



**SAVONIA**

OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO  
TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN ALA

# KAIIVOSALUEEN JAKELU- VERKON MAADOITUSMIT- TAUKSET

TEKIJÄ: Tommi Kemppainen

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala			
Koulutusohjelma/Tutkinto-ohjelma Sähkötekniikan tutkinto-ohjelma			
Työn tekijä(t) Tommi Kemppainen			
Työn nimi Kaivosalueen jakeluverkon maadoitusmittaukset			
Päiväys	2.6.2018	Sivumäärä/Liitteet	31/26
Ohjaaja(t) Yliopettaja Juhani Rouvali, lehtori Jari Ijäs			
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Eltel Networks Pohjoinen Oy/Terrafame Oy			
<p>Tiivistelmä</p> <p>Tässä insinööriyössä toteutettiin keskijännitejakeluverkon maadoitusmittauksia käännepistemenetelmällä. Maadoitusmittaukset tehtiin Terrafame Oy:n sähköjakeluverkossa, jota käytetään maasta erotettuna ja nimellisjännite on 20 kV.</p> <p>Tavoitteena oli suunnitella ja toteuttaa maadoitusmittauksia laajasta maadoituksesta erillään olevista muuntamoista. Mittauskohteita olivat erilaiset puistomuuntamot ja pylväsmuuntamot. Kohteiksi valittiin 16 kappaletta muuntamoita, joista maadoitusvastusta ei oltu vielä mitattu. Mittausten tarkoituksena oli varmistaa maadoitusten riittävyys alueella. Maadoitusmittauksista saatujen tulosten, maasulkuvirran ja vian poiskytkentäajan avulla pääteltiin, syntykö vaarallisia kosketusjännitteitä. Työssä käsitellään myös maadoitusten parantamista, sekä maasulkuvirran pienentämiskeinoja.</p> <p>Teoriaa käsitellään lyhyesti maadoitusmittauksista, maan ominaisuusresistiivisyyden mittaamisesta ja maasulusta maasta erotetussa verkossa.</p> <p>Opinnäytetyön tuloksena saatiin tärkeää tietoa maadoitusverkon kunnosta, sekä maadoitusolosuhteista, joita voidaan hyödyntää maadoitusverkon rakennus- ja kunnossapitotöissä. Mittaustuloksien perusteella voidaan määritellä suojausasetukset tarkemmiksi.</p>			
Avainsanat Maadoitusmittaukset, käännepistemenetelmä, kosketusjännite			

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme in Electrical Engineering			
Author(s) Tommi Kemppainen			
Title of Thesis Earthing Measurements of Mining Distribution Network			
Date	2 June 2018	Pages/Appendices	31/26
Supervisor(s) Mr Juhani Rouvali, Principal Lecturer, Mr Jari Ijäs, Senior Lecturer			
Client Organisation /Partners Eltel Networks Pohjoinen Oy/Terrafame Oy			
<p><b>Abstract</b></p> <p>The subject of the thesis was to make earthing measurements of the medium voltage distribution network.</p> <p>The aim was to design and implement measurements of the earthing which are separated from wide earthing. The measurement targets were various pad-mounted substations and pole-mounted transformer stations. 16 transformer stations were selected as targets, of which earthing resistance had not been yet measured. The earthing measurements were designed to ensure the adequacy of the grounding in the area. Based on the results of earthing measurements, earth fault current and breaking time, it was concluded that hazardous contact voltages are generated. Also, the improvement of the grounding and the reduction of the earth-fault current were dealt with in this thesis.</p> <p>First, theory of earthing measurements, measuring the characteristic resistance of a ground, and earth-fault in an earth separated network was studied. The earthing measurements were carried out using the inflection point method. Earthing measurements were made in the distribution network of Terrafame Oy, which is used as earth separated with a nominal voltage of 20kV.</p> <p>As a result of this thesis, important information about the condition of the earthing network was obtained, as well as the earthing conditions that can be utilized in the construction and maintenance of the earthing network. Based on the measurement results, it is possible to define the protection settings more accurately.</p>			
<p><b>Keywords</b> Earthing measurements, touch voltage</p>			

## ESIPUHE

Haluan kiittää kaikkia opinnäytetyössäni auttaneita ja mukana olleita ihmisiä. Erityiset kiitokset opinnäytetyön ohjaajille Juhani Rouvalille Savonialta ja Toni Mikkoselle Elteliltä. Kiitokset myös Joonas Riikoselle Terrafamelta, jolta sain tarvitsemani tiedot Terrafamen jakeluverkosta.

Kuopiossa 2.6.2018

Tommi Kemppainen

## SISÄLTÖ

1	JOHDANTO .....	7
2	MAADOITUKSET .....	8
2.1	Maadoitusten suunnittelu .....	8
2.1.1	Mekaaninen kestävyys.....	9
2.1.2	Terminen kestävyys .....	9
2.2	Maadoitusjännite .....	10
2.3	Kosketusjännite .....	11
3	MAASULKU .....	13
3.1	Maasulku maasta erotetussa verkossa .....	15
4	MAADOITUSMITTAUKSET .....	17
4.1	Maadoitusvastuksen mittausmenetelmät .....	17
4.1.1	Käännepestemenetelmä (3-napamenetelmä) .....	17
4.2	Maaperän resistiivisyyden mittaus .....	18
4.2.1	Wenner-menetelmä.....	19
5	TULOKSET .....	21
5.1	Maaperän resistiivisyyden mittaukset .....	21
5.2	Maadoitusvastusten mittaukset.....	22
5.3	Kosketusjännitteen määrittäminen .....	24
5.4	Tuloksien yhteenveto .....	27
5.5	Maadoitusten parantamisehdotus .....	28
6	YHTEENVETO.....	31
	LÄHTEET JA TUOTETUT AINEISTOT .....	32
	LIITE 1: MAADOITUSELEKTRODIEN TYYPI JA MINIMIMITAT (SFS-KÄSIKIRJA 601 2015, 114.) .....	33
	LIITE 2: 20 KV KAAPELIEN JOHTOTIETOJA 1/3 (SA5:94 1994.) .....	34
	LIITE 3: 20 KV KAAPELIEN JOHTOTIETOJA 2/3 (SA5:94 1994.) .....	35
	LIITE 4: 20 KV KAAPELIEN JOHTOTIETOJA 3/3 (SA5:94 1994.) .....	36
	LIITE 5: MUUNTOPIIRIN MAADOITUKSET, KUN TAVOITETASO $U_E \leq 2 \times U_{TP}$ (RJ 19:16 2016.) ....	37
	LIITE 6: MUUNTOPIIRIN MAADOITUKSET, KUN TAVOITETASO $U_E \leq 4 \times U_{TP}$ , AMKA-VERKKO (RJ 19:16 2016.) .....	37
	LIITE 7: MUUNTOPIIRIN MAADOITUKSET, KUN TAVOITETASO $U_E \leq 4 \times U_{TP}$ , KAAPELI-VERKKO (RJ 19:16 2016.).....	38

LIITE 8: MUUNTOPIIRIN MAADOITUKSET, KUN TAVOITETASO $U_E \leq 5 \times U_{TP}$ (RJ 19:16 2016.)....	38
LIITE 9: PYLVÄSMUUNTAMON MAADOITUSKAAVIO (RM 5:16 2016.).....	39
LIITE 10: PYLVÄSMUUNTAMON MAADOITUSKAAVIO (RM 5:16 2016.).....	40
LIITE 11: PYLVÄSMUUNTAMON ERILLINEN MAADOITUS (RM 5:16 2016.) .....	41
LIITE 12: MAADOITUSVASTUSMITTAUKSEN TULOKSET (KEMPPAINEN 2017.) .....	42
LIITE 13: MAADOITUSVASTUKSIEN MITTAUSSUUNNAT (KEMPPAINEN 2017.) .....	47
LIITE 14: MAADOITUSMITTAUSSUUNNITELMA (KEMPPAINEN 2017.).....	55
7 MITTAUSSUUNNITELMA.....	55
7.1 Mittauskohteet.....	55
7.2 Mittalaitteet .....	56
7.3 Aikataulu .....	56
7.4 Mittaustapa .....	56
7.5 Tulosten merkitseminen .....	56
7.6 Lisätietoja/linkit/lähteet .....	56
LIITE 15: MAADOITUSVASTUKSEN MITTAUSPÖYTÄKIRJA.....	57

## 1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön aiheena on kaivosalueen jakeluverkon maadoitusmittaukset. Aiheen sain esimieheltäni Toni Mikkoselta työskennellessäni Eltel Networks Pohjoinen Oy:llä kesän 2017. Aihe tuli vastaan Terrafame Oy:n kaivosalueen sähköjakeluverkon 12-vuotisten määräaikaistarkastuksien lähestyessä. Kaivoksen tehdasalueella on laajamaadoitusverkko, mutta kauempana olevat muuntamot ovat tästä erillään. Uuden muuntamon käyttöönoton yhteydessä on suoritettava maadoitusten mittaust. Laajan maadoitusverkon eheys on varmennettava standardin SFS 6001 mukaan vähintään 12 vuoden välein, ja laajasta hajallaan olevan maadoitusverkon kuntotarkastus vähintään kuuden vuoden välein. Tässä opinnäytetyössä suoritetuista maadoitusmittauksista suurin osa oli vanhan maadoituksen kuntotarkastuksia ja osa käyttöönottotarkastuksia. Terrafamen sähköjakeluverkko koostuu kahdesta 63 MVA:n 110/20 kV päämuuntajasta, ja jakeluverkon nimellisjännite on 20 kV. Verkko on maasta erotettu ja siinä on paljon kaapelointia, joten maasulkuvirrattkin ovat suuret.

Opinnäytetyö aloitettiin selvittämällä, mitä kohteita halutaan mitata yhdessä Terrafamen henkilökunnan kanssa. Kohteiksi valittiin muuntamoita yhteensä 16 kappaletta. Osasta mittauskohteista mitattiin myös maan ominaisresistiivisyys. Maadoitusvastuksen mittaustavaksi valittiin yleisimmin käytetty käännepestemenetelmä ja maan ominaisresistanssi mitattiin Wenner-menetelmällä.

Mittauksien tarkoituksena oli varmistaa, ettei jakeluverkossa pääse esiintymään vaarallisia kosketusjännitteitä henkilöiden, eläinten ja laitteiden turvallisuuden vuoksi. Maadoituksille on määritelty sähköiset ja mekaaniset vaatimukset standardissa SFS 6001.

Työn tilaajana oli Eltel Networks Pohjoinen Oy. Yrityksen toimipiste sijaitsee Kajaanissa ja vuonna 2016 se työllisti 261 henkilöä. Eltel Networks Pohjoinen Oy kuuluu Eltel-konserniin.

Terrafame Oy on Sotkamossa kaivostoimintaa harjoittava suomalainen monimetalliyhtiö. Yhtiön päätuotteita on nikkeli, sinkki, kupari ja koboltti. Henkilöstöä yrityksellä on noin 650 henkilöä.

Opinnäytetyön aihe on mielenkiintoinen ja työn aikana oppimani asiat maasulkujen piirteistä ja maadoituksista tulevat varmasti hyödyksi työelämässäni.

## 2 MAADOITUKSET

### 2.1 Maadoitusten suunnittelu

Suurjänniteverkon maadoitusten suunnittelussa ja kunnossapidossa noudatetaan SFS 6001-standardia. Jos kyseessä on yhdistetyt suur- ja pienjännitemaadoitukset, on maadoitusten täytettävä myös SFS 6000-standardin vaatimukset (Verkostosuositus RM 3:16). Jos suur- ja pienjännitemaadoitukset ovat lähellä toisiaan eivätkä muodosta laajaa maadoitusjärjestelmää, osa suurjännitejärjestelmän maadoitusjännitteestä voi esiintyä pienjännitejärjestelmässä. Tästä syystä suositellaan maadoitusten yhdistämistä, jos vain mahdollista. (SFS-käsikirja 601 2015, 103)

Maadoitusjärjestelmän suunnittelussa olennaiset tekijät ovat vikavirran suuruus, vian kesto aika ja maaperän ja maadoituselektrodin ominaisuudet (SFS-käsikirja 601 2015, 95). Maadoituksen tarkoituksena on estää maadoitusjännitteestä syntyvät laiteviat, sekä henkilön turvallisuudelle vaarallisten kosketusjännitteiden syntyminen. Uutta maadoitusjärjestelmää suunniteltaessa voidaan edetä seuraavan suunnittelumenetelmän mukaan:

- a) tietojen keruu (maasulkuvirrat, vian kesto aika, verkon rakenne)
- b) toiminnallisiin vaatimuksiin perustuva maadoitusjärjestelmän alustava suunnittelu
- c) määritetään, onko se osa laajaa maadoitusjärjestelmää
- d) jos ei ole osa laajaa maadoitusjärjestelmää, niin määritetään maaperän ominaisuudet, asennuspaikalla esiintyvä resultoiva maadoitusimpedanssi
- e) määritetään maasulkuvirtaan perustuen maadoitusjärjestelmästä maahan tunkeutuva virta
- f) määritetään verkon rakenteeseen, maaperän ominaisuuksiin ja rinnakkaisiin maadoitusjärjestelmiin perustuen kokonaisuimpedanssi
- g) määritetään maadoitusjännite
- h) määritetään sallittu kosketusjännite
- i) jos maadoitusjännite on alle sallitun kosketusjännitteen, on suunnittelu valmis
- j) jos ei ole, määritetään ovatko kosketusjännitteet maadoitusjärjestelmän sisällä ja läheisyydessä alle sallittujen arvojen
- k) määritetään aiheuttavatko siirtyvät potentiaalit vaaraa sähköasennuksen ulko- tai sisäpuolella
- l) määritetään joutuvatko pienjännitelaitteet alttiiksi liian suurille rasisitusjännitteille. Jos joutuvat, ryhdytään toimenpiteisiin, jotka voivat sisältää suur- ja pienjännitemaadoitusten erottamisen toisistaan. (SFS-käsikirja 601 2015, 100)



### 2.1.1 Mekaaninen kestävyys

Maadoitusjärjestelmä suunnitellaan siten, että vikavirta ei ylitä termisiä ja mekaanisia suunnittelu-  
raja-arvoja. Maadoitusten on pysyttävä toimintakuntoisena koko asennuksen odotettavan eliniän.  
Korroosiokestävyyden ja mekaanisen lujuuden vuoksi maadoituselektrodeille on asetettu vähimmäis-  
poikkipinnat SFS 6001-standardissa. Maadoituselektrodien minimimitat ja poikkipinnat ovat esitet-  
tynä erillisessä liitteessä (LIITE 1). Maadoitusjohtimille on annettu seuraavat vähimmäispoikkipinnat:

- kupari: 16 mm<sup>2</sup>
- alumiini: 35 mm<sup>2</sup>
- teräs: 50 mm<sup>2</sup> (SFS-käsikirja 601 2015, 96).

### 2.1.2 Terminen kestävyys

Mekaanisen lujuuden lisäksi maadoitukset täytyy mitoittaa myös esiintyvien vikavirtojen suuruuden  
mukaan, eli termisen lujuuden mukaan (SFS-käsikirja 601 2015, 97). Maadoitukset suunnitellaan  
siten, että lopulliset vikavirran aiheuttamat lämpötilat eivät heikennä maadoitusjohtimien tai elektro-  
dien materiaalia, tai maadoituksia ympäröivä materiaali ei vahingoitu. Maadoitusten poikkipinnan  
täytyy olla siis riittävän suuri. Poikkipinnan suuruuden valintaan vaikuttaa ainakin seuraavat asiat:

- Vikavirran suuruus
- Vian kestoaika
- Maadoitusten materiaali
- Ympäristö.

Standardin SFS 6001 mukaan alle 5 sekuntia kestävillä vikavirroilla maadoitusjohtimen tai maadoituselektrodin poikkipinta lasketaan kaavalla

$$A = \frac{I}{K} \sqrt{\frac{t_f}{\ln \frac{\theta_f + \beta}{\theta_i + \beta}}} \quad (1)$$

missä:

$A$  on poikkipinta [ $\text{mm}^2$ ]

$I$  on johtimen virran tehollisarvo [A]

$t_f$  on vikavirran kesto aika [s]

$K$  on virrallisen osan materiaalista riippuva vakio

$\beta$  on virrallisen osan resistanssin lämpötilakertoimen käänteisarvo lämpötilassa  $0\text{ }^\circ\text{C}$

$\theta_i$  on alkulämpötila. Arvo saadaan esim. julkaisusta IEC 60287-3-1. Jollei kansallisissa taulukoissa ole annettu muuta arvoa, ympäröivän maan lämpötilana 1 metrin syvyydessä tulisi käyttää arvoa  $20\text{ }^\circ\text{C}$

$\theta_f$  loppulämpötila [ $^\circ\text{C}$ ].

Vakiolle  $K$  on annettu arvot yleisimmille maadoitusjohtin/elektrodi materiaaleille alla olevassa taulukossa (TAULUKKO 1).

TAULUKKO 1. Materiaalivakiot  $K$  (SFS-käsikirja 601 2015, 97.)

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

## 2.2 Maadoitusjännite

Maadoitusjännite syntyy, kun maasulkuvirta kulkee maadoitetun osan kautta. Maadoitusjännite saadaan selvitettyä yhtälöllä

$$U_m = R_m \cdot I_e \quad (2)$$

missä

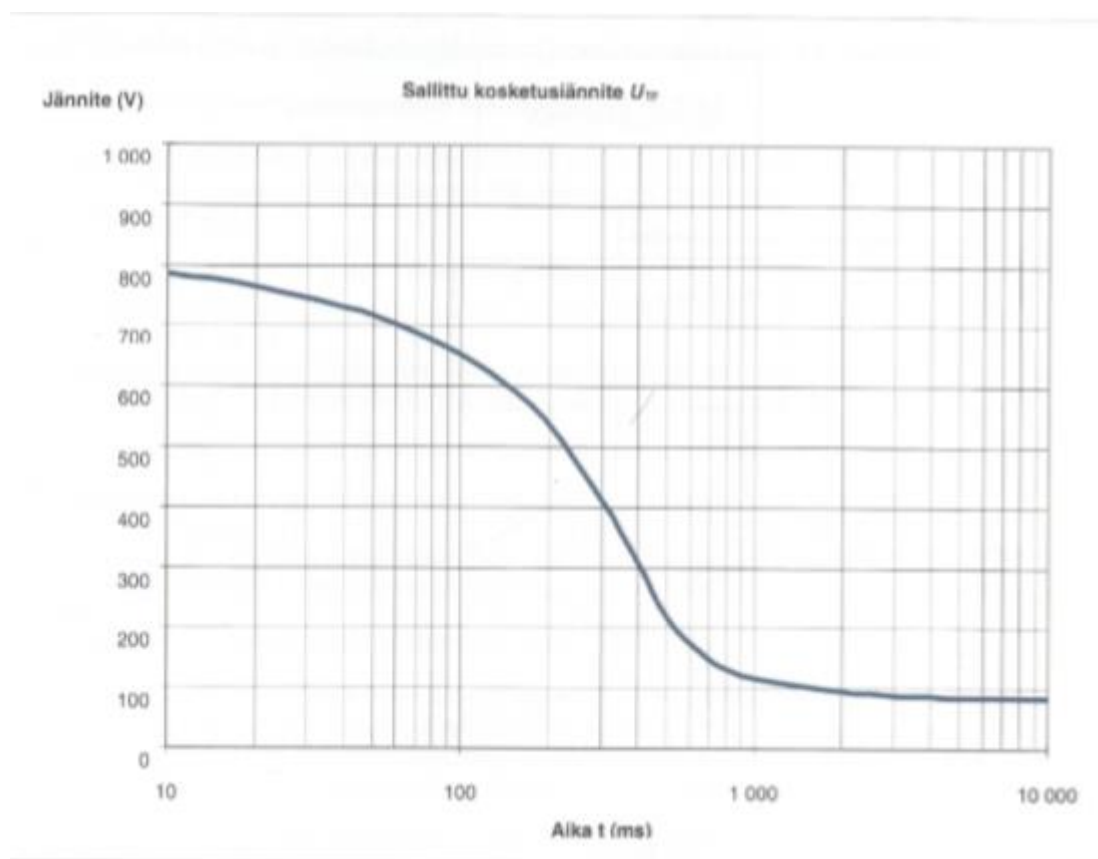
$U_m$  on maadoitusjännite (V)

$R_m$  on maadoitusresistanssi ( $\Omega$ )

$I_e$  on maasulkuvirta (A) (Verkostosuositus SA 5:94).

Maadoitusjännitteen avulla määritetään suurin sallittu kosketusjännite, jonka suuruus on tärkeä tekijä maadoitusten suunnittelussa. Kuten yllä olevasta yhtälöstä voidaan huomata, maadoitusjännitteen arvo voidaan pienentää joko maadoitusresistanssia tai maasulkuvirtaa pienentämällä. Maadoitusresistanssia voidaan pienentää maadoitusjärjestelmää parantamalla esimerkiksi lisäämällä maadoituselektrodeja tai liittämällä järjestelmä laajaan maadoitukseen. Maasulkuvirran pienentäminen onnistuu joko jakamalla galvaanisesti yhteen kytketty verkko pienempiin osiin tai kompensoimalla maasulkuvirtaa sammutuskuristimen avulla.

### 2.3 Kosketusjännite



KUVA AJA 1. Sallittu kosketusjännite EN 50522 (SFS-käsikirja 601 2015, s 101.)

Maadoitusjärjestelmän suunnittelun yhteydessä täytyy määrittää suurin sallittu kosketusjännite. Yllä olevassa kuvassa (KUVA AJA 1) on esitettyinä sallittu kosketusjännite  $U_{TP}$  ajan suhteen. Jos vikavirran kestoaika on yli 10 s, voidaan kosketusjännitteen arvona käyttää 80 V. Sallitun kosketusjännitteen suuruuteen vaikuttaa siis vikavirran kestoaika. Kuvassa esitetty kosketusjännite perustuu kosketukseen paljaasta kädestä paljaaseen käteen tai paljaasta kädestä paljaaseen jalkaan. Jos kyseinen maadoitusjärjestelmä ei kuulu laajaan maadoitukseen, on esiintyvä maadoitusjännite  $U_E$  määriteltävä joko laskennallisesti tai mittaamalla. Maadoitusjännite ei saa ylittää arvoa

$$U_E \leq F \times U_{TP} \quad (3)$$

jossa kertoimen  $F$  arvoksi sallitaan Suomessa yleensä 2. Tietyin edellytyksin sallitaan kertoimen arvoksi myös 4 tai 5. (SFS-käsikirja 601 2015, 150)

Jos esimerkiksi teknisistä tai taloudellisista syistä ei voida saavuttaa tavoitetasoa 2 ( $F = 2$ ), voidaan käyttää tavoitetasoa 4 seuraavin edellytyksin:

- $U_E \leq F \times U_{Tp} \leq 1200 \text{ V}$ , kun poiskytkentäaika on  $t_f \leq 5 \text{ s}$ . Tämän ehtona on kj- ja pj-maadoitusten yhdistäminen.
- Kyseisen muuntopiirin alueen maaperä on huonosti johtavaa.
- Syöttävässä suurjänniteverkossa käytetään maasulun laukaisua
- Muuntajan yläjännitepuolen maasulun todennäköisyyttä on pienennetty käyttämällä venttiilisuoja ja eristämällä muuntajan navat tai käyttämällä kotelointia.
- Muuntamolle on rakennettu potentiaalinhjaus standardin SFS 6001 mukaisesti.
- Jokaisessa pj-verkon haarassa on yksi johtohaaran maadoitus ja maadoitukset on tehty standardin SFS-6000 mukaisesti
- Jos kyseessä on kaapeloitu muuntopiiri, täytyy jokaisessa runkoverkon jakokaapissa olla maadoituselektrodi, jonka maadoitusvastuksen on oltava alle  $100 \Omega$ .
- Jos kaikki liittymät ovat uusia tai niissä on todettu olevan liittymämaadoitus, ei liittymisjohtoihin tarvitse rakentaa johtohaaramaadoituksia.
- Pj-verkosta ei syötetä kohteita joiden ulkotiloissa voi olla paljon ihmisiä (koulut, leirintäalueet). (Verkostosuositus RJ 19:16)

Jos maadoitusjärjestelmä kuuluu laajaan maadoitukseen, katsotaan sallittujen arvojen toteutuvan. (SFS-käsikirja 601 2015, 99) Muuntopiirien maadoitukset tavoitetasoille 2, 4 ja 5 sekä AMKA- että kaapeliverkkoihin ovat esitettyinä liitteissä 5-10.

### 3 MAASULKU

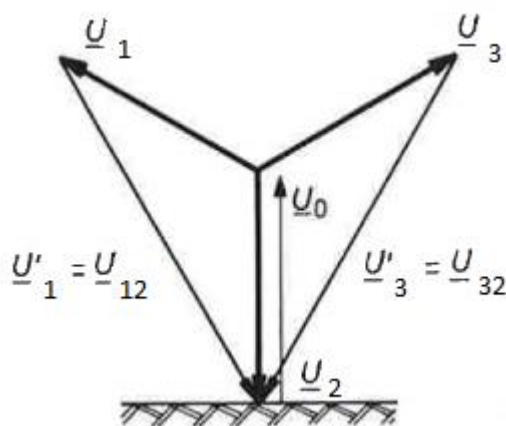
Maasulku määritellään käyttömaadoittamattoman virtajohtimen ja maan tai maahan johtavassa yhteydessä olevan osan väliseksi eristysviaksi (Korpinen, 3). Maasulussa esiintyvien ylijännitteiden suuruuteen vaikuttaa verkon tähtipisteen maadoitustapa.

Maadoitusvaihtoehtoja ovat:

- maasta erotettu
- kompensoitu verkko
- suuren resistanssin kautta maadoitettu verkko
- pienen impedanssin kautta maadoitettu verkko.

Maasulkuvirran suuruuteen vaikuttaa koko galvaanisesti yhteen kytketty verkko, eli yleensä päämuuntajalta seuraaville jakelumuuntajille asti. (ABB:n TTT-käsikirja 2000)

Maasta erotetussa ja kompensoidussa verkossa terveiden vaiheiden ja maan välinen jännite nousee suuremmaksi kuin vaiheiden välinen jännite. Tämä johtuu siitä, kun yksi vaiheista on yhteydessä maahan ilman vikavastusta, tulee vikaantuneen vaiheen jännitteeksi nolla (KUVA 1). Tällöin terveiden vaiheiden ja maan väliset jännitteet nousevat pääjännitteen suuruiseksi. Kun kyseessä on vikaresistansiton maasulku, eli vikaresistanssi  $R_f = 0$ , puhutaan suorasta maasulusta.



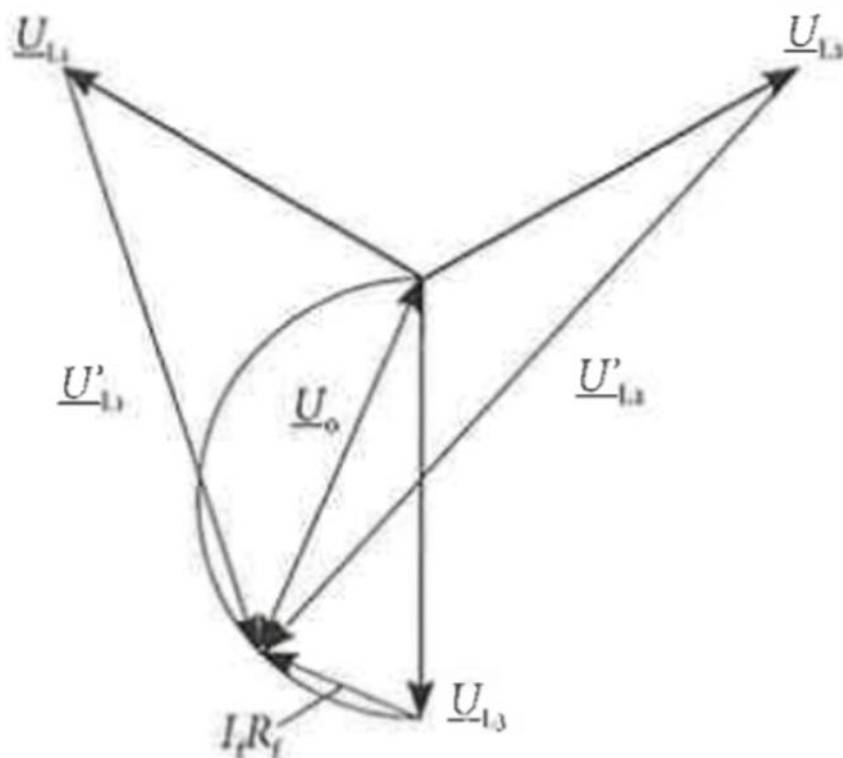
KUVA 1. Maasulku ilman vikavastusta (Rouvali 2017, muokattu.)

Ylläolevassa kuvassa (KUVA 2) on esitettyä maasulku ilman vikaresistanssia. Kuvassa on merkittynä terveen verkon vaihejännitteet  $\underline{U}_{L1}$ ,  $\underline{U}_{L2}$  ja  $\underline{U}_{L3}$ . Kun vaiheiden jännitteet ovat symmetriset on nollajännite  $\underline{U}_0 = 0$ . Kun vaiheeseen  $L2$  tulee maasulku, on jännite  $\underline{U}_{L2} = 0$  ja terveiden vaiheiden jännitteet  $\underline{U}'_{L1}$  ja  $\underline{U}'_{L3}$  ovat nousseet pääjännitteen suuruiseksi. Samanaikaisesti muuntajan tähtipisteen jännite  $\underline{U}_0 = \underline{U}_{L2}$ , eli vaihejännitteen suuruinen.

Kuvassa 2 on esitettyä maasulku, jossa on mukana vikaresistanssi  $R_f$ . Vikaresistanssin yli vaikuttava jännite

$$U_{Rf} = I_f \cdot R_f \quad (4)$$

voi aiheuttaa sen, että terveen vaiheen jännite voi nousta jopa pääjännitettä  $\sqrt{3}U$  suuremmaksi. Samalla nollijännitteen  $\underline{U}_0$  suuruus pienenee. (Rouvali, 2017)



KUVA 2. Jännitteet maasulun aikana (Lakervi ja Partanen 2009, 187)

Maasulkuvirran itseisarvon suuruus voidaan laskea yhtälöllä

$$I_e = \sqrt{3} \cdot \omega \cdot C_0 \cdot U \quad (5)$$

missä

$I_e$	maasulkuvirta (A)
$\omega$	$2\Omega f$
$f$	verkon taajuus (50Hz)
$C_0$	yhden vaiheen maakapasitanssi (F)
$U$	verkon laskentajännite (pääjännite) (V).



Kuvassa 3 on esitettyä nuolilla maasulkuvirran kulkusuunta maasta erotetussa verkossa. Kuten aikaisemmin on todettu terveen verkon vaihejännitteet ja maakapasitanssien kautta kulkevat virrat ovat likimain symmetrisiä. Maasulun aikana, jos vikaresistanssi  $R_f = 0$  on vikaantuneen vaiheen jännite  $U_v = 0$  ja tähtipisteen nolajännite  $U_0$  on suurimmillaan eli vaihejännitteen suuruinen. Vikavirta kulkee vikapaikasta maahan johtojen maakapasitanssien kautta muuntajan käämityksiin ja viallisen vaiheen kautta vikapaikkaan (Lakervi ja Partanen 2009, 183). Terveiden vaiheiden vaihejännitteet kohoavat pääjännitteen suuruiseksi. Ilman vikaresistanssia virtaa rajoittaa käytännössä verkon kapasitanssi. Kaapeleiden impedanssin vaikutus on niin pieni, että se voidaan yleensä jättää huomiomatta. Maasta erotetussa verkossa vikavirta on siis kapasitiivista.



## 4 MAADOITUSMITTAUKSET

### 4.1 Maadoitusvastuksen mittausmenetelmät

Maadoitusresistanssi on mitattava yleensä silloin, kun uusi järjestelmä otetaan käyttöön. Maadoituksille on hyvä tehdä myös määräaikaistarkastuksia, joista voidaan todeta, ovatko maadoitukset pysyneet toimintakuntoisena. Mittausta ei kuitenkaan tarvitse suorittaa, jos uusi maadoitus liitetään laajaan maadoitukseen. Uuden maadoitusjärjestelmän liityntä laajaan maadoitukseen tarvitsee todeta esimerkiksi mittaamalla.

Maadoitusresistanssien mittausväliksi suositellaan 6 vuotta, kun maadoitus on yhden maadoitusjohtimen varassa ja 12 vuotta kun kyseessä on laaja maadoitus.

Maadoitusvastuksen mittaamiseen on useita eri menetelmiä. Mittausmenetelmän valintaan vaikuttavat ainakin seuraavat asiat:

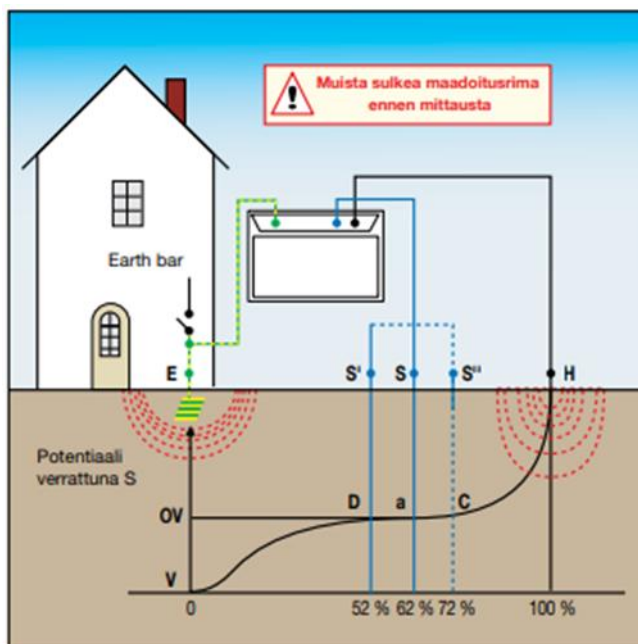
- Voidaanko mittaus suorittaa jännitteettömänä
- Voidaanko mitattava maadoituselektrodi irrottaa ja onko mitattava elektrodi ainut maadoitus järjestelmässä
- Mittausolosuhteet (Chauvin Arnoux, 6).

#### 4.1.1 Käänne pistemenetelmä (3-napamenetelmä)

Käänne pistemenetelmällä maadoituksesta mitataan maadoitusresistanssin arvoja. Mittaustapaa käytetään yleensä mitattaessa pieniä tai keskikokoisia maadoitusjärjestelmiä. (SFS-käsikirja 2015, 129) Mittaus toteutetaan kahden apuelektrodin avulla.

SFS 6001-standardin mukaan maadoituselektrodin, jännite-elektrodin ja virtaelektrodin pitää olla mahdollisimman suorassa linjassa. Mittausetäisyytenä kannattaa käyttää mahdollisimman pitkää matkaa, kuitenkin vähintään 4 kertaa maadoituselektrodin enimmäislaajuus. Jännitepiikin vähimmäisetäisyyden on oltava vähintään 2,5 kertaa maadoituselektrodin enimmäislaajuus.

Suomen maadoitusolosuhteista johtuen suositellaan käytettäväksi esim. 200 m mittausetäisyyttä ja virtaelektrodin siirrot esim. 20 m, kunnes käänne piste saavutetaan (SFS-käsikirja 601 2015, 133). Käänne pisteellä tarkoitetaan mittausetäisyyttä, jossa maadoitusvastus ei merkittävästi muutu (KUVA 4).



KUVA 4. Maadoituksen mittaus käännepistemethodella (Chauvin Arnoux).

Teoriassa käänneaste sijaitsee 62 % kohdalla maadoituksen ja virtaelektrodin välisellä etäisyydellä. Sovelletussa käännepestemethodassa mitataankin maadoitusvastus vain 62 %. Esimerkiksi, jos virtaelektrodin etäisyys on 200 m, jännite mitataan 124 m kohdalta. Tämä mittausmethoda on nopea ja sitä voidaan käyttää määräaikaistarkastuksissa. Saatua maadoitusvastusta verrataan aikaisemmin mitattuun, jonka avulla voidaan päätellä, onko maadoitusjärjestelmä heikentynyt. Yleensä maadoitusvastusmittarit antavat suoraan maadoitusvastuksen arvon. Maadoitusjännite saadaan laskettua yhtälöllä

$$U_E = R_E \times I_E \quad (7)$$

missä  $U_E$  on maadoitusjännite,  $R_E$  on mitattu maadoitusvastus ja  $I_E$  on suurin verkossa esiintyvä yksivaiheinen maasulkuvirta.

## 4.2 Maaperän resistiivisyyden mittaus

Maaperän resistiivisyys on hyvä mitata suunniteltaessa uutta maadoitusjärjestelmää. Kyseisen mittauksen avulla saadaan tietoa maadoitusolosuhteista, joista on hyötyä maadoitusjärjestelmän laajuutta suunniteltaessa. Mittalaitteella mitataan maadoitusvastus  $R$ , jonka avulla voidaan laskea maan ominaisresistiivisyys  $\rho$ . Taulukossa 2 on kuvattuna erilaisten maaperien tyypillisiä resistiivisyysarvoja.

TAULUKKO 2. Eri maaperien tyypillisiä resistiivisyysarvoja. (Chauvin Arnoux, 5)

Maalaji	Vastus $\Omega m$
Suo	2...30
Savimaa	20...100
Viljelymaa	10...150
Kalkkikivi	30...40
Saven sekainen hiekka	50...500
Kvartsihiekkä	200...3000
Kivinen maasto	1500...3000
Ruohoisa kivimaasto	300...500
Pehmeä kalkkikivi	100...300
Murskattu kalkkikivi	500...1000
Liuskekivi	800
Murskattu graniitti ja hiekkakivi	1500...10000
Graniitti ja hiekkakivi	100...600

#### 4.2.1 Wenner-menetelmä

Wenner-menetelmä on yleisin käytössä oleva maaperän resistiivisyyden mittausmenetelmä. Wenner-menetelmä sopii tilanteisiin, joissa halutaan tietää maaperän resistiivisyyden arvo tietyssä syvyydessä. (Chauvin Arnoux, 5).

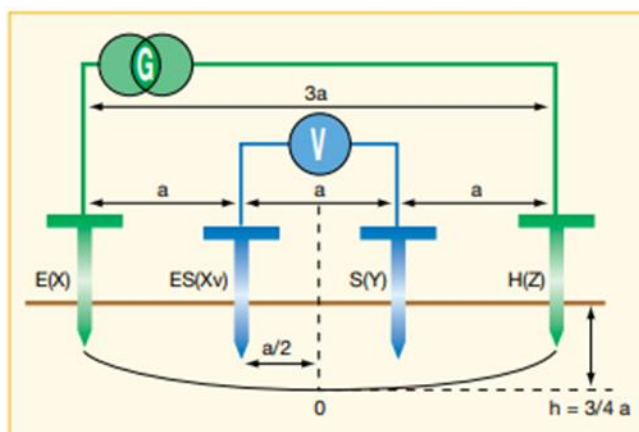
Wenner-menetelmän mittausperiaatteena on sijoittaa neljä apuelektroodia tasavälein samaan linjaan. Mittalaitteella syötetään virtaa kahden uloimman elektrodin välille. Laite mittaa jännitteen kahden sisemmän elektrodin väliltä. Tällä saadaan maadoitusvastusarvo  $R$  arvo kaavalla

$$R = \frac{U}{I} \quad (8)$$

Maadoitusvastuksen avulla voidaan määrittää maaperän resistiivisyyden  $\rho$  arvo kaavalla

$$\rho = 2\pi a R \quad (9)$$

jossa  $\rho$  on maaperän resistiivisyys,  $a$  on kahden mittauselektrodin välinen etäisyys ja  $R$  on mittamalla saatu maadoitusvastuksen arvo.



KUVA 5. Wenner-menetelmä (Chauvin Arnoux, 5)

Kuvassa 5 on esitetty apuelektrodien E, ES, S ja H sijainnit. Suluissa olevat X, Xv, Y ja Z ovat vanhoja apuelektrodien nimityksiä. Saatu maaperän resistiivisyyden arvo on yksikössä  $\Omega\text{m}$  0-pisteessä ja syvyydessä h, joka on  $3a/4$ . Resistiiivisyys kuvaa  $1\text{ m}^2$  poikkipinta-alaisen sylinterin muotoisen maaperän vastusta  $1\text{ m}$  matkalla. Chauvin Arnouxin mittausoppaassa elektrodien väliseksi etäisyydeksi suositellaan vähintään neljä metriä (Chauvin Arnoux, 5).

## 5 TULOKSET

### 5.1 Maaperän resistiivisyyden mittaukset

Tätä opinnäytetyötä varten suoritettiin maaperän resistiivisyyden mittauksia kahdessa eri kohteessa. Mittauskohteet ovat samoja, joissa suoritettiin maadoitusmittauksia. Maan resistiivisyys mitattiin Latosuolla ja Myllysuolla. Mittaukset suoritettiin Wenner-menetelmällä mittalaitteen valmistajan ohjeiden mukaisesti. Käytetty mittalaite oli Chauvin Arnoux C.A 6425 (KUVA 6).



KUVA 6. Maaperän resistiivisyyden mittauksessa käytetty mittalaite (Kempainen 2017).

Samaa mittalaitetta olisi myös voinut käyttää maadoitusmittauksissa, mutta päätettiin käyttää siihen Megger DET3TD-mittalaitetta. Ensimmäiset maadoitusvastusmittaukset mitattiin kummallakin mittalaitteella. Näin varmistettiin, että tuloksissa ei ole suuria eroja.

Wenner-menetelmän periaate on selitettynä edellä olevassa kappaleessa (5.2.1 Wenner-menetelmä). Mittaus suoritettiin yhdellä syvyydellä, joka oli noin 20cm ja yhdellä mittauselektrodien välillä  $a$ , joka oli 4 metriä. Teorian mukaan saadut mittaustulokset kuvaavat maaperän resistiivisyyttä ( $\Omega\text{m}$ ) 0-pisteessä ja syvyydessä  $h=3/4*a$ . Syvyydeksi  $h$  saadaan neljän metrin väleillä 0,25 m.

Latosuon maaperä oli hyvin kostea ja soista. Kiviä, hiekkaa tai kalliota ei ollut havaittavissa. Maadoitusvastukseksi saatiin 2,67  $\Omega\text{m}$ . Myllysuolla maastossa oli havaittavissa kalliota ja paljon enemmän kivikkoa ja kalliota, mutta myös soista maastoa. Maadoitusvastukseksi Myllysuolla mitattiin 299  $\Omega\text{m}$ . Mittaustuloksien ero oli yli 100-kertainen (n.112), joka aluksi vaikutti suurelta.

Maadoitusvastuksien  $R$  avulla laskettiin maaperän ominaisresistiivisyys  $\rho$ .

TAULUKKO 3. Mitatut maadoitusvastukset ja lasketut maan ominaisresistiivisyydet (Kemppainen 2017).

Kohteen nro	Kohteen nimi	Maadoitusvastus $\Omega$	Maan ominaisresistiivisyys $\Omega\text{m}$
T155	Myllysuo	299	7514,7
T144	Latosuo	2,67	67,1

Verrattaessa saatuja arvoja aiemmin esitetyn taulukon (TAULUKKO 2) tyypillisiin ominaisresistiivisyyksiin, kuvaavat tulokset hyvin silmämääräisesti tehtyjä havaintoja.

## 5.2 Maadoitusvastusten mittaukset

Maadoitusvastukset mitattiin käännepestemenetelmällä. Mittauselektrodien välisenä etäisyytenä pyrittiin maaston salliessa käyttämään suositeltua 200 metriä. Virtaelektrodi vietiin 200 metrin päähän mittauskohteesta ja jännite-elektrodia siirrettiin 20 metrin välein maadoituselektrodin ja virtaelektrodin välillä. Mittaustulokset ovat esitettynä alla olevassa taulukossa (TAULUKKO 4).

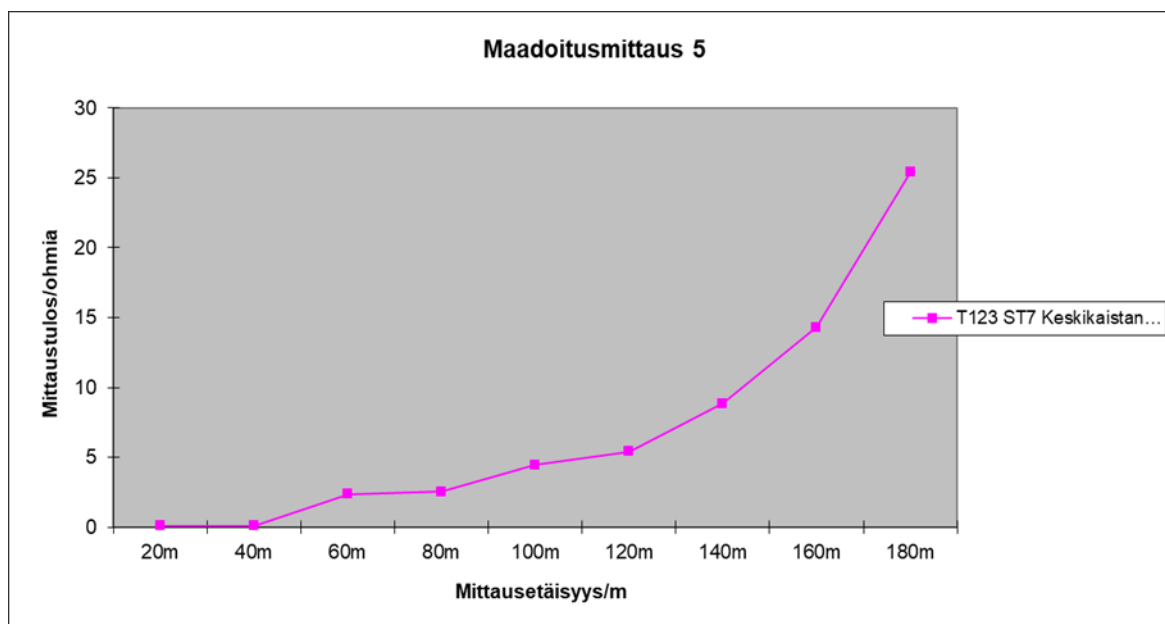
TAULUKKO 4. Maadoitusmittaustulokset (Kemppainen 2017).

Kohteen nro	20 m ( $\Omega$ )	40 m ( $\Omega$ )	60 m ( $\Omega$ )	80 m ( $\Omega$ )	100 m ( $\Omega$ )	120 m ( $\Omega$ )	140 m ( $\Omega$ )	160 m ( $\Omega$ )	180 m ( $\Omega$ )
T144	3,4	4,1	5,2	8,1	13,4				
T155	78,4	111,2	118,7	123,4	127,6	131	134,4		
T126	2,5	0,89	3,2	3,2	4,3	6	9,5	17,5	28,1
T145	0,48	1,49	1,91	2,74	3,9	5,09	6,78	13,67	35,8
T123	0,1	0,1	2,36	2,55	4,47	5,41	8,84	14,31	25,4
T121	2,2	4,68	6,2	8,18	9,24	10,76	12,6	14,43	31
T156	1,16	1,54	1,67	1,93	2,19	2,61	3	4,05	9,02
T158	2	3,4	2,22	2,41	2,57	2,72	3,36	4,76	8,27
T157	3,27	4,52	4,94	5,41	6,03	6,79	7,89	9,6	10,79
T105	2,55	3	3,53	4,46	5,63	7,37	7,72	8	15,94
T136	5,45	5,65	5,94	5,5	8,75	10,96	15,7	22	39,5
T133	6,7	9,07	10,14	11,45	12,9	14,76	19,5	24,7	42,4
T120	1,1	0,77	0,76	0,88	0,92	1,12	1,8	4	5,5
T124	1,6	2,6	2,57	2,43	2,42	2,43	2,44	2,55	3,63
T63	2	2,4	2,1	2,8	2,47	2,32	2,35	2,3	2,51
T74	8,6	12,85	14,7	16,5	16,87	17,19	17,98	18,17	23,1



KUVA 7. Maadoitusvastusmittaus Urkin padolla (Kemppainen 2017).

Maadoitusvastukset mitattiin yhteensä 16:sta eri muuntamosta. Kahdessa kohteessa (Latosuo, Myllysuu) virtaelektrodin etäisyys oli pienempi kuin 200 metriä, maastosta johtuen. Etäisyyksinä käytettiin Latosuolla 120 metriä ja Myllysuolla 160 metriä. Taulukossa kohteen numero tarkoittaa muuntamon tunnusta. Mittaustuloksista tehtiin kuvaajat vastuksen arvosta mittausetäisyyden suhteen (KUVAAJA 2).



KUVAAJA 2. Maadoitusvastus mittausetäisyyden suhteen, T123 (Kemppainen 2017).

Kuvaajan avulla voidaan havainnoida ovatko tulokset teorian mukaiset. Erilaiset virheet mittauksessa voivat näkyä kuvaajassa joko notkahduksena tai piikkinä. Notkahdus on tyypillinen, jos mittauselektrodi osuu maadoituksen lähetyville. Käänne pistemenetelmällä mitatessa käyrän tasainen kohta,

jossa kulmakerroin on pienin, on noin 62 % kohdalla. 62 % piste eli käänne piste on 200 metrin mitausmatkalla noin 124 metrissä. Mittaustuloksen arvo luetaan tältä tasaiselta kohdalta, vaikka se ei olisi aivan teorian mukaisessa käänne pisteessä, kuten esimerkiksi ylläolevassa kuvaajassa. Maadoitusvastuksen arvo on tässä tapauksessa noin 5  $\Omega$ .

Maasulkuvirrat eri käyttötilanteissa ovat esitettynä alla olevassa taulukossa (TAULUKKO 5).

TAULUKKO 5. Maasulkuvirrat eri käyttötilanteissa.

	01B	02B
Päämuuntajat erillään 03B syötetty 01B:ltä	141,2 A	77,0 A
Päämuuntajat erillään, 03B syötetty 02B:ltä	195,0 A	24,5 A
Päämuuntajat yhdessä	219,2 A	219,2 A

Jakeluverkkoa käytetään normaalisti päämuuntajat erillään. Tällöin suurin esiintyvä maasulkuvirran arvo kiskolla 01B on 195,0 A, joka on kohtuullisen suuri ja asettaa haasteita maadoitusten suunnitteluun. Kytkeätilanteissa päämuuntajia voidaan joutua käyttämään rinnakkain hetkellisesti ja myöskään tällä ajalla kosketusjännitetasoja ei saa ylittää. Tällöin tässä käyttötilanteessa on suurin maasulkuvirta, joten maadoitukset ja suojaus on suunniteltava sen mukaan.

### 5.3 Kosketusjännitteen määrittäminen

Suurin sallittu kosketusjännite määritellään aikaisemmin esitetystä kuvaajasta (KUVAAJA 1). Terra-famen jakeluverkossa käytetään yleisesti kuuden sekunnin poiskytkentäaika maasuluissa. Näin ollen kosketusjännitteeksi saadaan noin 80 V.

TAULUKKO 6. Sallitut kosketusjännitteet  $U_{TP}$ , kun kehon virtatien impedanssi on kädestä jalkoihin (Verkostosuositus RJ 19:16).

Laukaisu-aika s	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	2,0	5,0	10,0
$U_E = U_{TP}$	415	305	220	174	143	130	120	117	96	86	85
$U_E = 2 \times U_{TP}$	830	610	440	348	286	260	240	234	192	172	170
$U_E = 4 \times U_{TP}$		1220	880	696	572	520	480	468	384	344	340
$U_E = 5 \times U_{TP}$			1100	870	715	650	600	585	480	430	425

Ylläolevassa taulukossa on esitettynä sallittujen kosketusjännitteiden arvot eri laukaisuajoilla ja tavoitetasoilla. Huomioitavaa on, että laukaisuajalla tarkoitetaan kokonaislaukaisuaikaa, jossa huomioidaan releistä ja katkaisijasta johtuva viive.



Kun tiedetään maadoitusvastuksien arvot ja esiintyvät maasulkuvirrat, voidaan laskea maadoitusjännite yhtälöllä

$$U_m = R_m \cdot I_e \quad (10)$$

missä

$U_m$	maadoitusjännite (V)
$R_m$	maadoitusresistanssi ( $\Omega$ )
$I_e$	maasulkuvirta (A).

Alla olevassa taulukossa esitettyinä syntyvät maadoitusjännitteet, jos päämuuntajat ovat kytketty rinnan.

TAULUKKO 7. Maadoitusjännitteet kun päämuuntajat rinnan

Kohteen nro	Kohteen nimi	Vastusarvo ( $\Omega$ )	Maasulkuvirta (A)	$U_e$ (V)
T144	Latosuo	5,2	219,2	1140
T155	Myllysuu	127,6	219,2	27970
T126	Kortelampi lähtevä	3,2	219,2	701
T145	Urkin pato	5,09	219,2	1116
T123	ST7 Keskikaistan muuntamo	2,55	219,2	559
T121	SH3 Pumppaamo	9,24	219,2	2025
T156	Keskusveden puhdistamo	1,67	219,2	366
T158	Kipsisakka-altaan muuntamo	2,72	219,2	596
T157	Urakoitsijoiden alue	6,79	219,2	1488
T105	Tammalampi	7,37	219,2	1616
T136	Haukilampi	5,94	219,2	1302
T133	Kärsälampi	12,9	219,2	2828
T120	SH3 Puhaltimien muuntamo	0,92	219,2	202
T124	LKRW(raakavedenotto)	2,43	219,2	533
T63	Boosteri	2,32	219,2	509
T74	Niskala	17,19	219,2	3768

Maadoitusten riittävyttä ei kuitenkaan tarkastella suoraan maadoitusjännitteen avulla, vaan täytyy määrittää suurin sallittu kosketusjännite. Kosketusjännitteen  $U_{TP}$ :n arvoksi määriteltiin aiemmin 80 V. Asetetaan tavoitetasoksi  $U_E \leq 2 \times U_{TP}$ , eli  $U_E \leq 160$  V.

Kuten taulukosta 7 voidaan huomata, kaikki mittauskohteissa esiintyvät maadoitusjännitteet ylittävät asetetun tavoitetason. Asia voidaan ratkaista tai ainakin parantaa seuraavilla tavoilla:

- Ei käytetä verkkoa päämuuntajat rinnan, joka ei tälläkään hetkellä ole normaali käyttötilanne
- Pienennetään maasulun poiskytkentäaika, joka nostaa sallittua kosketusjännitteen suuruutta esim. poiskytkentä 0,4 s =>  $U_{TP} = 305$  V.  $2 \times U_{TP} = 610$  V
- Parannetaan maadoituksia
- Käytetään maasulun kompensointia.

Helpoimmat parannuskeinot ovat päämuuntajien käyttäminen erillään, jolloin yhteen kytketyn galvaanisen verkon pituus pienenee ja vian laukaisuaikojen pienentäminen. Jaettaessa verkko pienempiin osiin maasulkuvirta on eri suuruinen, riippuen kumman päämuuntajan syöttämään verkkoon se kuuluu. Tämä hankaloittaa verkon kytkentämuutoksia, koska päämuuntajia ei saa käyttää rinnan.

TAULUKKO 8. Maasulkuvirrat ja maadoitusjännitteet esitettynä eri käyttötilanteissa.

Kohteen nro	Vastusarvo $\Omega$	Maasulkuvirta $I_e$ (A)			Maadoitusjännite $U_e$ (V)		
		Tilanne 1	Tilanne 2	Tilanne 3	Tilanne 1	Tilanne 2	Tilanne 3
T144	5,2	219,2	77	24,5	1140	400	127
T155	127,6	219,2	77	24,5	27970	9825	3126
T126	3,2	219,2	77	24,5	701	246	78
T145	5,09	219,2	77	24,5	1116	392	125
T123	2,55	219,2	77	24,5	559	196	62
T121	9,24	219,2	77	24,5	2025	711	226
T156	1,67	219,2	141,2	195	366	236	326
T158	2,72	219,2	141,2	195	596	384	530
T157	6,79	219,2	141,2	195	1488	959	1324
T105	7,37	219,2	141,2	195	1616	1041	1437
T136	5,94	219,2	77	24,5	1302	457	146
T133	12,9	219,2	77	24,5	2828	993	316
T120	0,92	219,2	141,2	195	202	130	179
T124	2,43	219,2	77	24,5	533	187	60
T63	2,32	219,2	77	24,5	509	179	57
T74	17,19	219,2	77	24,5	3768	1324	421
Maasulkuvirtojen keskiarvot					<b>2920</b>	<b>1104</b>	<b>534</b>

Yllä olevassa taulukossa on esitettynä maasulkuvirrat ja maadoitusjännitteet mittauskohteissa eri käyttötilanteissa. Käyttötilanteet ovat:

Tilanne 1: Päämuuntajat kytketty rinnan

Tilanne 2: Kisko 03B on syötetty kiskosta 01B

Tilanne 3: Kisko 03B syötetty kiskosta 02B.

Alimmalla rivillä on esitettynä maadoitusjännitteiden keskiarvot. Käyttötilanteessa 3 maadoitusjännitteiden keskiarvo on yli viisi kertaa (n.5,5) pienempi kuin tilanteessa 1. Verkon jakaminen siis tässä tapauksessa kannattaa tehdä tällä tavalla. Jakamalla verkko tilanteen 3 tavalla, mittauskohteista seitsemän kappaletta täyttää vaatimukset tasolla 2 eli  $U_E \leq 160 V$ . Kuten aiemmin teoriassa mainittiin, tietyin edellytyksin voidaan käyttää myös tavoitetasoa 4 tai 5. Määritetään tavoitetasot 6,0 sekunnin laukaisuajan perusteella seuraaviksi:

- $U_E \leq 4 \times U_{Tp} \leq 320 V$ , jonka 10 kohdetta 16 täyttävät
- $U_E \leq 5 \times U_{Tp} \leq 400 V$ , jonka 11 kohdetta 16 täyttävät.

Muuntamoissa, joissa käytetään tasoja 4 tai 5 on tarkastettava erikseen, täyttävätkö ne kaikki tasojen käyttöön vaadittavat vaatimukset.

Tarkastellaan seuraavaksi, täyttäisivätkö maadoitukset tavoitetasot, jos maasulun laukaisuaika pienennetään 0,5 sekuntiin. Tavoitetasot 0,5 sekunnin laukaisujalla ovat:

- $U_E \leq 2 \times U_{Tp} \leq 440 \text{ V}$ , jonka 12 kohdetta 16 täyttävät
- $U_E \leq 4 \times U_{Tp} \leq 880 \text{ V}$ , jonka 13 kohdetta 16 täyttävät
- $U_E \leq 5 \times U_{Tp} \leq 1100 \text{ V}$ , jonka 13 kohdetta 16 täyttävät.

Näin ollen kannattaisi laukaisu-aikaa pienentää, jos suinkin mahdollista. Laukaisuajan pienentäminen myös parantaa maadoitusten termistä kestoisuutta, joka on riippuvainen ajasta. Näiden edellä mainittujen parannuksien lisäksi kolmen muuntamon maadoituksia on syytä parantaa. Tästä aiheesta lisää kappaleessa Maadoitusten parantamisehdotus.

Viimeisenä tarkastellaan, täyttävätkö maadoitukset pienjänniteverkon maadoituksia koskevat määräykset. Pj-verkon maadoitusten maadoitusvastuksen on oltava alle  $100 \Omega$  (Verkostosuositus RJ 19:16, 9). Näin ollen muuntamon T155 maadoitukset eivät täytä pj-verkon maadoitusten vaatimuksia, koska maadoitusvastus on  $127,6 \Omega$  ja tästä syystä siihen on tehtävä parannuksia.

#### 5.4 Tuloksien yhteenveto

Työn tarkoituksena oli mitata ennalta valittujen muuntamoiden maadoitusten kunto. Mittaukset toteutettiin käännepestemenetelmällä ja mittaustäisyytenä pyrittiin käyttämään 200 metriä maaston salliessa. Maadoitusvastusmittaukset onnistuivat hyvin ja tuloksista saatiin tietoa maadoitusten riittävydestä alueella. Tulosten perusteella on verkon suojaukselle tehtävä toimenpiteitä, jotka ovat esimerkiksi:

- Verkon jakaminen pienempiin osiin
  - Maadoitusten parantaminen
  - Vian poiskytkentäajan pienentäminen
  - Verkon maasulkuvirran kompensoinnin asennus.
- Näistä ehdotuksista taloudellisimmat ja teknisesti helpoimmat ovat:
- Vian poiskytkentäajan pienentäminen
  - Maadoitusten parantaminen.

Jos verkon odotetaan laajenevan ja varsinkin maakaapeloinnin lisääntyessä, voi maadoitusten riittävydessä tulla haasteita. Tällöin olisi syytä harkita verkon sammuttamista eli päämuuntajien tähtipisteen maadoittamista sammutuskuristimen kautta.

## 5.5 Maadoitusten parantamisehdotus

Mittauskohteiden maadoituksista muuntamon T155 maadoitusvastusarvo on yli 100  $\Omega$ , joten se ei täytä pienjännitestandardin SFS 6000 vaatimuksia. Koska muuntamossa on yhdistetyt pienjännite- ja suurjännitemaadoitukset, täytyy maadoitusten täyttää molempien vaatimukset. Muuntamo T155 sijaitsee Myllysuolla ja se on tyypiltään pylväsmuuntamo. Pylväsmuuntamo syötetään 20 kV:n avojohtolla ja pienjännitepuolelta lähtee AMKA-linja. Tällä hetkellä muuntamolla toimii maadoituksena ainoastaan potentiaaliohjausrenkas. Muuntopiirin alueelta mitattiin maan ominaisresistiivisyys, jonka suuruus on 0,25 m syvyydessä 7514,7  $\Omega\text{m}$ . Maa on siis huonosti sähköä johtavaa. Maadoituksen parantamismahdollisuudet ovat ainakin:

- Yhdistetään maadoitus toisen muuntamon maadoitukseen. Tämä ei välttämättä ole taloudellisin vaihtoehto, koska läheisyydessä ei ole toista muuntamo.
- Maadoituselektrodien lisäys nykyiseen maadoitusjärjestelmään esim. verkostosuosituksen RM 5:16 (LIITE 11) mukaan lisäämällä kolme 10m tai pidempää säiettä maadoitusjärjestelmään.
- Laajennetaan maadoitukset paremmin johtavalle maaperälle. Muuntamon läheisyydessä on aluetta, jossa todennäköisesti maa on paremmin johtavaa.

Muuntamon liittäminen laajaan maadoitukseen ei ole kannattavaa pitkän etäisyyden vuoksi. Muuntamolle on määritettävä kosketusjännitteen tasoitetaso. Pyritään suunnittelemaan maadoitukset siten, että  $U_E \leq 2 \times U_{TP}$  saavutetaan, mutta sallitaan myös  $U_E \leq 4 \times U_{TP}$  ja  $U_E \leq 5 \times U_{TP}$ . Tavoitetasoa 4 voidaan käyttää, koska muuntamo syöttävässä johtolähdössä käytetään maasulun laukaisua ja maasulun todennäköisyyttä voidaan pienentää suojaamalla rakenteellisesti. Tasoa 5 käytettäessä on varmistettava, että muuntamosta ei syötetä kuin yhtä rakennusta ja että syötettävällä rakennuksella on maadoituksiin yhdistetty potentiaaliohjausrenkas. Kun kyseessä on AMKA-linjaa syöttävä muuntamo, on käytettävä muuntajan navoilla metallioksidisuoja tasolla 4 ja 5 (Verkostosuositus RM 5:16). Opinnäytetyön tekemisen aikana on Terrafamen jakeluverkossa maasulun laukaisuaika pienennetty 0,6 s, jolloin maadoitusjännitteet saavat olla enimmillään taulukon 8 suuruiset.

TAULUKKO 9. Suurimmat sallitut maadoitusjännitteet (RJ 19:16).

Laukaisu-aika s	0,6
$U_E = U_{TP}$	174
$U_E = 2 \times U_{TP}$	348
$U_E = 4 \times U_{TP}$	696
$U_E = 5 \times U_{TP}$	870

Kun tiedetään suurin sallittu maadoitusjännite ja suurin mahdollinen maasulkuvirta, voidaan laskea suurin sallittu maadoitusvastus yhtälöllä

$$R_m = \frac{U_m}{I_e} \quad (11)$$

josta saadaan tavoitetasolle 2

$$\frac{348 \text{ V}}{219,2 \text{ A}} \approx 1,5 \Omega$$

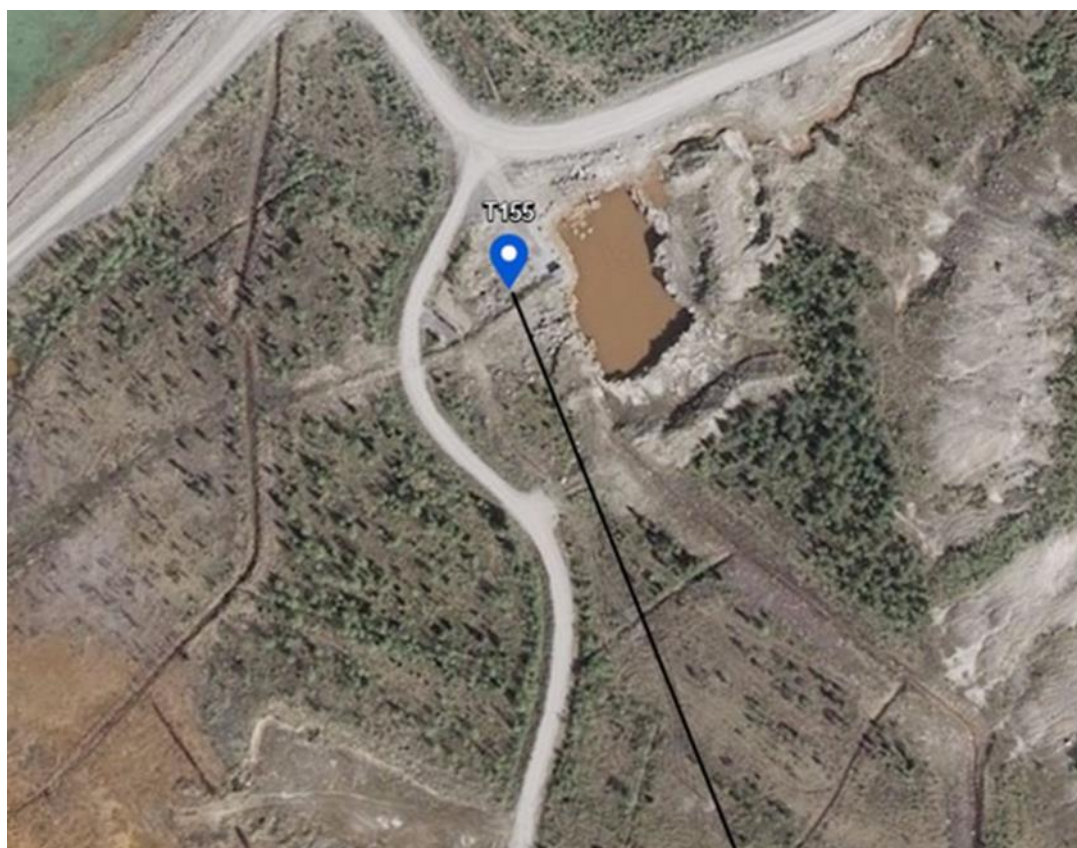
tavoitetasolle 4

$$\frac{696 \text{ V}}{219,2 \text{ A}} \approx 3,1 \Omega$$

ja tavoitetasolle 5

$$\frac{870 \text{ V}}{219,2 \text{ A}} \approx 4,0 \Omega$$

Tällä hetkellä muuntamon maadoitusvastus on 127,6  $\Omega$ . Maaperän ollessa huonosti johtavaa, onkin syytä miettiä, onko muuntamon lähellä paremmin johtavaa maata, johon maadoituskenttä kannattaisi rakentaa.



KUVA 8. Muuntamon T155 ilmakekuva, jossa merkittynä myös mittaussuunta (Kempainen 2017).

Ehdotukseni on, että muuntamon läheisyyteen paremmin johtavalle maaperälle rakennettaisiin lisää maadoitus, joka yhdistetään nykyisiin maadoituksiin. Kuten kuvasta 8 huomataan, kulkee muuntamon vieressä tie ja vastakkaisella puolella on "lampi". Tien sulkeminen voi olla ongelma, jolloin vaihtommin suunta uudelle maadoitukselle on kuvassa näkyvä musta viiva. Maaperä suunnalla on hyvin kosteaa ja kiviä tai kalliota ei juurikaan ollut havaittavissa. Resistiivisyys on kuitenkin hyvä mitata ennen rakennuksen aloittamista. Arvioidaan maan resistiivisyydeksi 65  $\Omega\text{m}$ , koska maaperä on hyvin samantapaista kuin Latosuolla, jossa resistiivisyydeksi saatiin 67  $\Omega\text{m}$ . Upotetun vaakasuoran maadoituselektrodin tarvittavaa pituutta voidaan arvioida yhtälön

$$R_E = \frac{\rho_E}{2 * \pi * L} \ln \frac{L^2}{1,85 * h * d} \quad (12)$$

avulla, missä

$R_E$	maadoitusresistanssi ( $\Omega$ )
$\rho_E$	maaperän ominaisresistiivisyys ( $\Omega\text{m}$ )
$L$	maadoituselektrodin pituus (m)
$h$	elektrodin upotussyvyys (m)
$d$	elektrodin halkasija (m) (SFS-käsikirja 601 2015, 153).

Päätetään seuraavat asiat:

- Maadoituselektrodina 25 mm<sup>2</sup> kupariköysi, jolloin sen halkasija on noin 5,64 mm
- Upotussyvyys 0,7 m
- Maaperän ominaisresistiivisyys aiemmin arvioitu 65  $\Omega\text{m}$ .

Näillä lähtötiedoilla saadaan taulukon 9 mukaiset maadoitusvastuksen arvot.

TAULUKKO 10. Maadoitusvastuksen arvo eri elektrodin pituuksilla.

Elektrodin pituus (m)	Maadoitusvastus ( $\Omega$ )
10	9,85
20	5,6
30	4
40	3,2
50	1,6
60	2,26
70	1,98
80	1,77
90	1,6
100	1,46

Taulukon 10 perusteella tavoitetason 2 maadoitusvastus vaatimus saavutetaan 100m pituisella vaakasuoralla maadoituselektroidilla, jos nykyistä maadoitusta ei oteta ollenkaan huomioon. Tämä ratkaisu olisi vaivattomin ja taloudellisin. Jos maadoituksen rakentaminen ei kyseiselle alueelle onnistu esimerkiksi maaperän upottavuuden vuoksi on syytä katsoa toinen suunta ja mitata sen maaperän resistiivisyys, jolloin voidaan arvioida elektrodin pituutta.

## 6 YHTEENVETO

Työn tarkoituksena oli tehdä maadoitusmittauksia Terrafamen jakeluverkossa. Maadoitusmittaustulosten, maasulkuvirtojen ja maasulun poiskytketäaikojen avulla arvioitiin, syntyykö vaarallisia kosketusjännitteitä.

Työ aloitettiin päättämällä mittaushaasteet ja niiden määrä. Kohteiksi valittiin 16 muuntamoita, joista maadoitusmittauksia ei oltu tehty. Mittausmenetelmäksi valittiin käännevirtamenetelmä, jota käytetään yleisesti käyttöönottotarkastuksissa pienissä maadoitusjärjestelmissä. Mittausten suorittamisesta tehtiin mittaussuunnitelma, jonka mukaan mittaukset suoritettiin. Kahdesta mittaushaasteesta mitattiin myös maan ominaisresistiivisyys, jotta voidaan arvioida maaperien johtavuutta ja tarvittavia maadoituksia.

Mittaukset saatiin suoritettua viikossa ja niistä saatiin odotetun mukaisia tuloksia. Mittauksia tehdessä maasulkuvirrat eivät olleet vielä selvillä, joten opinnäytetyö ei edennyt muutamaankuukauteen. Maasulkuvirtojen laskennan valmistuessa laskettiin syntyvät kosketusjännitteet ja tarkasteltiin, ovatko maadoitukset riittävät. Pääsääntöisesti maadoitukset eivät olleet riittävät ja ratkaisua asiaan alettiin pohtimaan. Yhden muuntamon maadoituksia päätettiin suoraan parantaa ja siitä tehtiin parantamisehdotus tämän opinnäytetyön tuloksena.

Opinnäytetyölle asetetut tavoitteet saavutettiin. Tilannetta on lähdetty jo parantamaan maasulun poiskytkentäaikoja pienentämällä. Yhden muuntamon maadoituksia parannetaan kuluvan kesän aikana.

Opinnäytetyön aihe muuttui työtä tehdessä koko ajan mielenkiintoisemmaksi ja laajuus osottautui yllättävän hankalaksi rajata. Aiheen parissa työskentelyä jatketaan myös opinnäytetyön jälkeen ja toivottavasti työn tuloksista on hyötyä myös jatkossa.

## LÄHTEET JA TUOTETUT AINEISTOT

SUOMEN STANDARDISOIMISLIITTO SFS RY 2015. SFS-käsikirja 601. 2.painos. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto ry, 90-153.

ENERGIATEOLLISUUS RY 2016. KAAPELILIITÄNNÄINEN VERKONHALTIJAN MUUNTAMO Verkostosuositus RM 3:16. Helsinki

ENERGIATEOLLISUUS RY 2016. PYLVÄSMUUNTAMON MAADOITUSJOHTIMET Verkostosuositus RM 5:16. Helsinki

ENERGIATEOLLISUUS RY 2016. MUUNTOPIIRIEN JA PYLVÄS EROTINASEMIEN maadoitukset SFS 6001/2015 mukaan Verkostosuositus RM 3:16. Helsinki

SÄHKÖENERGIALIITTO RY 1994. Verkostosuositus SA 5:94 [verkkajulkaisu] Keskijänniteverkon sähköinen mitoittaminen. Helsinki: Sähköenergiالیitto ry, 22-26, 38-40

KORPINEN, Leena. Vikatilanteet [verkkajulkaisu]. [Viitattu 2018-05-26.] Saatavissa:

<http://www.leenakorpinen.fi/archive/sahkoverkko/vikatilanteet.pdf>

ABB Oy. TTT-käsikirja 2000-07 [verkkajulkaisu]. 08. Maasulkusuojaus. [Viitattu 2018-05-26] Saatavissa: [http://www.oamk.fi/~kurki/automaatiolabrat/TTT/08\\_0\\_Maasulkusuojaus.pdf](http://www.oamk.fi/~kurki/automaatiolabrat/TTT/08_0_Maasulkusuojaus.pdf)

LAKERVI, Erkki ja PARTANEN, Jarmo 2009. Sähköjakelutekniikka. 2. painos. Helsinki: Otatieto, 183-187

ROUVALI, Juhani 2018, Maasulkuun liittyviä asioita [verkkajulkaisu]. [Viitattu 2018-05-26]

CHAUVIN ARNOUX. Maadoitusvastuksen mittausopas [verkkajulkaisu]. [Viitattu 2018-05-26.] Saatavissa: [https://chauvin-arnoux.fi/wp-content/uploads/2014/09/FI\\_-Maadoitusvastuksen-mittausopas.pdf](https://chauvin-arnoux.fi/wp-content/uploads/2014/09/FI_-Maadoitusvastuksen-mittausopas.pdf)



## LIITE 1: MAADOITUSELEKTRODIEN TYYPII JA MINIMITAT (SFS-KÄSIKIRJA 601 2015, 114.)

**Liite C**  
(velvoittava)  
**Maadoituselektrodien tyyppi ja minimimitat, jotka takaavat riittävän mekaanisen lujuuden ja korroosionkestävyyden**

Materiaali	Elektrodin tyyppi	Vähimmäismitta					
		Ydinosa		Pinoite/vaippa			
		Halkaisija mm	Poikkipinta mm <sup>2</sup>	Paksuus mm	Yksittäinen arvo µm	Keskiarvo µm	
Teräs	Kuumasinkitty	Nauha <sup>b</sup>		90	3	63	70
		Profiili (ml. levy)		90	3	63	70
		Putki	25		2	47	55
		Sauvaelektrodin pyörötanko	16			63	70
		Vaakamaadoituselektrodin pyöreä lanka	10				50
	Lyijyvaipalla <sup>a</sup>	Vaakamaadoituselektrodin pyöreä lanka	8			1 000	
	Päällystetyllä kuparivaipalla	Sauvaelektrodin pyörötanko	15			2 000	
	Elektrolyytti-kuparivaipalla	Sauvaelektrodin pyörötanko	14,2			90	100
Kupari	Paljas	Nauha		50	2		
		Vaakamaadoituselektrodin pyöreä lanka		25 <sup>c</sup>			
		Köysi	1,8 <sup>d</sup>	25 <sup>c</sup>			
		Putki	20		2		
	Tinattu	Köysi	1,8 <sup>d</sup>	25 <sup>c</sup>		1	5
	Sinkitty	Nauha		50	2	20	40
	Lyijyvaipalla <sup>a</sup>	Köysi	1,8 <sup>d</sup>	25 <sup>c</sup>		1 000	
		Pyöreä lanka		25 <sup>c</sup>		1 000	

<sup>a</sup> Ei soveltu asennettavaksi suoraan betoniin. Lyijyn käyttöä ei suositella ympäristösyistä.

<sup>b</sup> Valssattu tai leikattu nauha pyöristetyin reunoin.

<sup>c</sup> 16 mm<sup>2</sup> poikkipintaa voidaan käyttää erityisolosuhteissa, joissa kokemuksen mukaan korroosion ja mekaanisen vaurioitumisen riski on vähäinen.

<sup>d</sup> Yksittäiselle langalle.

## LIITE 2: 20 KV KAAPELIEN JOHTOTIETOJA (SA5:94 1994.)

SA 5:94

LIITE 1.2

1(3)

## 20 KV KAAPELIEN JOHTOTIETOJA

Johdin	Välähierintanssi		Vaihe- reaktanssi Xv Ω/ km	Maakape- sitanssi Cm μF/km	Käyttöke- pitimenssi Ck μF/km	Suurin sallittu kuormitusvirta		Suurin sallittu 1 s oikosulkuvirta		Jäähäy- mis- alkuekio τ min	Maasuku- virta Ie A
	Rv Ω/ km +20 °C 1) +40 °C 2)	In A				Ik kA	Ik kA	T1-Itittimet	T2-Itittimet		
AHMCNK 3x70	0,444	0,480	0,116	0,18	0,18	150	170	5,4	5,4	35	2,1
AHMCNK 3x120	0,254	0,274	0,107	0,21	0,21	200	225	9,1	9,1	55	2,4
AHMCNK 3x185	0,165	0,178	0,097	0,24	0,24	265	285	14,1	14,1	80	2,7
AHMCNK 3x300	0,103	0,111	0,091	0,28	0,28	350	375	22,1	22,1	105	3,2
AHMDMK 3x70	0,446	0,482	0,127	0,18	0,18	150	170	5,4	5,4	30	2,1
AHMDMK 3x120	0,256	0,277	0,111	0,21	0,21	200	225	9,1	9,1	50	2,4
AHMDMK 3x185	0,169	0,183	0,100	0,24	0,24	265	285	14,1	14,1	75	2,7
AHMDMK 3x300	0,105	0,113	0,101	0,28	0,28	350	375	22,1	22,1	100	3,2
AHXAMK-W 3x70	0,446	0,482	0,138	0,18	0,18	235	200	5,7	6,7	42	2,1
AHXAMK-W 3x120	0,256	0,277	0,129	0,23	0,23	325	265	9,8	11,4	47	2,6
AHXAMK-W 3x185	0,169	0,183	0,119	0,26	0,26	425	330	15	17,5	53	3,0
AHXAMK-W 3x240 + 70	0,130	0,140	0,116	0,30	0,30	510	375	19,4	22,6	60	3,4
AHXAMK-W 3x300	0,106	0,115	0,113	0,32	0,32	565	435	24,2	28,2	65	3,7
AHXCMK 3x1x70	0,456	0,493	0,190	0,18	0,18	255	215	5,7	6,7	25	2,1
AHXCMK 3x1x120	0,266	0,287	0,180	0,23	0,23	350	280	9,8	11,4	30	2,6
AHXCMK 3x1x185	0,184	0,199	0,172	0,26	0,26	440	350	15	17,5	35	3,0
AHXCMK 3x1x300	0,120	0,130	0,163	0,32	0,32	580	440	24,2	28,2	44	3,7
AHXCMK 3x1x500	0,088	0,095	0,157	0,39	0,39	755	550	40,3	47	55	4,5
AHXCMK 3x1x800	0,073	0,079	0,154	0,49	0,49	950	650	63,9	74,4	67	5,6
AHXCKMK 3x70	0,446	0,482	0,132	0,18	0,18	190	175	5,7	6,7	45	2,1
AHXCKMK 3x120	0,256	0,277	0,121	0,23	0,23	265	230	9,8	11,4	65	2,6
AHXCKMK 3x185	0,169	0,183	0,114	0,26	0,26	340	290	15	17,5	84	3,0
AHXCKMK 3x300	0,106	0,115	0,107	0,32	0,32	460	380	24,2	28,2	90	3,7
APYAKMM 3x25	1,21	1,31	0,145	0,20	0,20	85	94	2,3	2,5	18	2,3
APYAKMM 3x35	0,876	0,947	0,138	0,22	0,22	105	115	3,3	3,7	20	2,5
APYAKMM 3x50	0,649	0,701	0,131	0,25	0,25	125	140	4,6	5,25	25	2,9
APYAKMM 3x70	0,451	0,487	0,124	0,29	0,29	155	170	6,5	7,3	30	3,3
APYAKMM 3x95	0,329	0,356	0,118	0,32	0,32	190	205	8,7	9,9	40	3,7
APYAKMM 3x120	0,262	0,283	0,115	0,35	0,35	210	225	11	12,5	50	4,0
APYAKMM 3x150	0,216	0,233	0,111	0,38	0,38	240	255	13,7	15,6	60	4,3
APYAKMM 3x185	0,175	0,189	0,107	0,41	0,41	270	290	16,9	19,2	65	4,7
APYAKMM 3x240	0,138	0,149	0,104	0,45	0,45	315	335	21,9	24,8	80	5,1
APYAKMM 3x300	0,114	0,123	0,101	0,49	0,49	360	375	27,3	31	90	5,6

Huomautukset 1) 2) 3) 4) ja 5), katso s. 40.

## LIITE 3: 20 KV KAAPELIEN JOHTOTIETOJA (SA5:94 1994.)

SA 5:94

LIITE 1.2

2(3)

## 20 KV KAAPELIEN JOHTOTIETOJA

Johdin	Vaiheresistanssi		Vaihe- reaktanssi Xv Ω/ km	Maaka- pitanssi Cm μF/km	Käyttöka- pitanssi Ck μF/km	Suurin sallittu kuormitusvirta		Suurin sallittu 1 s oikosulkuvirta		Jäähdytys- aika τ min	Massaku- virta	
	+20 °C   Ω/ km	+40 °C   Ω/ km				In A	I <sub>n</sub> A	Ik kA	Ik kA		I <sub>o</sub> A	A
HMCMK 3x25	0,728	0,785	0,135	0,14	0,14	140	145	2,95	2,95	18	1,6	1,6
HMCMK 3x35	0,525	0,566	0,129	0,15	0,15	165	175	4,1	4,1	20	1,7	1,7
HMCMK 3x50	0,388	0,418	0,119	0,17	0,17	205	215	5,8	5,8	25	1,9	1,9
HMCMK 3x70	0,269	0,290	0,116	0,18	0,18	250	260	8,1	8,1	28	2,1	2,1
HMCMK 3x95	0,194	0,209	0,110	0,20	0,20	295	310	11	11	33	2,3	2,3
HMCMK 3x120	0,155	0,167	0,107	0,21	0,21	340	350	13,8	13,8	35	2,4	2,4
HMCMK 3x150	0,126	0,136	0,101	0,23	0,23	390	400	17,2	17,2	40	2,6	2,6
HMCMK 3x185	0,102	0,110	0,097	0,24	0,24	435	440	21,2	21,2	45	2,7	2,7
HMCMK 3x240	0,078	0,084	0,094	0,26	0,26	515	510	27,4	27,4	48	3,0	3,0
HPLKVJ 3x25	0,732	0,790	0,148	0,19	0,19	105	120	3,6	4,6	20	2,2	2,2
HPLKVJ 3x35	0,529	0,571	0,138	0,21	0,21	135	150	5	5,6	25	2,4	2,4
HPLKVJ 3x50	0,392	0,423	0,129	0,23	0,23	160	175	7,1	8,6	35	2,6	2,6
HPLKVJ 3x70	0,274	0,296	0,123	0,26	0,26	200	220	9,8	11,1	45	3,0	3,0
HPLKVJ 3x95	0,199	0,215	0,116	0,29	0,29	240	260	13,3	15	55	3,3	3,3
HPLKVJ 3x120	0,160	0,173	0,112	0,32	0,32	275	300	16,8	19	70	3,7	3,7
HPLKVJ 3x150	0,131	0,141	0,107	0,34	0,34	315	335	20,9	23,7	80	3,9	3,9
HPLKVJ 3x185	0,107	0,115	0,104	0,37	0,37	360	380	25,8	29,1	85	4,2	4,2
HPLKVJ 3x240	0,084	0,091	0,101	0,41	0,41	415	440	33,3	37,7	90	4,7	4,7
HPLKVJ 3x300	0,070	0,076	0,098	0,45	0,45	470	495	41,6	47,1	100	5,1	5,1
HXCMK 3x1x35	0,537	0,579	0,204	0,15	0,15	215	185	4,4	5,1	20	1,7	1,7
HXCMK 3x35	0,527	0,568	0,150	0,15	0,15	165	140	4,4	5,1	35	1,7	1,7
HXCMK 3x185	0,104	0,112	0,116	0,26	0,26	435	360	22,9	26,7	70	3,0	3,0
PYLVJ 3x25	0,732	0,790	0,157	0,19	0,19	105	120	3,6	4	20	2,2	2,2
PYLVJ 3x35	0,530	0,572	0,149	0,21	0,21	135	150	5	5,6	25	2,4	2,4
PYLVJ 3x50	0,393	0,424	0,140	0,23	0,23	160	175	7,1	8	35	2,6	2,6
PYLVJ 3x70	0,275	0,297	0,132	0,26	0,26	200	220	9,8	11,1	45	3,0	3,0
PYLVJ 3x95	0,201	0,217	0,127	0,29	0,29	240	260	13,3	15	55	3,3	3,3
PYLVJ 3x120	0,162	0,175	0,123	0,32	0,32	275	300	16,8	19	70	3,7	3,7
PYLVJ 3x150	0,134	0,145	0,119	0,34	0,34	315	335	20,9	23,7	80	3,9	3,9
PYLVJ 3x185	0,110	0,119	0,116	0,37	0,37	360	380	25,8	29,1	85	4,2	4,2
PYLVJ 3x240	0,089	0,096	0,113	0,41	0,41	415	440	33,3	37,7	90	4,7	4,7
PYLVJ 3x300	0,076	0,082	0,110	0,45	0,45	475	495	41,6	47,1	100	5,1	5,1

Huomautukset 1) 2) 3) 4) ja 5), katso s. 40.

## LIITE 4: 20 KV KAAPELIEN JOHTOTIETOJA 3/3 (SA5:94 1994.)

SA 5:94

LIITE 1.2

3(3)

## 20 KV KAAPELIEN JOHTOTIETOJA

Johdin	Vaiheresistanssi		Vaihe- reaktanssi Xv Ω/ km	Masaka- sitanessi Cm μF/km	Käyttöka- peitanessi Ck μF/km	Suurin sallittu kuormitusvirta In A		Suurin sallittu oikosulkuvirta Ik kA		Jäähdytys- aikavakio τ min	Maasulkui- virta Ie A
	+20 °C 1)	+40 °C 2)				3)	4)	5)			
VESISTOKAAPELIT											
AHPLKPJJ 3x35	0,876	0,947	0,132	0,23	0,23	105	115	3,3	3,7	50	2,6
AHPLKPJJ 3x70	0,454	0,491	0,119	0,29	0,29	155	170	6,5	7,3	60	3,3
AHPLKPJJ 3x120	0,266	0,287	0,107	0,35	0,35	210	225	11	12,5	70	4,0
AHPLKPJJ 3x185	0,178	0,192	0,101	0,41	0,41	270	290	16,9	19,2	90	4,7
HPLKPJJ 3x25	0,734	0,793	0,141	0,20	0,20	105	120	3,6	4	35	2,3
HPLKPJJ 3x35	0,532	0,575	0,132	0,22	0,22	135	150	5	5,6	40	2,5
HPLKPJJ 3x50	0,397	0,429	0,125	0,25	0,25	160	175	7,1	8	50	2,9
HPLKPJJ 3x70	0,279	0,301	0,119	0,29	0,29	200	220	9,8	11,1	55	3,3
HPLKPJJ 3x95	0,205	0,222	0,113	0,32	0,32	240	260	13,3	15	60	3,7
HPLKPJJ 3x120	0,166	0,179	0,107	0,35	0,35	275	300	16,8	19	65	4,0
HPLKPJJ 3x150	0,138	0,149	0,104	0,38	0,38	315	335	20,9	23,7	75	4,3

- 1) + 20°C johdinlämpötilan johdinresistanssia käytetään jänniteenaleneman määrittämisessä
- 2) + 40°C johdinlämpötilan johdinresistanssia käytetään oikosulkuvirtojen määrittämisessä
- 3) ilman lämpötila +25 °C. Johtimen lämpötila +65 °C, PEX-eristeiset +90 °C.
- 4) Maan lämpötila +15 °C. Johtimen lämpötila +65 °C.
- 5) Maasulkuvirta laskettu jännitteellä 21 kV.

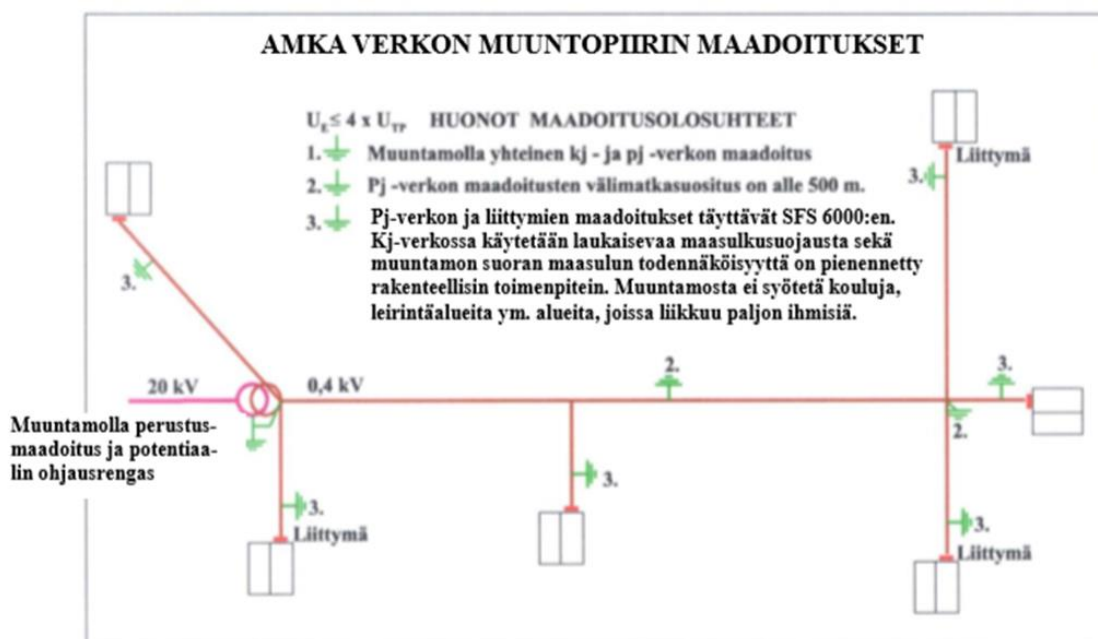
LIITE 5: MUUNTOPIIRIN MAADOITUKSET, KUN TAVOITETASO  $U_E \leq 2 \times U_{TP}$  (RJ 19:16 2016.)

Kuva 1. Muuntopiirin maadoitukset, tavoitetaso  $U_E \leq 2 \times U_{TP}$



LIITE 6: MUUNTOPIIRIN MAADOITUKSET, KUN TAVOITETASO  $U_E \leq 4 \times U_{TP}$ , AMKA-VERKKO (RJ 19:16 2016.)

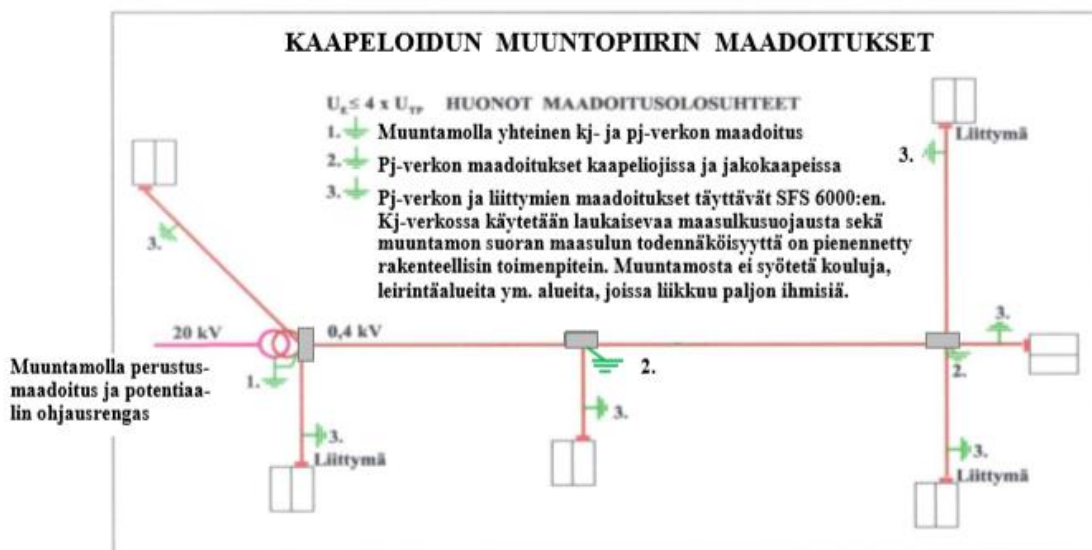
Kuva 2. Muuntopiirin maadoitukset, tavoitetaso  $U_E \leq 4 \times U_{TP}$ , AMKA -verkko



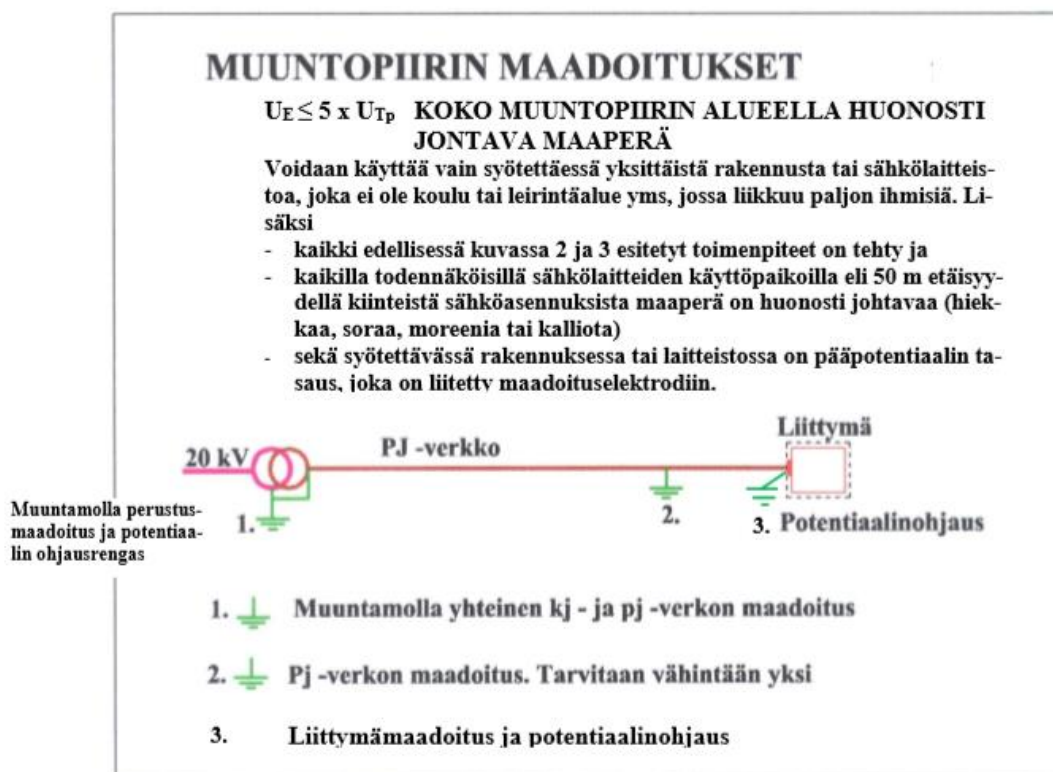


LIITE 7: MUUNTOPIIRIN MAADOITUKSET, KUN TAVOITETASO  $U_E \leq 4 \times U_{TP}$ , KAAPELI-VERKKO (RJ 19:16 2016.)

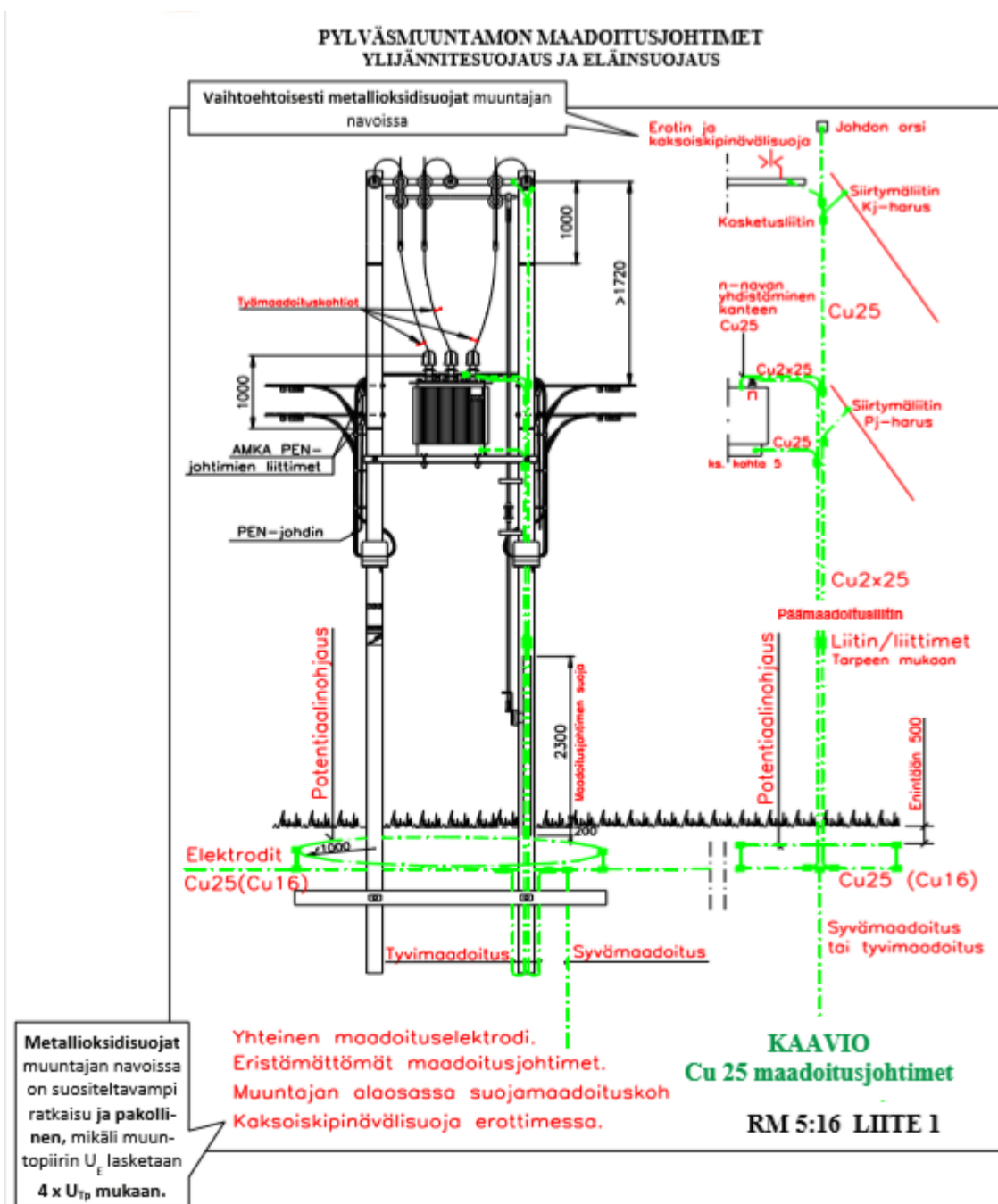
Kuva 3. Muuntopiirin maadoitukset, tavoitetaso  $U_E \leq 4 \times U_{TP}$ , KAAPELI-verkko



LIITE 8: MUUNTOPIIRIN MAADOITUKSET, KUN TAVOITETASO  $U_E \leq 5 \times U_{TP}$  (RJ 19:16 2016.)

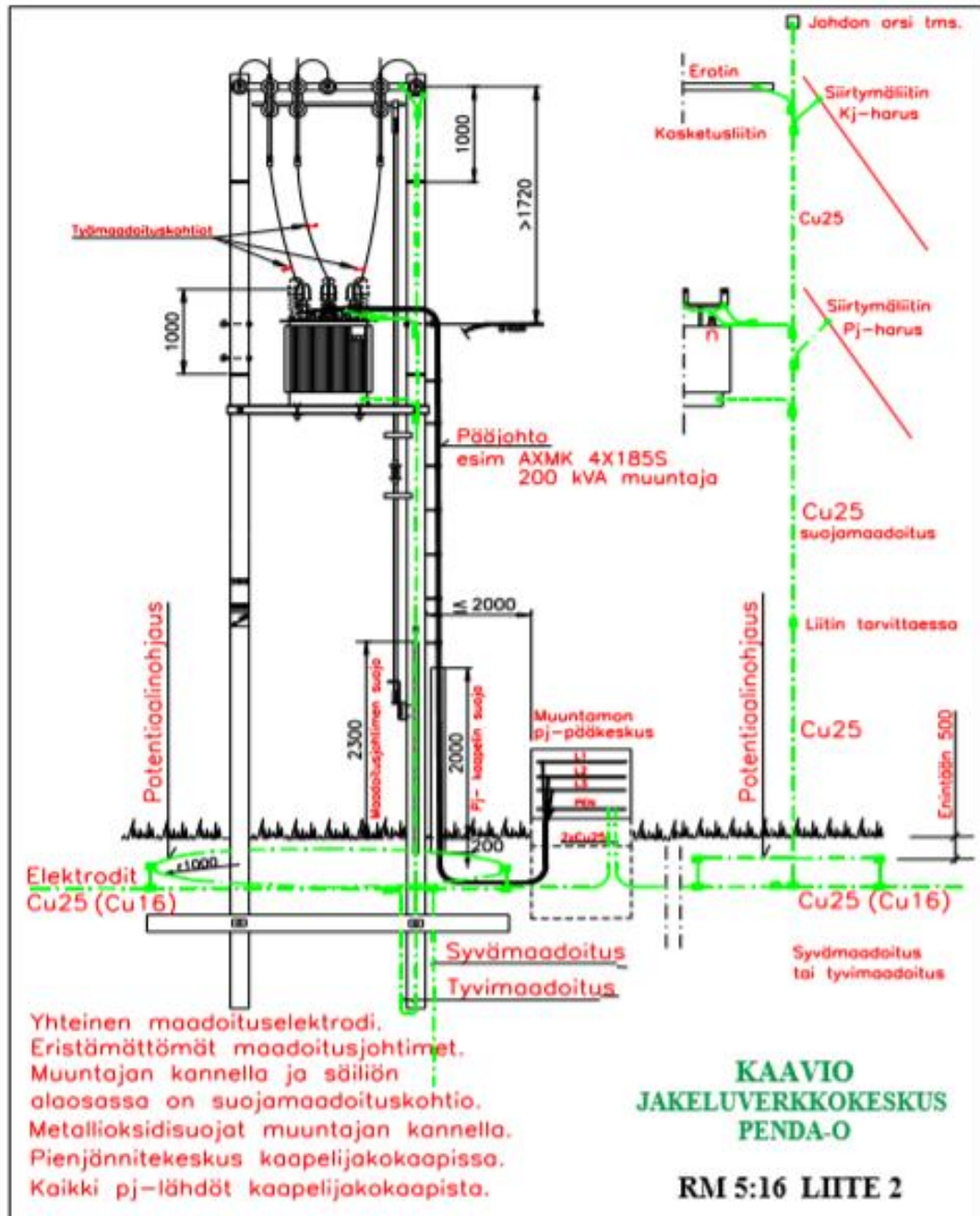


## LIITE 9: PYLVÄSMUUNTAMON MAADOITUSKAAVIO (RM 5:16 2016.)



## LIITE 10: PYLVÄSMUUNTAMON MAADOITUSKAAVIO (RM 5:16 2016.)

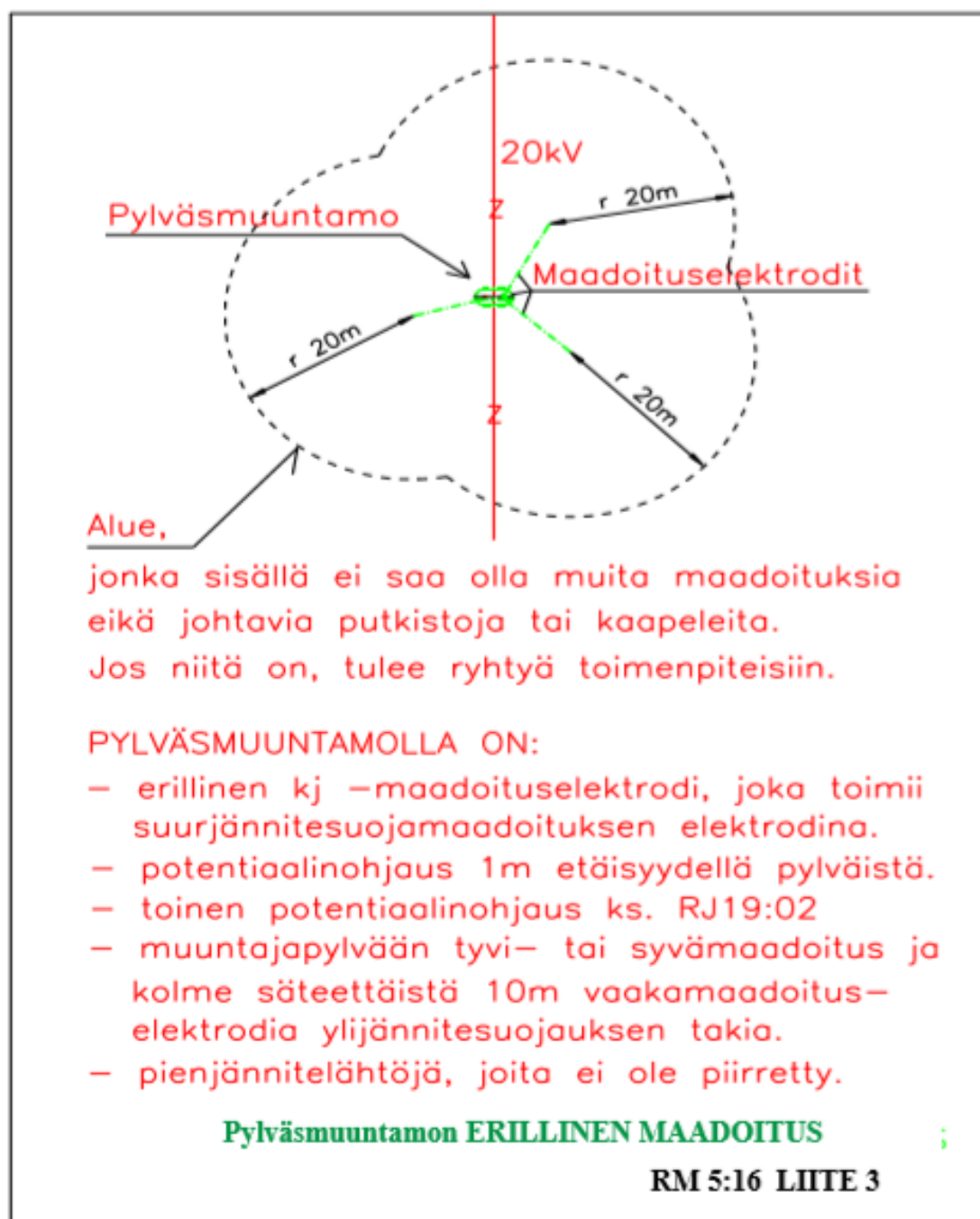
PYLVÄSMUUNTAMON MAADOITUSJOHTIMET  
YLIJÄNNITESUOJAUS JA ELÄINSUOJAUS



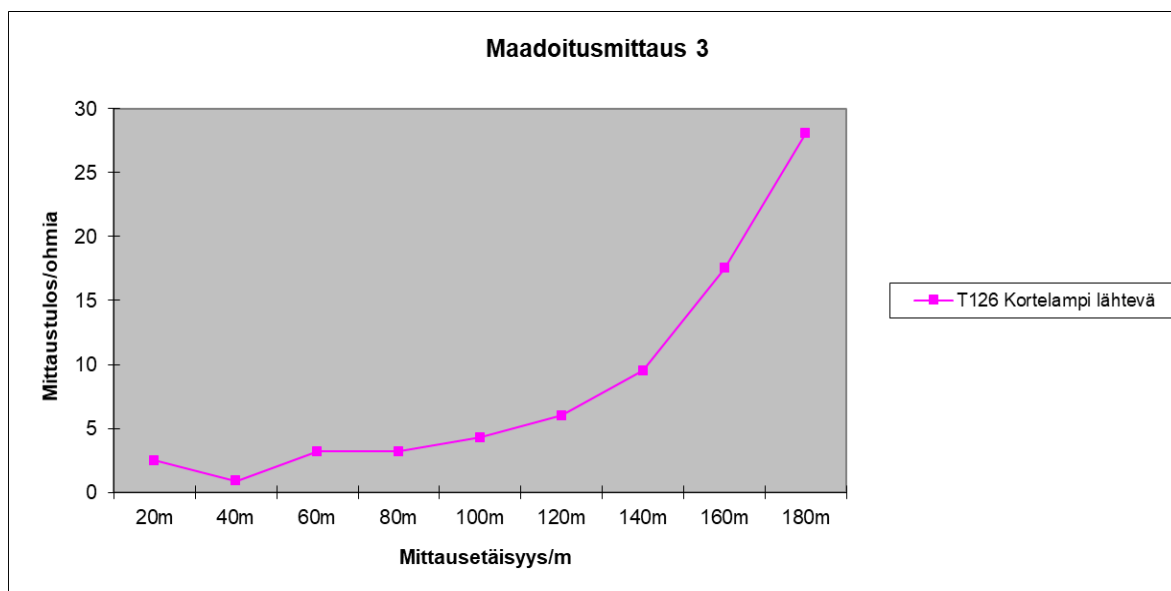
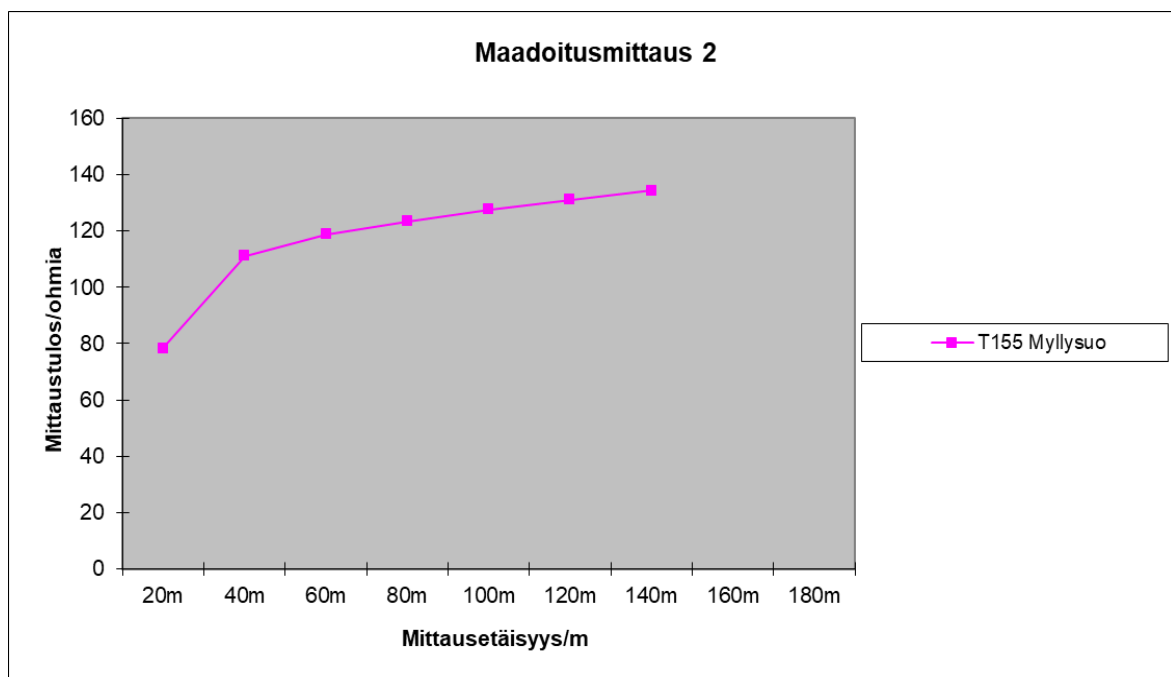
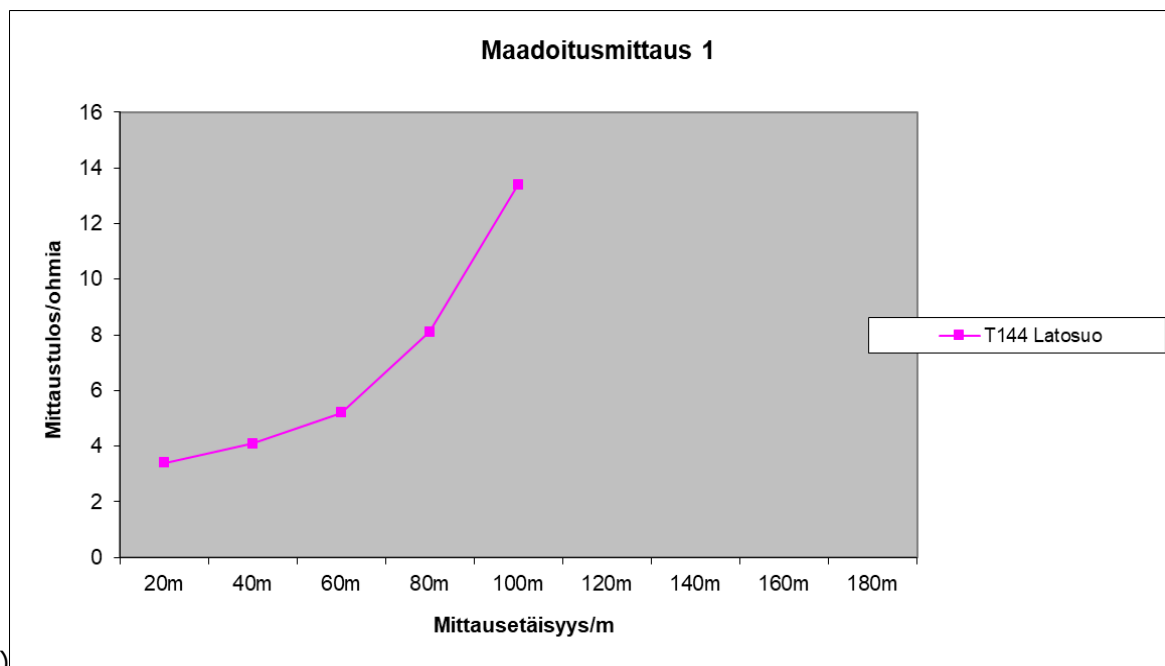


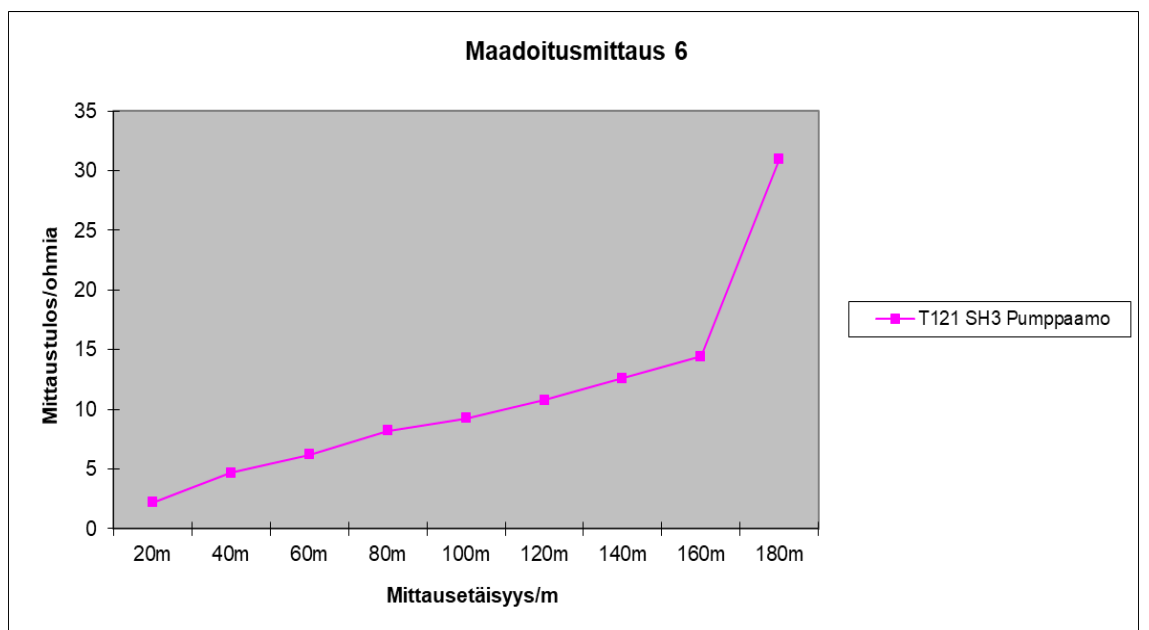
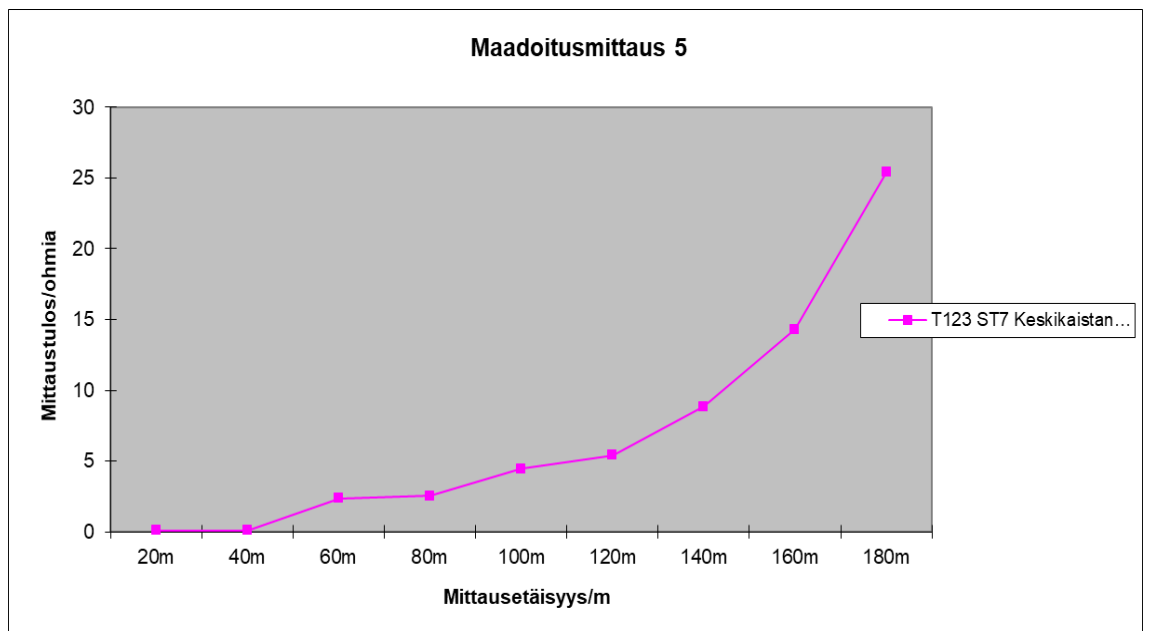
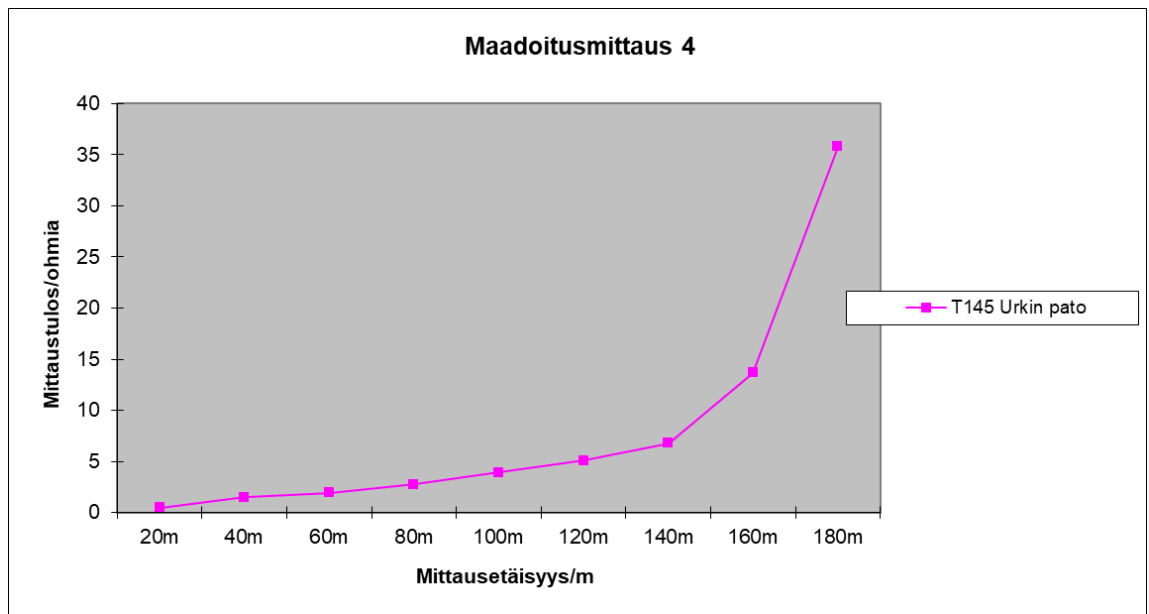
## LIITE 11: PYLVÄSMUUNTAMON ERILLINEN MAADOITUS (RM 5:16 2016.)

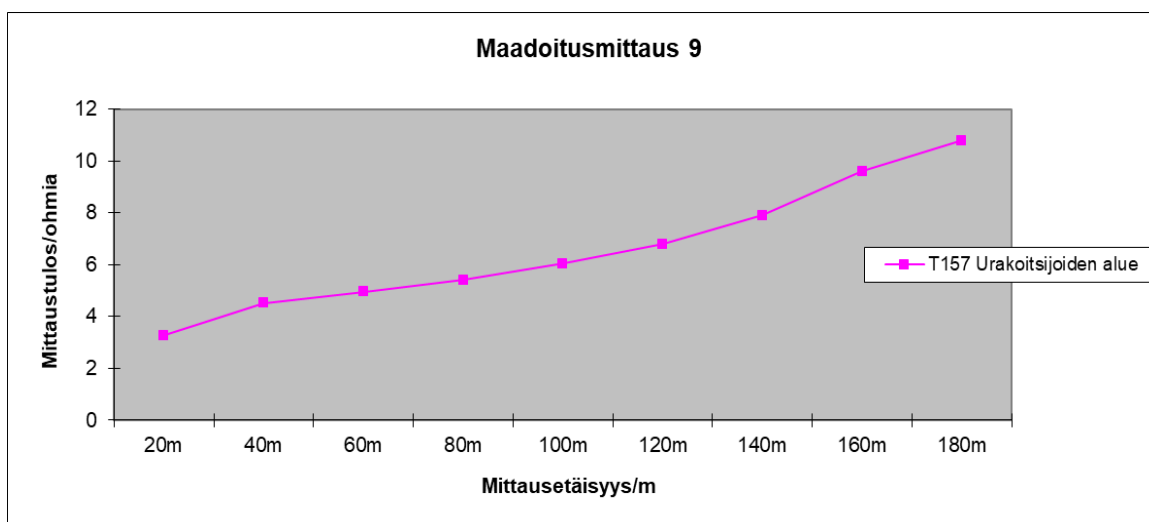
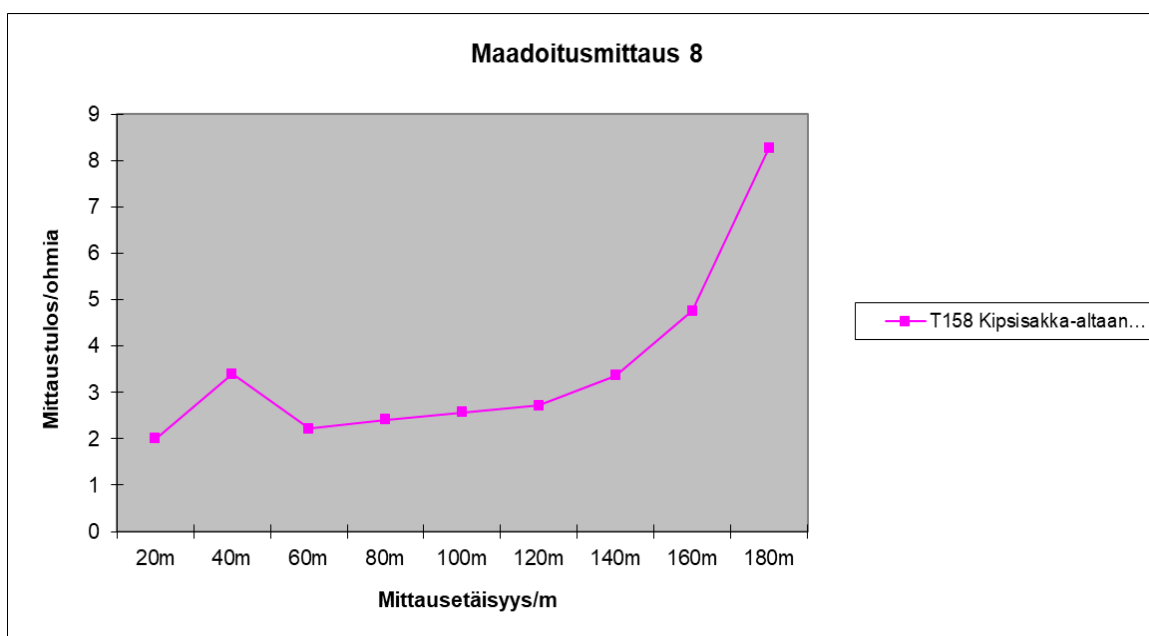
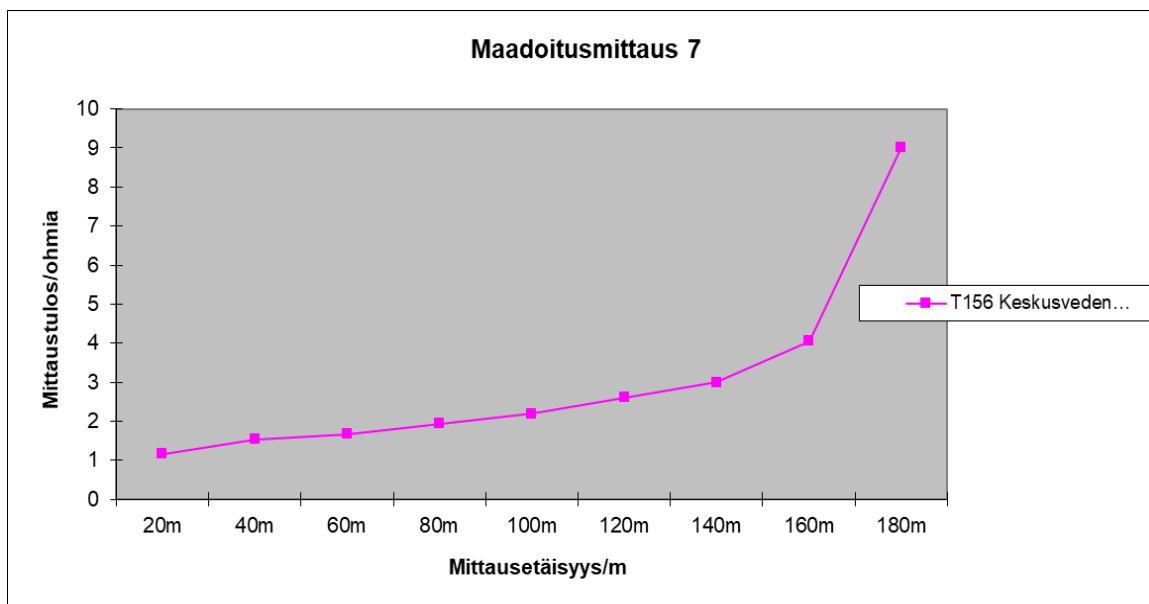
PYLVÄSMUUNTAMON MAADOITUSJOHTIMET  
YLIJÄNNITESUOJAUS JA ELÄINSUOJAUS

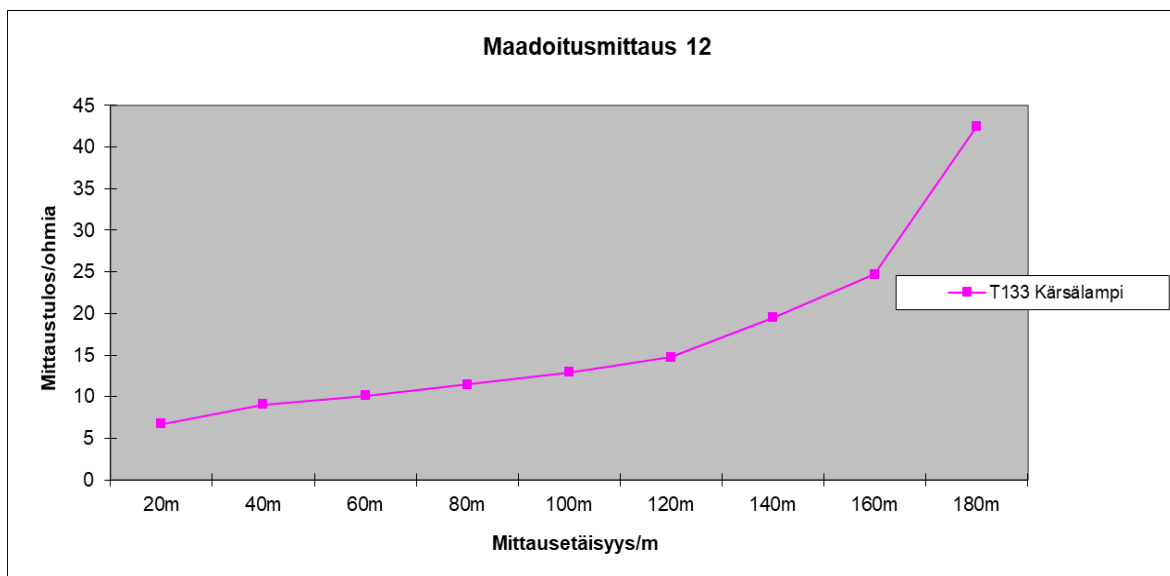
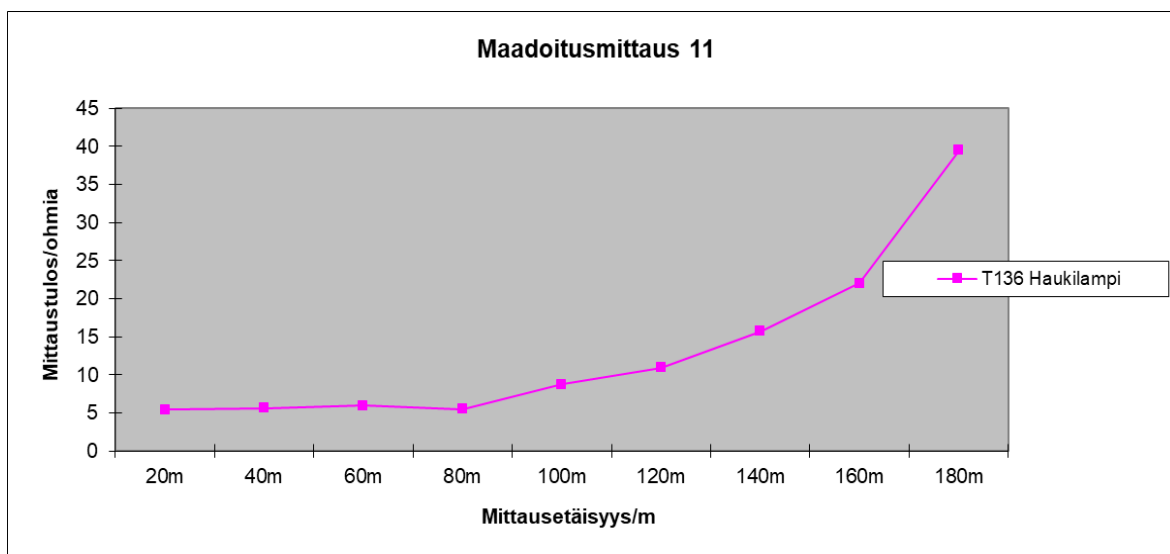
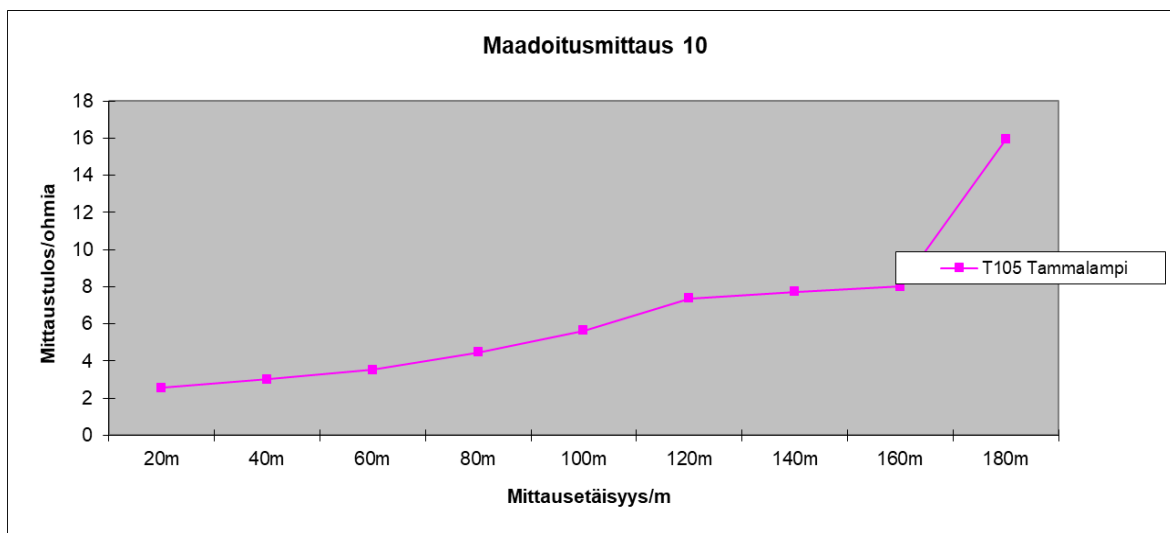


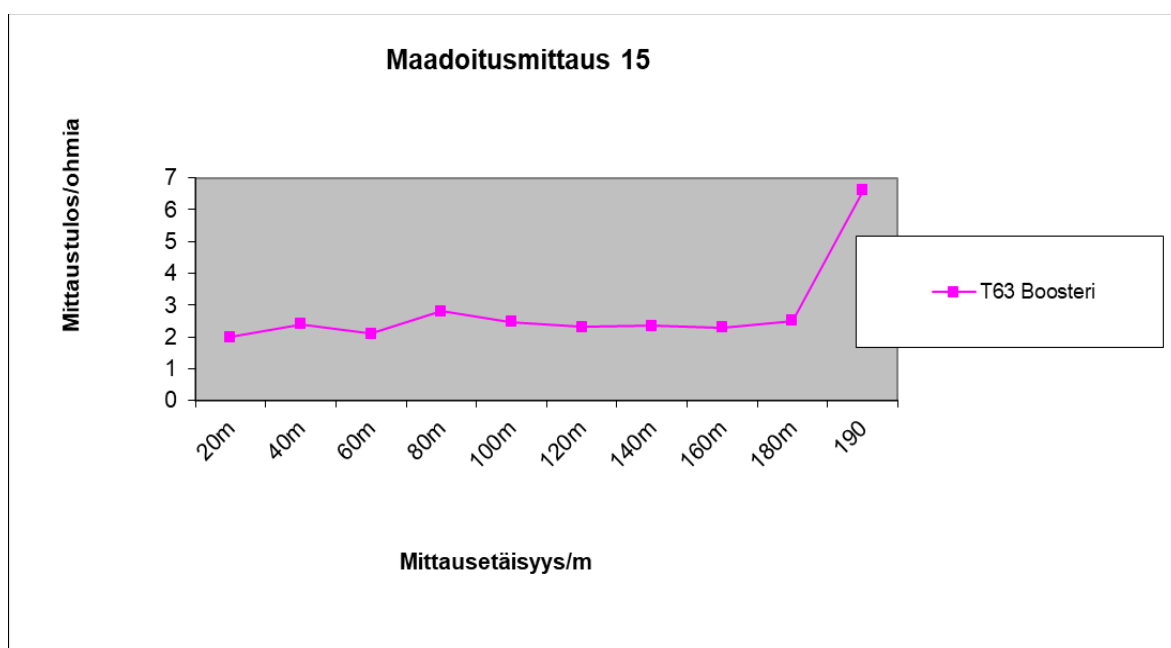
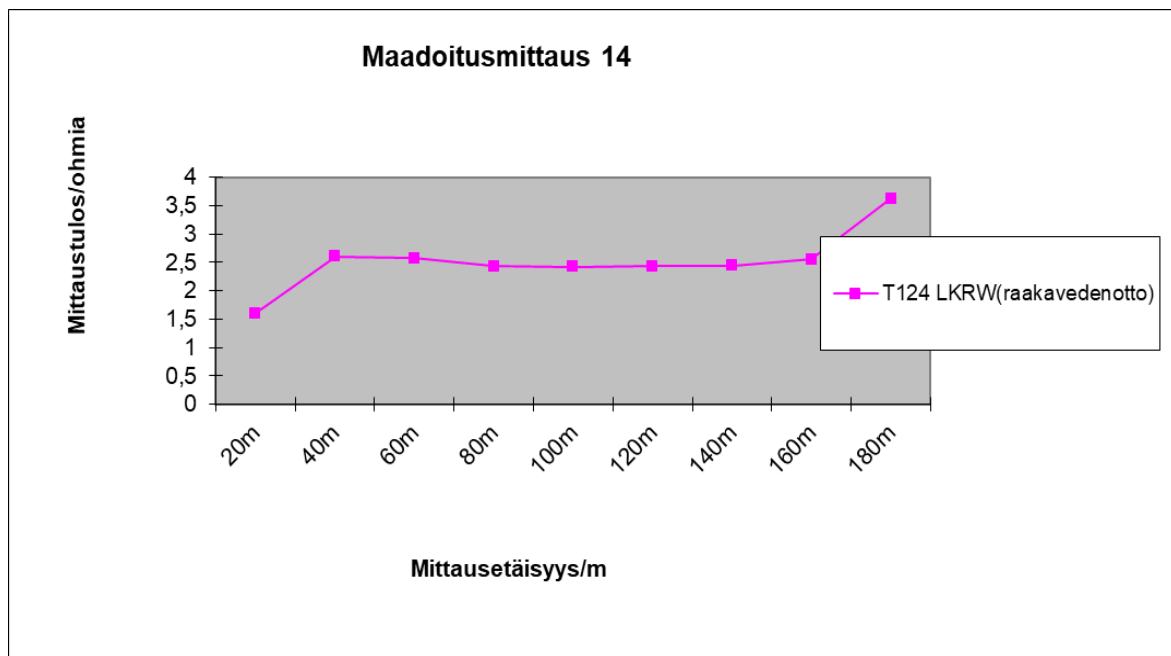
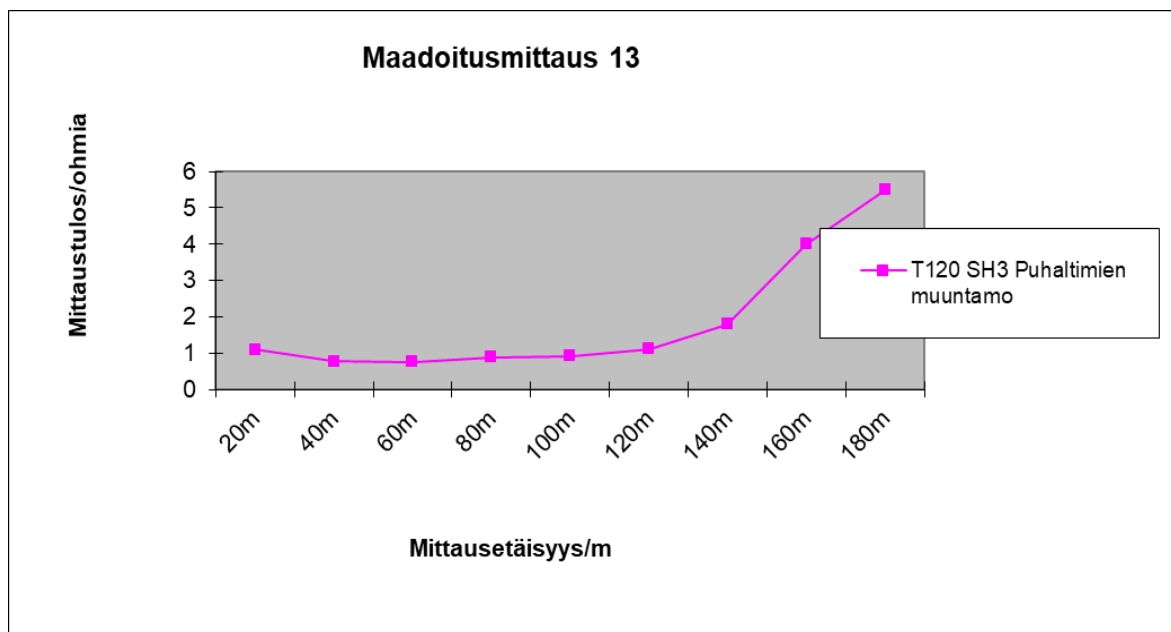
## LIITE 12: MAADOITUSVASTUSMITTAUKSEN TULOKSET (KEMPPAINEN 2017.)

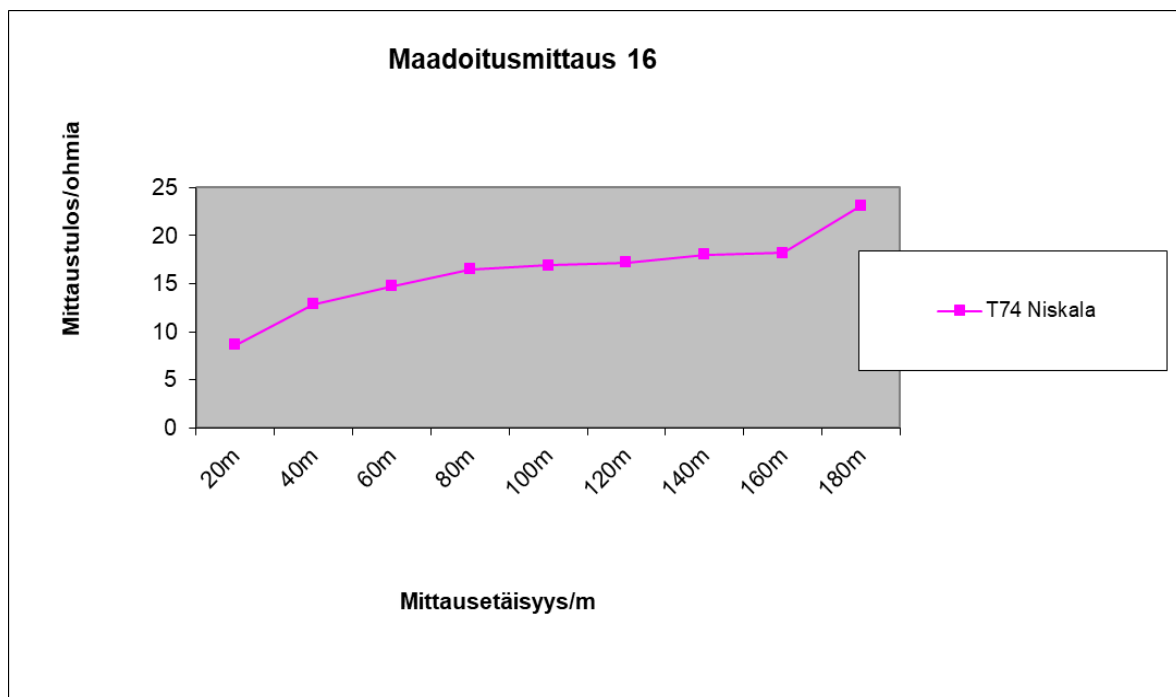








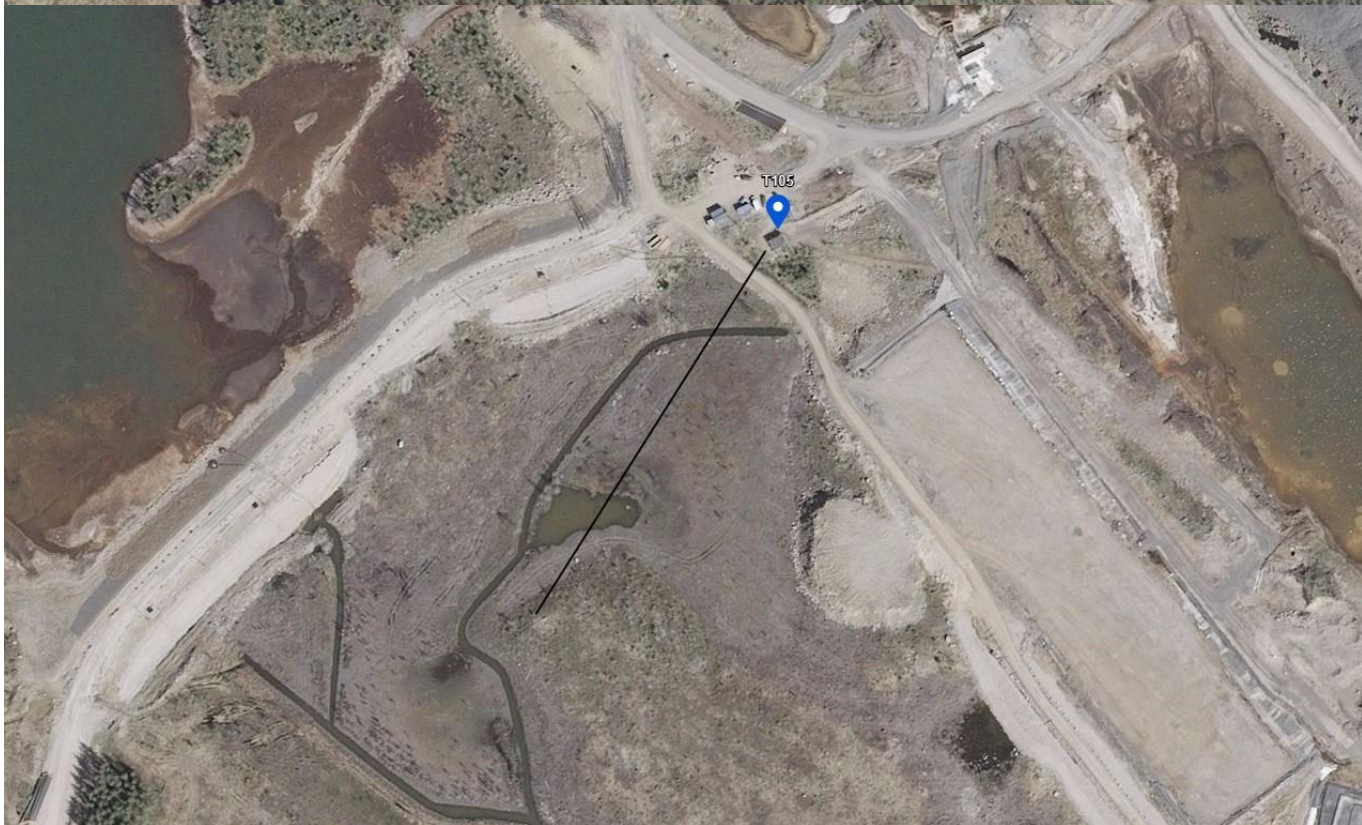




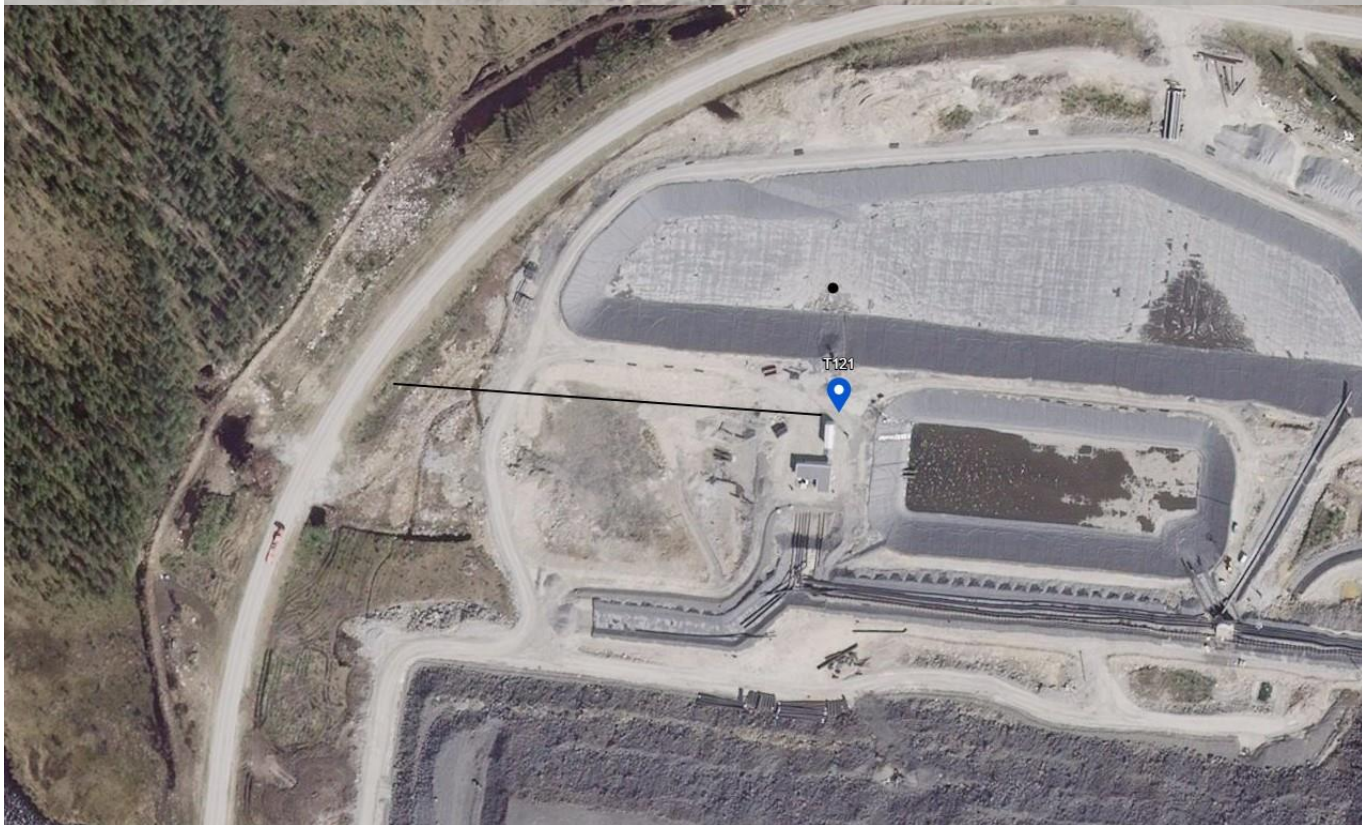
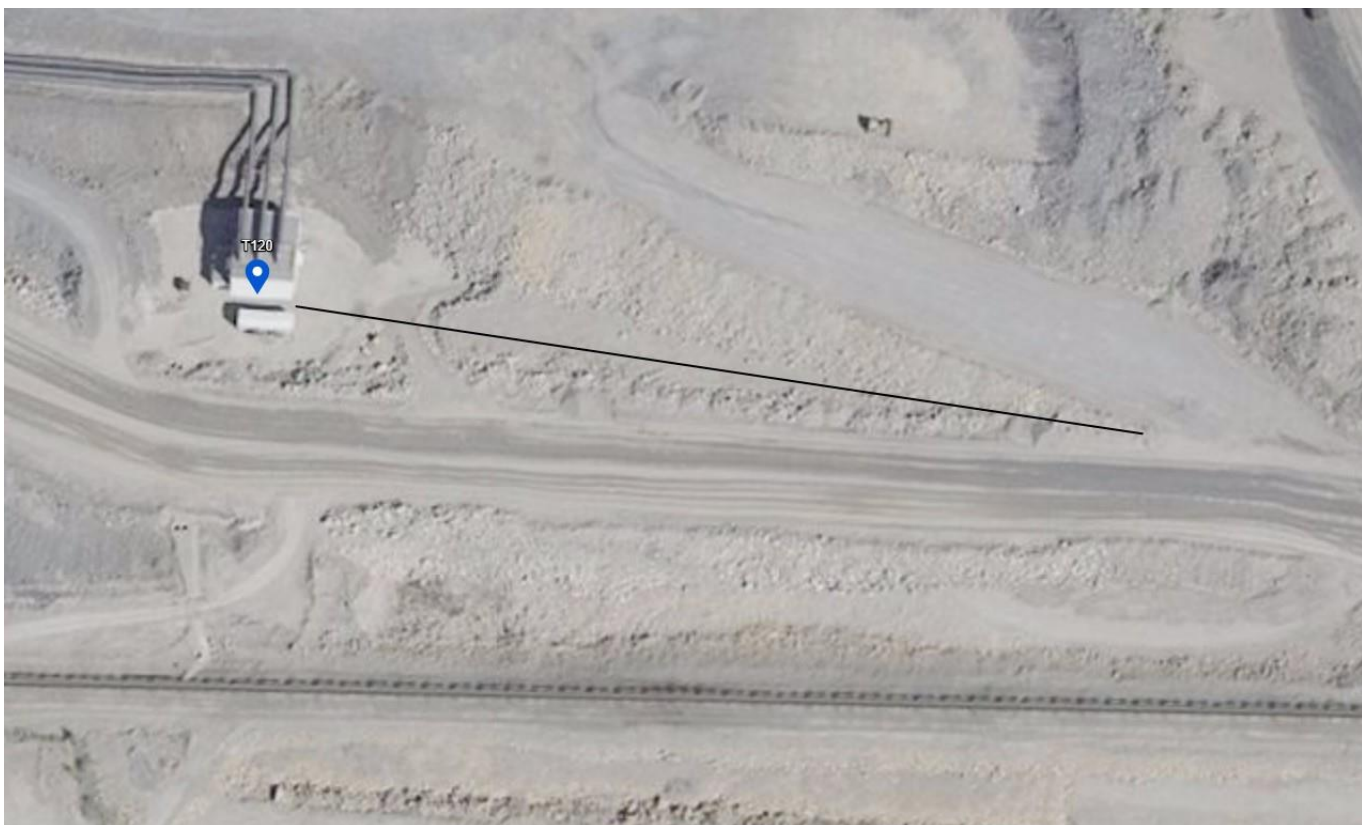
LIITE 13: MAADOITUSVASTUKSIEN MITTAUSSUUNNAT (KEMPPAINEN 2017.)



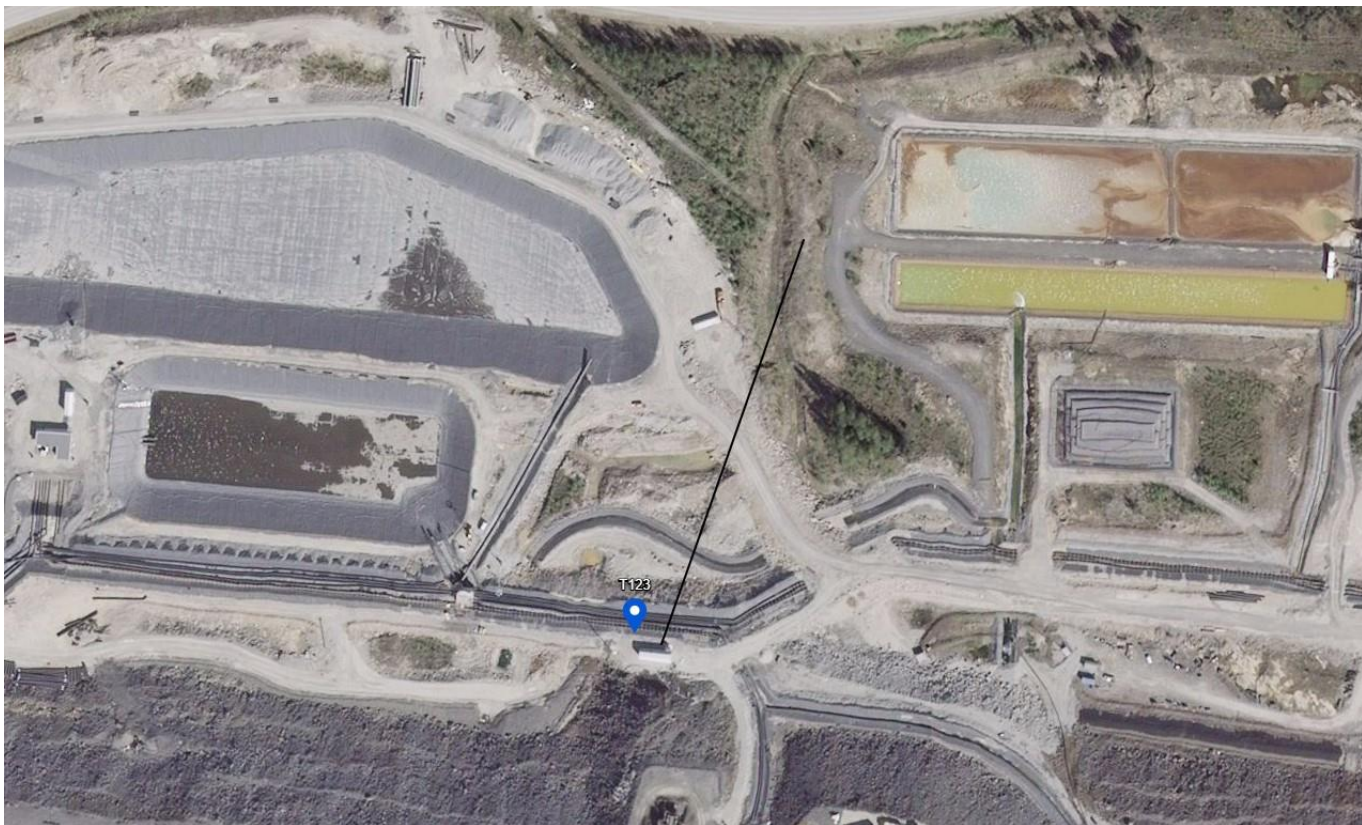




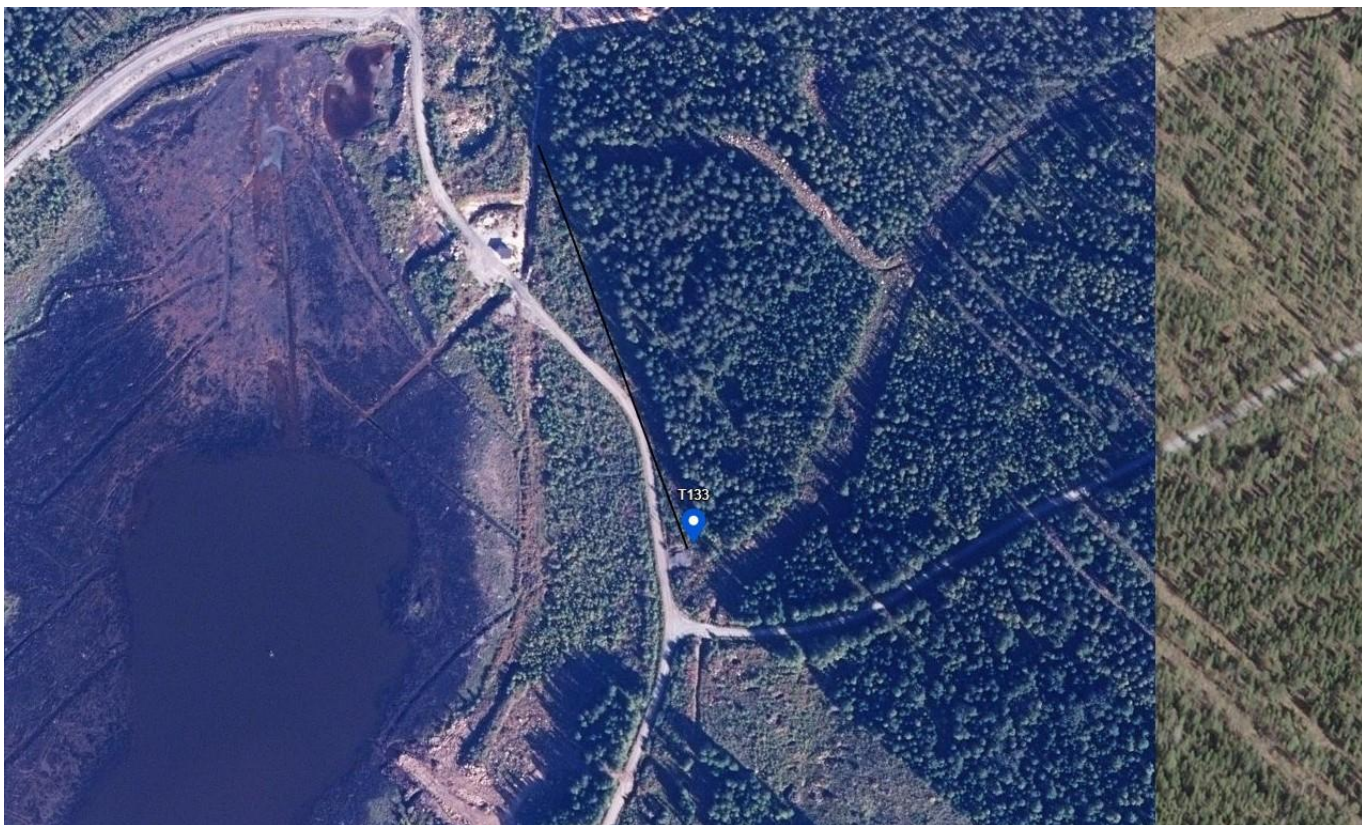
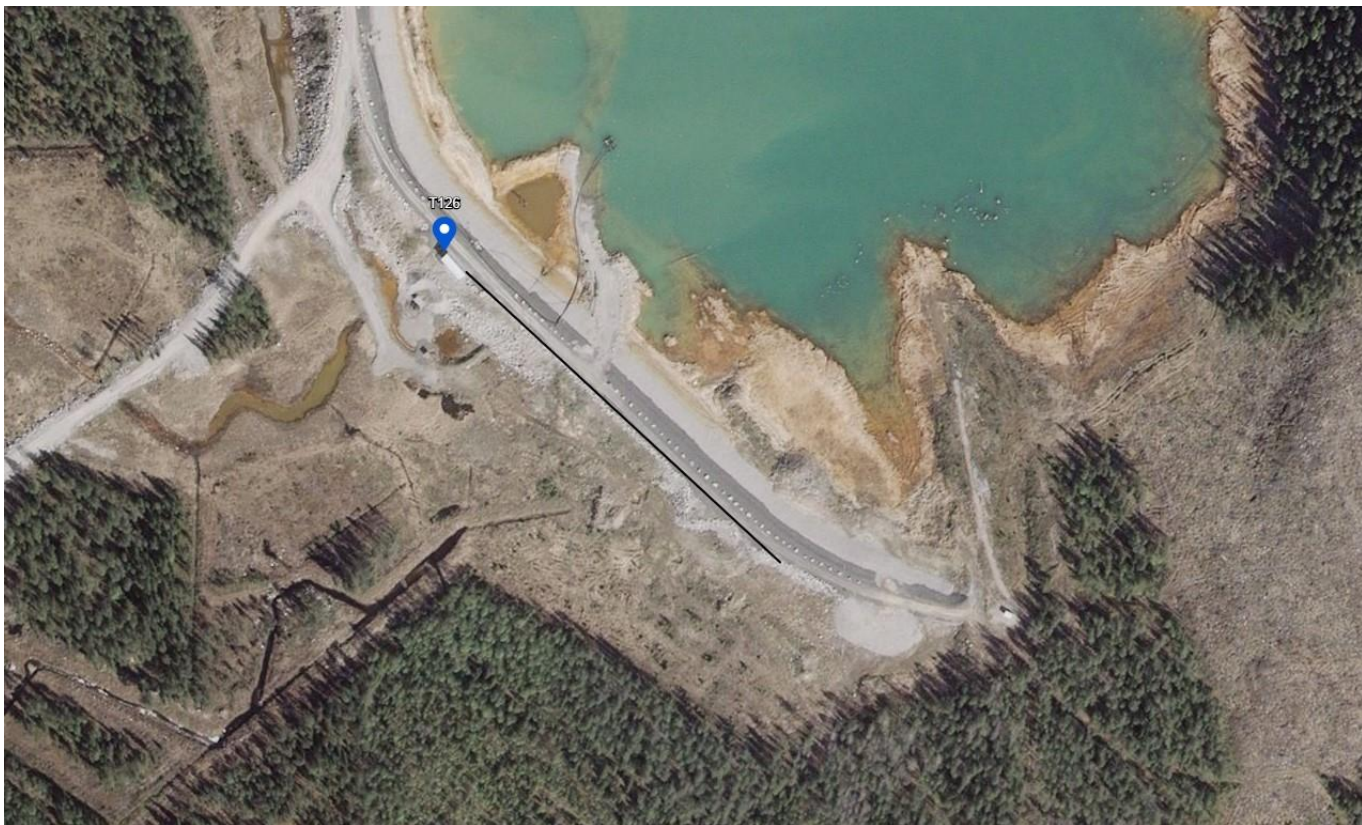




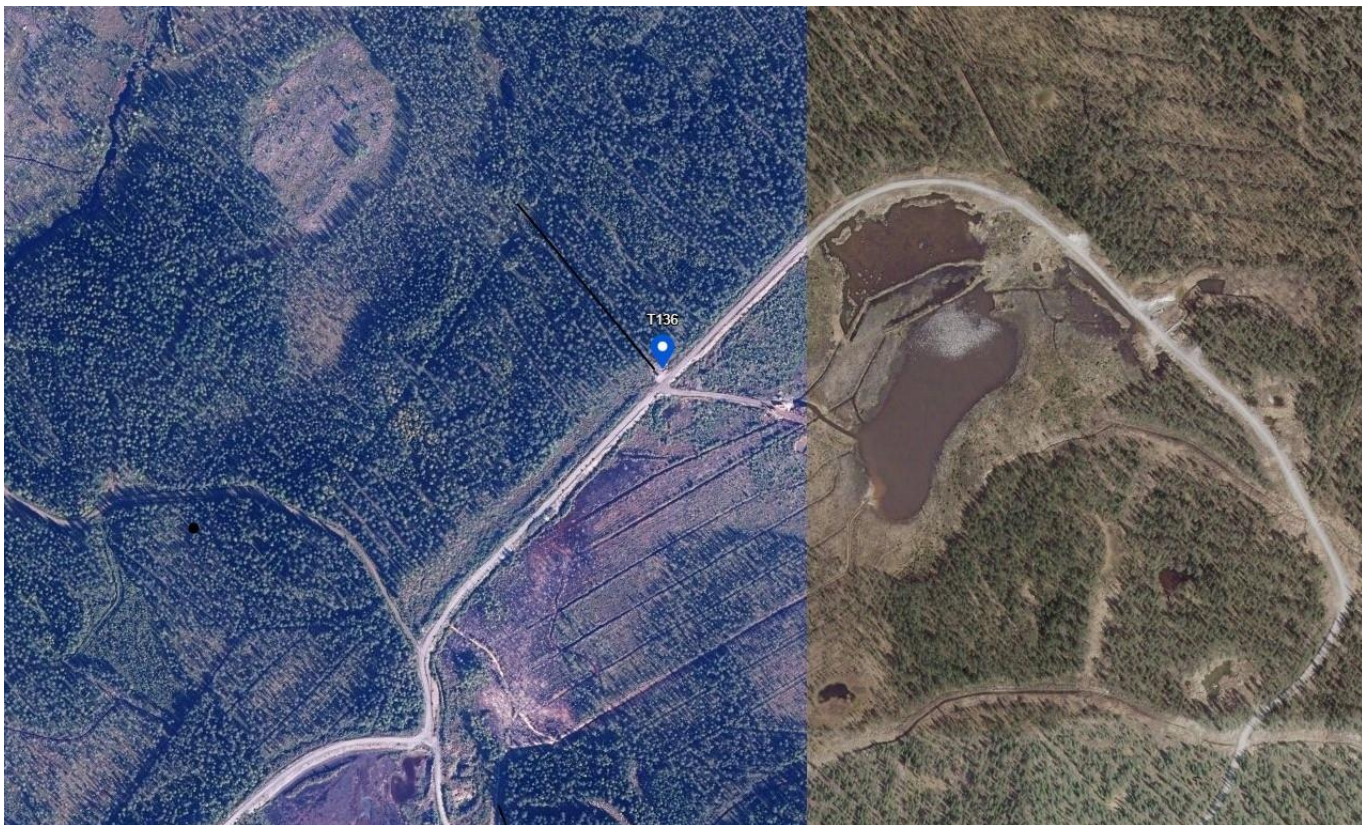




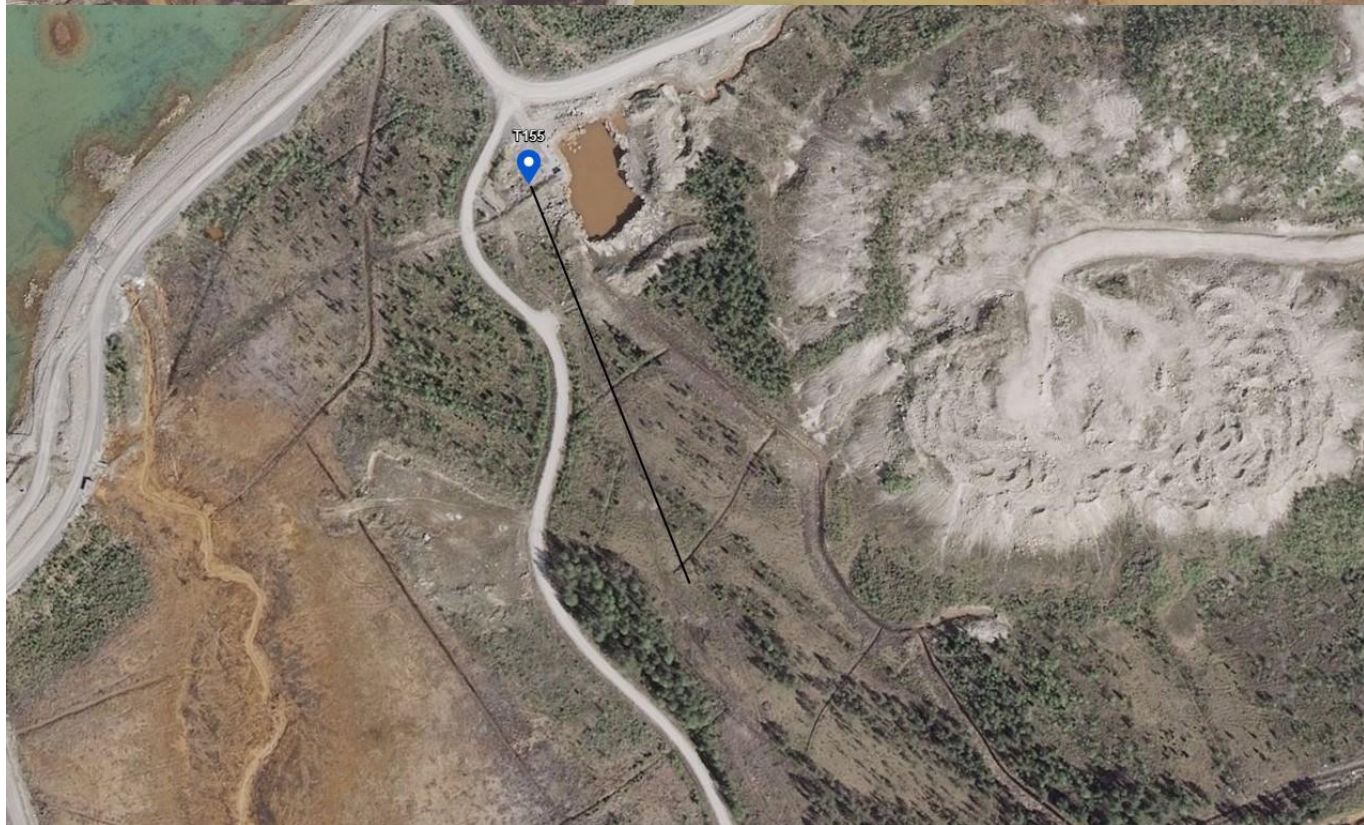
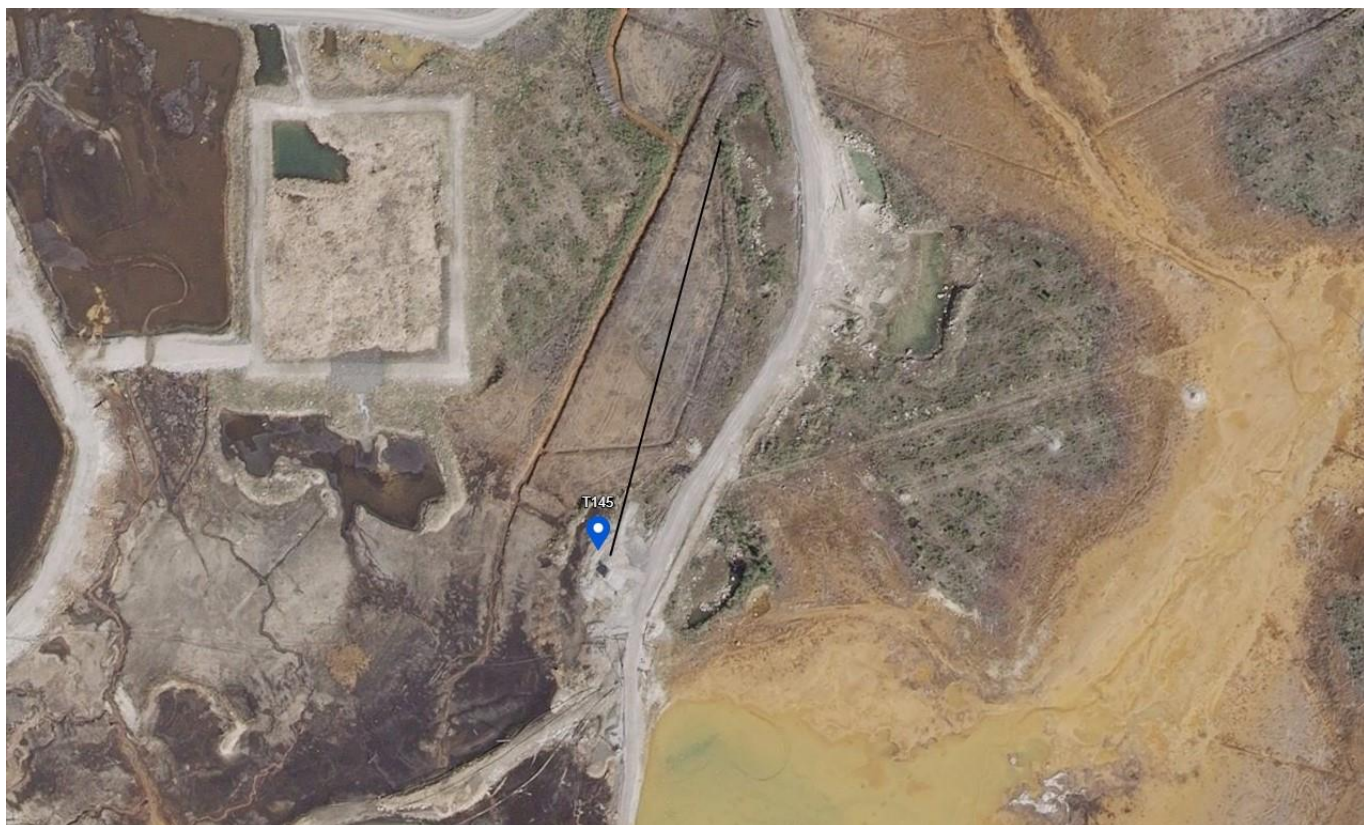




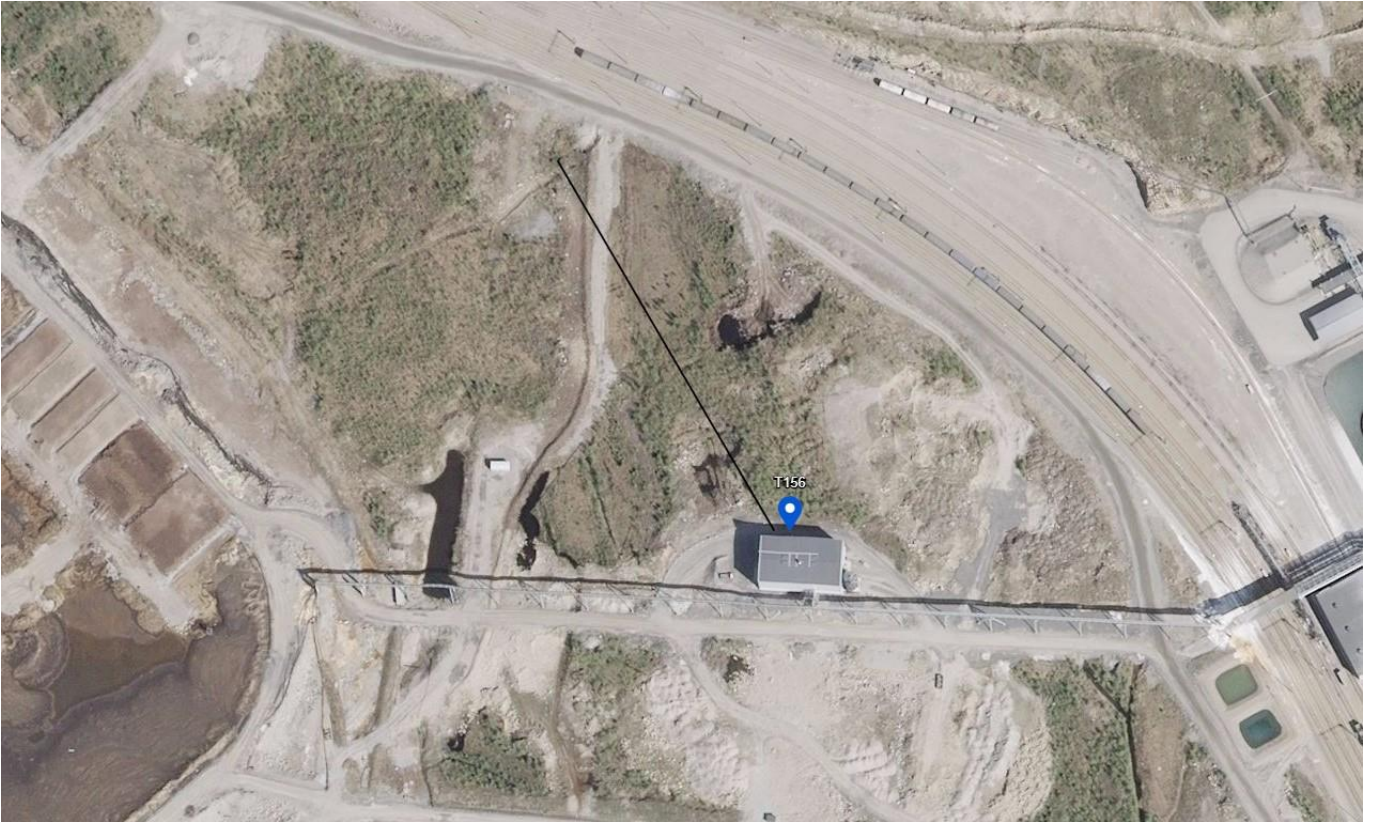




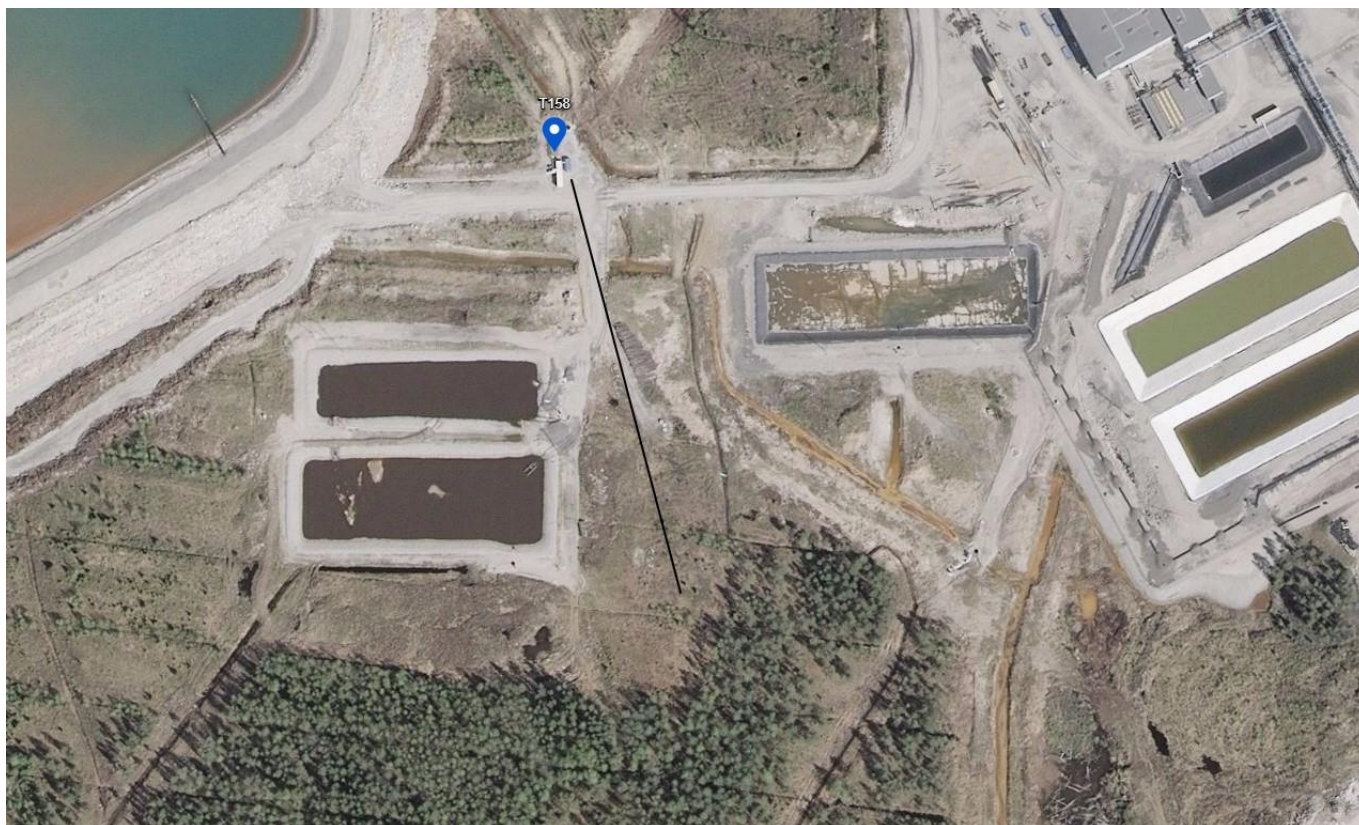












LIITE 14: MAADOITUSMITTAUSSUUNNITELMA (KEMPPAINEN 2017.)

## 7 MITTAUSSUUNNITELMA

### 7.1 Mittauskohteet

Varmennustarkastuksiin liittyen tulee mitata seuraavat 16 muuntamo:

1. Myllysuo T155
2. Latosuo T144
3. Urakoitsijoiden alue T157
4. Keskusvedenpuhdistamo T156
5. Kipsisakka-altaan muuntamo T158
6. SHPS3 pumppaamo T121
7. ST7-Keskikaistan muuntamo T123
8. SH3 Puhaltimien muuntamo 120.
9. Urkin pato T145
10. Kortelampi lähtevä T126
11. Haukilampi T136
12. Kärsälampi T133
13. Boosteri T63
14. Niskala T74
15. LKRW (raakavedenotto) T124
16. Tammalampi T105

Muuntamoiden sijainnit löytyvät muuntamoiden sijaintipiirustuksesta.

## 7.2 Mittalaitteet

Käytettävät mittalaitteet ovat seuraavat:

Maadoitusvastusmittari: Megger DET3TD

Maan ominaisresistiivisyysmittari: Chauvin Arnoux C.A 6425 Earth&Resistivity Tester

## 7.3 Aikataulu

Mittaukset suoritetaan viikolla 42 16.10.2017-20.10.2017

## 7.4 Mittaustapa

Maadoitusvastuksen mittaus suoritetaan käännepestemenetelmällä. Kauimmainen mittauspiikki vietään 200 m päähän, jos mahdollista. Mittari kytketään muuntamon maadoitukseen kiinni ja toista mittauspiikkiä siirretään muuntamolta 20 m välein. Mittaussuunta pyritään valitsemaan poispäin mahdollisista maadoituselektrodeista.

Maan ominaisresistiivisyys mitataan Wenner-menetelmällä. Mittaukseen tarvitaan neljä mittauspiikkiä, ja piikit asetetaan maahan tasavälein esim. 4 m välein. Mittauksessa on tärkeää piikkien tasainen välimatka. Yksi mittaus riittää muuntamoa kohden.

## 7.5 Tulosten merkitseminen

Tulokset merkitään valmiiseen lomakepohjaan (LIITE 15). Maadoitusvastuksen tulokset syötetään Excel-pohjaan, josta nähdään myös vastuksen kuvaaja mittauspiikin etäisyyden suhteen. Mitatun maadoitusarvon riittävyyteen ei vielä tässä vaiheessa oteta kantaa.

## 7.6 Lisätietoja/linkit/lähteet

Chauvin Arnoux 6425 mittalaitteen manuaali. Saatavissa: <http://docs-europe.electrocomponents.com/webdocs/002f/0900766b8002fa3f.pdf>

Megger 3TD mittalaitteiden manuaali. Saatavissa: <https://www.instrumart.com/assets/Megger-DET3Series-Ground-Manual.pdf>

Maadoitusvastuksen mittausopas (Chauvin Arnoux). Saatavissa: [https://chauvin-arnoux.fi/wp-content/uploads/2014/09/FI\\_Maadoitusvastuksen-mittausopas.pdf](https://chauvin-arnoux.fi/wp-content/uploads/2014/09/FI_Maadoitusvastuksen-mittausopas.pdf)



