyvin suurempien maadoitusjärjestelmien maadoitusimpedanssimittauksiin, mutta mittauksen toteuttaminen ei ollut järjevää tarkasteltavassa ympäristössä.

6.1.1 Käänne pistemenetelmä

Käänne pistemenetelmässä tarkasteltavasta maadoituksesta mitataan maadoitusresistanssin arvoja. Mittaustapaa käytetään yleensä mitattaessa pieniä tai keskikokoisia maadoitusjärjestelmiä tai yksittäisiä elektrodeja. (SFS 6001 2015, 129)

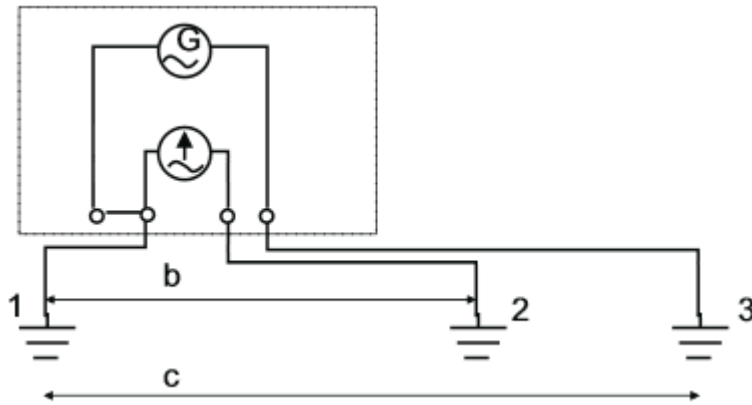
Mittauksen suorittamista varten tarvitaan kaksi apuelektrodia, johtimet ja mittaukseen sopiva maadoitusvastusmittari. Apuelektrodeiksi sopivat sähköä johtavat piikit, esimerkiksi kupari- tai terästangot. Mittaussuunta tulee valita mahdollisimman keskeltä järjestelmää, jolloin mittaustulos on mahdollisimman luotettava. Apuelektrodit sijoitetaan samaan linjaan mitattavan maadoituselektrodin kanssa kuvan 13 mukaisella tavalla. (Tiainen, E. ym. 2014, 141–143)



KUVA 13 Käänne pistemenetelmän mittaussuuntien suunnat (Tiainen, E. ym. 2014, 143)

Kuvan 13 numerolla 1 tarkoitetaan mitattavaa maadoitusta, numerolla 2 virta-apuelektrodia, numerolla 3 jänniteapuelektrodia, sekä kirjaimilla b ja c mittajohtimien etäisyyksiä elektrodin liityntäpisteestä. Suosituksena on, että jänniteapuelektrodin on sijaittava vähintään 2,5-kertaisella ja virta-apuelektrodin vähintään 4-kertaisella etäisyydellä mitattavan maadoituselektrodin enimmäislaajuudesta. (SFS 6001 2015, 129)

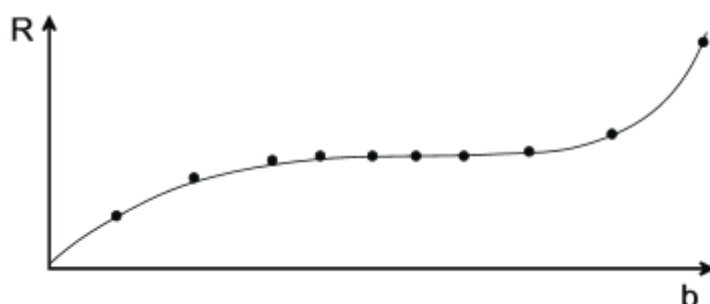
Kuvassa 14 on esitetty käänne pistemenetelmän mittaussuuntien suunnat. Mittaustapa perustuu siltamittaukseen. Mittalaitteen virtalähde syöttää virtaa maadoituselektrodiin. Virta kulkee maadoituksesta virta-apuelektrodille ja sieltä takaisin mittalaitteeseen. Jänniteapuelektrodin ja maadoituselektrodin välille syntyy jännite. Mitatun virran ja jännitteen avulla mittalaite laskee jänniteapuelektrodin ja maadoitusten välisen resistanssin arvon.



KUVA 14 Käännepestemenetelmän mittauskytkentä (Sähköinfo Oy, 2)

Mitattaessa mittalaitteen yksi johdin liitetään mitattavaan elektrodiin (kuvassa numero 1). Virta-apuelektrodi viedään riittävän kauas mitattavasta elektrodista ja sen paikka pysyy samana koko mittauksen ajan (kuvassa numero 3). Jänniteapuelektrodi (kuvassa numero 2) siirrellään mitattavan maadoituksen ja virta-apuelektrodin välillä ja otetaan resistanssin arvot ylös eri etäisyyksillä (kuvassa kirjain b). Käännepisteen lähellä mittaustiheyttä voidaan lisätä, jolloin saadaan tarkempi kuvaaja käännepisteen kohdalta. (Tiainen, E. ym. 2014, 141–143)

Saadut resistanssiarvot muodostavat teoriassa kuvan 15 mukaisen resistanssikuvaajan. Resistanssin arvo määritetään käännepisteen kohdalta. Käännepisteellä tarkoitetaan kuvaajan vaakasuoraa osaa tai selvää resistanssiarvojen käännekohtaa. Jos kuvaajasta ei ole havaittavissa selvää käännepistettä, voidaan arvo lukea 60 % kohdalta kokonaisetäisyydestä. Elektrodiin etäisyyden toisistaan on oltava vähintään 0,5 metriä ja ne on upotettava vähintään 30 cm maahan. Apuelektrodien paikat pyritään valitsemaan maadoitusten ja häiriöitä aiheuttavien putkien ja muiden metallisten kappaleiden vaikutusalueen ulkopuolelta. (Tiainen, E. ym. 2014, 141–143)

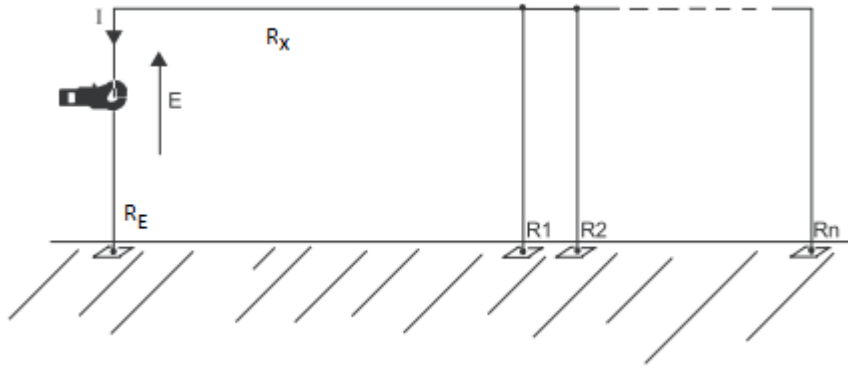


KUVA 15 Käännepistemennetelmällä saatava teoreettinen resistanssikuvaaja (Sähköinfo Oy, 2)

Mittaus voidaan suorittaa myös yksinkertaistettuna 60 % säännöllä, jos maaperä on riittävän homogeeninen. Tällöin jänniteapuelektrodi viedään 60 % päähän virtaapuelektrodin etäisyydestä. Esimerkiksi, jos virtaapuelektrodi sijaitsee 100 metrin päässä, jänniteapuelektrodi sijoitetaan 60 metrin päähän mitattavasta elektrodista ja luetaan mittauksesta saatava resistanssin arvo. Monen pisteen mittauksia käytetään yleensä käyttöönottomittauksissa, kun taas yhden pisteen mittaus on yleensä riittävä määräraikaistarkastuksissa. (Tiainen, E. ym. 2014, 141–143)

6.1.2 Silmukkamittausmenetelmä

Silmukkamittauksella mitataan maadoitusresistanssin arvoja maadoituksista, joilla on muita maadoituksia rinnankytkettynä. Mittausmenetelmä toimii hyvin laajan maadoitusjärjestelmän testauksessa (Energiateollisuus ry). Silmukkamittauksella voidaan tarkastella myös maadoitusten välisiä yhteyksiä, maadoitusjärjestelmän liitoksia, kiskostoja ja potentiaaliohjauselektrodin kuntoa (Energiateollisuus ry). Kuvassa 16 on esitetty silmukkamittausmenetelmän mittauspiirin muodostuminen ja mittaustapa. (CA 6145-käyttöohje)



KUVA 16 Chauvin Arnoux 6145- silmukkavastusmittarin mittaustapa (CA 6145- käyttöohje, muokattu)

Mitattaessa pihti viedään mitattavan maadoitusjohtimen tai elektrodin ympärille. Pihdin käämitys muodostaa vakiosuuruisen jännitteen E . Tällöin mitattavan elektrodin ja muiden rinnakkaisten maadoitusten lävitse (kuvassa symbolit R_E , R_1 , R_2 ja R_n) syntyy kokonaisvastuksen suuruudesta riippuva virta I . Ohmin lain avulla jännitteen ja virran avulla saadaan laskettua likimääräinen maadoitusresistanssin suuruus R_E . Kuvan 16 symboli R_n tarkoittaa mitattavan maadoituselektrodin rinnalla olevaa n kappaletta maadoituselektrodeja. (CA 6145- käyttöohje)

Mittauksesta saatava kokonaisvastuksen suuruus voidaan laskea seuraavasti:

$$R_{\text{kok}} = R_X + R_E + \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} \right)^{-1} \quad (9)$$

, missä

R_X on maadoituselektrodien välillä oleva yhdysjohdin

R_E on tarkasteltava maadoituselektrodi

R_1 , R_2 ja R_n ovat tarkasteltavan maadoituselektrodin rinnalla sijaitsevia maadoituselektrodeja.

Rinnakkaisten maadoitusten ja mitattavan maadoituksen sarjakytkennän vuoksi mittauksesta saatava lukema on suurempi kuin todellinen maadoitusvastus ($R_E < R_{\text{kok}}$).

Rinnakkaisten maadoitusten muodostama kokonaisvastusarvo on yleensä kuitenkin pieni mitattavan maadoituselektrodin vastusarvoon nähden, jolloin silmukkamittauksella saatava arvo on kohtuullinen ja turvallisella puolella. Silmukkamittauksesta saatava vastusarvo on oikeastaan impedanssi, sillä mittalaite toimii vaihtojännitteellä (Chauvin

Arnoux). Tässä työssä silmukkaimpedanssin arvoa on käsitelty kuitenkin resistanssiarvona maadoitusresistansseja määrittäessä mittaustulosten selkeyden säilyttämiseksi ($R \approx Z$) (CA 6145- käyttöohje). Verkkomaisten osien silmukkamittauksissa vastusarvo on ilmoitettu impedanssina.

7 KAIVOSALUEEN MAADOITUKSET

Kaivoksen sähköverkon rakennusaikana maadoituksilla on ollut erilaiset säännökset, joten maadoitusten ominaisuudet voivat poiketa nykyisin voimassa olevista standardeista. Kaivoksen 6 kV jakeluverkko on rakenteeltaan maasta erotettu verkko.

Keskijännitejakeluverkon maadoitukset on kytketty sähköaseman päämaadoituskiskolla (rikastamon kaapelikanaalissa) keskijännitekaapelien keskusköysien välityksellä yhteen. Maadoitukset on kytketty lisäksi maanpinnalla noin kahden kilometrin mittaiseen vesiputkilinjaan, sekä kaivoksessa oleviin useisiin vesiputkilinjoihin. (Liite 2 & 3)

Maadoitukset muodostavat pääosin laajan maadoitusjärjestelmän rakenteen. Paikalliset maadoitukset on kytketty yhteen, jolloin maadoitusjärjestelmä muodostaa verkkomaisen rakenteen. Muuntamot sijaitsevat lähellä toisiaan, jolloin maan potentiaalierojen kasvamisen suureksi on epätodennäköistä. Muuntamoilla on käytetty myös suur- ja pienjännitejärjestelmien yhteistä maadoitusta. Tässä työssä maadoitusten tarkastelu on jaettu alueisiin niiden erityyppisten ympäristöjen perusteella.

Ulkoalueilla ja piha-alueilla, esimerkiksi jätealueella ja avolouhoksella osa muuntamoista sijaitsee hieman etäämmällä muista alueen muuntamoista. Näillä alueilla on kuitenkin useita pienjännitejakeluverkon maadoituksia.

Rikastamon jakelujärjestelmän maadoitukset täyttävät laajalle maadoitusjärjestelmälle tyypilliset ominaisuudet. Muuntamot sijaitsevat toistensa lähellä, maadoitukset on kytketty keskenään yhteen muodostaen verkkomaisen rakenteen ja maadoituksilla on useita yhteyksiä neutraaliin maahan maadoituselektrodien, perustuselektrodien ja metalliputkistojen kautta. Maadoitusverkosta oli saatavilla myös rakennekuva, josta oli nähtävissä maadoitusten väliset yhteydet. (Liite 2)

Maanalaiset maadoitukset muodostavat myös pääosin laajalle maadoitusjärjestelmälle tyypillisen rakenteen. Maanalaiset muuntamot sijaitsevat toistensa lähellä ja maadoitukset muodostavat verkkomaisen rakenteen useiden yhteyksien välityksellä. Maan alla on kuitenkin muutama muuntamo, joiden maadoituksilla on säteittäisiä maadoituspiirteitä. Maanalaisesta maadoitusverkosta oli saatavilla myös rakennekuva, josta selvisi maadoitusten väliset yhteydet. (Liite 3)

8 KÄYTETTÄVISSÄ OLEVAT MITTALAITTEET

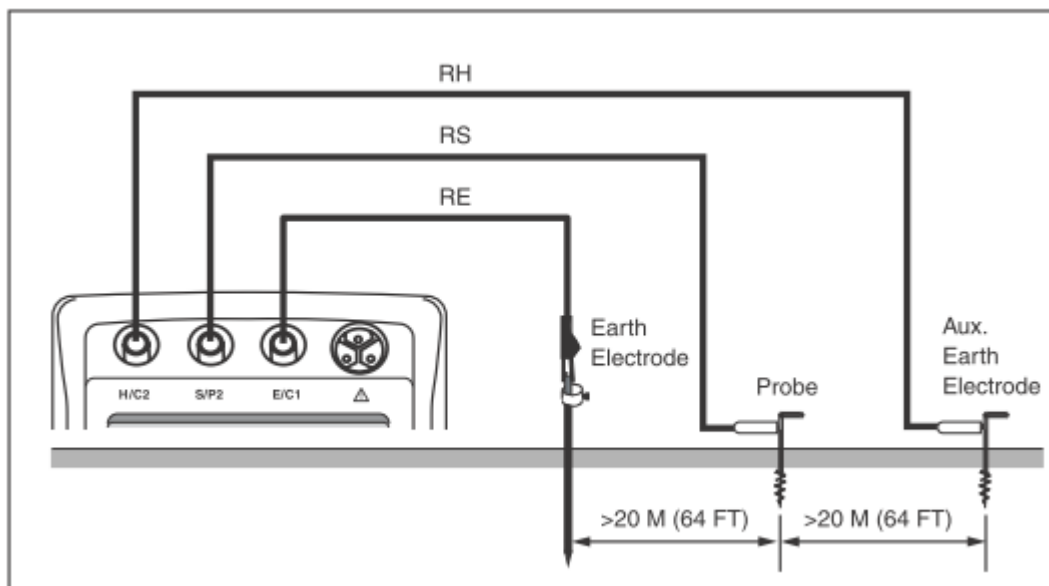
Maadoitusresistanssin mittaamiseen tarvitaan käytettävään mittausmenetelmään soveltuvia mittareita. Mittaria valittaessa on hyvä ottaa huomioon myös mittarin käyttötarkoitus, eli käytetäänkö sitä käyttöönotto- vai kunnossapitomittauksissa tai halutaanko sitä käyttää molemmissa. Aluksi selvitettiin yhtiöltä löytyvä maadoitusmittauksiin soveltuva mittarikanta.

Käytettävissä olevilla mittareilla voitiin mitata maadoitusresistanssin arvoja käänne- ja silmukkamittausmenetelmällä. Käänne- ja silmukkamittalaitteet käyttävät mittauksissa 70–140Hz taajuutta ja 100–500V jännitettä ja silmukkamittalaite 2400Hz taajuutta ja noin 60mV jännitettä.

8.1 Fluke 1621 -maadoitusvastusmittari

Fluke 1621 on maadoitusvastusmittari, joka toimii siltamittausperiaatteella. Mittaaminen toteutetaan käänne- ja silmukkamittausmenetelmällä. Mittarilla voidaan mitata myös vaihtojännite-resistanssia. Mittalaitteella voidaan asettaa haluttu raja-arvo 0 Ω ja 1999 Ω väliltä, jolloin sen ylityksestä hälytetään. Mittauksen suorittamiseen tarvitaan lisäksi virta- apuelektrodin etäisyydestä riippuen riittävän pitkät mittajohtimet ja kaksi apuelektrodia. (Fluke 1621- käyttöohje)

Kuvassa 17 on esitetty Fluke 1621:n mittauskytkentä. Tutkittava elektrodi kytketään mittarin *E/C1*- liittimeen, jänniteapuelektrodi *S/P2*- liittimeen ja virta- apuelektrodi *H/C2*- liittimeen. (Fluke 1621- käyttöohje)

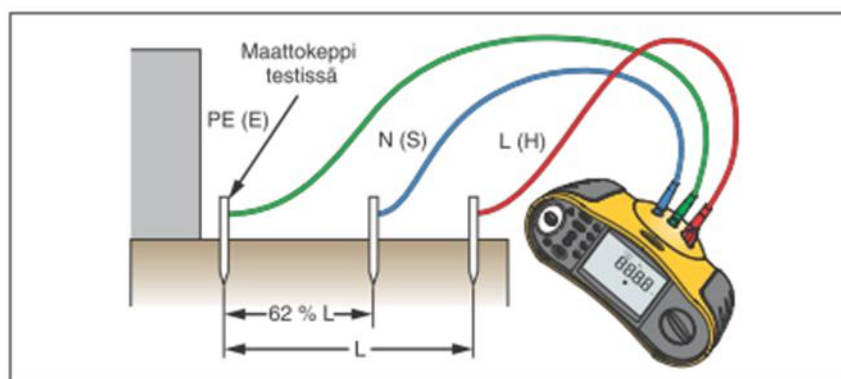


KUVA 17 Fluke 1621 -maadoitusmittarin mittauskytkentä (Fluke 1621 käyttöohje)

Mitattaessa mittarin valintakytkimestä valitaan *3-POLE*-mittaustoiminto, jolloin näytölle ilmestyy mittausympäristössä havaitun häiriöjännitteen suuruus. Häiriöjännitelähteitä voi olla esimerkiksi rinnakkaiset järjestelmät, jotka sijaitsevat tarkasteltavan kohteen vaikutusalueella. Mittaus suoritetaan painamalla *START*-painiketta. Mittaus kestää muutaman sekunnin, jonka jälkeen maadoitusvastuksen arvo R_E esitetään näytöllä. Mittalaitteen havaitessa yli 20V häiriöjännitteen, mittaus keskeytetään ja näytölle ilmestyy varoitussymboli. Mittari näyttää havaitun jännitteen suuruuden. (Fluke 1621- käyttöohje)

8.2 Fluke 1654B -asennustesteri

Fluke 1654B -asennustesterillä voidaan suorittaa useita erilaisia mittauksia, joita tarvitaan mm. käyttöönottomittauksissa. Tässä työssä hyödynnettiin mittalaitteen maadoitusvastuksen mittaustoimintoa. Mittaaminen voidaan toteuttaa käännepistemennetelmällä. Mittauksen suorittamiseen tarvitaan lisäksi virta-apuelektrodin etäisyydestä riippuen riittävän pitkät mittajohtimet ja kaksi apuelektrodisauvaa. Mitattaessa mittausjohtimet kytketään kuvan 18 mukaisella tavalla. (Fluke 1654B- käyttöohje)



KUVA 18 Fluke 1654B -asennustesterin maadoitusvastusmittauksen kytkentä (Fluke 1654B- käyttöohje)

Mittarin valintakytkimestä valitaan R_E - mittaustoiminto, jonka jälkeen painetaan *TEST*-painiketta. Mittalaite suorittaa mittauksen, joka kestää noin 10 sekuntia. Tämän jälkeen näytölle ilmestyy saatu maadoitus vastuksen arvo R_E ylempään näyttöön. Apuelektrodien välisen jännitteen ylittäessä 10V, mittaus estetään. Jos näytölle ilmaantuu *Err5*- ilmoitus, mittauksessa on liikaa häiriötekijöitä ja mittaustuloksen tarkkuus heikkenee. *Err6*- ilmoitus kertoo, että mittauksen vastusarvo on liian suuri. (Fluke 1654B- käyttöohje)

8.3 Chauvin Arnoux 6145 -silmukkavastustesteri

Chauvin Arnoux 6145 -silmukkavastustesteri on tarkoitettu maadoitusvastuksen mittaamiseen piirissä, jossa jakeluverkon maadoitukset muodostavat silmukoidun rakenteen. Silmukkatesteri soveltuu hyvin esimerkiksi laajan maadoitusjärjestelmän tarkastukseen. Mittarilla voidaan tarkastaa uuden muuntamon maadoitusten liittyminen laajaan maadoitusjärjestelmään (Energiateollisuus ry). Mittarilla voidaan toteuttaa myös maadoituksissa kulkevien vuotovirtojen tarkastelua. (CA 6145- käyttöohje)

Mitattaessa mittalaite kytketään päälle ja valitaan Ω - painikkeesta resistanssimittaus. Pihti viedään halutun mittauskohteen johtimen ympärille ja mittaustulos näytetään välittömästi mittalaitteen näytöllä. Mittarin *A*- painikkeella näytetään maadoituspiirissä kulkevan virran suuruus. Mittarilla voidaan tallettaa saatuja mittaustuloksia *MEM*- näppäintä painamalla ja lukea ne myöhemmin uudelleen. Mittari ilmoittaa *NOISE*- ilmoituksella, kun häiriöjännitteen suuruus ylittää 50V. Näytölle ilmestyy *OL*- merkki, jos mittausalue ylitetään. (CA 6145- käyttöohje)

9 MITTAUKSET

Mittausten ajatuksena oli tutkia miten maadoitusten kuntotarkastelua on järkevää toteuttaa tutkimustyökohteessa. Mittauksilla haluttiin selvittää maadoituskohteisiin soveltuvat mittaustavat ja mittaustuloksiin vaikuttavat tekijät.

Maadoitusten tarkastelua varten tutkittiin yhtiöltä löytyvää dokumentaatioita maadoituksista ja muista tarvittavista tiedoista. Tarkasteltavia asioita oli muun muassa sähköjakeluverkon ja maadoitusten rakenne, sekä suojalaitteiden toiminnot. Osa löydettyistä dokumenteista oli vanhoja, joten niiden paikkansa pitävyydestä ei ollut täyttä varmuutta. Tarvittavia tietoja selvitettiin myös kenttätutkimusten avulla.

Kaivoksen maadoitusjärjestelmien mittaamiseen soveltuvia tapoja tutkittiin maadoitusten mittaamista käsittelevistä materiaaleista ja standardeista. Mittauksia varten tutkittiin onko yhtiöltä löytyvät mittarit soveltuvia mittausten suorittamiseen, tai onko tarvetta hankkia uutta mittauskalustoa.

Käännepistemenetelmämittauksissa mittajohtimina käytettiin MKEM 16mm² KEVI-kaapelia, jota oli kaksi 200 metrin kelaa. Kaapeleiden suurella poikkipinta-alalla minimoitiin mittausjohtimista aiheutuvia häviöitä. Apuelektrodeina käytettiin kuparitankoja, sekä noin metrin mittaisia terässauvoja, joissa oli kiinnikkeet mittajohtimien liittimille. Mittauslaitteiden lisäksi työn suorittamiseen tarvittiin radiopuhelimet ja kaksi mittauksen suorittajaa. Mittaukset tuli tehdä sähkötyöturvallisuusmääräyksiä noudattaen. Esimerkiksi maadoituselektrodia ei saanut irrottaa jännitteisestä laitteistosta siten, että vaarana on järjestelmän irtaantuminen maasta.

Käännepistemenetelmällä mittareilla suoritettiin mittaukset samoista pisteistä, jotta tulokset olivat vertailukelpoisia. Käännepistemittaukset tehtiin monen pisteen mittauksina, sekä 60 % säännöllä. Mittaustulosten pohjalta muodostettiin kuvaajat. Maadoitusresistanssin arvo määritettiin kuvaajan käännepisteestä tai 60 % kohdalta, jos käännepistettä ei ollut havaittavissa.

Mittauksissa tarkasteltavia asioita oli muun muassa häiriöjännitteiden huomioon ottaminen, mittareiden luotettavuudet, mittaussuunnat ja -paikat, apuelektrodit, johtimet, mittausten menetelmät ja maaperän rakenne.

9.1 Apuelektrodien vertailu

Mittauksia varten testattiin koemittauksella, onko apuelektrodin materiaalilla vaikutusta mittaustulokseen. Vertailussa käytettiin kupari- ja terästankoja. Mittaus tehtiin 60 % käännepestemittauksella jätealueen muuntamalla ja mittauksessa käytettiin Fluke 1621 - maadoitusvastusmittaria. Taulukossa 9 on esitetty apuelektrodien vertailumittauksella saadut resistanssien arvot.

TAULUKKO 9 Apuelektrodien vertailumittaus

Materiaali	R (Ω)
Kupari	19,15
Teräs	16,85

Kuparitangot olivat hieman lyhyemmät, jolloin niitä ei voitu upottaa yhtä syvälle, kuin terästankoja. Molemmat mittatangot upotettiin kuitenkin vähintään 30 cm syvyyteen. Tuloksista huomataan, että vaikka kupari on johtavampi materiaali, myös teräs on riittävän johtava mittauksia varten. Tärkeämpää on apuelektrodien riittävä upotussyvyys.

9.2 Silmukatesterin kalibrointi

Chauvin Arnoux 6145 -silmukkamittalaitteen mukana on kalibrointisilmukka, jolla voidaan tarkistaa mittarin tarkkuus. Valmistajan mukaan mittalaitteen epätarkkuuden tulisi olla maksimissaan 0,5 % ja tarvittaessa silmukkamittari voidaan lähettää huoltoon uudelleen kalibroitavaksi (CA 6145-käyttöohje). Mittalaitteen suhteellinen tarkkuus on laskettu seuraavasti:

$$\frac{|\Delta R|}{R_{\text{silmukka}}} \cdot 100\% = \frac{|R_{\text{silmukka}} - R_{\text{mittari}}|}{R_{\text{silmukka}}} \cdot 100\% \quad (10)$$

, missä

R_{silmukka} on kalibrointisilmukan resistanssi

R_{mittari} on mittalaitteen mitaama resistanssi.

Tällöin suhteelliseksi tarkkuudeksi saadaan TAULUKKO 10 ensimmäisen sarakkeen arvoilla:

$$\frac{\Delta R}{R_{\text{silmukka}}} \cdot 100\% = \frac{|7,9\Omega - 8,1\Omega|}{7,9\Omega} \cdot 100\%$$

$$\frac{\Delta R}{R_{\text{silmutikka}}} \cdot 100\% \approx 2,47\%$$

Taulukossa 10 on esitetty silmukkamittarin kalibrointisilmukan mittaustulokset. Kalibrointisilmukka koostui viidestä eri kokoluokan silmukavastuksesta.

TAULUKKO 10 Silmukatesterin kalibrointitulokset

$R_{\text{silmutikka}} (\Omega)$	$R_{\text{mittari}} (\Omega)$	$\frac{\Delta R}{R_{\text{silmutikka}}} (\%)$
7,9	8,1	2,47
12,4	12,6	1,59
22	22,3	1,35
49,5	50	1,00
198	197	0,51
keskiarvo		1,38

Taulukon 10 kalibrointimittaustuloksen mukaan kaikki mittaustulokset ylittävät mittalaitteen suositustarkkuuden. Mittalaitteelle on aiheellista suorittaa uudelleen kalibrointi.

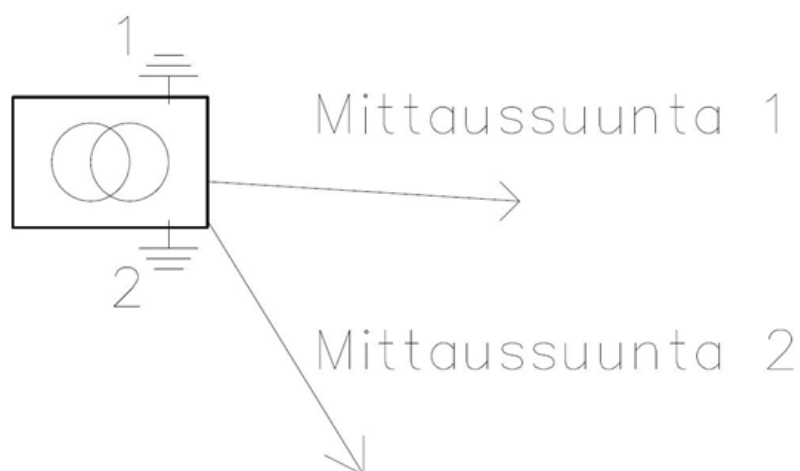
9.3 Ulkoalueet

Ulkoalueilla tarkoitetaan jätealueen muuntamoita. Ulkoalueen jakeluverkko koostuu kolmesta muuntamosta. Ulkoalueilla kenttämittauksia suoritettiin jätealueen ja jätteen välipumppaamoon muuntamoilla. Käännepestemittareiden tuloksia vertailtiin keskenään. Käännepestemittareiden tuloksia verrattiin myös silmukkamittarin mittaustuloksiin, jolloin voitiin havainnoida maadoitusten rakennetta. Ulkoalueen tarkasteltavat maadoitukset sijoittuvat osin laajan maadoitusjärjestelmän reuna-alueille.

Ensimmäiset kenttämittaukset tehtiin jätealueen muuntamolla. Jätealueella on puisto-
muuntamo, jossa suurjännite- ja pienjännitemaadoitukset on yhdistetty. Muuntajaa syötetään maakaapeliverkosta ja muuntamo sijaitsee maadoitusjärjestelmän reuna-alueilla. Muuntamon maadoitukset ovat yhteydessä toisen muuntamon maadoituksiin. Muuntamon mittaukset tehtiin käännepeste- ja silmukkamittausmenetelmällä.

Kuvassa 19 on esitetty maadoitusten sijainnit ja suunnat, joihin mittaukset voitiin toteuttaa. Ympäristössä oli haittatekijöitä, jotka estivät mittaamisen muihin suuntiin. Muuntamon maadoitusten tarkoista sijainneista ei ollut dokumentoitua tietoa, joten maadoi-

tusten suunnat on arvioituja. Muuntamalla toinen maadoitusjohdin (kuvassa numero 1) on kaapelioidessa syöttökaapelin mukana oleva eristetty keskusköysi ja toinen on molemmista päistä kiskoon liitetty maadoituselektrodi (kuvassa numero 2).



KUVA 19 Jätealueen muuntamon mittaussuunnat

Maaperä oli mittaussuunta 1:ssä homogeenista, mutta mittaussuunta 2:ssa virta-apuelektrodin läheisyydessä (kauempana) maaperä oli kivisempää ja peruskallio tuli lähemmäs maanpintaa.

Ensimmäiset käännepestemittaukset tehtiin 60 % säännöllä, eli jänniteapuelektrodi sijoitettiin 60 % etäisyydelle virta-apuelektrodista. Mittauksissa virta-apuelektrodi sijoitettiin 50 metrin etäisyydelle mittaussuuntaan 1. Silmukkamittarilla mittaus suoritettiin siten, että mittaus kattoi potentiaaliohjauselektrodin. Taulukossa 11 on esitetty jätealueen maadoitusmittaustulokset.

TAULUKKO 11 Jätealueen muuntamon mittaustulokset

Mittari	R (Ω)
Maadoitusvastusmittari	19,15
Asennustesteri	19,3
Silmukkatesteri	25,20

Taulukon 11 mittaustuloksista havaitaan, että käännepestemittareiden tulokset ovat yhteneviä. Silmukkamittalaitteen tulos poikkeaa jonkin verran käännepestemittausten tuloksista. Silmukkamittarin vastusarvoon vaikuttaa silmukkapiirin impedanssi, joka muodostuu rinnalla olevien muuntamoiden maadoituselektrodeista ja maadoitusköysistä. Käännepestemittausten vastusarvot muodostuvat ainoastaan muuntamon maadoi-

tuselektrodien maadoitusvastuksesta. Mittauksista havaitaan myös, että suurivastuksinen tulos viittaa säteittäiseen maadoitusjärjestelmään.

Jätealueen muuntamalla suoritettiin myös mittaus, jolla koestettiin elektrodin irtikytkennän vaikutusta maadoitusvastuksen suuruuteen. Mittaus toteutettiin kuvan 19 mittausuuntaan 1 ja mittaus toteutettiin maadoitusvastusmittarilla sekä asennustesterillä vertailun vuoksi. Mittaustulokset on esitetty taulukossa 12.

TAULUKKO 12 Elektrodin irtikytkennän vaikutus mittaustulokseen

Elektrodi	irti R (Ω)	kiinni R (Ω)
Maadoitusvastusmittari	19.17	19.16
Asennustesteri	19.3	19.2

Taulukon 12 mittaustuloksista havaitaan, että maadoituselektrodin irtikytkemisellä ei ole merkitystä tässä tapauksessa. Mittaamalla irtikytkettyä elektrodia, saadaan mittaustulokseksi yksittäisen maadoituselektrodin maadoitusresistanssin arvo. Maadoituselektrodia irtikytkettäessä on otettava huomioon muuntamon irtaantuminen maasta, jolloin vaarana on vaarallisen korkeiden kosketus- ja askeljännitteiden syntyminen. Kun muuntamon sähköverkko irrotetaan maapiiristä, on muuntamo kytkettävä jännitteettömäksi henkilö- ja laitevahinkojen välttämiseksi.

Seuraavana suoritettiin monen pisteen käännepistemittaukset kuvan 19 mukaisiin mittausuuntiin. Mittarina käytettiin Fluke 1621 -maadoitusvastusmittaria ja virtaapuelektrodi sijoitettiin molemmissa mittauksissa 60 metrin päähän, sillä maasto rajoitti pitempiä mittausetäisyyksiä. Mittausuunnat pyrittiin valitsemaan siten, että toinen mittaussuunta oli mahdollisimman keskeltä järjestelmää ja toinen satunnaiseen suuntaan. Mittauksilla haluttiin havainnoida mittaussuunnan vaikutusta mittaustulokseen.

Taulukossa 13 on esitetty käännepistemittauksen mittaustulokset mittaussuunnassa 1 (KUVA 19). Taulukossa on esitetty myös mittarin havaitsemien häiriöjännitteiden suuruudet.

TAULUKKO 13 Jätealueen muuntamon mittaustulokset mittaussuuntaan 1 (KUVA 19)

b (m)	R (Ω)	U (V)
5	0,29	0,4
10	0,32	0,4
15	0,82	0,4
20	2,00	0,3
22,5	2,74	0,3
25	3,93	0,2
27,5	5,52	0,1
30	6,72	0,1
32,5	7,76	0,1
35	8,92	0,1
37,5	10,23	0,1
40	11,46	0,1
42,5	12,86	0,1
45	15,75	0,1
50	24,90	0,2

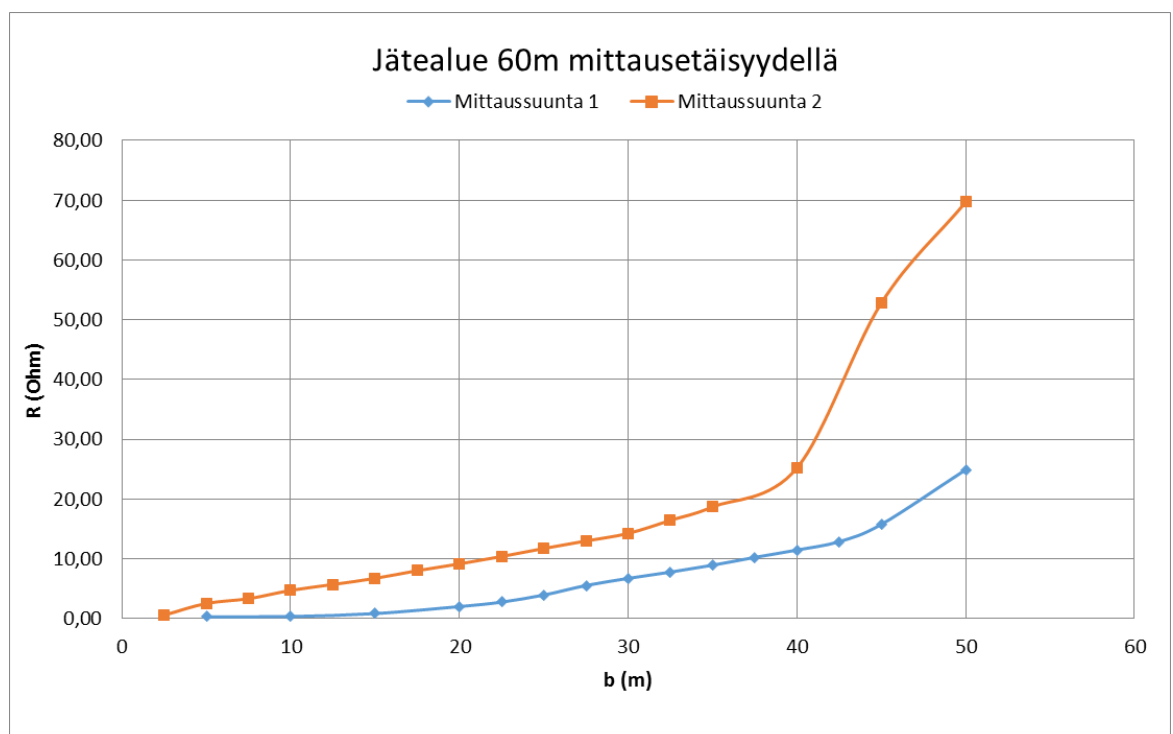
Taulukon 13 symboli b tarkoittaa siirrettävän jännite-apuelektrodin etäisyyttä elektrodista. Taulukon arvoista havaitaan, että mittaussuunnalla ei ollut merkittäviä häiriöjännitteen aiheuttajia. Häiriöjännitteen lähteitä voivat olla esimerkiksi rinnakkaisten järjestelmien indusoimat jännitteet.

Taulukossa 14 on esitetty jätealueen muuntamon käännepestemittauksen mittaustulokset mittaussuunnassa 2 (KUVA 19). Taulukossa on esitetty myös mittarin havaitsemien häiriöjännitteiden suuruudet.

TAULUKKO 14 Jätealueen muuntamon mittaustulokset mittaussuuntaan 2 (KUVA 19)

b (m)	R (Ω)	U (V)
2,5	0,55	0,4
5	2,51	0,3
7,5	3,31	0,3
10	4,70	0,1
12,5	5,69	0,3
15	6,71	0,1
17,5	8,00	0,3
20	9,14	0,1
22,5	10,38	0,2
25	11,72	0,2
27,5	12,98	0,2
30	14,24	0,2
32,5	16,43	0,1
35	18,68	0,2
40	25,20	0,2
45	52,80	0,1
50	69,70	0,1

Taulukon 14 mittaustulosten pohjalta havaitaan, että myöskään mittaussuunta 2:ssa ei ollut merkittäviä häiriöjännitelähteitä. Taulukoiden 13 ja 14 mittaustulosten pohjalta piirrettiin resistanssikuvaajat, joista voitiin määrittää maadoitusresistanssien suuruudet. Resistanssikuvaajat on esitetty kuvassa 20.



KUVA 20 Jätealueen muuntamon resistanssikuvaajat kahdella eri mittaussuunnalla

Kuvan 20 resistanssikuvaajia vertailemalla havaitaan, että mittaussuunta 2:n resistanssiarvot ovat huomattavasti suurempia ja kuvaajien muodot poikkeavat toisistaan. Tuloksista on havaittavissa maaperän epähomogeenisuus ja kallioperän läheisyys mittaussuunta 2:n etäisimmissä pisteissä. Kuvaajista on havaittavissa myös elektrodin läheisyydessä mitatuista pisteistä elektrodin vaikutus käyrämuotoihin. Mittaussuunnassa 1 käännealue on havaittavissa epäselvästi 27–40 metrin välillä olevasta lineaarisesta osasta.

Taulukossa 15 on esitetty kuvan 20 resistanssikuvaajista määritetyt maadoitusresistanssien arvot. Tulokset on määritetty kuvaajista määritettyjen käännealueiden kohdalta tai 60 % säännöllä.

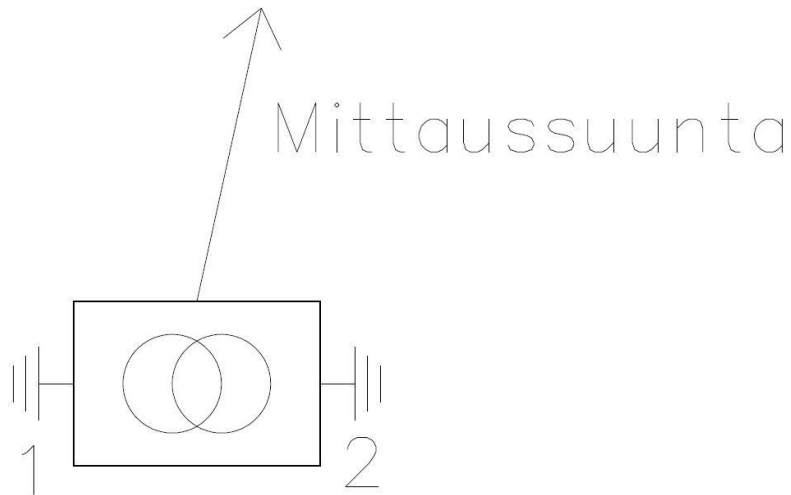
TAULUKKO 15 Jätealueen muuntamolta määritetyt maadoitusresistanssit

Mittaussuunta	R (Ω)
1	11,46
2	14,24

Taulukon 15 mittaustulosten pohjalta havaitaan, että mittaussuunta vaikuttaa merkittävästi saatavan maadoitusresistanssin suuruuteen. Mittauksia tehdessä on tärkeää valita mittaussuunta mahdollisimman keskeltä järjestelmää varsinkin silloin, kun ei voida käyttää riittävän pitkiä mittausetäisyyksiä. Keskeltä järjestelmää tarkoittaa tässä tapauksessa sitä, ettei mitata elektrodien sijaintisuuntiin vaan pyritään suorittamaan mittaukset elektrodien sijaintien välistä. Myös maaperän ominaisuuksiin on hyvä kiinnittää huomiota.

Toiseksi mittauskohteeksi valittiin jätteen välipumppaamon muuntamo. Jätteen välipumppaamolla on puistomuuntamo, jossa suurjännite- ja pienjännitemaadoitukset on yhdistetty. Muuntamo sijaitsee rikastushiekka-alueella, jossa maaperä on tavallisesta maa-aineksista poikkeava. Muuntajaa syötetään maakaapeliverkosta ja muuntamolta on useita yhteyksiä muihin muuntamoihin.

Käännealuemittaukset tehtiin yhteen suuntaan kahdella eri virta-alueelektrodin etäisyydellä ja mittareina käytettiin Fluke 1621 -maadoitusvastusmittaria ja Fluke 1654B -asennustesteriä. Kuvassa 21 on esitetty jätteen välipumppaamon muuntamon maadoitusten arvioidut sijainnit, sekä mittauksille valittu suunta.



KUVA 21 Jätteen välipumppaamon maadoituselektrodien suunnat ja mittauasuunta

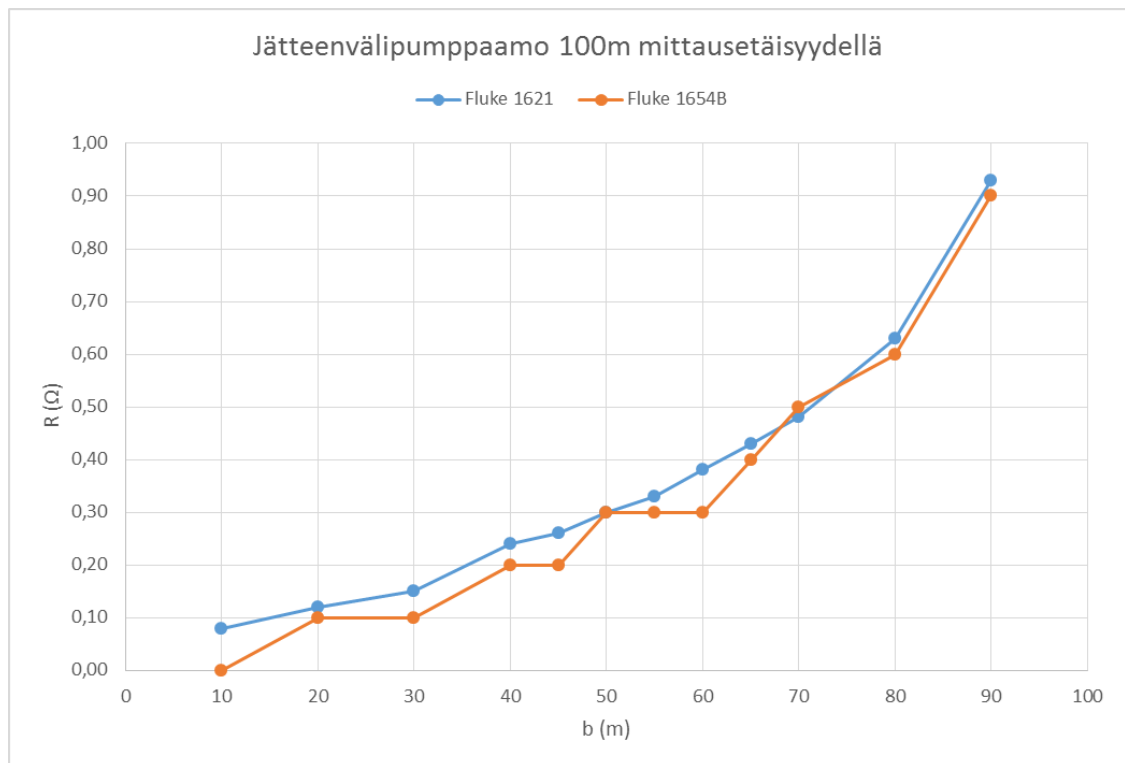
Kuvassa 21 muuntamon vasemmalla puolella olevat maadoituselektrodit (1) koostuvat jätteen välipumppaamon, sekä kahden muun muuntamon syöttökaapelien keskusköystistä. Muuntamon oikealla puolella olevat maadoituselektrodit (2) koostuvat useista osaelektrodeista.

Ensimmäinen mittaus suoritettiin 100 metrin mittausetäisyydellä maadoitusvastusmittareilla ja asennustesterillä. Taulukossa 16 on esitetty jätteen välipumppaamolla suoritetun käännepestemittauksen tulokset virta-alueelektrodin ollessa 100 metrin etäisyydellä.

TAULUKKO 16 Käännepestemittauksen tulokset jätteen välipumppaamolla 100 metrin mittausetäisyydellä

Fluke 1621			Fluke 1654B	
b (m)	R (Ω)	U (V)	b (m)	R (Ω)
10	0,08	0,0	10	0,0
20	0,12	0,0	20	0,1
30	0,15	0,2	30	0,1
40	0,24	0,1	40	0,2
45	0,26	0,2	45	0,2
50	0,30	0,1	50	0,3
55	0,33	0,1	55	0,3
60	0,38	0,2	60	0,3
65	0,43	0,2	65	0,4
70	0,48	0,2	70	0,5
80	0,63	0,2	80	0,6
90	0,93	0,2	90	0,9

Taulukon 16 mittaustuloksista havaitaan, että häiriöjännitteet ovat merkitsemättömän pieniä. Mittaustulosten pohjalta piirrettiin resistanssikuvaajat, joiden pohjalta voitiin määrittää maadoitusresistanssien suuruudet. Kuvassa 22 on esitetty maadoitusvastusmittarin ja asennustesterin käännepestemittausten vertailukuvaajat.



KUVA 22 Käännepestemittauksen resistanssikuvaajat jätteen välipumppaamolla

Kuvan 22 resistanssikuvaajista määritettiin maadoitusresistanssien arvot kuvaajista havaitun käännepesteen tai 60 % kohdalta. Maadoitusvastustesterin (Fluke 1621) kuvaajasta käännepeste on heikosti havaittavissa jänniteapuelektrodin etäisyyden ollessa 45 metriä. Asennustesterin kuvaajassa käännepeste on 50–60 metrin etäisyydellä. Taulukossa 17 on esitetty mittauksista määritetyt maadoitusresistanssit.

TAULUKKO 17 Jätteen välipumppaamolta määritetyt maadoitusresistanssit

Mittari	R (Ω)
Fluke 1621	0,24
Fluke 1654B	0,3

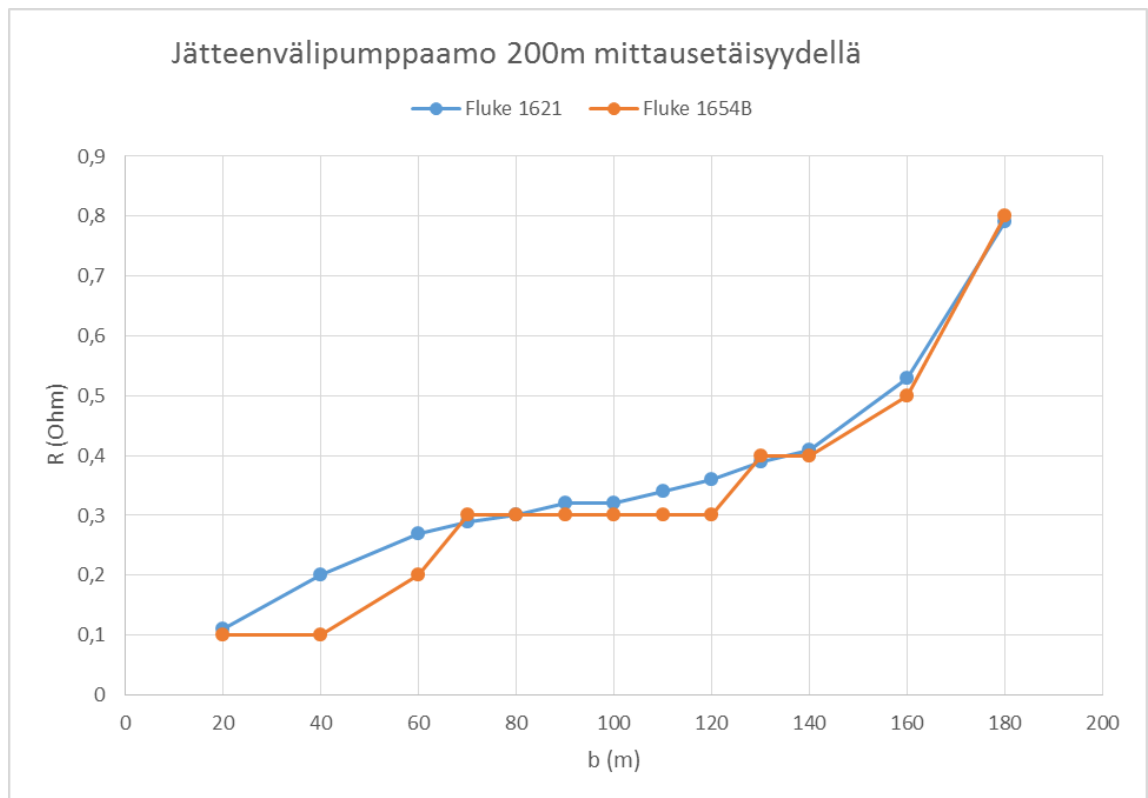
Taulukon 17 mittaustuloksista havaitaan arvojen olevan yhteneviä. Tässä tapauksessa asennustesterin kuvaajasta oli helpompi määrittää käännepeste, mutta mitattaessa yhden pisteen 60 % säännöllä, on kummankin mittarin tulokset ”turvallisella puolella”.

Toisessa mittauksessa mittausetäisyyttä kasvatettiin 200 metrin virta-apuelektrodin etäisyyteen. Mittaus toteutettiin samaan suuntaan kuvan 21 mukaisesti. Taulukossa 18 on esitetty jätteen välipumppaamalla suoritettujen käännepistemittausten vertailutulokset.

TAULUKKO 18 Käännepistemittauksen tulokset jätteen välipumppaamalla 200 metrin mittausetäisyydellä

Fluke 1621			Fluke 1654B	
b (m)	R (Ω)	U (V)	b (m)	R (Ω)
20	0,11	0	20	0,1
40	0,2	0,1	40	0,1
60	0,27	0,2	60	0,2
70	0,29	0,2	70	0,3
80	0,3	0,2	80	0,3
90	0,32	0,2	90	0,3
100	0,32	0,2	100	0,3
110	0,34	0,2	110	0,3
120	0,36	0,2	120	0,3
130	0,39	0,2	130	0,4
140	0,41	0,2	140	0,4
160	0,53	0,2	160	0,5
180	0,79	0,2	180	0,8

Mittaustulosten pohjalta piirrettiin resistanssikuvaajat, joista voitiin määrittää kohteen maadoitusresistanssin suuruus. Maadoitusvastusmittarin tuloksista havaitaan, että mittauksessa ei ole vaikuttanut merkittäviä häiriöjännitteitä. Kuvassa 23 on esitetty maadoitusvastusmittarin ja asennustesterin käännepistemittauksen vertailutulokset.



KUVA 23 Resistanssikuvaajat 200 metrin mittausetäisyydellä jätteen välipumppaamolla

Kuvasta 23 huomataan, että mittaustulokset ovat samankaltaisia. Maadoitusvastusmittarin mittaustuloksista saatava resistanssikuvaaja on lähempänä teoreettista mallia, mutta selvä käännepiste on havaittavissa myös asennustesterin resistanssikuvaajasta. Mittauksissa tehdessä huomattiin, että käytettävyydeltään maadoitusvastusmittari (Fluke 1621) on nopeampi ja vaivattomampi kuin asennustesteri (Fluke 1654B). Mitattaessa 60 % säännöllä, mittarilla ei ole niin suurta merkitystä.

Taulukossa 19 on kerättyä kuvan 23 resistanssikuvaajista määritetyt maadoitusresistanssit ja silmukkamittauksen tulos jätteenvälipumppaamolla. Käännepistemittauksissa tulokset on luettu käännepisteen kohdalta ja silmukkamittauksella siten, että mittaus kattoi muuntamon paikallisen elektrodijärjestelmän.

TAULUKKO 19 Jätteen välipumppaamon mittaustulokset

Mittari	R (Ω)
Silmukkatesteri	0,33
Maadoitusvastusmittari	0,32
Asennustesteri	0,30

Taulukon 19 mittaustuloksista havaitaan, että sopivasta paikasta oikeissa olosuhteissa mitattaessa kaikkien mittareiden mittaustulokset ovat yhteneviä. Myös silmukkamittarilla mittaaminen on luotettavaa, kun mittauspaikan maadoitukset muodostavat verkko-maisen rakenteen. Tuloksista on myös havaittavissa maadoitusjärjestelmän kuulumisen laajaan maadoitusjärjestelmään, sillä mittaustulokset ovat vastusarvoltaan pieniä. Tämä johtuu useiden rinnakkaisten maadoitusyhteyksien muodostamasta kokonaisvastuksesta.

Chauvin Arnoux 6415 -silmukkamittarilla mittaaminen oli käytettävistä laitteista vaivat-tominta. Mittaamiseen ei tarvittu erillisiä mittajohtimia ja usean henkilön työpanosta. Mittarin käyttöön oli kuitenkin perehdyttävä, jotta mittaustuloksista saatiin luotettavia. Mitattaessa oli otettava huomioon, mistä kohdasta järjestelmää mitataan ja milloin sen käyttö on mahdollista. Silmukkamittauksen mitattavan piirin ollessa pidempi tulos on impedanssinen, sillä myös johtimien reaktiivinen komponentti vaikuttaa saatavaan vas-tusarvoon. Silmukkamittauksesta saatava tulos ei ole välttämättä nimenomaan maadoi-tusresistanssin tai -impedanssin tulos, vaan mittauspiirin tulos riippuu tarkasteltavan maadoitusjärjestelmän rakenteesta.

Mitattaessa väärässä paikassa tuloksesta saattaa helposti tehdä virheellisiä tulkintoja. Säteittäisellä maadoitusrakenteella käännepistemittauksella päästään realistisempaan tulokseen. Tarkasteltaessa muuntamon maadoitusten maadoitusresistanssia, mittauskoh-ta on valittava siten, että pihti kattaa koko paikallisen elektrodijärjestelmän. Kun muun-tamalla on useita elektrodeja, mitattaessa yhden elektrodin vastusta mittaustulos vääris-tyy. Mittalaitteen mittausvirta pääsee tällöin kulkemaan lähekkäin olevien maadoi-tuselektrodien välillä ja saatava mittaustulos ei vastaa maadoitusresistanssin suuruutta. Yksittäisestä elektrodista mitattaessa voidaan havainnoida kuitenkin johtimien ja liitos-ten eheyttä.

9.4 Piha-alue

Piha-alueella tarkoitetaan tehdasalueen ulkotiloihin sijoitettuja muuntamoita. Ulko-alueella sijaitsee muun muassa avolouhoksen, ilmastointiasemien ja varasyöttömuunta-jan muuntamot.

Kenttämittauksia tehtiin varasyöttömuuntajalla. Varasyöttömuuntajalla maadoitukset koostuvat neljästä osaelektrodista. Muuntaja sijaitsee aidatulla alueella ja sitä syötetään maakaapeliverkosta.

Mittauksia suoritettiin kaikilla osaelektrodeilla, joista yksi oli muuntajalle tulevien käytöstä poistettujen syöttöjohtojen eristimen suojamaadoitus. Käännepestemittaukset toteutettiin yhteen suuntaan yhden pisteen mittauksina 60 % säännöllä. Silmukkamittaus toteutettiin erikseen jokaisella osaelektrodilla. Mittareina käytettiin Fluke 1621 - maadoitusvastusmittaria, Fluke 1654B -asennustesteriä, sekä Chauvin Arnoux 6145 - silmukavastustesteriä.

Taulukossa 20 on esitetty osaelektrodeista mittaamalla saadut maadoitusvastusten arvot. Yhden elektrodin mittauksessa koestettiin myös työmaadoitusten kytkemisen vaikutusta mittaustuloksiin. Elektrodit 1 ja 3 on säteittäisiä vaakamaadoituselektrodeja, elektrodi 2 on syöttökaapelin keskusköysi ja elektrodi 4 muuntajan vanhan syöttöyhteyden eristimien suojamaadoitus.

TAULUKKO 20 Varasyöttömuuntajan mittaustulokset

Elektrodi	1		2	3	4
Työmaadoitukset	kytketty	ei kytketty	ei kytketty	ei kytketty	ei kytketty
Maadoitusvastusmittari	0,49 Ω	0,48 Ω	0,49 Ω	0,49 Ω	0,49 Ω
Asennustesteri	0,5 Ω	0,5 Ω	0,5 Ω	0,5 Ω	0,5 Ω
Silmukavastustesteri	0,05 Ω	0,05 Ω	1,80 Ω	0,21 Ω	375 Ω

Taulukon 20 mittaustulokset vastaavat suoraan muuntamon kokonaisuomaadoitusresistanssin arvoa. Taulukosta on havaittavissa se, että työmaadoitusten kytkeminen ei vaikuta maadoitusvastuksen arvoon, kun kyseessä on laaja maadoitusjärjestelmä. Tämä johtuu siitä, että yhden elektrodin vastus on lähes merkityksetön, kun järjestelmä koostuu useista rinnankytketyistä elektrodeista. Varasyöttömuuntajan mittaustuloksista havaitaan, että käännepestemittareilta saatavat tulokset ovat yhteneviä ja myös osaelektrodien välillä vastusarvot ovat keskenään yhtä suuria.

Elektrodien yhtä suuret mittaustulokset johtuvat siitä, että niiden välillä on galvaaninen yhteys. Tällöin maadoitusresistanssin määrittämiseksi riittää mittaus yhden maadoituselektrodin liityntäpisteestä. Tällöin ei tosin välttämättä havaita, jos yhden elektrodin yhteys muihin elektrodeihin on katkennut.

Taulukon tuloksista havaitaan, että silmukkamittauksen tulokset poikkeavat käännepistemittausten tuloksista. Tämä johtuu muuntamolla olevien useiden rinnakkaisten elektrodien vaikutuksesta. Silmukkamittauksen elektrodin 1 maadoitusvastuksen arvo viittaa, että elektrodi muodostaa johtavan silmukkapiirin esimerkiksi metallirakenteiden välityksellä. Silmukkamittaus onkin soveliaampi maakaapeliverkossa silmukoita muodostavien maadoitusjohtimien mittaamiseen, sillä muuntamoiden väliset avojohtimiset keskusköydet toimivat samaan aikaan maadoituselektrodeina. Laajaan maadoitusjärjestelmään kuuluvissa osissa osaelektrodeita mitattaessa nähdään kuitenkin elektrodien eheys, kun mittaustulos on kohtuullisen pieni.

9.5 Rikastamo

Rikastamolla mittauksia suoritettiin vaahtopuhaltimen ja painesuotimen muuntamoilla. Rikastamolla on lisäksi kymmenkunta muuta muuntamo. Muuntamoita syötetään maakaapeliverkosta ja ne sijaitsevat sisätiloissa. Mittaukset toteutettiin silmukkamittauksina (Chauvin Arnoux 6145), koska kyseessä on selkeä verkkomainen laaja maadoitusjärjestelmä (Liite 2). Rikastamon maadoitukset muodostavat myös tiheän verkkomaisen rakenteen. Mittaukset suoritettiin silmukoiduille maadoitusjohtimille.

Ensimmäinen mittaus toteutettiin vaahtopuhaltimen muuntamolla. Vaahtopuhallinmuuntamolla on maadoituskisko, josta on yhteyksiä useisiin muihin maadoituspisteisiin (Liite 2). Taulukossa 21 on esitetty vaahtopuhallinmuuntamon maadoituskiskolta mitattujen silmukkavastusten mittaustulokset. Mittaukset toteutettiin johtimiin, joiden oletettiin muodostavan silmukkarakenteen.

TAULUKKO 21 Vaahtopuhallinmuuntamon silmukkamittaustulokset

Yhteys	Z (Ω)
Puhallin, rautaosat	0,13
Pääkeskus	0,21
Muuntaja	0,83
Perustuselektrodi	0,17
Maadoituselektrodi	0,90

Taulukossa 21 mittauspiste kertoo mihin maadoitusjohdin on liitetty. Mittauspisteet puhallin ja rautaosat tarkoittavat vaahtopuhaltimen ja sen läheisyydessä sijaitsevien me-

tallisten osien suojamaadoituksia. Kiskoon oli liitetty myös kaksi erillistä maadoituselektrodiä, jotka oli kytketty molemmista päistä kiskoon. Elektrodiin lenkkien eheyttä ei voitu mitata, koska elektrodit olivat kosketuksissa keskenään ja mittauspiiri muodostui vääristyneesti. Mittaustulosten pohjalta havaitaan kaikkien johtimien muodostavan ehjät silmukkapiirit. Maadoituselektrodin mittauspiiri syntyy maan kautta, jolloin saatava arvo ei kuvasta johtimien vastusarvoa. Arvo on kuitenkin pieni, jolloin maadoituksilla voidaan olettaa olevan pieni potentiaaliero maadoitusjärjestelmän vaikutusalueella.

Toinen mittaus toteutettiin painesuotimen muuntamolla PS2SK:lla. Muuntamolla on kaksi maadoituskiskoa, joista toinen sijaitsee muuntamotilassa ja toinen keskushuoneessa. Maadoituskiskot on liitetty yhteen ja kiskoilta on useita yhteyksiä muihin maadoituspisteisiin (Liite 2). Taulukossa 22 on esitetty painesuotimen muuntamon maadoituskiskojen silmukkamittauksen tulokset. Mittaukset toteutettiin johtimille, joiden oletettiin muodostavan silmukkapiirin.

TAULUKKO 22 Painesuodinmuuntamon mittaustulokset

Muuntamon maadoituskisko	Z (Ω)
Pääkeskuksen kisko	0,20
Ristikytkentä	1,70
Kojeisto	0,09
Muuntaja	0,16
Rikastamon kanaalin maadoituskisko	1,70
Maadoituselektrodi	0,10
Pääkeskuksen maadoituskisko	Z (Ω)
Teräsrakenteet	0,07
Pääkeskus	0,10
Pääkeskuksen kisko	0,20

Taulukossa 22 mittauspiste kertoo mihin maadoitusjohdin on liitetty. Mittaustuloksista havaitaan, että maadoitusjohtimien muodostamat yhteydet ovat kunnossa, sillä mittaustulokset ovat pienivastuksisia. Rikastamon kanaalin maadoituskiskon, sekä perustuksiin, maahan ja muihin metallirakenteisiin liittyvät maadoitusyhteydet ovat laajassa maadoitusjärjestelmässä tarkasteltavia asioita.

Ristikytkentätilan ja rikastamon kanaalin maadoitusyhteyksien suuremmat arvot viittaavat, että maadoitukset muodostavat silmukkayhteyden rakennuksen metalliosien ja pienjännitepiirin suojamaadoitusten kautta, sillä nämä pisteet eivät muodosta suoraa johdin-

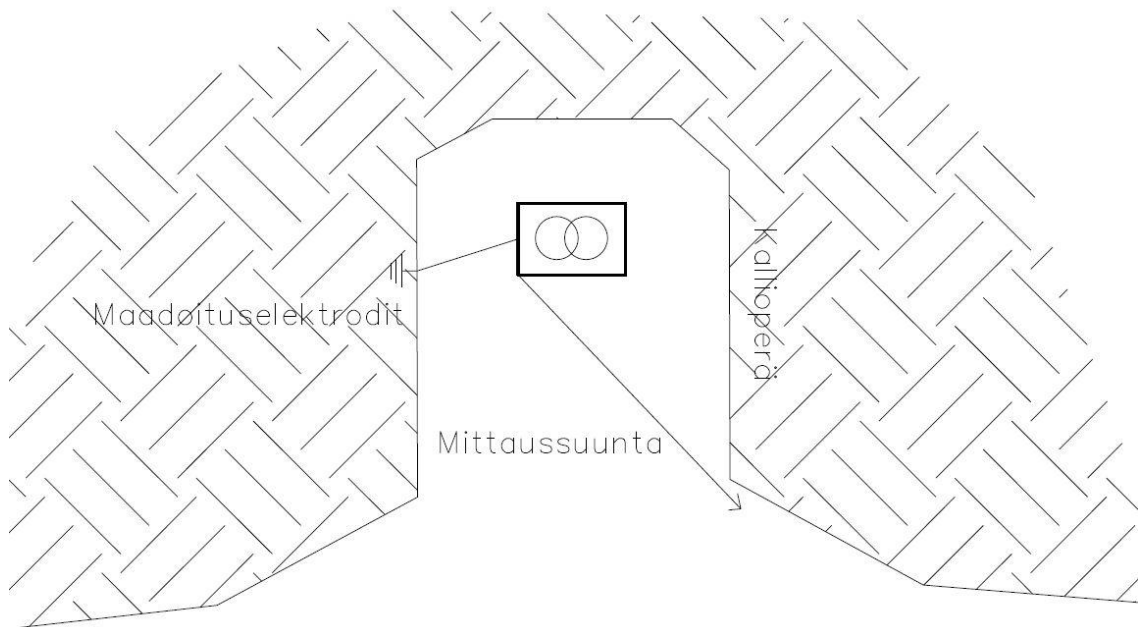
silmukkkayhteyttä. Maadoituselektrodin pienivastusarvo viittaa perustusten metalliosien välityksellä muodostuvasta silmukkkayhteydestä.

9.6 Kaivos

Kaivoksessa kenttämittauksia suoritettiin maadoitusvastusmittarilla ja silmukkatesterillä +1175- ja +1390-muuntamoilla. Kaivoksen jakeluverkko koostuu yhteensä 25 muuntamosta. Käännepestemittauksissa käytettiin Fluke 1621 -maadoitusvastusmittaria.

Käännepestemittauksissa apuelektrodeina käytettiin kalliossa olevia lujitepultteja, sillä erillisten apuelektrodien käyttäminen olisi ollut hankalaa. Mittajohtimiin kytkettiin hau-nleukaliittimet, jolloin lujitepultteihin saatiin luotettavat kontaktit. Lujitepulttien päät puhdistettiin metallipinnalle ennen mittauksen suorittamista. Mittaukset pyrittiin tekemään mahdollisimman pitkällä mittausetäisyydellä olosuhteet huomioon ottaen. Tunnelien muodoista johtuen ei kovin pitkiä mittaetäisyyksiä voitu käyttää, sillä mittauspisteiden todellisten etäisyyksien määrittäminen olisi ollut vaikeaa ja tulokset olisivat vääristyneet.

Ensimmäiset mittaukset suoritettiin +1175-muuntamolla. Muuntamon maadoitukset koostuvat useista kallioon upotetuista maadoitustangoista. Muuntamoa syötetään maa-kaapeliverkosta. Kohteessa mittaukset tehtiin maadoitusvastusmittarilla ja silmukkamittarilla. Mittauksilla tarkasteltiin minkälaisiin tuloksiin erikoislaatuudessa ympäristössä päästään. Kuvassa 24 on esitetty suurpiirteinen mittaussympäristö +1175-muuntamolla. Kuvaan on merkitty myös maadoitusten sijainti sekä käännepestemittauksen suunta.



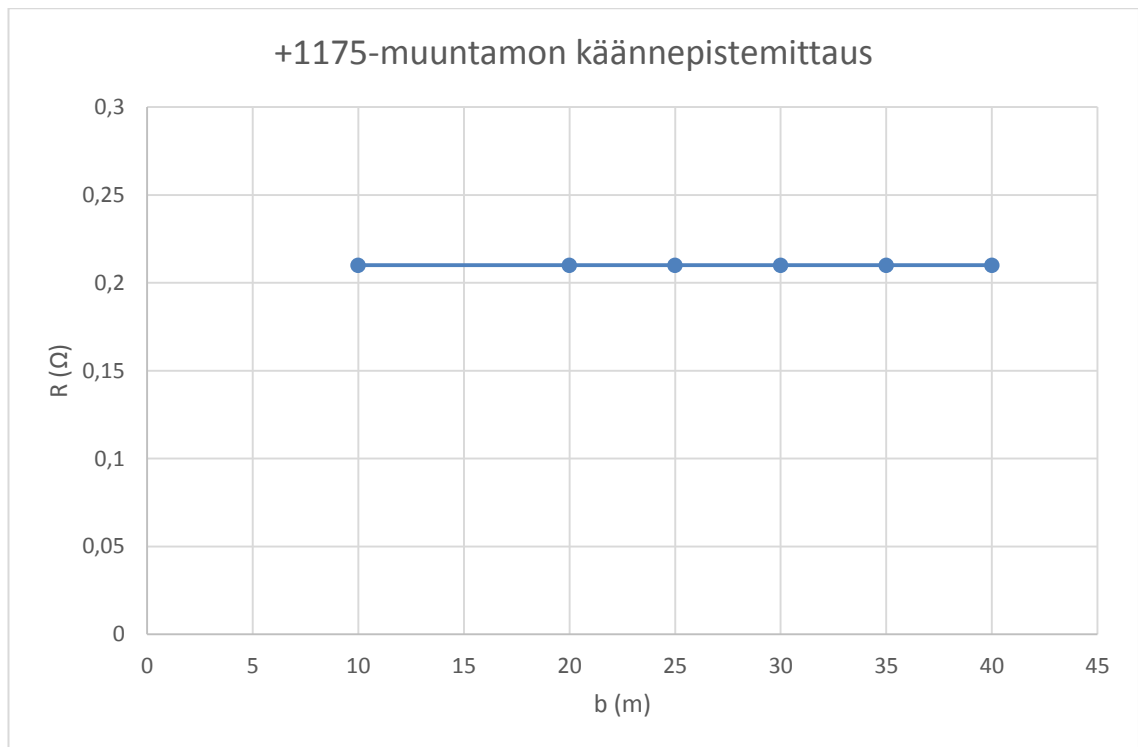
KUVA 24 Muuntamon mittausympäristö, maadoitusten sijainti, sekä mitaussuunta +1175 tasolla

Käännepistemittauksessa mittapisteiksi valittiin sopivissa kohdissa sijaitsevia lujitepultteja. Mittaukset toteutettiin 50 metrin mittausetäisyydellä. Taulukossa 23 on esitetty +1175-muuntamon maadoitusvastusmittarin mittauspisteiden tulokset.

TAULUKKO 23 Käännepistemittauksen tulokset +1175-muuntamolla

Fluke 1621		
b (m)	R (Ω)	U (V)
10	0,21	0
20	0,21	0
25	0,21	0
30	0,21	0
35	0,21	0
40	0,21	0

Taulukon 23 mittaustuloksista havaitaan, että kallioperässä ei ole mittauksissa häiriötä aiheuttavia tekijöitä. Mittaustulosten pohjalta piirrettiin kuvaaja, josta voitiin määrittää maadoitusresistanssin arvo. Kuvassa 25 on esitetty +1175-muuntamon käännepistemittauksen resistanssikuvaaja.



KUVA 25 +1175-muuntamon käännepistemittauksen resistanssikuvaaja

Kuvan 25 pohjalta määritettiin maadoitusresistanssi 60 % kohdalta, sillä kuvaajassa käännepistettä ei ole havaittavissa. Mittaustulos on mielenkiintoinen, sillä vastusarvot ovat yhtä suuria jokaisessa pisteessä.

Silmukkamittarilla mittaus toteutettiin maadoituselektrodeille menevän johtimen ympäriltä. Taulukossa 24 on esitetty määritetyn maadoitusresistanssin ja silmukkamittauksen tulokset.

TAULUKKO 24 +1175-muuntamon mittaustulokset

Mittari	R (Ω)
Fluke 1621	0,21
CA 6145	36,3

Taulukon 24 mittaustulosten pohjalta nähdään, että mittareiden tulokset poikkeavat toisistaan huomattavasti. Silmukkamittarin suuri tulos johtuu siitä, että muuntamolta ei ole johdinyhteyttä toisiin muuntamoihin. Silmukkapiiri syntyy tällöin maadoituselektrodien ja muuntamon rungon ja maan kautta.

Käännepistemittauksesta havaitaan, että kallioperästä määritetty maadoitusvastuksen arvo on pieni vaikka sen pitäisi olla yleensä kallioperässä suuri. Kaivosympäristössä

kallioperässä on kuitenkin malmia, jolloin sen johtavuuden nähdään olevan huomattavasti parempi. Kallioperän todellisen resistiivisyyden voisi mitata maan ominaisvastusmittaukseen kykenevällä mittarilla, jolloin voidaan todeta, onko mittaustulos todella luotettava.

Toinen koemittaus suoritettiin +1390-muuntamolla. Muuntamoja syötetään maakaapeli-verkosta ja maadoitukset on liitetty kiskostoon, josta on useita yhteyksiä putkistoihin ja muihin muuntamoihin. Mittaukset tehtiin silmukkatesterillä, sillä muuntamon maadoitukset muodostivat selkeän verkkomaisen maadoitusjärjestelmän. Mittaukset toteutettiin kaikille maadoituskiskosta lähteville johtimille.

Taulukossa 25 on esitetty +1390-muuntamon maadoituskiskosta lähtevien johtimien silmukkaimpedanssit. Taulukossa pääkuilun maadoitukset, +1300- ja +1400-muuntamo ovat verkkomaisen maadoitusjärjestelmän muodostavia liitoksia. Silmukkapiirien maadoitusjohtimet koostuivat MK KEVI 120 mm²-kaapelista (Liite 3).

TAULUKKO 25 Mitatut silmukkaimpedanssit +1390-muuntamolla

Yhteys	Z (Ω)
Pääkuilun maadoitukset	5,7
Pj-maadoituskisko	1,4
+1370 MEB-kisko	3,0
Muuntaja	0,06
PEN-kisko	0,05
+1300-muuntamo	2,1
+1400-muuntamo	2,8

Taulukon 25 mittaustuloksista havaitaan vastusarvojen olevan kohtuullisia. Muuntajalle menevän suojamaadoituksen ja PEN-kiskon pienet impedanssiarvot kertovat niiden yhteyksien olevan ehjiä. Verkkomaisen piirin muodostavien yhteyksien (pääkuilu, +1370 MEB, sekä +1300- ja +1400-muuntamot) pituudet ovat alle kilometrin mittaisia, jolloin vastusarvojen pitäisi olla pienempiä. Tuloksista on havaittavissa liitosten ja johtimien kulumista, jolloin vastusarvot ovat kaapeleille ominaisia vastusarvoja suurempia.

9.7 Erilliset maadoituskiskot

Kaivosalueella on myös erillisiä maadoituskiskostoja, jotka toimivat maadoitusjärjestelmän osien, esimerkiksi muuntamoiden välisinä liitos- ja risteyskohtina. Kiskoja on muun muassa rikastamolla, nostotorneissa, sekä maanalaisessa kaivoksessa. Mittaukset toteutettiin silmukkamittauksina Chauvin Arnoux 6145 -silmukkavastustesterillä, sillä kiskojen maadoitusyhteydet ovat verkkomaisia. Mittausten tarkoituksena oli tutkia verkkomaisen maadoitusjärjestelmän osien välisten yhteyksien mittaamista.

Koemittaus tehtiin rikastamon alakerran kaapelikanaalin maadoituskiskolla. Mittaukset tehtiin kaikkiin johtimiin, vaikka tarkasteltavia kohteita olivat maadoitusjärjestelmän yhdysjohtimien muodostamat yhteydet. Taulukossa 26 on esitetty rikastamon kaapelikanaalissa sijaitsevan maadoituskiskon mittaustulokset.

TAULUKKO 26 Rikastamon kaapelikanaalin maadoituskiskon mittaustulokset

Yhteys	Z (Ω)
PS2SK	1,70
KM2J	1,00
Malmin nosto, murska	0,73
Torni, Vesijohto	0,26
PM2J	0,69
Kaivostupa	1,00
?	0,61

Taulukossa 26 kysymysmerkillä merkityn mittauskohteen johtimen tietoja ei ollut saatavilla. Taulukossa PS2SK, Torni, Vesijohto, Kaivostupa, ja KM2J ovat verkkomaisen maadoitusjärjestelmän muodostamia silmukkaimpedanssiarvoja. Mittaustuloksista on havaittavissa, että johdinyhteydet ovat hyvässä kunnossa, sillä vastusarvot ovat kohtalaisen pieniä.

Osalla maadoituskiskoista ei ole suoraa johdinsilmukkayhteyttä (esimerkiksi PS2SK), vaan silmukkayhteys muodostuu metallirakenteiden välityksellä. Painesuotimen muuntamon mittauspiste vastaa samaa mittausta, kuin taulukossa 22 (rikastamon kanaalin maadoituskisko), sillä kyseessä on sama johdin. Mittauksissa riittää siis, että mittaus toteutetaan vain yhdestä pisteestä turhien päällekkäisyyksien välttämiseksi.

10 TOIMINTA VIAN AIKANA

Maadoitusten toimivuuden toteamiseksi maadoitusresistanssin mittaamisen lisäksi oli selvitettävä maahan kulkevan virran suuruus maasulkuvirran avulla, sekä vian laukaisuajan arvot. Näiden tietojen pohjalta pystyttiin laskemaan maadoituksissa vaikuttava maadoitusjännite, sekä edelleen määrittämään sallitun kosketusjännitteen rajoissa pysyminen. Sallitun kosketusjännitteen toteutuminen tehdään verkon osissa, jotka eivät kuulu laajaan maadoitusjärjestelmään, mutta tässä työssä maadoitusjännitettä on tarkasteltu kaikissa mitatuissa kohteissa havaintojen tekemiseksi.

10.1 Kosketusjännitelaskenta

Maasulkuvirran suuruus määritettiin osin arvioituilla suureilla verkon monimuotoisuuden ja rakenteen vuoksi. Esimerkiksi kaapelien tarkkojen maakapasitanssien määrittäminen olisi ollut hankalaa useiden vanhojen johtotyyppien ja pituuksien tiedon puutteen vuoksi. Lisäksi kaivokseen sijoitetut kaapelit kulkevat osin ilmassa ja putkissa, jolloin valmistajataulukoissa maakapasitansseiksi ilmoitetut arvot eivät ole välttämättä luotettavia.

Kaivosalueella 6 kV jakeluverkko koostuu 70–300 mm² kupari- ja alumiinikaapeleista. Kaapeleissa on paperieristeisten kaapeleiden lisäksi myös muun muassa muovi- ja öljyeristeisiä kaapeleita, sillä verkko on rakennettu osin siihen aikaan, kun niiden käyttäminen oli yleistä. Taulukossa 27 on koottuna määritetyt kaapelityypit ja johdinpituudet. Kaapelit, joiden eristemateriaaleja ei tiedetty varmasti, oletettiin muovieristeisiksi.

TAULUKKO 27 Kaivosalueen 6 kV jakeluverkon johtopituudet

A (mm ²)	Muovieristeinen (m)	Paperieristeinen (m)	Yht. (m)
70	2983	860	3843
95	481	0	481
120	706	1360	2066
150	0	1000	1000
185	0	1100	1100
240	230	0	230
300	3237	450	3687
Yht. (m)	7637	4770	12407

Taulukon 27 pohjalta jakeluverkon kokonaispituudeksi saadaan noin 12,4 kilometriä. Kaapelityyppien määrittämisen jälkeen voidaan laskea verkon kokonaiskapasitanssi, kun tiedetään kaapeleiden maakapasitanssit. Kaapeleiden kapasitanssiarvot pituusyksikköä kohti on esitetty taulukossa 28.

TAULUKKO 28 Kaapeleiden maakapasitanssiarvoja (Alatalo, P. 1975, 50–51; Prysmian Group)

A (mm ²)	Muovieristeinen (μF/km)	Paperieristeinen (μF/km)
70	0,25	0,27*
95	0,28	0,30
120	0,30	0,33
150	0,32	0,36
185	0,35	0,39
240	0,40	0,44
300	0,43	0,49

Taulukon 28 *-symbolilla merkitty arvo on arvioitu 50 mm²- ja 95 mm²-kaapeleiden maakapasitanssiarvojen väliltä, sillä kyseisen kaapelikoon maakapasitanssiarvoja ei ollut ilmoitettu valmistajataulukossa. Kaapelin maakapasitanssi voidaan laskea kaavalla:

$$C_0 = l \cdot c_0 \quad (11)$$

, missä

l on kaapelin pituus kilometreinä

c_0 on kaapelin maakapasitanssi kilometriä kohti.

Tällöin esimerkiksi 70 mm²-muovieristeisen kaapelin kokonaiskapasitanssiksi kaavalla 10 saadaan taulukoiden 26 ja 27 arvoja käyttäen:

$$C_0 = 2,983 \text{ km} \cdot 0,25 \frac{\mu\text{F}}{\text{km}}$$

$$C_0 = 0,74575 \mu\text{F}$$

$$C_0 \approx 0,75 \mu\text{F}$$

Taulukossa 29 on esitetty jokaisen kaapelikoon ja -tyypin maakapasitanssiarvot, sekä verkon kokonaiskapasitanssi. Verkon kokonaiskapasitanssi on laskettu edellä käydyllä tavalla summaamalla jokaisen kaapelityypin ja -koon kapasitanssit yhteen.

TAULUKKO 29 Kaapeleille lasketut kokonaiskapasitanssiarvot

A (mm ²)	Muovieristeinen (μF/km)	Paperieristeinen (μF/km)	Kokonaiskapasitanssi (μF)
70	0,746	0,232	0,978
95	0,135	0,000	0,135
120	0,212	0,449	0,661
150	0,000	0,360	0,360
185	0,000	0,429	0,429
240	0,092	0,000	0,092
300	1,392	0,221	1,612
Yht. (μF)	2,576	1,691	4,267

Taulukon 29 pohjalta verkon kokonaiskapasitanssiksi saadaan noin 4,27μF. Maasulkuvirta lasketaan tilanteessa, jossa vikaimpedanssi on nolla, koska tällöin maasulkuvirta ja maadoitusjännite ovat suurimmillaan. Maasulkuvirta maasta erotetussa verkossa lasketaan kaavalla 3, jolloin maasulkuvirraksi saadaan:

$$I_{ef} = 3\omega C_0 U_v$$

$$I_{ef} = 3 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50\text{Hz} \cdot 4,267 \cdot 10^{-6}\text{F} \cdot \frac{6000\text{V}}{\sqrt{3}}$$

$$I_{ef} = 13,9311\text{A}$$

$$I_{ef} \approx 13,9\text{A}$$

Maasulkuvirran pohjalta voitiin määrittää maahan kulkevan virran suuruus. Maahan kulkevan virran laskeminen on jokaisessa piirissä maadoitusjärjestelmän rakenteesta riippuvainen, jolloin laskenta on tapauskohtaista. Esimerkiksi jätealueen reduktioker-toimena käytettiin arvoa yksi, koska kaapeleiden aiheuttamia reduktiokertoimia ei voi kohtuudella määrittää. Tällöin maahan kulkevan virran suuruudeksi saadaan arvo, joka ei ole ainakaan pienempi kuin todellisuudessa. Maahan kulkevan virran suuruudeksi kaavalla 8 saadaan:

$$I_E = r \cdot I_{ef}$$

$$I_E = 1 \cdot 13,9311\text{A}$$

$$I_E = 13,9311\text{A}$$

$$I_E \approx 13,9\text{A}$$

Maadoitusjännitteen suuruus maadoituselektrodin liittymispisteessä lasketaan kaavalla 2, jolloin esimerkiksi jätteen välipumppaamalla määritetyn maadoitusresistanssin (TAULUKKO 19) avulla maadoitusjännitteeksi saadaan:

$$U_E = Z_E \cdot I_E$$

$$U_E = 0,32\Omega \cdot 13,9311A$$

$$U_E = 4,45795V$$

$$U_E \approx 4,5V$$

Maadoitusimpedanssina on käytetty maadoitusresistanssin arvoa, sillä jätteenvälipumppaamalla suoritettulla mittaustavalla saatu vastusarvo kuvastaa järjestelmän kokonaisvastusta maahan ($R_E \approx Z_E$).

Sallitun kosketusjännitteen toteutumiseksi maadoitusjännitteen suositelluksi raja-arvoksi oli Suomessa asetettu $2U_{Tp}$. Sallitun kosketusjännitteen suuruus on esitetty kuvassa 3 ja pienin sallittu kosketusjännite vian kestäessä yli 10 sekuntia on 80V. Lasketaan sallitun maadoitusjännitteen suuruus kaavalla 1, kun maasulkuvika kestää enemmän kuin 10 sekuntia:

$$U_E = F \cdot U_{Tp}$$

$$U_E = 2 \cdot 80V$$

$$U_E = 160V$$

Tällöin maadoitusjännite saa olla kuitenkin korkeintaan 150V ($2U_{Tp}$). Edellisen laskun perusteella maadoitusjännitteen voidaan todeta olevan lasketussa tapauksessa riittävän pieni ($4,5V < 160V$).

Jätteen välipumppaamon maadoitukset kuuluvat laajaan maadoitusjärjestelmään. Tällöin rasitusjännitteiden huomioon ottamista suur- ja pienjännitejärjestelmien maadoitusten yhdistämiselle ei vaadita. Jos rasitusjännite otettaisiin huomioon, olisi sallittu arvo tällöin taulukon 7 mukaisesti 250V. Tässä tapauksessa määrävänä raja-arvona olisi kuitenkin sallittu maadoitusjännite, sillä se on kriittisempi ($150V < 250V$).

Taulukossa 30 on esitetty työssä käsiteltyjen mittauskohteiden maadoitusten toiminnan tarkastelu. Maadoitusjännitteet on määritetty edellä käsitellyllä tavalla. Taulukossa JÄ-

VÄ tarkoittaa jätteen välipumppaamaa ja U_{Tp} sallittua kosketusjännitettä. Vian laukaisuajat selvitettiin muuntamoiden lähtöjä suojaavien releiden asetteluista. Sallitussa maadoitusjännitteen arvossa on otettu sallitun rasiusjännitteen suuruus huomioon. Eli taulukossa sallituksi maadoitusjännitteen arvoksi on asetettu pienempi ja kriittisempi raja-arvo.

TAULUKKO 30 Maadoitusten toiminta vian aikana

Mittauspaikka	R_E (Ω)	I_E (A)	Vian laukaisu-aika (s)	U_{Tp} (V)	Sallittu U_E (V)	Laskettu U_E (V)	Toiminta
Jätealueen muuntamo	11,46	13,9	-	80	150	159,7	!
JÄVÄ:n muuntamo	0,32	13,9	-	80	150	4,1	OK
Varasyöttömuuntaja	0,50	13,9	>20	80	150	7,0	OK
+1175 muuntamo	0,21	13,9	>20	80	150	2,9	OK

Jätealueen ja jätteen välipumppaamon muuntamot ovat saman maasulkusuojauksen alla ja niillä ei ole laukaisevaa suojausta. Kun maadoitusjännite on pieni, ei maadoitusten vaikutusalueella esiinny suuria potentiaalieroja ja henkilöiden on turvallista liikkua ja työskennellä alueella.

Taulukon 30 pohjalta havaitaan, että jätealueen muuntamolla laskennallinen kosketusjännite on hieman suurempi, kuin suositusarvo. Jätealueen maadoituksille olisi tällöin hyvä tehdä parannustoimenpiteitä. Jätealueella muuntamo sijaitsee suljetulla alueella ja alueella kuljetaan aina kengät jalassa, jolloin kosketusjännitteitä määriteltäessä lisäresistanssien huomioon ottaminen on mahdollista (KUVA 4). Tällöin maadoitusjännite olisi tosin mitattava lisäresistanssien avulla voltti-ampeerimenetelmällä.

Jätealueen muuntamon maadoitukset ovat myös yhteydessä jätteen välipumppaamon muuntamoon maadoitusköyden ja äärijohtimien metallivaippojen välityksellä. Maadoitusköyden ja metallivaippojen aiheuttaman reduktiokertoimen määrittämisellä maahan kulkevan virran arvosta saadaan tarkempi ja maadoitusjännitteen laskennallinen suuruus pienenee. Muiden maadoitusjärjestelmien maadoitusjännitteistä voidaan huomata laajalle maadoitusjärjestelmälle tyypilliset alhaiset maadoitusjännitteen ja -resistanssin arvot.

10.2 Parannustoimenpiteet

Maadoituksille parannustoimenpiteinä voidaan suorittaa lisäämällä maahan maadoituselektrodeja ja potentiaaliohjauselektrodeja muuntamolle tai rinnakkaismaadoitusjohtimia muuntamoiden välille. Maadoitusyhteyksien lisäämisellä muuntamon kytkeytymien verkkomaiseen maadoitusjärjestelmään paranee. Tällöin riittäisi tarkastus muuntamon liittymisestä laajaan maadoitusjärjestelmään esimerkiksi silmukkamittauksella.

Toinen mahdollisuus on säätää maasulkusuojan toiminta-aikaa riittävän pieneksi. Yhtenä vaihtoehtona on myös sammutuskuristimen asentaminen päämuuntajalle, jolloin maasulkuvirta saadaan pienemmäksi. Sammutuskuristimen asentaminen on kuitenkin kustannuksiltaan muita vaihtoehtoja huomattavasti arvokkaampi. Näistä vaihtoehdoista edullisin on lisäelektrodien asentaminen.

11 ALUEKOHTAINEN KUNNONVALVONTA

Maadoitusmittausten ja tutkittujen materiaalien pohjalta määritettiin kohteisiin soveltuvat mittaustavat. Maadoituksille määritettiin yleispätevät mittaustavat aluekohtaisesti, mutta myöhemmin tarkoituksena on dokumentoida maadoituskohtaiset mittaustavat kunnossapito-ohjelmaan. Koska tarkasteltavassa kohteessa on maasta erotettu verkko, jokaiselle 6 kV liittymän alaiselle maadoitusjärjestelmälle voidaan määrittää sallittu maadoitusimpedanssin arvo, sillä laskennallisesti ainoa muuttuja on maasulkusuojien laukaisuaika.

Mittauksista on hyvä dokumentoida suoritettujen mittausten mittaustapa, -suunta ja -etäisyys. Dokumentissa on hyvä mainita myös muiden maadoitusten osien tarkastukset ja huomiot. Muita tarkasteltavia asioita voi olla esimerkiksi potentiaalintasausjohtimen mittaus ja aistinvaraiset havainnot. Ympäristöolosuhteista johtuen on mittausvälin hyvä olla hieman lyhyempi kuin yleensä. Sopiva mittausväli kaivosympäristöön voisi olla esimerkiksi neljä vuotta.

Mittausten pohjalta havaittiin, että käännepistemenetelmällä voidaan mitata hyvin yksittäisten elektrodien ja muuntamoiden maadoitusresistansseja. Silmukkamittaus soveltuu taas paremmin muiden maadoitusten osien tarkasteluun. Seuraavana on käsitelty erikseen jokaisen ympäristön kunnonvalvontaan sopivia tapoja.

11.1 Ulkoalueet

Ulkoalueiden maadoitusten säteittäisemmän rakenteen vuoksi maadoituselektrodeja on luotettavampaa mitata käännepistemittauksina, sillä silmukkamittauksilla mittausten ei saada välttämättä luotettavia maadoitusolosuhteiden arvoja. Poikkeuksena alueella oli jätteen välipumppaamon muuntamo, jossa maadoituksilla oli riittävästi rinnakkaisia maadoituselektrodeja. Silti käännepistemittaus antaa luotettavamman mittaustuloksen.

Kunnonvalvontamittauksissa 60 % säännöllä yhden pisteen käännepistemittäminen riittää, sillä mittaustulosten pohjalta käännepiste sijoittuu ennen 60 % etäisyyttä. Jos mittaustulos poikkeaa huomattavasti edellisen mittauskerran arvosta, voidaan mittaus suorittaa monen pisteen käännepistemittauksena, jolloin maadoitusresistanssin määrittäminen on helpompaa. Mittaukset on järkevää toteuttaa samaan suuntaan kuin edelli-

sellä kerralla, jolloin mittaustulokset ovat vertailtavissa keskenään. Myös mittausetäisyys vaikuttaa saatavaan maadoitusresistanssin arvoon. Mittauksissa on hyvä ottaa huomioon mittaussuuntaa valittaessa maaperän tasalaatuisuus ja riittävän pitkä mittausetäisyys.

Maadoituksille on hyvä suorittaa myös silmukan muodostavien maadoitusosien mittaus silmukkamittauksena, jolloin voidaan hyvin havainnoida järjestelmään liittyvien osien ja liitosten eheyksiä. Tällaisia kohteita ovat esimerkiksi potentiaalintasausjohtimet ja potentiaalinohjauselektrodit. Mittausten ohella on hyvä suorittaa samalla aistinvaraista tarkastelua maadoitusten näkyvillä oleville osille.

Maadoitusresistanssin mittaukset on järkevämpää toteuttaa Fluke 1621 - maadoitusvastusmittarilla, sillä mittari näyttää myös mahdolliset häiriöjännitteiden suuruudet ja on käytettävyydeltään parempi. Mitattaessa on muistettava aina sähkötyöturvallisuuden noudattaminen. Yksittäisen elektrodin irrottaminen saattaa aiheuttaa järjestelmän irtaantumisen maasta, jos elektrodi on ainoa maadoituksilla oleva maayhteys.

Silmukkamittauksella voidaan tarkastella maadoitusten muita osia, esimerkiksi muuntamoiden välisten potentiaalintasausjohtimien ja potentiaalinohjauselektrodien eheyksiä. Muuntamoiden välisten maadoitusköysien eheyksiä on mahdollista tarkastella myös jatkuvuusmittauksilla, jolloin mittauksissa voidaan hyödyntää muuntamoiden välisiä vaihejohtimia. Tällöin muuntamot joudutaan tosin kytkemään jännitteettömiksi ja mitaus aiheuttaa jakelukatkoksen syötettävälle alueelle. Tätä vaihtoehtoa ei kuitenkaan tarkasteltu tässä työssä.

11.2 Piha-alue

Piha-alueella osa maadoituksista muodostaa säteittäisemmän rakenteen ja osa verkko-maisen. Mittaustulosten pohjalta piha-alueen maadoitukset on luotettavampaa mitata käännepistemittauksina. Mittauksissa riittää yksi koko järjestelmän kattava mittaus muuntamolla, sillä mittauksesta saadaan suoraan järjestelmän kokonaismaadoitusresistanssi.

Kun muuntamon maadoitusten tiedetään muodostavan riittävän verkkomaisen rakenteen, riittää silmukkamittaus verkkorakenteen muodostavilta maadoitusjohtimilta. Samalla voidaan havainnoida lisäksi muiden maadoituskomponenttien eheyttä.

11.3 Rikastamo

Rikastamon maadoitukset muodostavat verkkomaisen maadoitusjärjestelmän, jossa maadoitukset on silmukoitu muuntamoiden ja muiden maadoituspisteiden välillä. Maadoitusjärjestelmän osien välisiä yhteyksiä voidaan tarkastella silmukkamittauksin. Mittauksissa on hyvä ottaa huomioon mistä kohti mittaus voidaan toteuttaa.

Rikastamon maadoitusten yhteyttä referenssimaahan voidaan tarkastella myös käännepistemittauksena. Tällöin nähdään miten hyvä yhteys koko rikastamon maadoitusjärjestelmällä on todellisuudessa maahan.

11.4 Kaivos

Kaivoksessa verkkomaisen maadoitusjärjestelmän osia tarkasteltiin silmukkamittauksella. Silmukkamittauksella nähdään hyvin sekä maadoituselektrodien, sekä muihin maadoitukseen yhteydessä olevien yhdysjohtimien eheydet. Mittauksilla voidaan tarkastella myös liitoksien kuntoa.

Osalla muuntamoiden maadoituksista oli kuitenkin säteittäisiä piirteitä, jolloin näiden maadoitusolosuhteita voidaan mitata käännepistemittauksina. Käännepistemittauksissa 60 % säännöllä mitaaminen riittää koemittauksen perusteella kuntotarkastuksissa. Mittauksissa apuelektrodeina toimii hyvin kalliossa sijaitsevat lujitepultit. Mittaukset on hyvä tehdä olosuhteet huomioon ottaen mahdollisimman pitkällä mittajohtimilla, esimerkiksi 100–200 metrin etäisyyksillä, jolloin mittaustuloksista saadaan mahdollisimman luotettavia.

Uusia muuntamoita käyttöönotettaessa monen pisteen käännepistemittaus on luotettavampi, kun mitataan säteittäisessä järjestelmässä. Verkkomaisissa maadoitusosissa silmukkamittaus on riittävä todentamaan uuden muuntamon liittymisen laajaan maadoitusjärjestelmään.

Kaivoksessa ongelmana on maadoitusten nopea kuluminen. Kulumisen vuoksi muuntamoiden maadoitusten väliset yhteydet on haastavaa pitää kunnossa ja niiden uusiminen on työlästä ja taloudellisesti rasittavaa.

Ongelmasta päästään ainakin osittain eroon muodostamalla muuntamoilla paikallisia maadoitusjärjestelmiä useilla maadoituselektrodeilla, joilla ei tarvitse olla yhteyksiä muihin maadoituksiin. Maadoituksille voidaan suorittaa ensin suunnittelua, josta määritetään onko tällaisella rakenteella järkevää lähteä toteuttamaan maadoituksia. Tällöin maadoituksille täytyy määrittää maadoitusimpedanssit ja tarkastella maadoitusjännitteen pysymistä sallituissa arvoissa. Etuna tällaisen maadoitusjärjestelmän toteuttamisessa on kaivoksen malmipitoisen kallioperän pieni ominaisvastus, joka pienentää maadoituselektrodien maadoitusresistanssia.

Mittaukset voidaan tehdä käännepistemittauksina ja maan ominaisvastus on aiheellista selvittää esimerkiksi Wenner-menetelmällä. Paikallista maadoitusjärjestelmää suunniteltaessa tulee huomioon ottaa myös se, että rinnakkaiset maadoitusjärjestelmät eivät sijaitse toistensa vaikutusalueella, jolloin maadoitettujen osien potentiaalierojen syntyminen on mahdollista. Kaivoksessa tällainen toteuttaminen on mahdollista ainakin paikotellen, sillä muuntamot sijaitsevat eri tasoilla, jolloin muuntamoiden maadoitukset eivät pääse helposti toistensa vaikutusalueille.

11.5 Erilliset maadoituskiskot

Erillisistä maadoituskiskostoista mittauksilla voidaan selvittää maadoitusjärjestelmän osien välisten yhteyksien eheyttä. Eli mittauksilla ei tarkastella itsessään maadoitusresistansseja, vaan maadoituskiskojen välisten yhdysjohdinten tarkastelua. Mittauksilla voidaan tarkastaa myös yksittäisiä maadoituskohteita, esim. metalliosien maadoitusjohtimia, kun tiedetään, että maadoitukset muodostavat silmukkayhteyden. Säteittäisissä osissa johtimet voidaan mitata esimerkiksi jatkuvuusmittauksin.

Mittauksista havaittiin, että kiskostojen välisten maadoitusjohtimien mittaus ei toimi joka paikassa luotettavasti. Maadoitusjohdinten ollessa eristämättömiä mittauspiiri vääristyy sen metallikosketusten (kaapelihyllyt ym.) vuoksi, jolloin mittauksilla ei nähdä itse johdinsilmukan eheyttä. Tällöin mittaukset voidaan koettaa toteuttaa eri kohdasta johdinta, mutta tällöinkään ei mittauksesta saatava tulos ole täysin luotettava.

12 POHDINTA

Työn pohjalta havaittiin, että uusia muuntamoita rakennettaessa maadoitusresistanssin määrittäminen monen pisteen käännepistemittauksena ja oikein toteutettuna on luotettavin valinta säteittäisessä ja verkkomaisessa maadoitusjärjestelmässä. Käännepistemittaus käytettävissä olevista mittareista on järkevimmin toteutettavissa Fluke 1621 - maadoitusvastusmittarilla. Kunnossapitomittauksissa 60 % säännöllä mittaaminen riittää, sillä mittaustulos on riittävän lähellä maadoituselektrodin kunnan toteamiseksi.

Verkkomaisessa järjestelmässä, kun kuulutaan laajaan maadoitusjärjestelmään, voidaan mittaus toteuttaa silmukkamittauksena toteamalla muuntamon maadoitusjärjestelmän liittyminen laajaan maadoitusjärjestelmään. Silmukkamittaus on tosin melko epäluotettava, jos maadoitusjärjestelmän rakennetta ei tunneta riittävän hyvin. Silmukkamittauksen toteuttaminen on myös haastavaa paikoitellen. Sekä käännepiste-, että silmukkamittauksen toteuttaminen vaatii mittaajalta mittaustekniikoihin perehtymistä ja erilaisten tekijöiden huomioon ottamista. Erilaiset häiriötekijät, muun muassa mittaussuunnat ja maadoitusjärjestelmän rakenne, voivat vaikuttaa saatavan mittaustuloksen luotettavuuteen merkittävästi.

Tämän työn pohjalta ajatuksena on tuottaa maadoitusten kunnonvalvontaan soveltuva kunnossapito-ohjelma esimerkiksi yhtiön käytössä olevaan tietojärjestelmään. Kunnossapito-ohjelmaan on tarkoitus rakentaa tarkemmat ohjeistukset kaikista tarkastuskohteista, sillä tähän työhön ei ollut järkevää ottaa kaikkia, noin 60 maadoituskohdetta tutkimuksen kohteeksi. Ohjeistukseen on hyvä sisällyttää ainakin yleisohjeistus mittaustekniikoista, jokaiseen kohteeseen soveltuva mittaustapa-, etäisyys ja -suunta, sekä maadoituksista tarkastettavat asiat ja mittauskohde. Mitatuista kohteista on hyvä dokumentoida vähintään mittaustulokset ja havaitut asiat.

Tutkimustyön pohjalta myös maan ominaisvastuksen mittaamiseen kykenevän mittarin hankinta olisi järkevää esimerkiksi kaivoksen ja rikastushiekka-alueiden maaperän sähköisten ominaisuuksien selvittämistä varten. Tällöin nähdään onko kohteissa mitatut arvot realistisia ja myös uusien ja lisättävien maadoitusten suunnittelu helpottuu. Silmukkamittarille on hyvä suorittaa myös uudelleen kalibrointi. Mittauksia tehdessä havaittiin, että maadoitusjärjestelmän rakenteen tuntemus on tärkeää, jotta mittaukset voidaan toteuttaa luotettavasti.

Kaivoksella maanalaisten maadoitusyhteyksien kuluminen on ollut myös ongelma. Yhtenä ratkaisuna tähän voisi olla muuntamoiden paikallinen maadoittaminen ilman muuntamoiden välisiä maadoitusyhteyksiä. Tällöin maadoitukset eivät tosin enää liittyisi laajaan maadoitusjärjestelmään ja ne olisivat alttiina suuremmille maadoitusjännitteille ja maadoitusten välisille potentiaalieroille. Maadoituksissa syntyvien maadoitusjännitteiden suuruudet olisi tällöin määritettävä mittauksin tai laskennallisesti.

Työ oli kaikinensa haasteellinen, mutta erittäin kehittävä. Maadoitusten toiminnan ja rakenteen tuntemus oli ennestään melko vähäistä ja aiheeseen täytyi tutustua perusteellisesti perehtymällä erilaisiin aihetta käsitteleviin materiaaleihin. Lisäksi asioita pohdittiin haastatteleamalla alan ammattihenkilöitä. Omat haasteensa työlle toi myös kaivoksen erikoislaatuiset ympäristöolosuhteet, jossa tietoja täytyi soveltaa ympäristöön ja olosuhteisiin sopiviksi.

LÄHTEET

Alatalo, P. 1975. Voimakaapelit ja asennusjohdot. Helsinki: Oy Nokia Ab Kaapelitehdas.

ABB Oy. 2000. TTT-käsikirja 2000–07.

Centre for Underground Physics in Pyhäsalmi. Pyhäsalmen kaivos. Luettu 29.3.2016
http://www.cupp.fi/index.php?option=com_content&view=article&id=3&Itemid=41&lang=fi

Chauvin Arnoux. CA 6145-käyttöohje.

Chauvin Arnoux. Maadoitusvastuksen mittaussopas. Luettu 20.4.2016
https://chauvin-arnoux.fi/wp-content/uploads/2014/09/FI_-Maadoitusvastuksen-mittaussopas.pdf

Energiateollisuus ry. n.d. Verkostosuositus TJ 1:05. Sähkönjakeluverkkojen maadoitusmittaukset. Luettu 15.1.2016.
<http://www.sahkoverkkoekstra.fi/kirjasto-koulutus/verkostosuositukset>

First Quantum Minerals Ltd. Pyhäsalmi mine. Luettu 29.3.2016.
<http://www.first-quantum.com/Our-Business/operating-mines/Pyhasalmi/default.aspx>

Fluke Corporation. Fluke 1621- käyttöohje.

Fluke Corporation. Fluke 1654B- käyttöohje.

Luukkonen, K., Lähteenmäki, S., Mäki, T. & Oertel, A. n.d. Pyhäsalmen kaivos. Pyhäjärvi: Pyhäsalmi Mine Oy.

Outokumpu Mining Oy. 2001. Maadoituskaavio.

Partanen J. 2011. Sähkönjakelutekniikka. Maasulkusuojaus-luentomateriaali. LUT Energy. Luettu 9.11.2015.
<https://noppa.lut.fi/noppa/opintojakso/bl20a0500/luennot/maasulkusuojaus.pdf>

Prysmian Group. Voimakaapelit 10 kV ja 20 kV. Kaapelien tekniset tiedot. Luettu 13.1.2016.
http://fi.prysmiangroup.com/en/business_markets/markets/pd/download/datasheets/AHXAMK-W_10kv.pdf

Pyhäjärven Kehitys Oy. Calliolab. Luettu 20.3.2016.
<https://calliolab.com/>

Pyhäsalmi Mine Oy. 1984. Maadoituskaavio.

Sesko ry. 2012. SFS-käsikirja 600-1. Sähköasennukset. Osa 1: SFS 6000 Pienjännitesähköasennukset. 1. painos. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS ry

Sesko ry. 2015. SFS-käsikirja 601. Suurjännitesähköasennukset ja ilmajohdot. 2. painos. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS ry

Sesko ry. 2015. SFS-6001. Suurjännitesähköasennukset. 4. painos. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS ry.

Sähköinfo Oy. n.d. ST-kortisto. ST 53.22. Luettu 6.10.2015

<http://severi.sahkoinfo.fi.elib.tamk.fi/item/542?search=53.22>

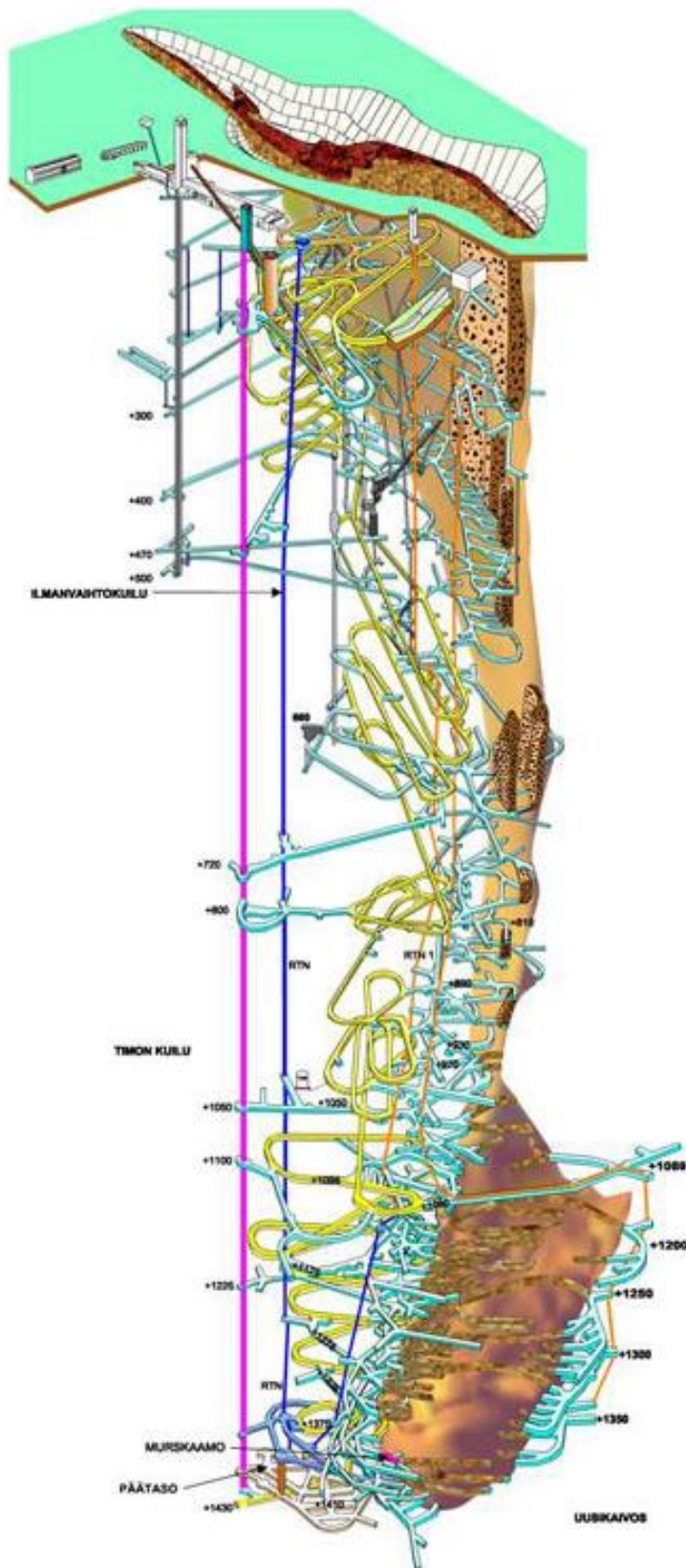
Tiainen, E., Nurmi, T. & Koivisto, P. 2014. Maadoituskirja. Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto STUL ry. 6. uusittu painos. Espoo: Sähköinfo Oy.

Turku Energia. 2013. Verkkouutinen. Turku Energia kehittämään Pyhäsalmen kaivoksesta jättimäistä sähkövarastoa. Luettu 12.10.2015

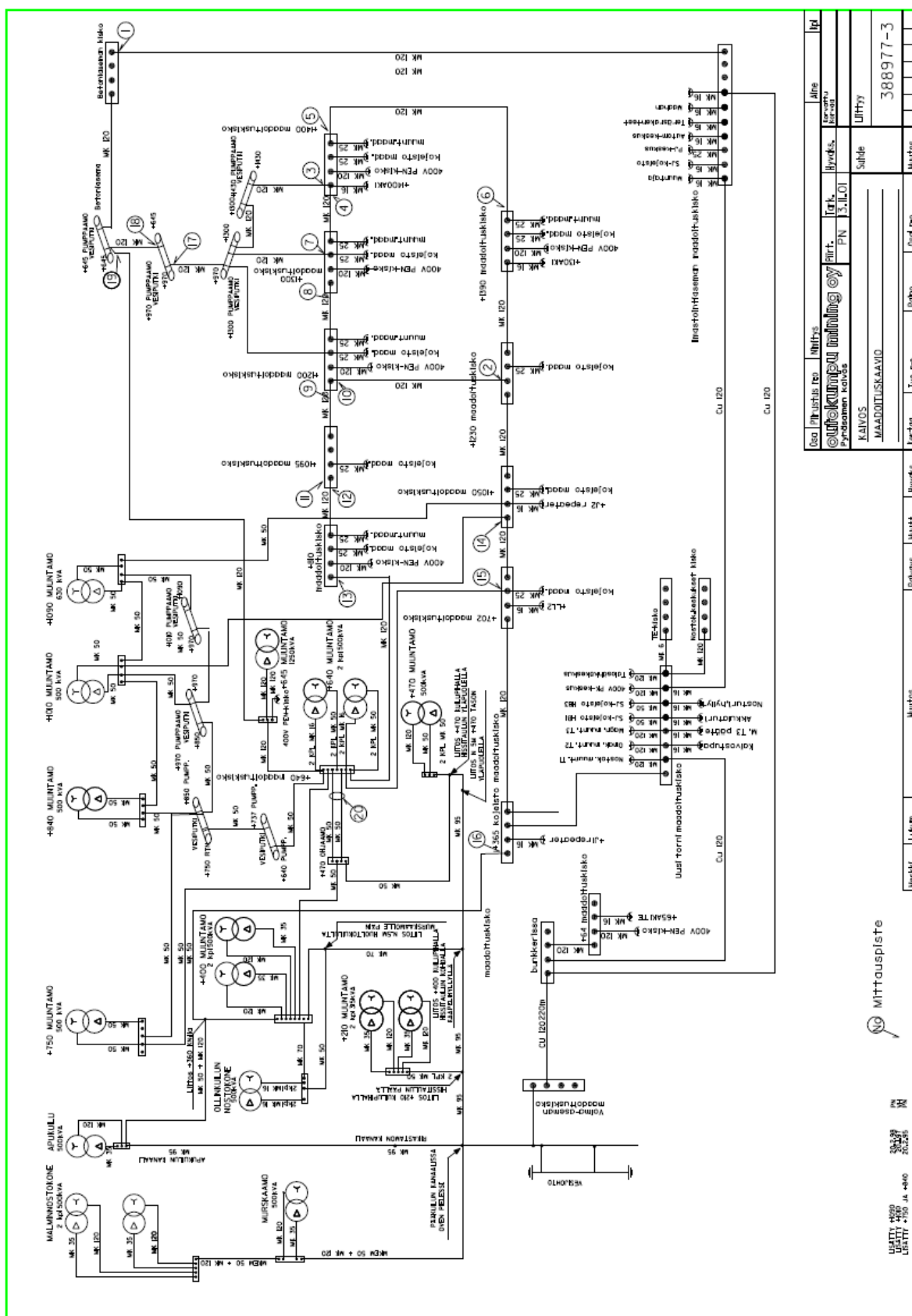
<http://www.turkuenergia.fi/ajankohtaista/2013/pyhasalmen-kaivoksesta-kehitetaan-jattimaista-sahkovarastoa/>

LIITTEET

Liite 1. Pyhäsalmen kaivoksen maanalainen infrastruktuuri ja malmio (Centre for Underground Physics in Pyhäsalmi)



Liite 3. Maanalaisen kaivoksen maadoituskaavio (Outokumpu Mining Oy 2001)



MITTAUSPILTE

UUTTI 420
 UUTTI 440
 UUTTI 730 ja 440