



Karelia-ammattikorkeakoulu  
Insinööri (AMK)

# Tuulipuiston keskijännitekaape- loinnin laadunvarmistus

Opinnäytetyö

Matti Luukkainen

Opinnäytetyö, kesäkuu 2024

[www.karelia.fi](http://www.karelia.fi)



**OPINNÄYTETYÖ**  
**Kesäkuu 2024**  
**Talotekniikan koulutus**

Tikkarinne 9  
80200 JOENSUU  
+358 13 260 600 (vaihde)

Tekijä(t)  
Matti Luukkainen

Nimeke  
Tuulipuiston keskijännitekaapeloinnin laadunvarmistus

Toimeksiantaja  
Ilmatar Energy Oy

**Tiivistelmä**

Opinnäytetyössä tarkasteltiin tuulipuiston keskijännitekaapelien standardien ja suunnitelmien mukaisen asennussyvyyden toteutumista tuulipuiston rakennuttamisen aikana, ja pohdittiin kaapeloinnin jälkikartoituksen tarpeellisuutta. Työssä myös sivuttiin yleisimpiä kaapelien valmistus- ja asennusvaiheen laadunvarmistusmenetelmiä. Opinnäytetyöhön sisällytettiin kaksi asiantuntijahaastattelua, joilla kartoitettiin tuulipuistohankkeen rakentaja- ja kaapelointiurakoitsijaosapuolen tapoja varmistaa kaapeloinnin laatu puistohankkeen kaikissa vaiheissa. Lisäksi vertailtiin kaapeleiden sijaintitiedon taltioimiseen käytettyjä menetelmiä puistotyömaalla.

Sijaintitietoverailun avulla arvioitiin kaapelointiurakoitsijan käyttämien työkalujen tarkkuutta, ja pyrittiin haastamaan kaapelireittien jälkikartoitustutkauksen tarpeellisuus. Tuulipuistotyömaan kaapelireittien varrelta valittiin maasto-ominaisuuksiltaan toisistaan eriäviä mittauspisteitä, joista saatua asennussyvyystietoa käytettiin referenssinä urakoitsijan taltioidun sijaintitiedon vertailussa kolmannen osapuolen toimittamiin kaapelitutkaustuloksiin.

Työn lopputuloksena ilmeni, että puistokaapeloinnin jälkikartoitustutkaus ei välttämättä ole tarpeellinen toimenpide, sillä rakentamisen aikana kaapelien sijaintitiedon tallettamisessa käytetyillä menetelmillä on mahdollista saavuttaa riittävä paikkatietotarkkuus.

Kieli  
suomi

Sivuja 41  
Liitteet 1  
Liitesivumäärä 6

Asiasanat  
tuulivoima, keskijännitekaapeli, sähköverkko



**THESIS**  
**June 2024**  
**Degree Programme in Building Services Engineering**

Tikkarinne 9  
80200 JOENSUU  
FINLAND  
+ 358 13 260 600

Author (s)  
Matti Luukkainen

Title  
Quality Assurance of Medium Voltage Cabling in a Wind Farm

Commissioned by  
Ilmatar Energy Oy

#### Abstract

The purpose of this thesis was to examine medium voltage cable installations' conformity to standards and plans during the construction of a wind power plant and to reflect upon the necessity of mapping the cable routes after the installation. For the thesis, two expert interviews were conducted, the scope of which was to investigate the quality assurance practices used by a construction developer and a cabling contractor in all project phases. Furthermore, different methods of recording the cabling location data were cross-compared using data gathered at a wind power plant construction site.

The location data comparison was utilized to evaluate the accuracy of the tools and methods used by the cabling contractor and to question the requirement for post-installation cable route mapping. Several locations along the cabling routes of the plant's construction site were designated for installation depth measurement and the collected data was used as a reference value in comparing the cabling contractor's location data to the data produced by a third-party-conducted cable scanning.

As a result, it appeared that post-installation cable mapping is not a strict requirement, as sufficient cable location data accuracy can be achieved with the methods used to record the location data during construction.

Language  
Finnish

Pages 41  
Appendices 1  
Pages of Appendices 6

Keywords  
wind power, medium voltage cable, power grid

## Sisältö

1	Johdanto .....	6
2	Tuulipuiston sisäverkko .....	7
2.1	Sisäverkon suunnittelu .....	7
2.2	Kaapeloinnin luvitus .....	8
2.3	Kaapeleiden mitoitus .....	8
2.4	Kaapeloinnin toteutus .....	8
2.5	Asennus .....	9
3	Keskijännitekaapeli .....	10
3.1	Kaapelin rakenne .....	11
3.1.1	Ulkovaippa .....	11
3.1.2	Kosketussuoja .....	12
3.1.3	Hohtosuoja .....	13
3.1.4	Johdineristys .....	13
3.1.5	Johdinsuoja .....	14
3.1.6	Johdin .....	14
3.2	Tuulipuiston sisäverkon kaapelityypit .....	15
3.3	Kaapelivarusteet .....	16
3.3.1	Jatkos .....	17
3.3.2	Pääte .....	17
3.3.3	Cross bonding -jatkos .....	17
4	Vikatilanteet .....	18
4.1	Mahdolliset vikatilanteet .....	18
4.1.1	Oikosulku .....	18
4.1.2	Maasulku .....	19
4.1.3	Johdinkatkokset .....	19
4.1.4	Osittaispurkaukset .....	19
4.1.5	Sähkö- ja vesipuut .....	20
5	Laadunvarmistus .....	20
5.1	Laadunvarmistusmittausmenetelmät .....	21
5.1.1	Osittaispurkausten mittaus .....	21
5.1.2	Eristysresistanssin mittaus .....	22
5.1.3	Häviökerroinmittaus .....	22
5.1.4	Syvyys- ja sijaintikartoitukset .....	22
6	Toiminnallinen osuus .....	23
6.1	Haastattelut .....	23
6.1.1	Kaapelointiurakoitsija .....	23
6.1.2	Rakennuttaja .....	26
6.2	Mittaukset .....	28
6.2.1	Mittausmenetelmä .....	29
6.2.2	Tarke pistevertailu .....	32
6.2.3	Tutkaustulokset .....	36
7	Pohdinta .....	38
	Lähteet .....	40

### Liitteet

Liite 1      Kaapelitutkaustulokset

## 1 Johdanto

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli kartoittaa tuulipuistonhankkeen rakennuttamisvaiheessa käytettyjä keskijännitekaapeloinnin laadunvarmistustapoja. Työssä keskityttiin erityisesti standardien ja suunnitelmien mukaisen asennussyvyyden saavuttamiseen. Opinnäytetyö tehtiin Ilmatar Energy Oy:n toimeksiantosta, ja sen tavoitteena oli pohtia tapoja kehittää käytössä olevia toimintamalleja ja arvioida tuulipuiston sisäverkon jälkikartoittamisen tarvetta maakaapelien asentamisen jälkeen.

Tarve jälkikartoittamisen hyödyn arvioimiselle on syntynyt liikenne- ja viestintävirasto Traficomien määräyksen 71/2023 M myötä. Määräys velvoittaa verkonrakentajat toimittamaan verkkotiedot ja verkonrakentamissuunnitelmat Sijaintitietopalvelu -tietokantaan 31.12.2024 alkaen. 1.1.2021 jälkeen rakennettujen verkkojen osalta rakentajat veloitetaan ilmoittamaan maakaapelien sijainnin Z-koordinaatti tai sijainnin syvyystieto. (Traficom 2023.)

Mikäli 1.1.2021 jälkeen rakennetun verkon sijaintitiedossa on puutteita, on rakentajan jälkikartoitettava verkon kaapelireitit. Toimenpide vie runsaasti aikaa ja resursseja, joten tarkan sijaintitiedon taltiointi jo rakennuttamisvaiheessa on suotavaa. Tässä työssä tarkasteltiin tuulivoimapuistoissa kaapelien asentamisen aikana käytettyjen sijaintitiedon taltiointimenetelmien soveltuvuutta.

## 2 Tuulipuiston sisäverkko

Tuulipuiston sisäverkko tai kokoojaverkko on sarja kaapeliyhteyksiä, joka yhdistää puiston tuulivoimalat kokonaisuudeksi. Sen avulla voimaloiden tuottama sähköenergia kootaan ja johdetaan sähköasemalle muunnettavaksi suurjänniteverkkoon sopivaksi. Sisäverkko toteutetaan lähes poikkeuksetta maakaapelointina käyttäen 33 kV jännitettä. Aiemmin tuulipuistoissa on ollut käytössä 20 kV jännite, kuten jakeluverkossa, mutta uusissa puistoissa voimaloiden tehojen kasvu on vaatinut jännitetason nostoa 33 kilovolttiin.

Maakaapeli on avojohtoon verrattuna kalliimpi ratkaisu, mutta sillä saavutettavat edut ovat suurempien investointien arvoisia. Maakaapelin etuja avojohtoon verrattuna ovat säävarmuus, vähäisemmät häiriöt ympäristölle, kosketussuojatut jännitteiset osat, hyvä reduktiokerroin, vähäisempi jännitteenalenema termiseltä siirtokyvyltään samantyyppisen avojohtoon verrattuna, korkeampi lyhytkestoinen ylikuormitettavuus sekä vähäiset sähkö- ja magneettikentät ympäristössä. (Elovaara & Haarla 2011, 304–306.) Lisäksi maakaapelien vikataajuus on noin 10–50 % avojohtojen vikataajuudesta (Lakervi & Partanen 2009, 146). Maakaapelin tilantarve on pienempi verrattuna avojohtoon, mikä on tuulipuistoille edukasta, sillä avojohdot hankaloittaisivat muun muassa voimalakuljetuksia. Maakaapelin haittapuolia toisaalta ovat korkea hinta, heikommat jäähdytysominaisuudet, heikompi pitkäaikainen ylikuormitettavuus, huonompi oikosulkuvirtojen rajoituskyky, suurempi käyttökapasitanssi, työläämpi asennus, korjausajan pituus ja haastavampi vianpaikannus, kaapelivarusteiden hajotessa riippuvuus valmistajasta, kaivuutöiden aikainen vahinkoalttius ja lähiympäristön rakentamisen rajoittaminen. (Elovaara & Haarla 2011, 304–306.)

### 2.1 Sisäverkon suunnittelu

Sisäverkon kaapelireitteihin vaikuttaa turbiinien sijoittelu ja asennuspaikan maasto. Kaapelireititystä suunniteltaessa on otettava huomioon maaston piirteet ja maaperän ominaisuudet; esimerkiksi kiviseen tai kallioiseen maaperään kaapelireitin kaivaminen on äärimmäisen työlästä ja kivinen maaperä voi pahimmassa tapauksessa aiheuttaa vahinkoa kaapeleille.

Kaapelireitit suunnitellaan lähtökohtaisesti huoltoteiden varsille kaapeliojien kaivamisen ja kelojen käsittelyn sujuvoittamiseksi. Tiet ja huoltoreitit joudutaan usein rakentamaan puistohankkeen ohessa, mutta toisinaan on mahdollista käyttää hankealueella valmiina olevia tieyhteyksiä. Reititystä suunniteltaessa on otettava huomioon alueen ympäristön mahdolliset suojelukohteet, kuten tervahaudat ja muut muinaismuistot.

## **2.2 Kaapeloinnin luvitus**

Sisäverkon suunnitteluun vaikuttavat ratkaisevasti myös maankäytösopimuksissa määritellyt seikat. Maankäytösopimukset solmitaan maanomistajien kanssa, joiden kiinteistöille kaapelireittiä suunnitellaan rakennettavaksi. Sopimuksissa määritellään kaapeliyhteyksien rakentamisen reunaehdot, kuten reitin pituus ja johdinalueen leveys, sekä johdonhaltijan vastuut ja velvollisuudet, kuten velvollisuus toimittaa kaapelireitin sijaintitiedot, ympäristö- ja vahingonkorvausvastuu ja reitin kunnossapitovelvollisuus. Maankäytösopimukset pohjautuvat maankäyttö- ja rakennuslain (132/1999) 161 §:än.

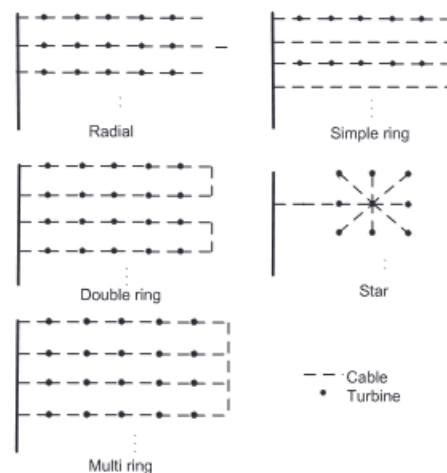
## **2.3 Kaapeleiden mitoitus**

Maakaapeleita valittaessa ovat kaapelin kuormitettavuus ja oikosulkukestoisuus avainasemassa. Kuormitettavuuden määrää kaapelin käyttölämpötila, sillä lämpötila vaikuttaa johdinmateriaalin resistiivisyyteen ja edelleen käytönaikaisiin häviöihin. Käyttölämpötila ei saa ylittää arvoja, jotka ympäristöolosuhteiden kanssa saisivat kaapelit jatkuvan maksimikuormituksen alaiseksi. Myös asennusolosuhteilla on vaikutus kuormitettavuuteen, joten kuormitusvirran laskemisessa tulee käyttää korjauskertoimia, jotka ottavat olosuhteet huomioon. (Monni, 2001, 31.)

## **2.4 Kaapeloinnin toteutus**

Sisäverkon kaapelointi on mahdollista toteuttaa hyödyntäen erilaisia verkkotopologioita. Tuulipuistoissa mahdollisia verkkotopologioita ovat säteittäinen, renkas- ja tähti, jotka esitetty kuvassa 1. Säteittäinen verkkotopologia on näistä

Suomessa yleisin, sillä se on helpoin ja edullisin vaihtoehto toteuttaa. Säteittäisessä verkossa kaapelointi muodostaa joukon yksittäisiä haaroja, joiden varrelle voimalat sijoitetaan. Tyypillisesti suuret puistot koostuvat useista monen voimalan haaroista. Rakenteensa vuoksi säteittäinen topologia on kaapeloinnissa mahdollisesti tapahtuville vikatilanteille herkempi, sillä vikatilanne haaran yhdessä kohdassa estää sähköenergian siirron haaran kauemmista voimaloista. Rengas- ja tähtitopologia ovat luotettavimmat ratkaisut, sillä suurempi määrä kaapelireittejä mahdollistaa tehokkaamman sähkönsiirron vikatilanteessa. Ne ovat kuitenkin harvinaisempia suurempien kaapelointikustannusten ja työläämän toteutuksen takia.



Kuva 1. Tuulipuiston verkkotopologia (Lumbreras & Ramos 2013)

## 2.5 Asennus

Kaapeleiden asennus tulee aina suorittaa etukäteen tehtyjen suunnitelmien mukaisesti, ja suunnitelmien mukainen asennus on suositeltavaa varmistaa valokuvaamalla kaikki kaapeliasennukset (ST-käsikirja 34). Kaapelien keskinäiset vaikutukset kuormitettavuuteensa tulee huomioida standardin SFS 6000-5-52 mukaisesti. Huomioon tulee ottaa myös asennustavat koko kaapelireitillä, maan lämpöresistiivisyys ja asennuspaikan ympäristöolosuhteet. Toisiaan lähelle asennettavien kaapeleiden välinen vaadittu etäisyys tulee säilyttää koko asennuksen mitalla, mutta jatkojen kohdalla kaapelien väliset etäisyydet saavat olla tarvittaessa pienemmät, kuitenkin pitäen osuus mahdollisimman lyhyenä. (SFS 6000-8-814, 2022, 7.)



Kaapelin vaurioitumista tulee varoa varastoinnin, kuljetuksen ja asennuksen aikana, joten kaapelin karkeaa käsittelyä on vältettävä. Pienetkin vauriot voivat johtaa kaapelin sähköisten ominaisuuksien heikkenemiseen ja kaapelin ennenaikaiseen ikääntymiseen.

Asentaessa on aina noudatettava kaapelivalmistajan ohjeita sallituista vetovoimista, käsittelylämpötilasta ja taivutussäteistä. (SFS 6000-8-814, 2022, 7.) Muovieristeisillä kaapeleilla pienin sallittu taivutussäde on yleensä noin 15 kertaa kaapelin ulkohalkaisija (Elovaara & Haarla 2011, 321.)

Maahan asennettaessa kaapeli täytyy suojata ulkoisilta vaaroilta, kuten suurilta kiviltä, vedon ja kaapeliojan täyttämisen aikana. Tämä voidaan toteuttaa esimerkiksi käyttäen putkia, kourua tai ympäröimällä kaapeli hienojakoisella hiekkalla. Kaapelit asennetaan välttämällä niiden jättämistä vetorasituksen alaiseksi ja siten, etteivät ne nouse maan pinnalle maan liikkeiden, kuten paisumisen tai roudan takia. (SFS 6000-8-814, 2022, 7.)

Kaapelit tulee asentaa riittävän syväälle tai suojata mekaanisesti muilla tavoin. Asennussyvyyteen vaikuttaa muun muassa kaapelin tyyppi, sekä olosuhteet kuten maan laatu ja sen käyttötarkoitus, routiminen, liikenteen määrä. Yleensä suositussyvyys kaapelin asennukselle on vähintään 0,7 metriä. (SFS 6000-8-814, 2022, 7.) Maankäyttösopimuksissa on kuitenkin mahdollista vaatia asennussyvyudeksi enemmän, kuin standardien määrittämän 0,7 metriä.

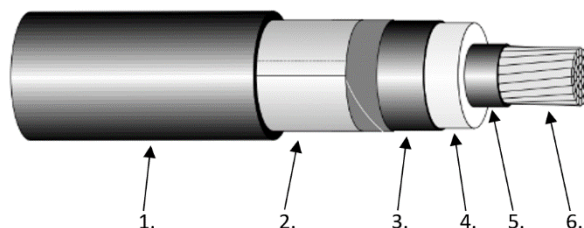
### **3 Keskijännitekaapeli**

Keskijännitekaapeli on sähköenergian siirtoon lyhyillä ja keskipitkillä matkoilla tarkoitettu johto, jossa tehdasvalmisteisen, kosteutta ja korroosiota estävän ja mekaanista vahingoittumista kestävä vaipan sisällä on yksi tai useampia, toisistaan eristettyjä johtimia. (Elovaara & Haarla 2011, 303.)

Kaapeleita on sekä muovi- että öljypaperieristeisiä. Nykyään keskijänniteasennukset tehdään pääasiassa muovieristeisillä kaapeleilla, sillä Suomessa on luovuttu kokonaan öljypaperieristeisten keskijännitekaapelien valmistuksesta. (Elovaara & Haarla 2011, 303.)

Jakeluverkossa keskijännitekaapeleiden käyttöikä on määritelty vähintään 30–40 vuotta. Tuulipuiston sisäverkossa käyttöaika on lyhyempi, tyypillisesti 20–25 vuotta, johtuen kaapelien raskaammasta käyttöasteesta. Kuormitus puiston sisäverkossa voi vaihdella nopeasti 0–100 % välillä lyhyen ajan sisällä kuormitusvirran ollessa suurimmillaan 50–90 % kaapelien nimellisestä kuormitettavuudesta. Jakeluverkossa kuormitus on pientä ja useimmiten tasaista, normaalitilanteessa 5–20 % nimellisestä kuormitettavuudesta, suurimman kuormituksen ollessa noin 30–70 %.

### 3.1 Kaapelin rakenne



1. Ulkovaippa 2. Kosketussuoja 3. Hohtosuoja 4. Johdineristys 5. Johdinsuoja 6. Johdin

Kuva 2: Kaapelin rakenne (Prysmian Group 2022)

#### 3.1.1 Ulkovaippa

Ulkovaippa on kaapelin uloin osa, jonka tehtävä on suojata kaapelin sisempiä osia mekaaniselta rasitukselta asennuksen aikana sekä antaa kaapelille sähköinen suojaus käytön aikana. Ulkovaipan materiaaleina käytetään useimmiten polyeteenejä, etenkin suuritiheyksistä HDPE:tä. (Elovaara & Haarla 2011, 311.) Ulkovaipan vesitiivistys on mahdollista toteuttaa sekä pituus- että poikittaissuunnassa. Poikittainen tiivistys estää kosteuden pääsyn kaapeliin eristykseen ja pituussuuntainen estää veden etenemisen johtimen sisällä. Käytön aikana suurin rasite ulkovaipalle on lämpötilojen vaihtelu.

### 3.1.2 Kosketussuoja

Kosketussuojan tehtävä on luoda kaapelille sähköinen suojaus. Se kuljettaa va-  
raus- ja vikavirtoja sekä suojaa kaapelia häiriöiltä, joten sen raaka-aineina käy-  
tetään sähköä hyvin johtavia materiaaleja; alumiinia, kuparia, lyijyä ja terästä,  
joista alumiini on yleisin. (Elovaara & Haarla 2011, 310.) Alumiinilaminaattia  
käyttäen voidaan muodostaa poikittain vesitiivis kerros, mikä on yleisin koske-  
tussuojan toteuttamisratkaisu tuulipuistoissa käytetyissä kaapelityypeissä.

Kosketussuojan maadoittaminen on elintärkeää kaapelin vikavirtakestoisuuden  
kannalta. Maadoittamiseen on useita eri tapoja, joista yleisimmät ovat:

#### **Avoin virtapiiri**

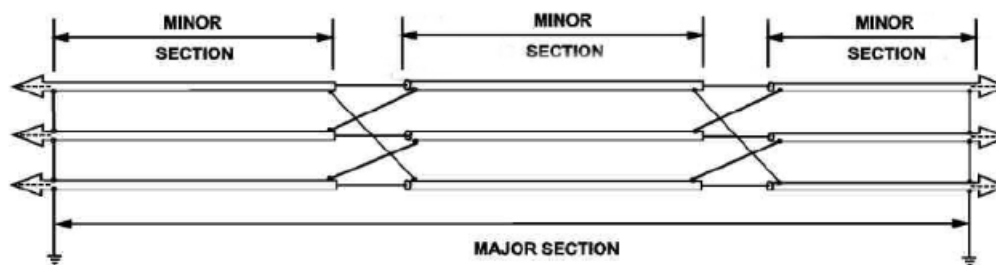
Kosketussuojapiirin avoin kytkentä toteutetaan maadoittamalla kosketussuoja  
yhdestä pisteestä, yleensä toiselta kaapelipääteeltä. Asennustapa estää in-  
dusoituvien virtojen kiertämisen eli kosketussuojan tehohäviöt ovat pieniä ja joh-  
timen kuormitettavuus ei heikkene. Avoimessa virtapiirissä kosketussuojaan  
kuitenkin indusoituu jännitettä, joka voi vikatilanteen sattuessa nousta vaaralli-  
sen suureksi. (Czapp & Dobrzynski 2020, 2, 3.)

#### **Suljettu virtapiiri**

Suljettu virtapiiri on yleinen tapa maadoittaa keskijännitekaapeleiden kosketus-  
suojat. Kosketussuojan virtapiiri suljetaan maadoittamalla se kaapeliyhteyden  
kummastakin päästä. (Kehl, Meier & Quaggia 2019, 1.) Asennustapa pienentää  
kosketussuojaan indusoituvia jännitteitä, mutta ei kuitenkaan estä kiertävien vir-  
tojen indusoitumista, mikä saa aikaan tehohäviöitä ja heikentää johtimen kuor-  
mitettavuutta (Czapp & Dobrzynski 2020, 3).

## Vaippavuorottelu

Kosketussuojan maadoitus vaippavuorottelua hyödyntäen toteutetaan kytke- mällä vaiheiden kosketussuojat ristiin tietyin välimatkoin ja maadoittamalla ne kaapeliyhteyden kummastakin päästä kuvan 2 mukaisesti. Asennustapa vähentää kosketussuojaan indusoituvia jännitteitä. Maasulun sattuessa vaippavuorot- telu helpottaa kosketussuojan toimimista vikavirtojen kulkureittinä. (IEEE, Std 575–2014, 15, 21.)



Kuva 3. Kosketussuojan vaippavuorottelu (IEEE 575-2014)

### 3.1.3 Hohtosuoja

Hohtosuojan valmistukseen käytetään metallinauhoja tai puolijohtavaa materi- aalia. Sen tarkoituksena on johdinsuojan kanssa rajata johtimen luoma sähkö- kenttä eristyskerrokseen. Hohtosuojan on pysyttävä hyvin kiinni eristyskerrok- sessa, säilyttäen kuitenkin helpon kuorittavuuden asennustöitä ajatellen. (Elo- vaara & Haarla 2011, 309–310.)

### 3.1.4 Johdineristys

Johdineristys on hohtosuojan alta johdinsuojaan ulottuva kerros, jonka tehtävä on antaa jännitteisille osille mekaaninen suojaus ja riittävä sähköinen eristys (Aro ym. 2015, 125). Sen tulee myös siirtää johtimessa sekä eristeessä itses- sään syntyvä lämpö pois kaapelista. Eristysmateriaaleina käyttökelpoisia ovat erilaiset muovit, öljykyllästetyn paperi ja näiden yhdistelmät. (Elovaara &

Haarla 2011, 308.) Tuulipuistoissa yleisimmin käytettyjen keskijännitekaapeleiden eristeenä käytetään ristosilloitettua polyeteenimuovia (PEX). Eristyksen pak-suuden määrittää käyttöjännite ja mitoitusstandardi.

Eristyksen puhtaus, kuplattomuus ja tasalaatuisuus vaikuttavat merkittävästi sen elinkaareen. Muovieristeisten kaapelien valmistusvaiheessa eristykseen voi jäädä kosteutta tai sitä voi tunkeutua käytön aikana eristykseen joko johtimen kautta kaapelin vaurioituessa tai diffundoitumalla ulompien kerrosten läpi. Liiallinen lämpö nopeuttaa johdineristyksen ikääntymistä ja voi pahimmassa tapauksessa aiheuttaa läpilyönnin, joten eristyksellä on ratkaiseva rooli kaapelin kuorimitettavuudessa. (Elovaara & Haarla 2011, 309.) (Aro ym. 2015, 162)

### **3.1.5 Johdinsuoja**

Johdinsuoja sijaitsee eristyksen alla johtimen pinnalla. Se on puolijohtavaa materiaalia, ja sen tehtävä on tasoittaa epätasaisuuksia johtimen pinnassa, pienentäen johdinlankojen aiheuttamia kentänvoimakkuushuippuja. Johdinsuoja myös pienentää johtimen eristykseen aiheuttamaa lämpörasitusta oiko- ja maasulun sattuessa. Toimiakseen tarkoitetulla tavalla johdinsuojan on oltava hyvin kiinni eristeessä. (Elovaara & Haarla 2011, 308.)

### **3.1.6 Johdin**

Johdin on kaapelin sisin osa. Tyypillisesti johtimet valmistetaan kuparista tai alumiinista, mutta erityistapauksissa voidaan käyttää myös muita metalleja ja metalliseoksia, esimerkiksi kaapelin vetolujuuden lisäämiseksi. Useimmiten keskijännitekaapelien valmistuksessa käytetään alumiinia sen keveyden ja alhaisen materiaalikustannusten vuoksi. Alumiinisissa johtimissa poikkipinta-alan on kuitenkin oltava kuparisiin verrattuna suurempi materiaalin korkeamman resistiivisyyden takia. (Elovaara & Haarla 2011, 307.)

Johtimet koostuvat pyöreistä, kerroksittain keskilangan ympärille asetelluista, valssaamalla tiivistetyistä metallilangoista. Mitä parempaa liikuteltavuutta ja

taipuisuutta kaapelilta vaaditaan, sitä useammasta ja ohuemmasta langasta johdin rakentuu. Pyöreällä muodolla ja tiivistyksellä pyritään poistamaan eristykselle vaaralliset osittaispurkaukset. Tiiviste paisuu kastuessaan vettä läpipäästämättömäksi massaksi, mikä estää kosteuden etenemisen johtimessa mahdollisessa vikatilanteessa. (Elovaara & Haarla 2011, 308–309.)

### 3.2 Tuulipuiston sisäverkon kaapelityypit

Tuulipuiston sisäverkossa käytetään jakeluverkossa yleisesti käytössä olevia kaapelityyppejä. Näistä yleisimpiä ovat AHXAMK-W ja AHXAMK-WP. Kaapeleista on saatavilla yksi- ja kolmijohdinversiot.

#### AHXAMK-W

Kuvan 4 AHXAMK-W on alumiinijohtiminen Suomessa hyvin yleinen voimakaapeli. Kolmijohtimisessa kaapelissa olevan kupariköyden tehtävä on kosketussuojan ohella kuljettaa vikavirtoja, mikä parantaa kaapelin vikavirtakestoisuutta. Kuparisella keskusköydellä on myös maadoitusvaikutus, mikä parantaa kaapelin käyttövarmuutta. Kolmijohtiminen kupariköydellä varustettu kaapeli on kuitenkin noin 10 % kalliimpi vaihtoehto, kuin keskikupariton. (Prysmian Group 2022)



Kuva 4: AHXAMK-W (Prysmian Group 2022)

## AHXAMK-WP

Kuvan 5 AHXAMK-WP on samankaltainen kaapeli, kuin edellä mainittu AHXAMK-W, mutta siinä ei ole rakenteeseen integroitua keskusköyttä. Kaapeleiden mekaaniset ja sähköiset ominaisuudet ovat muuten samankaltaiset, mutta AHXAMK-WP:n vikavirtakestoisuus on pienempi, johtuen ylimääräisen vikavirtareitin puuttumisesta. Kaapelissa johtosuoja yksin toimii vikavirtojen kulutienä. Kuperisen keskusköyden puuttuminen tekee AHXAMK-WP:stä edullisemmän vaihtoehdon kuin AHXAMK-W.



Kuva 5: AHXAMK-WP (Prysmian Group 2022)

### 3.3 Kaapelivarusteet

Kaapelivarusteita, kuten jatkoksia ja päätteitä, käsitellään yhtenä kokonaisuutena kaapelin kanssa, sillä jatkoksien ja päätteiden on säilytettävä samat sähköiset ominaisuudet ja kestettävä samat rasitukset kuin itse kaapelinkin. Kaapelivarusteet ovat usein kaapeliyhteyksien heikoin lenkki, joten niiden käsittelyssä ja asennuksessa on noudatettava erityistä huolellisuutta. Kaapelivarusteiden käsittely tulee aina tehdä valmistajan asennusohjeiden mukaisesti. (Monni 2001, 33.) Tuulipuistoissa jatkos- ja päätetyöt ovat lähes poikkeuksetta tulitöitä, joten työskentely-ympäristö tulee valmistella tulityöohjeiden vaatimalla tavalla.

### 3.3.1 Jatkos

Jatkoksia käytetään tilanteissa, jotka vaativat kahden kaapelin yhdistämistä toisiinsa. Jatkamista tarvitaan esimerkiksi kaapelin valmistuspituuden ollessa riittämättömän kaapeliyhteydelle, verkossa tehtävien muutosten vuoksi tai kaapelin hajomisen takia. (Monni 2001, 39.) Tuulipuistoille ominaisilla pitkillä kaapeliyhteyksillä on tehtävä useita jatkoksia.

Jatkosta tehtäessä kaapeleiden johtimet liitetään toisiinsa käyttäen puristettavia liittimiä tai ruuviliittimiä. Kaapelin rakenteesta ja jännitteestä riippuen liitokset eristetään toisistaan sähköteipillä, valumuovilla, kutistumuovilla tai kaapeliöljyllä. Liitoksien on kestettävä samat rasitukset kuin kaapelien, joten on ne suojattava ympäristön vaikutuksia vastaan. Suojaus toteutetaan käyttäen kutistumuovia, sähköteippiä, valumuovia tai metallisuojusta. Kutistumuoviset jatkokset ovat yleisimpiä tuulipuistoissa käytettyjä jatkostyyppejä. Niiden etuja ovat hyvä sähköinen eristys, pintavirran kestävyys, sähkökentän ohjauskyky, kemikaalikestävyys, lämpötilakestävyys ja palamattomuus. (Monni 2001, 39.)

### 3.3.2 Pääte

Kaapelipäätteiden avulla kaapelien johtimet kytketään esimerkiksi muuntamoon, kytkinlaitokseen, ilmajohtoon tai muihin vastaaviin kohteisiin. Päätteen tehtävä on suojata kaapelin päätä mekaanisesti ja tiivistää pää kosteutta kestäväksi. Myös päätteen tulee kestää samat rasitteet kuin kaapelin. (Monni 2001, 34.)

### 3.3.3 Cross bonding -jatkos

Cross bonding -jatkoksia käytetään kaapeleiden kosketussuojien ristiin kytkemiseen eli vaippavuorotteluun. Niiden tehtävä on rajoittaa kosketussuojan ylijännitteitä ja hallita kosketussuojaan indusoituvia jännitteitä. Ne vähentävät tai poistavat kokonaan kiertäviä virtoja parantaen kaapelin sähkönsiirtokapasiteettia ja käyttövarmuutta. (Shenzhen Woer Heat - Shrinkable Material Co., Ltd. 2024.)



## 4 Vikatilanteet

Maakaapeliverkon yleisimpiin vikatilanteisiin kuuluvat oiko- ja maasulut, johdinkatkokset ja ylikuormituspiikit. Vikatilanteiden sattuessa vikaantunut verkon osa on nopeasti irrotettava muusta järjestelmästä, ettei se aiheuta vaaraa tai tuhoa verkkoon kytkettyjä laitteistoja. Verkon suojaus tapahtuu mittamuuntajien, suojaareleiden ja katkaisijoiden avulla. Sähköturvallisuuslain mukaan

Sähkölaitteet ja -laitteistot on suunniteltava, rakennettava, valmistettava ja korjattava niin sekä niitä on huollettava ja käytettävä käyttötarkoituksensa mukaisesti niin, että:

- 1) niistä ei aiheudu kenenkään hengelle, terveydelle tai omaisuudelle vaaraa;
- 2) niistä ei sähköisesti tai sähkömagneettisesti aiheudu kohtuutonta häiriötä;
- 3) niiden toiminta ei häiriinny helposti sähköisesti tai sähkömagneettisesti. (Sähköturvallisuuslaki 1135/2016, 6§.)

Tehonsiirto voi jatkua muissa osissa verkkoa suojausjärjestelmän irrotettua vikaantuneen osan. Mahdollisimman nopea vikaantuneen osan erotus ehkäisee materiaali- ja henkilövahingot sekä minimoi taloudelliset menetykset. (Elovaara & Haarla 2011, 335–336.)

### 4.1 Mahdolliset vikatilanteet

#### 4.1.1 Oikosulku

Oikosulussa sähköverkon virtapiiri sulkeutuu kohdasta, jonka ei ole tarkoitus johtaa sähköä. Se syntyy esimerkiksi eristysvian seurauksena valokaaren tai muun vikaimpedanssin kautta, ja voi ilmetä kaapelissa tai kaapelivarusteissa. Oikosulku voi olla kaksi- tai kolmevaiheinen. Tyypillisesti oikosulku aiheuttaa suuren virran vikapaikassa jännitteen ollessa pieni. (Lakervi & Partanen 2009, 28.)

### 4.1.2 Maasulku

Maasulku on kaapelin vikatilanne, jossa jännitteinen johdin kytkeytyy maahan, tai johtimen ja maan välinen eristysresistanssi pienenee määrätyn raja-arvon alapuolelle (SFS 6001, 2018, 21). Maasulku voi olla yksi- tai kaksivaiheinen ja voi ilmetä kaapelin lisäksi myös kaapelivarusteissa.

Kaapelissa ja varusteissa voi ilmetä myös kaksoismaasulku, jossa maasulku tapahtuu kahdessa pisteessä. Sen aiheuttaa ensimmäisen maasulun kahdessa muussa vaiheessa synnyttämä jännitteenousu, mikä johtaa eristeen pettämiseen ja maasulkuun toisessa pisteessä.

Maasulku voi ilmetä myös katkeilevana. Katkeileva maasulku syntyy eristyksen pettäessä kaapeliin päässeän veden aiheuttaman läpilyönnin lämmön takia. Lämpö höyrystää veden, jolloin maasulku katoaa. Viallinen kohta eristeessä päästää jälleen vettä kaapeliin, jolloin maasulku syntyy uudestaan, tasaisin intervalein.

### 4.1.3 Johdinkatkokset

Johdinkatkoksia on maasulullisia sekä maasuluttomia. Maasulullisessa katkoksessä katkennut johdin aiheuttaa maakosketuksen ja maasuluttomissa katkos tapahtuu ilman maakosketusta. Katkos voi olla yksi- kaksi- tai kolmevaiheinen. Ne ovat harvinaisia ja aiheutuvat lähinnä kaivinkoneiden kaivuutöistä.

### 4.1.4 Osittaispurkaukset

Osittaispurkaus on sähköpurkaus, joka syntyy, kun sähkökentän voimakkuus ylittää kaapelin eristeen sähkönlujuuden. Osittaispurkaukset tapahtuvat kaapelin eristeessä ja aiheuttavat suuritaajuisia virtapulsseja kaapelin kosketussuojaan. Ne synnyttävät kaapeliin happo- ja kaasuesiintymiä, jotka vahingoittavat eristettä. Huolimatta valmistusvaiheen laadunvarmistuksesta, kaapelien eristeisiin jää usein kaasukuplia ja onteloita, jotka mahdollistavat osittaispurkausten syntymisen. Osittaispurkauksia on kolmentyyppisiä: eristeen sisäisiä

ontelopurkauksia, eristeen pinnalla tapahtuvia pintapurkauksia ja koronapurkauksia johtimen pinnalla. (Aro, ym. 2015, 80.)

#### **4.1.5 Sähkö- ja vesipuut**

Sähköpurkaukset voivat pitkällä aikavälillä vahingoittaa kaapelieristettä, aiheuttaen lopulta eristeen läpi kulkevan puun muotoisen eroosiokanavan. Kanava voi toimia lopullisen läpilyönnin kulkureittinä. Eristeen sisältämät johtavat epäpuhtaudet tai elektrodien epätasaisuudet voivat myös saada aikaan sähköpuun syntymisen. Purkauksen tapahduttua uudet purkaukset ovat mahdollisia jo verrattain pienellä jänniterasituksella. (Aro ym. 2015, 131.)

Sähköpuiden lisäksi kaapelieristeessä voi ilmetä vesipuita, jotka aiheutuvat kaapeliin tunkeutuvasta kosteudesta. Sähkökentän vaikutuksesta vesi muodostaa eristeeseen puumaisia muodostelmia sähköpuiden tapaan, heikentäen eristeen läpilyöntilujuutta. Kaapelivaurio tai huolimaton asennus voivat aiheuttaa veden pääsyn kaapeliin. Myös valmistuksessa eristeeseen voi jäädä vettä, ja käytön aikana vesi päästä kaapeliin diffundoitumalla. (Aro ym. 2015, 161.)

## **5 Laadunvarmistus**

Kaapelien mahdollisimman korkean laadun takaamiseksi kaapelivalmistajilla on käytössään järjestelmälliset, monivaiheiset laadunvarmistusprotokollat, alkaen raaka-ainetasolta ja jatkuen aina valmistusprosessin lopuksi tehtäviin mittauksiin. Keski-jännitekaapeleiden yleisimpiin laatumittauksiin kuuluu jännitelujuus- ja osittaispurkaustestaukset. (Prysmian Group 2022.) Myös kaapelien asennuksen jälkeen suoritetaan laadunvalvonnallisia mittauksia. Mittauksien tarkoituksena on varmistaa, että kaapelit ja varusteet yltyvät niille asetetulle vaatimustasolle etsimällä ja ehkäisemällä luvussa 4 esiteltyjä vikoja.

## **5.1 Laadunvarmistusmittausmenetelmät**

### **5.1.1 Osittaispurkausten mittaus**

Osittaispurkausten mittauksella varmistetaan kaapeleiden eristysrakenteiden laatu ja standardinmukaisuus. Osittaispurkausten aiheuttamat virtapulssit kulkevat kaapelin kosketussuojaa pitkin ja niiden mittaaminen on mahdollista sähköaseman maadoituksesta (Eurolaite 2021). Jännitteettömien kaapelien testaus voidaan suorittaa vaimenevalla vaihtojännitteellä (DAC, Damped Alternating Current) tai VLF-tekniikalla (Very Low Frequency) (Aro ym 2015, 199).

#### **Vaimeneva vaihtojännite DAC**

Vaimenevan vaihtojännitteen mittauksessa kaapeliin syötetään tasajännite ja sen rinnalle kytketään kuristin, mikä saa aikaan resonanssipiirin. Kuristimen induktanssi ja testikappaleen kapasitanssi määrittävät piirin resonanssitaajuuden, joka on tyypillisesti muutamia satoja hertsejä. Osittaispurkausmittaus suoritetaan kytkennässä tapahtuneen värähtelyn vaimennuttua. (Aro ym 2015, 436.)

#### **Very Low Frequency VLF**

VLF-mittauksessa testaus tapahtuu pienellä, tyypillisesti 0,1 Hz taajuudella. Matala taajuus ei rasita kaapelia yhtä voimakkaasti, kuin käyttötaajuus, eikä se vaadi suuria ja tehokkaita mittalaitteita. Testauksen aikana kaapelia varataan jännitteellä, joka yleensä ylittää käyttöjännitteen. Kaapelin eristerakenteiden on säilyttävä vahingoittumattomana läpäistäkseen testauksen.

(Aro ym 2015, 436.) (IEEE Std 400.2-2013, 7.)

### 5.1.2 Eristysresistanssin mittaus

Eristysresistanssimittaus suoritetaan käyttäen muutaman kilovoltin, esimerkiksi 5 kV, tasajännitettä yleensä yhden minuutin ajan. Mittauksella tarkistetaan kaapelin kunto kostumisen ja suurten eristevaurioiden varalta. Mittaustapa ei kuitenkaan anna tietoa kaapelissa mahdollisesti tapahtuvista osittaispurkauksista. (Aro ym. 2015, 191.) (Chauvin Arnoux Group 2023, 2.)

### 5.1.3 Häviökerroinmittaus

Häviökertoimen mittaaminen vaihtojännitteellä on yleinen tapa kartoittaa kaapelien eristysrakenteen kuntoa. Häviökerroinmittauksella selvitetään kaapelieristeen pätö- ja loistehon suhde, eli kuinka paljon se poikkeaa ideaalilanteesta. (Eurolaite 2021.) Yleisesti mittaus suoritetaan käyttäen Scheringin siltaa, jolla voidaan mitata myös eristyksen resistanssi ja kapasitanssi, tai virtavertailijasiltaa, joka soveltuu paremmin suurikapasitanssisten koekappaleiden mittaukseen (Aro, ym. 2015, 193–195).

### 5.1.4 Syvyys- ja sijaintikartoitukset

Jakeluverkkoa muutettaessa avojohdosta maakaapeliverkoksi, on kaapelien syvyys- ja sijaintitietoihin alettu kiinnittää aiempaa tarkemmin huomiota. Syvyys- ja sijaintitietojen taltioiminen on ollut verrattain heikolla tasolla, vaikka maakaapeliverkkoja on rakennettu jo useiden vuosikymmenten ajan. Suurpiirteiset ja jopa virheellisesti dokumentoidut sijaintitiedot voivat aiheuttaa kaapelien vaurioitumista esimerkiksi kaivuutöissä ja aiheuttaa vaaratilanteita kaivajille. (Rejlers, 2021.)

Liikenne- ja viestintävirasto Traficomın määräys 71/2023 M velvoittaa verkonrakentajat toimittamaan verkkotiedot ja verkonrakentamissuunnitelmat Sijaintitietopalvelu -tietokantaan 31.12.2024 alkaen. Määräyksellä pyritään edistämään verkkojen yhteisrakentamista ja -käyttöä sekä vähentämään

maanrakennustöiden aiheuttamia vikatilanteita verkkoinfrastruktuurille. Lisäksi määräyksen tarkoituksena on tietokannan avulla edistää verkonrakentajien välistä yhteistyötä lisäämällä tietoisuutta rakentamishankkeista ja infrastruktuurin sijainnista. (Traficom 2023.)

Maakaapelien asennussyvyyden ja sijainnin jälkikartoitus GPS-paikannuslaitteistolla ja kaapelitukauslaitteilla on näiden seikkojen takia muodostumassa entistä tärkeämmäksi osa-alueeksi maakaapeloinnin laadunvarmistuksessa.

## **6 Toiminnallinen osuus**

Opinnäytetyön toiminnallinen osuus koostui kahdesta osiosta. Ensimmäisessä osiossa kartoitettiin haastattelujen avulla tuulivoimarakentamiseen erikoistuneen kaapelointiurakoitsijan ja rakennuttajan käyttämiä laadunvarmistusmenetelmiä, sekä osapuolten kokemuksia hankkeiden suunnittelu- ja toteutusvaiheessa yleisimmin ilmenevistä laatupoikkeamista. Toisessa osiossa tarkasteltiin keskijännitekaapeloinnin asennussyvyyden toteutumista tuulipuistotyömaalla.

### **6.1 Haastattelut**

#### **6.1.1 Kaapelointiurakoitsija**

Kaapelointiurakoitsijan haastattelussa selvitettiin tapoja, joilla kyseinen osapuoli varmistaa kaapeloinnin laadun alkaen tarvikkeiden saapumisesta työmaalle aina kaapeleiden lopulliseen peittämiseen saakka. Haastattelussa kartoitettiin keinoja saavuttaa standardien ja sopimusten vaatimat asennussyvyydet, varmistaa kaapelireittien suunnitelmien mukaiset sijainnit, sekä näihin liittyviä toimintatapoja ja välineitä. Näiden lisäksi kartoitettiin yleisimpiä virhetilanteita ja niihin johtavia tekijöitä.

### 6.1.1.1 Kaapeleiden asennussyvyys ja sijainti

Tuulipuistohankkeen pääurakoitsija, jonka alaisuudessa kaapelointiurakoitsija ja muut aliurakoitsijat toimivat, luo maastosuunnitelmat, suunnittelee layout- reitti-piirustukset sekä teiden ja vesistöjen alitukset. Näiden lisäksi pääurakoitsijan tehtävänä on suunnitella poikkileikkauspiirustukset, joista käy ilmi kaapeloinnille asetetut syvyysvaatimukset. Kaikki suunnitelmat luodaan ennalta tehtyjen maastokartoitusten pohjalta, ja niiden reunaehtoina toimivat alan standardit ja maankäytösopimuksissa määritellyt seikat. Kaapelointiurakoitsija luottaa pääurakoitsijan suunnitelmien oikeellisuuteen ja noudattaa niitä. Mikäli yksityiskohdista on jäänyt puutteelliseksi suunnitteluvaiheessa, tai niitä on jäänyt merkitsemättä lopullisiin dokumentteihin, ei tieto luonnollisesti kulkeudu kaapelointiurakoitsijalle. Toisaalta tarpeen vaatiessa on suunnitelmista mahdollista poiketa, jos suunniteltu kaapelireitti on esimerkiksi maasto-olosuhteiden tai muiden pakottavien syiden takia haastava tai mahdoton toteuttaa, tai jos löydetään tehokkaampi tapa toteuttaa tietyt kaapeliosuudet. Suunnitteludokumentteja päivitetään jatkuvasti ajan tasalle työmaan tilanteen eläessä ja kaapelireitityksien muuttuessa.

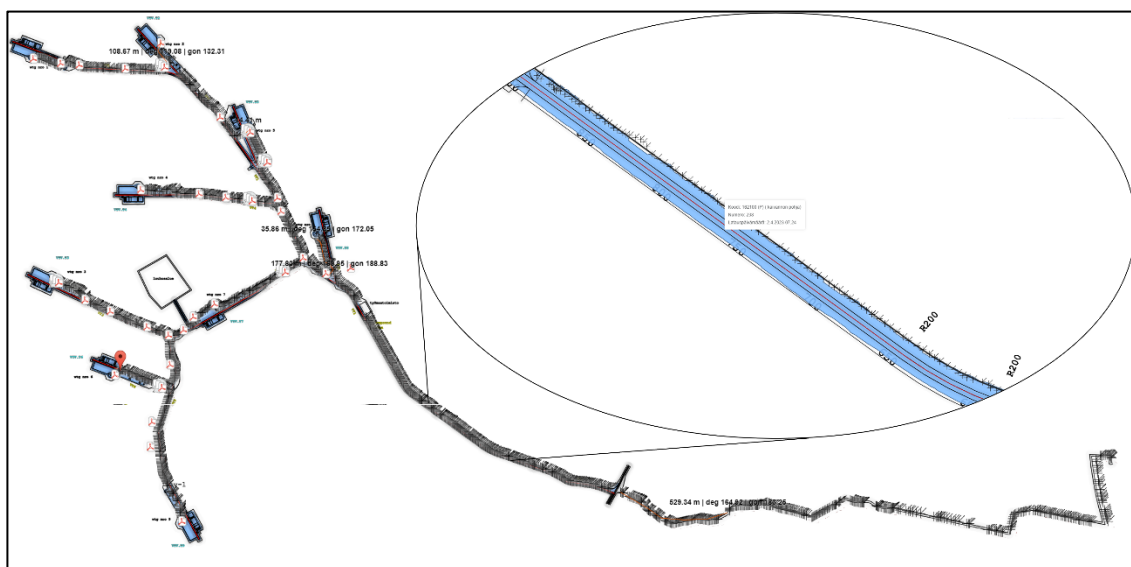
Kaapeliojia kaivaessa kaivinkoneen kuljettajalla on suunnitteludokumentit nähtävillään kaivinkoneen tietokoneen Novatron Xsite PRO 3D -koneohjausmallissa (kuva 6), joten kaivaja pysyy jatkuvasti ajan tasalla työtehtävästään. Tämä kuitenkin vaatii muuttuvien suunnitelmien päivittämistä koneohjausmalliin. Koneohjaus varmistaa, että kaapeliojia kaivetaan vaadittuun syvyyteen. Kaapelien syvyys- ja sijaintitiedot taltioidaan tarkepisteiden avulla käyttäen XYZ-koordinaatistoa. Koneohjausmallin valmistajan tarkepisteille lupaama tarkkuus on  $\pm 2,5$  cm. Kaapelireitin varrelta dokumentoitavaa tarkepistetietoa ovat:

- Kaivannon pohjatieto 5 metrin välein
- Kaivannon pintatarkepisteet
- Kaapelien jatkojen sijainnit
- Kupariköyden jatkojen sijainnit
- Maadoituksen jatkopisteet
- Putkituksen ja kourutuksen aloitus- ja lopetus pisteet



Kuva 6: Novatron Xsite PRO 3D -koneohjausmalli (Novatron 2024)

Urakoitsijalla on käytössä Infrakit-projektinhallintatietokanta, johon tarkepistetiedot taltioidaan ETRS-TM35FIN-tasokoordinaattimuodossa. Kaivinkoneenkuljettajat tekevät kaapeloinnin aikana tarkemerkinnät ja tekevät kirjaukset tietokantaan. Kuvassa 7 on esitetty opinnäytetyössä tarkastellun tuulipuiston sisäverkon kaapelireittien pohjatarkepistekertymä Infrakitissä. Puiston koosta riippuen kaapelireiteiltä taltioidaan projektin aikana jopa kymmenientuhansien pisteiden sijaintitieto.



Kuva 7. Tuulipuiston sisäverkon tarkepisteitä



### 6.1.1.2 Laatu poikkeamat

Kaapelointia aloittaessa suunnitelmat voivat olla vielä kesken ja yksityiskohdat epäselviä. Tämä voi tuoda haasteita vaadittujen asennussyvyyksien saavuttamiseen, jos maasto ja maaperä ovat paikoin tuntemattomat. Esimerkiksi maan aineksen määrä voi olla paikoin riittämätön kaapelien peittoon tai maasto voi olla odotettua louhikkoisempaa.

Joissain tilanteissa voidaan joutua tekemään suunnitelmista poikkeavia kallio-porauksia, jolloin kaapeli joudutaan putkittamaan rautaputkella. Rautaputki magnetoituu kaapelissa kulkevan sähkövirran vaikutuksesta, mikä aiheuttaa tehohäviöitä ja heikentää kaapelien kuormitettavuutta. Saatavilla on myös magnetoitumattomia putkia, jotka kuitenkin ovat rautaputkia kalliimpi vaihtoehto. Joissain tapauksissa, esimerkiksi ELY-keskuksen hallinnoimien teiden alituksissa porauksiin täytyy hakea viranomaisilta erikseen lupa, mikä voi puolestaan aiheuttaa kaapeloinnin aikatauluun viivytyksiä.

Kaapelointiurakoitsijan mukaan työmailla on ilmennyt tapauksia, joissa maanrakennusurakoitsijan rakentamien tiestöjen ojaluiskat ovat levinneet paikoin liikaa, mikä on johtanut kaapeloinnin asennussyvyyden riittämättömyyteen kyseisillä osuuksilla. Vaikka maanrakennusurakoitsijat suunnittelevat ja rakentavat tiestöt perustuen kaapelointisuunnitelmiin, on ristiriitatilanteita silti päässyt muodostumaan, johtuen puutteellisesta tiedonkulusta sekä puutteista suunnitelmien yhteensovittamisessa.

### 6.1.2 Rakennuttaja

Rakennuttajaosapuolen haastattelussa selvitettiin, mitä keinoja rakennuttamisorganisaatiolla on varmistaa kaapeloinnin laatu ennen tuulipuistohankkeen rakentamisvaiheen alkamista sekä sen aikana. Haastattelussa kartoitettiin tapoja, joilla rakennuttaja varmistaa kaapeloinnin suunnitelmien- ja standardienmukaisen toteutustavan ja informaation sulavan siirtymisen hankkeessa toimivien sidosryhmien välillä. Haastattelussa selvitettiin myös kaapelointisuunnitelmien tyypillisiä heikkouksia ja pohdittiin mahdollisia kehitysehdotuksia.

### 6.1.2.1 Suunnitelmat

Rakennuttajaosapuolen kokemuksen mukaan puistohankkeita varten toimitetut kaapelointisuunnitelmat ovat yleisesti ottaen laadukkaita ja huolellisesti toteutettu, vaikkakin lopullisiin suunnitelmiin usein jää pieniä huolimattomuusvirheitä. Kuitenkin suunnitelmien kannalta olennaista olisi kiinnittää tarkempaa huomiota maastokatselmointiin alueilla, johon tuulipuistoja kaavaillaan. Tyypillisesti puistosuunnitelmat tehdään maastokarttojen perusteella, jolloin maastosta saa vain hyvin suurpiirteisen käsityksen; suunnitelmissa ei ole aina huomioitu esimerkiksi ojavesien virtaussuuntia ja tiestön ja puuston välisen alueen leveyttä. Tarkkuutta suunnitelmiin saisi lisättyä esimerkiksi paikan päällä suoritettavilla maastontiedusteluilla eli suunnittelijoiden jalkauttamisella maastoon.

Kaapelikaivantojen poikkileikkauskuvien määrän lisääminen parantaisi myös osaltaan suunnitelmien tarkkuutta, ja edelleen helpottaisi kaapeloinnin toteutusta sekä parantaisi kaapeleiden käytettävyyttä. Poikkileikkauskuvien avulla voidaan välttää kaapelien risteämiä, jotka aiheuttavat kaapelien kuormitettavuuden heikkenemistä. Risteämäkohdassa kaapelin lämmönluovutuskyky ympäristöön heikkenee, mikä voi aiheuttaa kaapelin liiallista lämpenemistä, tehohäviöitä ja äärimmäisessä tapauksessa kaapelin käyttöiän lyhenemisen. Katselusuuntien merkitsemisellä poikkileikkauskuviin voidaan edelleen pienentää kaapeleiden risteämisen riskiä.

### 6.1.2.2 Laadunvarmistus ja laatupoikkeamat

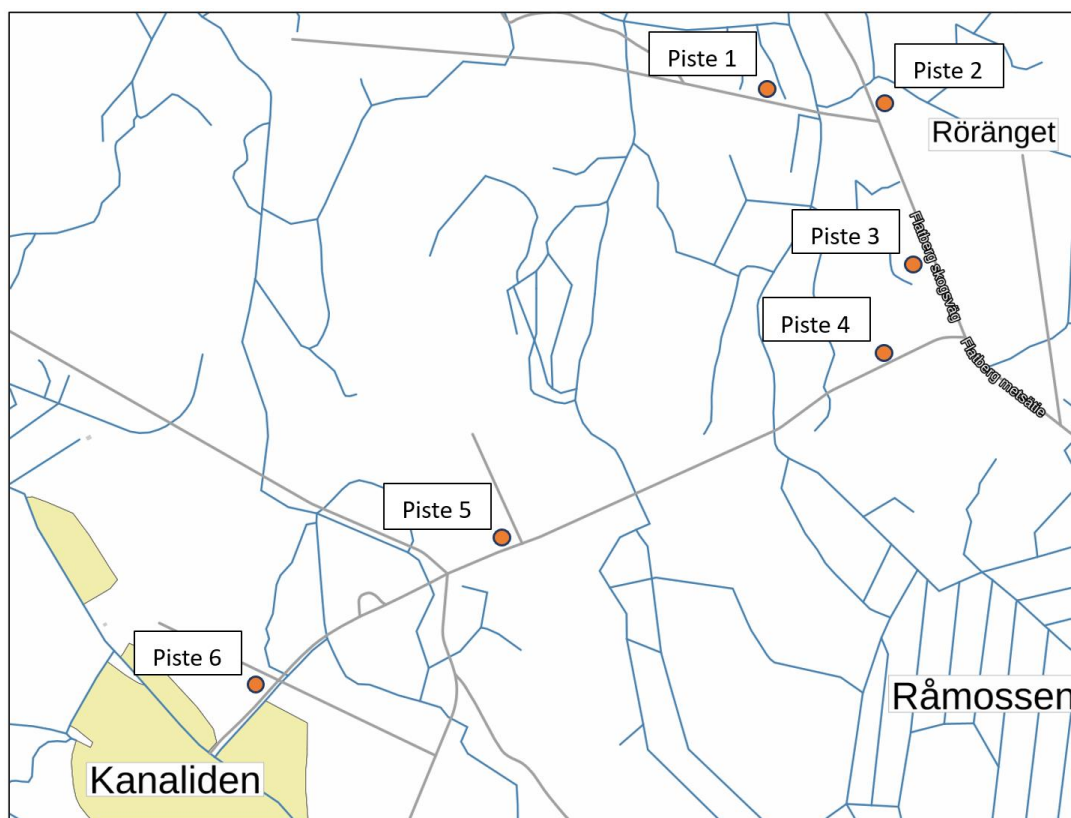
Rakennuttaja hyödyntää rakentamisen aikaisessa laadunvarmistuksessa paikallisvalvontaa, jonka tehtäväkenttään kuuluu valvoa työmaan työskentelyturvallisuutta sekä varmistaa, että asennukset tehdään vaaditulla tavalla. Paikallisvalvoja osallistuu työmaalla tehtäviin mittauksiin ja koestuksiin, ja raportoi työmaan tilanteesta rakennuttajalle.

Yleisimpiä laatupoikkeamia kaapeloinnissa rakennuttajan kokemuksen mukaan ovat riittämätön asennussyvyys ja kaapelien keskinäinen etäisyys kaivannossa. Oikean asennussyvyyden saavuttamiseksi rakennuttaja vaatii kaapelikaivannot

tehtäväksi kaivamalla — ei auraamalla, toisin kuin jakeluverkkoja rakennettaessa usein tehdään. Auraamalla tehtävät kaivannot voivat jäädä liian kapeiksi ja mataliksi. Liian pieni etäisyys kaapeleiden välillä voi aiheuttaa kaapeleiden lämmönluovutuskyvyn heikkenemistä.

## 6.2 Mittaukset

Opinnäytetyön mittauksien tavoitteena oli todentaa pistokoeluoontoisesti standardien ja kaapelointisuunnitelmien mukainen asennussyvyys satunnaisotannalla tuulipuiston sisäverkon kaapeliyhteyksien varrelta. Mittauksella pyrittiin haastamaan asennussyvyysien varmistus- ja määrittystapojen luotettavuutta. Mittaukset suoritettiin tuulipuistotyömaalla kuudessa kuvan 8 osoittamassa pisteessä.



Kuva 8. Mittauspisteet mastokartalla

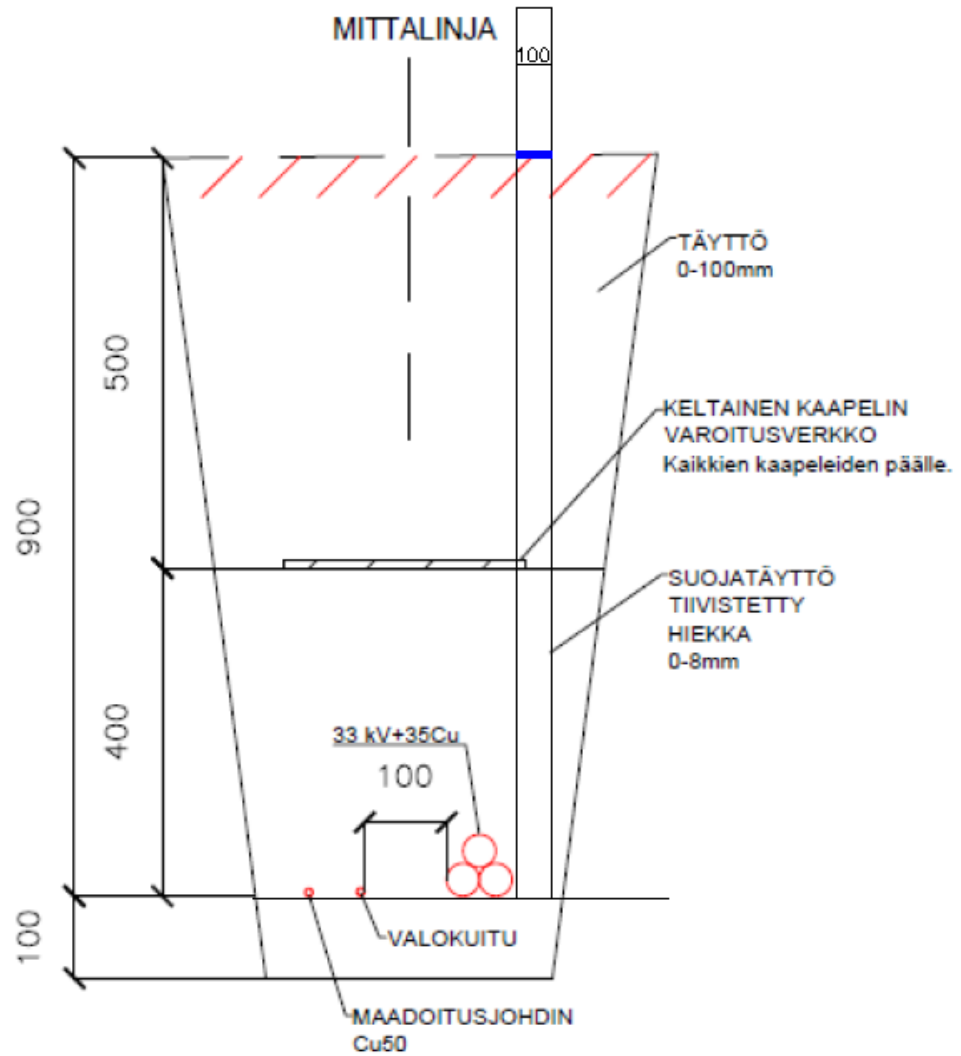
### 6.2.1 Mittausmenetelmä

Syvyyden todentaminen suoritettiin asettamalla kaapelikaivantoihin Infrakit-tietokantaan tallennettujen pohjatarkepisteiden koordinaatteihin (taulukko 1) referenssimittauspaalut, joihin merkittiin suunnitelmien mukainen täyttösyvyys 0,90 metriä. Tärkein tarkastelun kohde oli Z-koordinaatti, joka määrittää kaapelin sijainnin korkeussuunnassa.

Taulukko 1. Mittauspisteiden ETRS-TM35FIN-koordinaatit ja tarkenumerot

	Piste 1	Piste 2	Piste 3	Piste 4	Piste 5	Piste 6
X	6894657	6894650	6894475	6894327	6894093	6893924
Y	210616	210735	210795	210736	210256	209928
Z	20.933	21.551	23.537	23.741	22.496	20.872
Tarke	529	1050	725	758	460	200

Referenssimittauspaalut jätettiin täyttöön kuvien 9 ja 10 mukaisella tavalla. Suunnitelmien vaatima minimisyvyys 0,90 metriä merkittiin paaluun värillisellä teipillä. Kaivantojen täyttämisen ja koneohjausmallin pintatarkepisteiden tallentamisen jälkeen täyttöjen pinnankorkeutta verrattiin mittauspaalujen osoittamaan arvoon. Lopuksi mittauspisteiden ympäristöä tutkattiin kaapelitutkauslaitteilla kolmannen osapuolen toimesta, ja tutkaustuloksia vertailtiin ristiin Infrakitin tarkepistetietojen ja mittauspaalujen osoittamien arvojen kanssa.



Kuva 9. Poikkileikkauspiirustus mittauspaalun sijainnista kaapelikaivannossa



Kuva 10. Mittauspaalu kaapelikaivannossa

Täyttöjen pinnankorkeutta tarkasteltaessa mittapaaluihin verraten todettiin täytösyvyyden olevan riittävä jokaisessa mittauspisteessä. Mittapaalujen osoittama syvyys vaihteli noin 1,00–1,55 m välillä, mikä riitti täyttämään suunnitelmien vaatiman asennussyvyyden 0,90 metriä. Mittaustulokset on esitetty kootusti taulukossa 2.

Taulukko 2. Mittauspaalujen lukemat

	Piste 1	Piste 2	Piste 3	Piste 4	Piste 5	Piste 6
Syvyys (m)	1,0	1,4	1,55	1,5	1,4	1,4

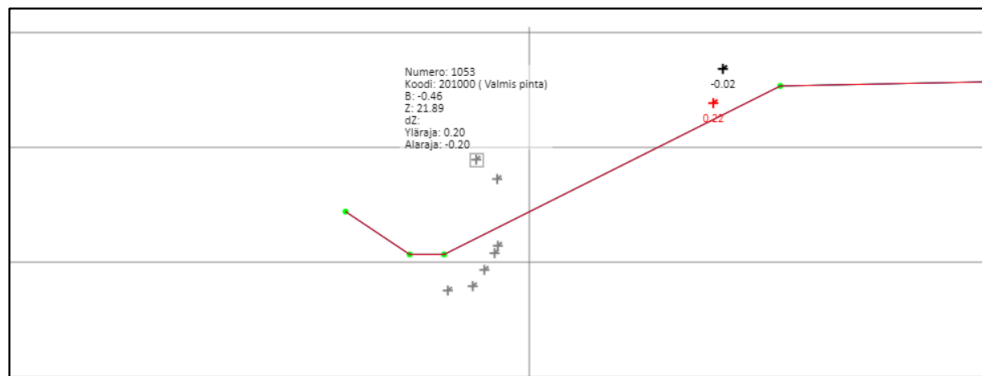
## 6.2.2 Tarkepistevertailu

Seuraavaksi mittapaalujen arvoja vertailtiin kaivinkoneenkuljettajien tallettamiin tarkepistetietoihin, jotka haettiin Infrakitin tietokannasta. Sovelluksessa luotiin mittauspisteiden sijainneista poikkileikkauskuvat, joista kävi ilmi kaapelikaivantojen suunnitelmien mukaiset pintaprofiilit sekä tallennetut tarkepisteet eli toteutunut profiili. Suunnitellut kaivantoprofiilit on merkitty kuviin värillisellä käyrällä. Toteutuneet asennussyvydet laskettiin kaapelikaivannon pohjan ja toteutuneen pinnan tarkepisteiden Z-koordinaattien erotuksista. Ohjelmiston rajoittuneisuuden takia leikkauskuvissa ei saatu esitettyä pohjatarkepisteen ja toteutuneen pinnan koordinaatteja yhteisessä näkymässä, joten kuvissa 11–16 on nähtävillä ainoastaan pintatarkepisteiden korkeustieto.

### Mittauspiste 1

Mittauspisteessä 1 (kuva 11) pohjatarkepisteen Z-koordinaatti 20.93 ja toteutuneen pinnan (tarkepiste numero 1053) Z-koordinaatti 21.89.

Pisteen laskennallinen asennussyvyys 0,96 metriä.

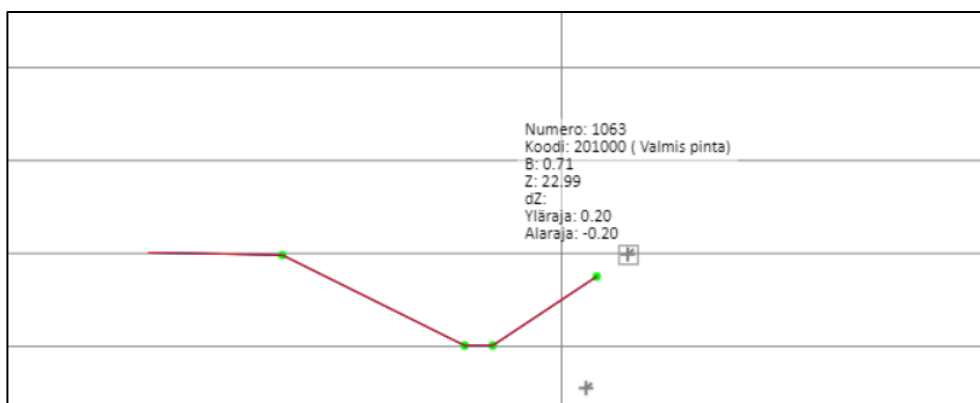


Kuva 11. Poikkileikkaus mittauspisteestä 1

### Mittauspiste 2

Mittauspisteen 2 (kuva 12) pohjatarkepisteen Z-koordinaatti 21.55 ja toteutuneen pinnan (tarkepiste numero 1063) Z-koordinaatti 22.99.

Pisteen laskennallinen asennussyvyys 1,44 metriä.

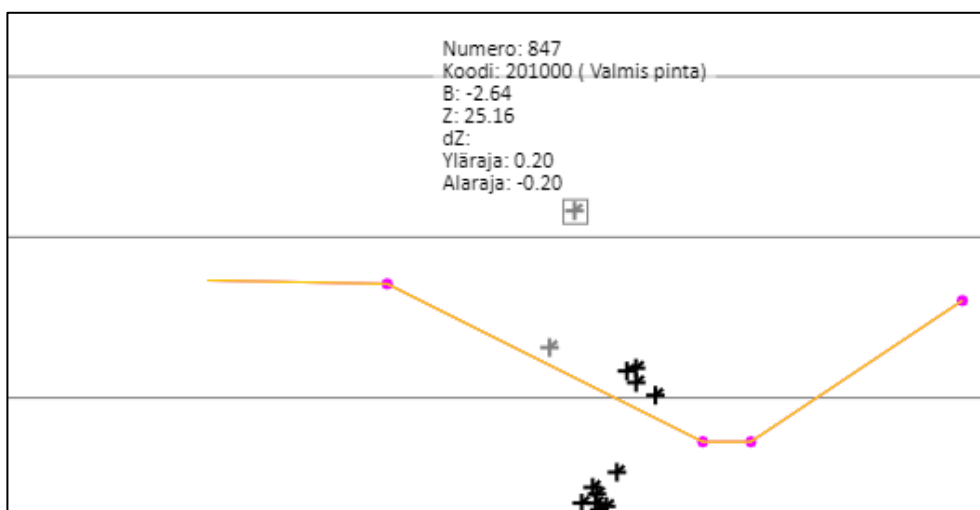


Kuva 12. Poikkileikkaus mittauspisteestä 2

### Mittauspiste 3

Mittauspisteen 3 (kuva 13) pohjatarkepisteen Z-koordinaatti 23.54 ja toteutuneen pinnan (tarkepiste numero 847) Z-koordinaatti 25.16.

Pisteen laskennallinen asennussyvyys 1,62 metriä.



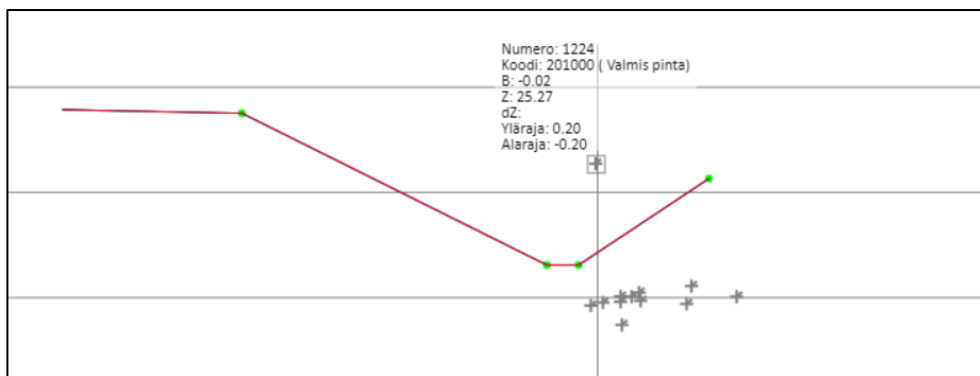
Kuva 13. Poikkileikkaus mittauspisteestä 3



### Mittauspiste 4

Mittauspisteen 4 (kuva 14) pohjatarkepisteen Z-koordinaatti 23.74 ja toteutuneen pinnan (tarkepiste numero 1224) Z-koordinaatti 25.27.

Pisteen laskennallinen asennussyvyys 1,53 metriä.

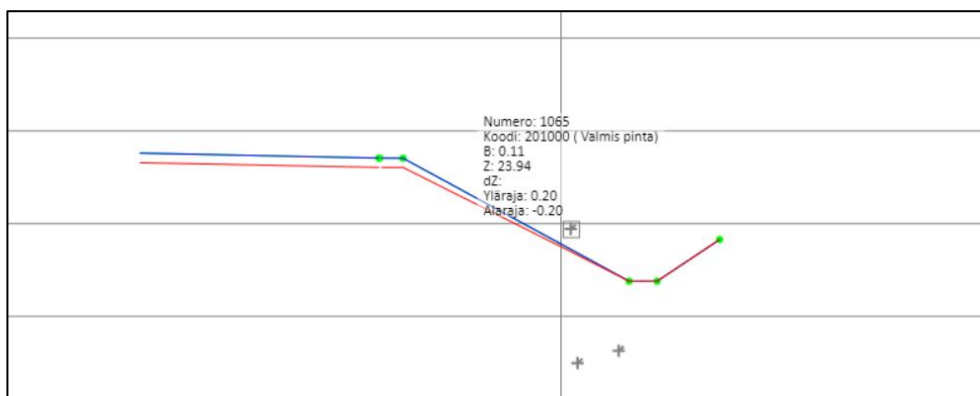


Kuva 14. Poikkileikkaus mittauspisteestä 4

### Mittauspiste 5

Mittauspisteen 5 (kuva 15) pohjatarkepisteen Z-koordinaatti 22.50 ja toteutuneen pinnan (tarkepiste numero 1065) Z-koordinaatti 23.94.

Pisteen laskennallinen asennussyvyys 1,44 metriä.

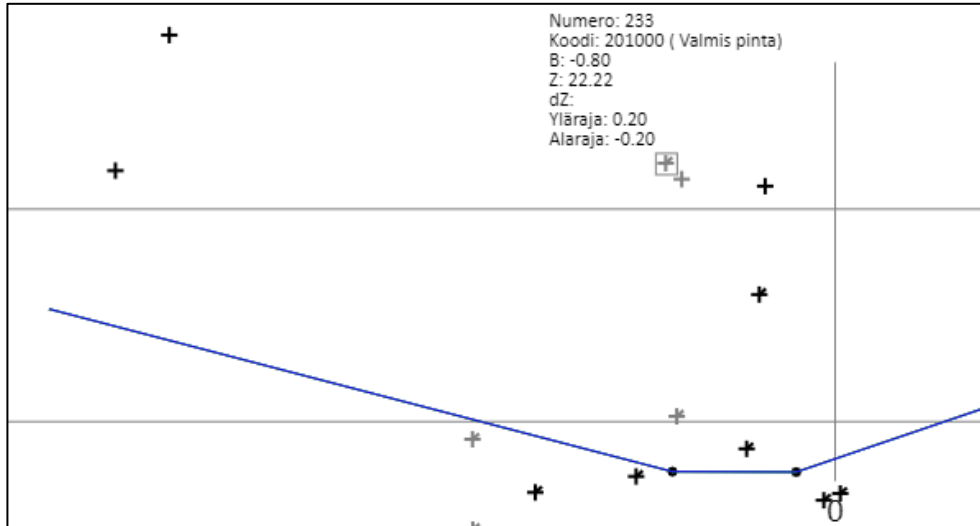


Kuva 15. Poikkileikkaus mittauspisteestä 5

### Mittauspiste 6

Mittauspisteen 6 (kuva 16) pohjatarkepisteen Z-koordinaatti 20.87 ja toteutuneen pinnan (tarkepiste numero 1065) Z-koordinaatti 22.22.

Pisteen laskennallinen asennussyvyys 1,35 metriä.



Kuva 16. Poikkileikkaus mittauspisteestä 6

Taulukossa 3 on esitetty kootusti mittauspisteiden tarkkeiden syvyyskoordinaatit ja niistä johdetut kaapelin asennussyvydet. Tarkepistetiedon perusteella riittävä peittosyvyys saavutettiin jokaisessa tarkastelupisteessä. Taulukossa 4 on esitetty mittauspaalujen tulosten ja laskennallisen syvyyden poikkeaminen toisistaan. Tulokset ovat melko hyvin linjassa toistensa kanssa.

Taulukko 3. Mittauspisteiden syvyyskoordinaatit ja kaapelin peittosyvyys

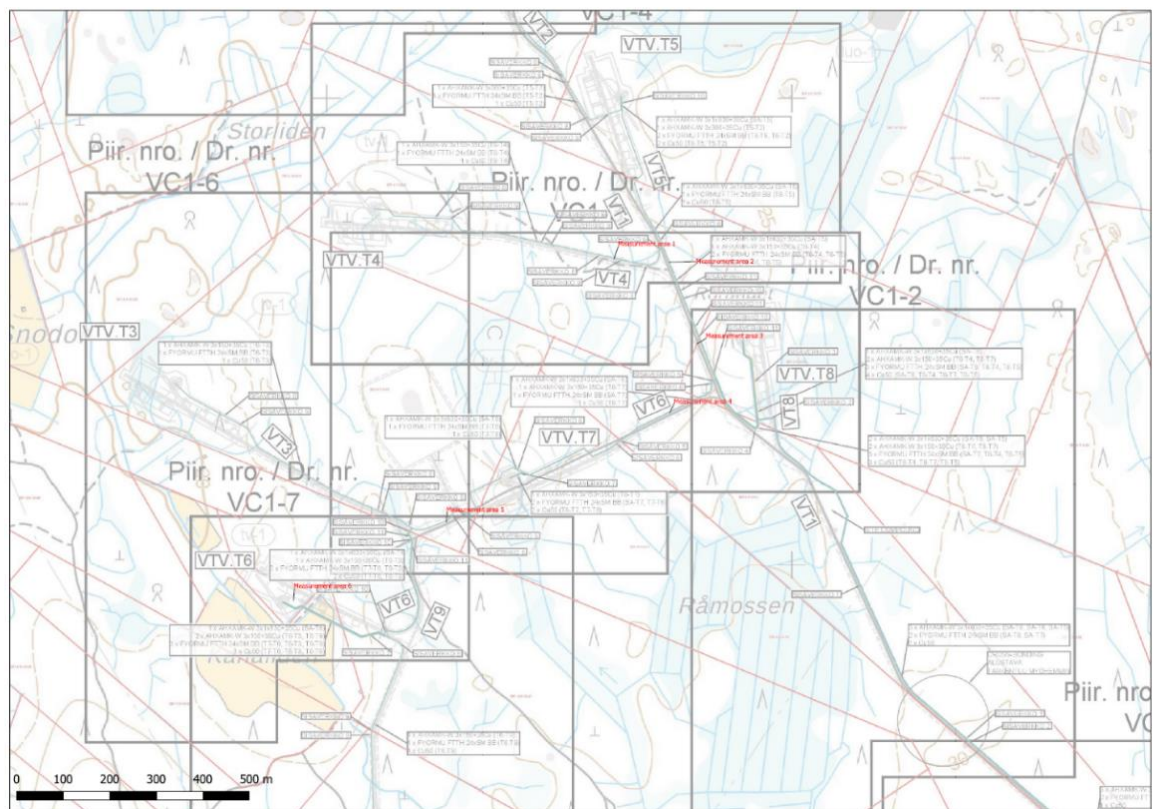
	Piste 1	Piste 2	Piste 3	Piste 4	Piste 5	Piste 6
Z-koordinaatti pintatarkepiste	21.89	22.99	25.16	25.27	23.94	22.22
Z-koordinaatti pohjatarkepiste	20.93	21.55	23.54	23.74	22.50	20.87
Laskennallinen peittosyvyys (m)	0,96	1,44	1,62	1,53	1,44	1,35

Taulukko 4. Mittauspaalujen tulosten ja tarkepistetietojen poikkeavuus

	Piste 1	Piste 2	Piste 3	Piste 4	Piste 5	Piste 6
Mittauspaalun syvyys (m)	1,0	1,4	1,55	1,5	1,4	1,4
Tarkepistesyvyys	0,96	1,44	1,62	1,53	1,44	1,35
Poikkeama (m)	0,04	0,06	0,07	0,03	0,04	0,05

### 6.2.3 Tutkaustulokset

Seuraavassa työvaiheessa Infrakitiin tallennettuihin tarkepistetietoihin verrattiin kolmannen osapuolen jälkikartoitustutkaustuloksia. Jälkikartoitustoimenpiteet suoritettiin tarkastelupisteiden läheisyydessä, noin 60 metrin säteellä referenssipaaluilta kuvassa 17 punaisella tekstillä esitetyissä pisteissä. Tutkaajaosapuolen toimittamat tulokset on esitetty kokonaisuudessaan liitteessä 1.



Kuva 17. Tuulipuiston kartta, johon merkitty kaapelitutkausalueet

Tutkauksessa käytettiin kuvan 18 Radiodetection RD8100PDL-kaapelinhakulaitetta. Valmistajan ilmoittama toleranssi laitteen paikannustarkkuudelle on  $\pm 5\%$ .



Kuva 18. Radiodetection RD8100PDL (Radiodetection 2024)

Taulukossa 4 on esitetty kaapeleiden laskennallinen peittosyvyys, tutkaustulokset sekä niiden välinen poikkeama.

Taulukko 5. Tutkaustulosten vertailu tarkepisteisiin

	Piste 1	Piste 2	Piste 3	Piste 4	Piste 5	Piste 6
Laskennallinen peittosyvyys (m)	0,96	1,44	1,62	1,53	1,44	1,35
Tutkaussyvyys (m) (lähin tutkauspiste)	1,1	1,3	1,45	1,4	1,3	1,45
Poikkeama (m)	0,14	0,14	0,17	0,13	0,14	0,10

## 7 Pohdinta

Tuulipuiston sisäverkon kaapelireittien sijaintitiedon taltioiminen koneohjauksellin tarkepisteitä käyttämällä todettiin tässä työssä luotettavaksi menetelmäksi asennussyvyyden varmistamisessa. Näin ollen kaapelireittien jälkikartoittaminen ei välttämättä ole tarpeen Traficomien määräyksen verkkotietojen toimittamisesta Sijaintitietopalveluun täyttämiseksi ja ensisijaisesti kaapeloinnin laadukkaan toteutuksen varmistamiseksi, sillä olennaisinta tarkan sijaintitiedon tallentamisessa kuitenkin on, että kaapeloinnin tilannut osapuoli varmistuu asennustyön laadusta. Tarve jälkikartoitukselle voi syntyä, mikäli paikkatiedot on esimerkiksi jäänyt puuttumaan osalta kaapelireiteistä puiston sisäverkon rakentamisen aikana, tai tarkepisteiden ilmaisema kaapelikaivantojen peittosyvyys on jäänyt joidenkin kaapelointiosuuksien osalta riittämättömäksi. Jälkikartoitus vie runsaasti aikaa ja resursseja, joten mahdollisimman tarkan sijaintitiedon tallentaminen jo rakentamisvaiheessa on ensiarvoisen tärkeää.

Opinnäytetyötä varten haastatellun kaapelointiurakoitsijan mukaan jälkikartoitustutkauksen tarkkuudessa on historiassa ollut epävarmuutta. Esimerkkinä käytettiin aiempaa tilannetta tuulipuistotyömaalta, jossa tutkaamalla mitattu kaapelien asennussyvyys poikkesi kymmenillä senttimetreillä suunnitelmista ja tarkepistetiedosta. Tutkaustulosten mukaan asennussyvyydeltään suunnitelmista poikkeavia reittiosuuksia auki kaivaessa todettiin kuitenkin kaapelien peittosyvyyden olleen todellisuudessa riittävä. Tulosten tarkkuuteen vaikuttavat muun muassa maaperän ominaisuudet ja lämpötila, ja erityisen haastavaa tarkkojen tutkaustulosten saavuttaminen on routaisessa maaperässä. Tässä työssä käytettyjen tutkimusmenetelmien perusteella ei voida muodostaa johtopäätöstä kaapeleiden tutkaukseen käytettyjen laitteiden luotettavuudesta, johtuen menetelmien epävarmuustekijöistä ja otannan suppeudesta.

Opinnäytetyötä koostettaessa ilmeni, että kaapelitutkauksen tarkkuutta voi olla mahdollista parantaa käyttämällä kaapelireitillä sijaitsevia paikkatiedoltaan entuudestaan tunnettuja referenssipisteitä tutkauslaitteiston kalibroimiseen. Työssä tarkasteltua jälkikartoitusta varten tutkaajat käyttivät kaapelikaivantoihin

opinnäytetyön nimissä asetettujen mittauspaalujen osoittamaa kaivannon syvyystietaa referenssiarvona, mikä on osaltaan voinut vaikuttaa tutkaustulosten tarkkuuteen ja "linjautumiseen" tarkepistetiedon kanssa. Normaalitilanteessa kaapelireittien varrella ei kuitenkaan ole erillisiä syvyysreferenssipisteitä tutkien kalibrointia varten. Lisäksi on toki huomioitava, että mittauspaalujen osoittamia arvoja tulkitsemalla ei ollut mahdollista saavuttaa aivan absoluuttisen tarkkoja tuloksia, johtuen mittauksien mekaanisesta luonteesta ja maaperän elämisestä kaivantojen täyttövaiheessa. Mikäli jatkossa referenssipisteille olisi tarvetta, voisi niiden luomisen suorittaa esimerkiksi erillisellä satelliittipaikannuslaitteistolla. Tämä voisi olla hyödyksi, mikäli kaapelitutkauksen luotettavuuden tarkastelua haluttaisiin jatkaa tulevien hankkeiden ohessa ilman, että tutkalaitteita olisi mahdollista kalibroida etukäteen. Resurssien puitteissa tätä ei sisällytetty opinnäytetyöhön.

Koneohjausmallin kalibroiminen on verrattain yksinkertainen toimenpide. Kalibroimiseen tarvitaan maastosta selkeä piste, esimerkiksi kaapelireitin varrella sijaitseva suuri kivi. Pisteiden sijaintitieto tallennetaan etukäteen käyttäen satelliittipaikannuslaitteistoa, ja koneohjausmallin kalibroimisen voi suorittaa aina pisteen ohi ajettaessa. Asennussyvyystietojen tarkkuutta voisi myös edelleen parantaa lisäämällä kaapelikaivantojen valmiilta pinnalta tallennettavien tarkepisteiden määrää.

## Lähteet

- Aro, M. Elovaara, J. Karttunen, M. Nousiainen, K & Palva, V. 2015. Suurjännite-tekniikka, 4 painos. Helsinki: Otatieto.
- Chauvin Arnoux Group. 2023. Eristysvastuksen mittausopas. <https://www.sahkonumerot.fi/6750278/doc/brochure/>. 26.3.2023
- Czapp, S. & Dobrzynski, K. 2020. Safety Issues Referred to Induced Sheath Voltages in High-Voltage Power Cables—Case Study. <https://doi.org/10.3390/app10196706>. 20.3.2023
- Elovaara, J & Haarla, L. 2011. Sähköverkot 2, Verkon suunnittelu ja laitteet. Toisen painos. Helsinki: Otatieto.
- Eurolaite. 2021. Kaapelin ikääntyminen voidaan määrittää häviökerroinmittauksella. <https://www.eurolaite.fi/ajankohtaista/kaapelin-ikaantyminen-voidaan-maarittaa-haviokerroinmittauksella/>. 25.3.2023
- IEEE Std 400.2-2013. 2013. IEEE Guide for Field Testing of Shielded Power Cable Systems Using Very Low Frequency (VLF)(less than 1 Hz). New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.
- IEEE Std 575–2014. 2014. IEEE Guide for Bonding Shields and Sheaths of Single Conductor Power Cables Rated 5 kV through 500 kV. New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.
- Kehl, L. Meier, R & Quaggia, D. 2019. Cross-bonding for MV cable systems: advantages and Impact on accessories design. Europacable. <https://europacable.eu/wp-content/uploads/2021/11/03-Cross-bonding-for-MV-cable-systems-Advantages-and-inpact-on-accessories-design.pdf>. 5.4.2023
- Lakervi, Erkki & Partanen, Jarmo. 2009. Sähköjälkeluttekniikka. Helsinki: Otatieto.
- Lumbreras, S. & Ramos, A. 2013. Offshore wind farm electrical design: a review. Wind Energ., 16: 459-473. <https://doi.org/10.1002/we.1498>. 30.05.2024
- Maankäyttö- ja rakennuslaki 132/1999
- Monni, M. 2001. Sähkölaitosasetajan ammattioppi 2, Maakaapeliverkostotyöt - Katu- ja tievalaistustyöt. Helsinki: Adato Energia.
- Novatron. 2024. Xsite® PRO 3D. <https://novatron.fi/koneohjaus/kaivinkoneisiin/xsite-pro-edistynyt-3d/>. 7.6.2024
- Prysmian Group. 2022. Koestus on ratkaiseva osa kaapelinvalmistusta. <https://fi.prysmiangroup.com/node/10741>. 13.3.2023
- Radiodetection. 2024. RD8100 Cable and Pipe Locator. <https://www.radiodetection.com/en/products/cable-and-pipe-locators/rd8100>. 7.6.2024
- Rejlers. 2021. Rejlers kertoo, mistä maahan kaivettu kaapeli löytyy. <https://www.rejlers.fi/Uutiset/rejlers-kertoo-mista-maahan-kaivettu-kaapeli-loytyy/>. 12.3.2023
- SFS 6000-8-814. 2022. Pienjännitesähköasennukset. Osa 8-814: Täydentävät vaatimukset. Kaapelien asentaminen maahan tai veteen. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto
- SFS 6001. 2018. Suurjännitesähköasennukset. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto
- Shenzhen Woer Heat - Shrinkable Material Co., Ltd. 2024. Cross Bonding Link Box. <https://en.woer.com/Solution/1044/264> 31.5.2024

Sätköturvallisuuslaki 1135/2016

Traficom. 2023. Määräys verkkotietojen toimittamisesta Sijaintitietopalveluun  
(71/2023 M)

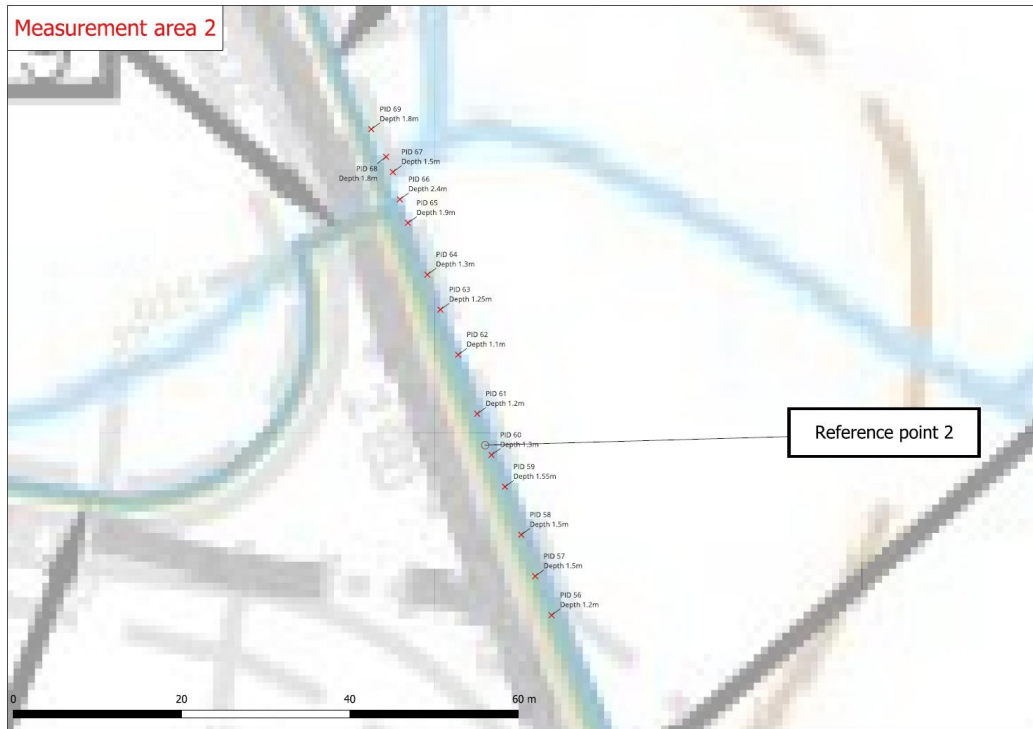


**Liite 1 Kaapelitukkaustulokset**



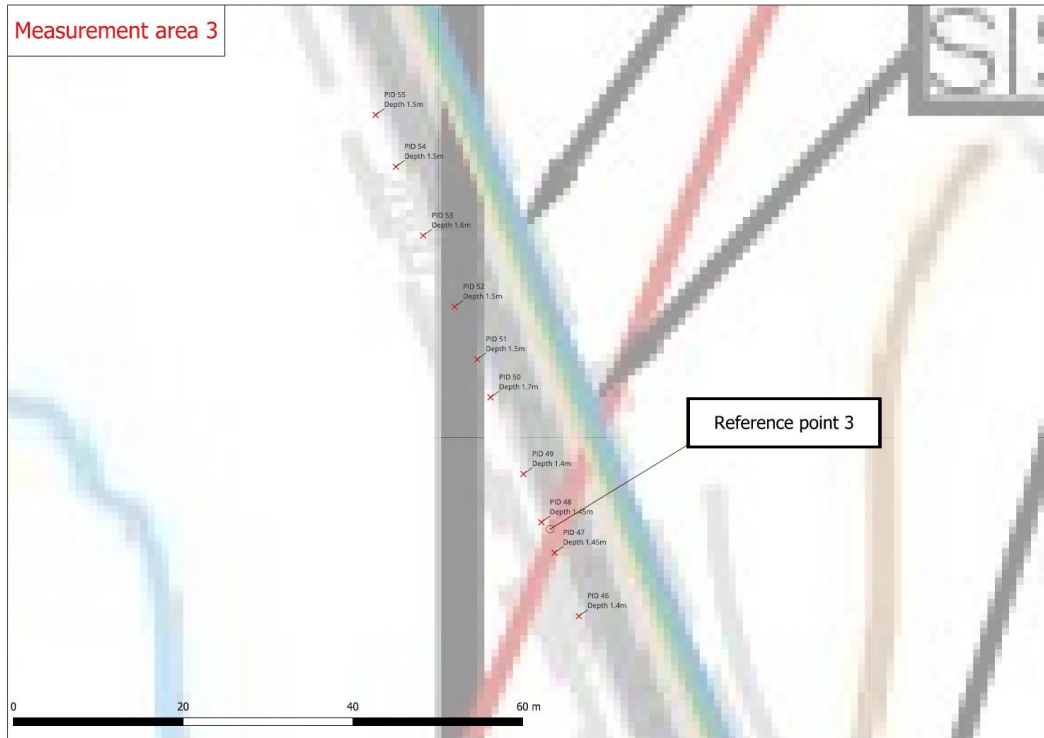
Point	PID70	PID71	PID72	PID73	PID74	PID75	PID76
Depth (m)	1,4	1,35	1,55	1,45	1,6	1,5	1,1

Point	PID77	PID78	PID79	PID80	PID81	PID82	PID83
Depth (m)	1,4	1,3	1,1	1,15	1,2	1,2	1,15



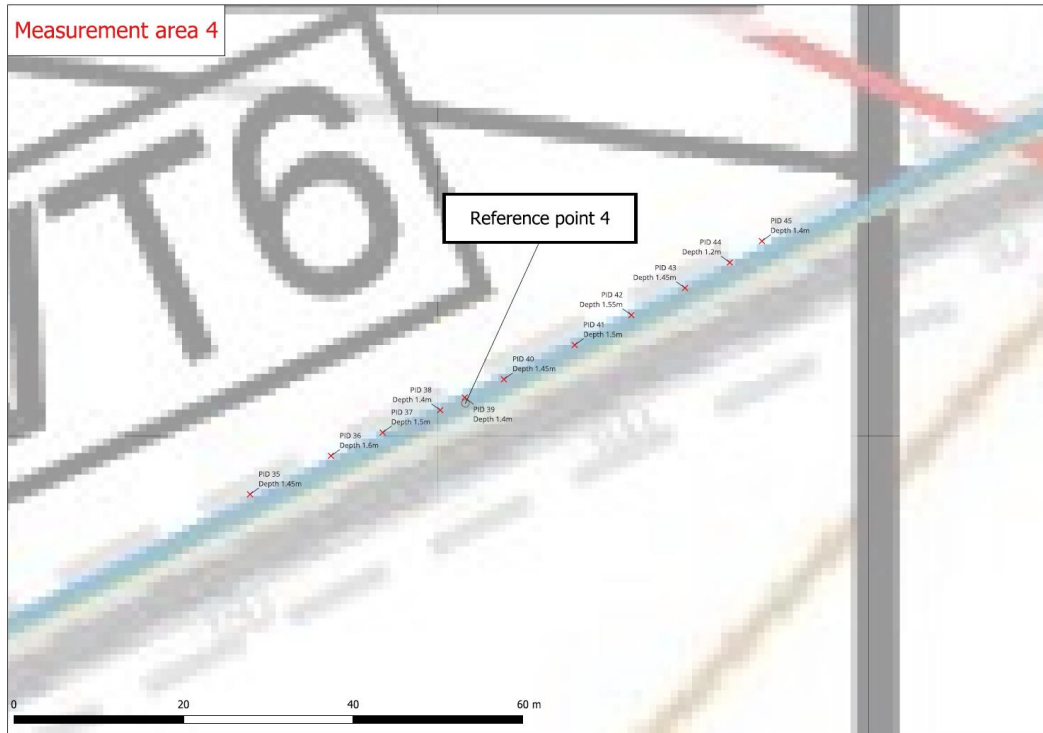
Point	PID56	PID57	PID58	PID59	PID60	PID61	PID62
Depth (m)	1,2	1,5	1,5	1,55	1,3	1,2	1,1

Point	PID63	PID64	PID65	PID66	PID67	PID68	PID69
Depth (m)	1,25	1,3	1,9	2,4	1,5	1,8	1,8



Point	PID46	PID47	PID48	PID49	PID50	PID51	PID52
Depth (m)	1,4	1,45	1,45	1,4	1,7	1,5	1,5

Point	PID53	PID54	PID55
Depth (m)	1,6	1,5	1,5



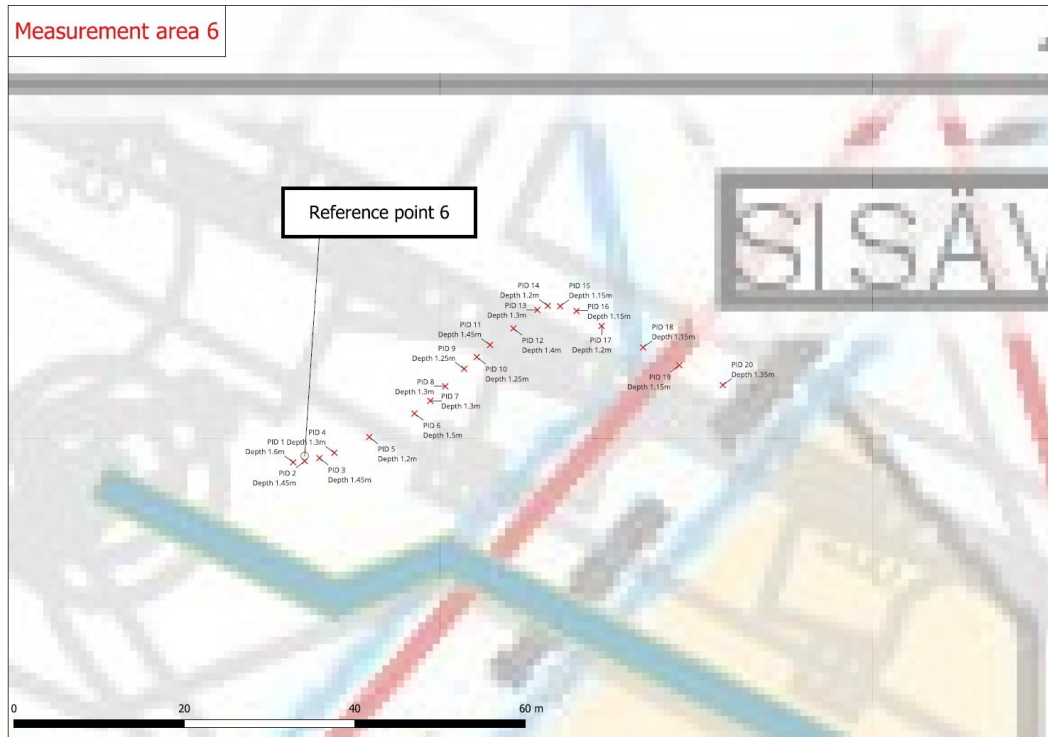
Point	PID35	PID36	PID37	PID38	PID39	PID40	PID41
Depth (m)	1,45	1,6	1,5	1,4	1,4	1,45	1,5

Point	PID42	PID43	PID44	PID45
Depth (m)	1,55	1,45	1,2	1,4



Point	PID21	PID22	PID23	PID24	PID25	PID26	PID27
Depth (m)	1,5	1,4	1,5	1,45	1,3	1,45	1,45

Point	PID28	PID29	PID30	PID31	PID32	PID33	PID34
Depth (m)	1,5	1,5	1,3	1,45	1,45	1,3	1,45



Point	PID1	PID2	PID3	PID4	PID5	PID6	PID7
Depth (m)	1,3	1,45	1,45	1,3	1,2	1,5	1,3

Point	PID8	PID9	PID10	PID11	PID12	PID13	PID14
Depth (m)	1,3	1,25	1,25	1,45	1,4	1,3	1,2

Point	PID15	PID16	PID17	PID18	PID19	PID20
Depth (m)	1,15	1,15	1,2	1,15	1,15	1,35