

Mikko Snellman

# 110 kV:N MAAKAAPELOINNIT SÄHKÖASEMALLA

Opinnäytetyö

Tekniikan ammattikorkeakoulututkinto

Merenkulun koulutus

2024



**Kaakkois-Suomen  
ammattikorkeakoulu**

Tutkintonimike	<a href="#">Insinööri (AMK)</a>
Tekijä/Tekijät	Mikko Snellman
Työn nimi	110 kV maakaapeloinnit sähköasemalla
Toimeksiantaja	Destia Oy
Vuosi	2024
Sivut	41 sivua, liitteitä 2 sivua
Työn ohjaaja(t)	José Hernández, Ari Eskola

## TIIVISTELMÄ

Työn tavoitteena oli koota ja tuottaa tietoa sähköasemaprojektien 110 kV:n maakaapeloinneista rakennusurakoitsijan näkökulmasta. Sähköasemien sisäinen maakaapelointi lisääntyy tulevaisuudessa merkittävästi vanhojen asemien saneerausten sekä uusien voimajohtojen hitaiden lupaprosessien myötä. Perinteisiä avokytkinlaitoksia korvataan yhä etenevässä määrin kompakteilla kaasuieristeisillä kytkinlaitoksilla ja uusiutuvan energian yleistyessä sähköasemille tulevat ulkopuoliset liittymät tuovat yhteytensä asemille usein 110 kV:n maakaapeleilla.

Tutkimuksen teoreettinen viitekehys koostuu kaapelityyppien, kaapeliasennusten, maadoitusten ja kaapelipäätteiden kuvaamisesta. Tutkimuksessa esitetään laskentatapoja kaapeloinnin kannalta kriittisille tekijöille, kuten kuormitettavuudelle ja maan resistiivisyydelle. Lisäksi työssä kuvataan rakentamisen aikaista kaapelointiprosessia, standardien ja lakisäännösten asettamia vaatimuksia urakoitsijalle sekä pohditaan rakennusprosessin aikana mahdollisesti ilmeneviä haasteita. Aihetta käsitellään sekä yleisellä tasolla että käyttäen tapausesimerkinä Kauppilan sähköasemaa. Lähteinä tutkimukselle on käytetty alan kirjallisuutta ja julkaisuja, standardeja, aiempia tutkimuksia sekä urakoitsijoiden käytössä olevaa, työtä ohjaavaa materiaalia.

Työssä havaittiin kaapelointiprosessin olevan monitahoinen sekä kriittinen vaihe sähköasemarakentamisessa, jota alan standardit ohjaavat tarkasti. Kaapeloinnille haasteita asettavat rajatulla sähköasema-alueella työskentely ja mahdollisten jännitteisten osien läheisyys. Tutkimus oli ajankohtainen maakaapeloinnin lisääntyessä tulevaisuudessa vanhojen avokytkinlaitosten saneerausten myötä. Työ toimii aineistona ja oppaana sen toimeksiantajalle sekä mahdollisesti muille samankaltaisia projekteja työstäville yrityksille ja aiheesta kiinnostuneille.

**Asiasanat:** sähköasema, maakaapelointi, maadoitus

Degree title	<a href="#"><u>Bachelor of Engineering</u></a>
Author (authors)	Mikko Snellman
Thesis title	110 kV substation underground cabling
Commissioned by	Destia Oy
Time	2024
Pages	41 pages, 2 pages of appendices
Supervisor	José Hernández, Ari Eskola

## ABSTRACT

The objective of this thesis was to gather and produce information from the perspective of a construction contractor regarding the 110 kV underground cabling in electrical substation projects. The internal underground cabling in substations is anticipated to significantly increase in the future due to the refurbishment of old substations and the slow licensing processes of new overhead power lines. Traditional air-insulated switchgear substations are being replaced by more compact gas-insulated switchgear, and with the growing prevalence of renewable energy, external connectors to substations often bring their connections via 110 kV underground cables.

The theoretical framework of the study comprises descriptions of cable types, cable installations, grounding methods and cable terminations. The research presents calculation methods for critical factors in cabling, such as ampacity and soil resistivity. Additionally, the work outlines the cabling process during construction, the requirements set by standards and regulations for contractors, and contemplates potential challenges that may arise during the construction process. The subject is addressed both in a general context and by using the Kauppila substation project as a case example. The study draws upon literature, publications in the field, standards, prior research, and material guiding contractors' work practices as sources of information.

In this thesis, it was observed that the cabling process is complex and a critical phase in the construction of electrical substations, tightly guided by the industry standards. Challenges in cabling arise from working within confined substation areas and the proximity of potentially energized components. The research was timely due to the increasing use of underground cabling expected in the future alongside the refurbishment of older air-insulated switchgear substations. This work serves as both source material and a guide for its commissioning party and potentially for other companies engaged in similar projects and individuals interested in the topic.

**Keywords:** electrical substation, cabling, grounding

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	3
2	TYÖN TAUSTA JA TUTKIMUSTEHTÄVÄ.....	4
2.1	Toimeksiantajan ja rakennuskohteen esittely .....	4
2.2	Työn lähtökohdat ja tutkimusongelma .....	5
2.3	Työn rajaus ja rakenne .....	6
3	KAAPELITYYPIT JA KUORMITETTAVUUS .....	7
3.1	Voimakaapelin rakenne .....	7
3.1.1	Johdin .....	8
3.1.2	Johdinsuoja.....	9
3.1.3	Johdineristys.....	9
3.1.4	Hohtosuoja.....	10
3.1.5	Kosketussuoja .....	10
3.2	Kaapeleiden kuormitettavuus .....	11
3.3	Lämmön siirtyminen kaapelista ympäristöön .....	12
3.4	Kaapeleiden taso- tai kolmioasennus .....	15
3.4.1	Asentaminen tasoon .....	15
3.4.2	Asentaminen kolmioon.....	16
4	KAAPeleiden MAADOITUS .....	17
4.1	Avoin kosketuspiiri .....	18
4.2	Suljettu kosketuspiiri .....	18
4.3	Maadoitus ylijännitesuojalla .....	19
5	KAAPELIASENNUKSET .....	19
5.1	Kaapeleiden käsittely.....	20
5.2	Vetotavat .....	21
5.3	Kaapelien kiinnitys sisällä ja ulkona.....	22
5.4	Pääteportaalit, -telineet ja -pylväät.....	22
5.5	Mahdolliset ongelmat kaapeliasennuksissa.....	24

6	KAAPELIPÄÄTTEET JA JATKOKSET .....	24
7	MITTAUKSET .....	25
7.1	Tehdastestaukset (FAT) .....	25
7.2	Käyttöönottomittaukset (SAT) .....	26
7.3	Osittaispurkausmittaus .....	26
7.4	Maaperän resistiivisyyden mittaaminen .....	27
7.4.1	Wenner-menetelmä .....	27
7.4.2	Schlumberger-menetelmä.....	29
7.5	Käytettävät mittalaitteet .....	30
8	TARVITTAVAT PÖYTÄKIRJAT, SUUNNITELMAT JA DOKUMENTIT .....	32
9	KAUPPILAN SÄHKÖASEMAN UUDISTUS.....	34
9.1	Kaapeli-asennukset Kauppilassa .....	34
9.2	Kauppilan sähköasemalla tehdyt mittaukset.....	34
9.3	Kauppilassa havaitut ongelmat.....	36
10	YHTEENVETO .....	36
	LÄHTEET.....	39

## LIITTEET

Liite 1. Eristysresistanssin mittauspöytäkirja

Liite 2. Kauppilan sähköaseman alkuperäinen kaapelointisuunnitelma

## 1 JOHDANTO

Sähköasemat ovat sähköverkon solmukohtia. Niillä suoritetaan kytkentöjä, muunnetaan jännitettä ja jaetaan sähköenergian siirtoa eri johdoille. Olennaisesti sähköasemien rakenteeseen vaikuttava tekijä on niiden pääasiallinen tehtävä – toimiiko asema vain kytkinlaitoksena vai onko tarkoituksena myös muuntaa jännitettä eri jakeluverkkoihin sopivaksi. (Elovaara & Haarla 2011, 76, 96.)

Laajenevat kaupungit ja alati kasvava energiankulutus pakottavat etsimään energian siirrossa ja jakelussa ratkaisuja, joissa samaa tilavuutta tai maa-alaa käyttämällä saadaan syötettyä entistä suurempi teho. Kaasueristetyt kytkinlaitokset ovat jo mahdollistaneet tämän. (Elovaara & Haarla 2011, 111.) 110 kV:n maakaapelointi on yleisesti lisääntymässä, sillä uusien voimajohtojen luvitus on hankalaa ja aikaa vievää. Vanhoja avokytkinlaitoksia saneerataan lähivuosina paljon. Yleinen ratkaisu saneerauksissa on korvata paljon tilaa vievä avokytkinlaitos kompaktimmalla kaasueristeisellä kojeistolla (GIS), mikä lisää sähköaseman sisäisten maakaapelointien tarvetta. 110 kV:n sähköasemille tulee myös etenevässä määrin ulkopuolisia liittyjiä uusiutuvan energian yleistyessä ja liittyjän tuodessa yhteydet sähköasemille usein 110 kV:n maakaapeleilla. (ABB 2000, 128–136.)

Tämän tutkimuksen tavoitteena on tuottaa tietoa sähköasemaprojektien 110 kV:n maakaapeloinneista. Kaapeloinnin ollessa hyvin laaja-alainen aihe, tämä tutkimustehtävä rajataan koskemaan vain sähköaseman sisäisiä kaapelointeja. Aihetta sivuavia opinnäytetöitä on tehty Suomessa jonkin verran (Ala-Kokko 2018; Hämäläinen 2013; Nevalainen 2023; Mäkinen 2023; Suomi 2010), mutta sähköasemien sisäisestä kaapeloinnista löytyy paitsi niukasti kirjallisuutta myös vähän tutkimuksia.

Tutkimuksen teoreettinen kehys koostuu kaapelityypeistä, kaapeliasennuksista, maadoituksista ja kaapelipäätteistä käsittelevästä osuudesta. Johdannon jälkeen esitellään opinnäytetyön toimeksiantaja ja työn tapausesimerkkinä toimiva sähköasemaprojekti sekä kuvataan toimeksiannon ja työn tavoitteita, rajausta ja taustaa. Kolmannessa luvussa kuvataan maakaapelin rakenneosat sekä

kuormitettavuuteen liittyviä perusteita. Neljäs luku käsittelee kaapeleiden maa-  
doituksia, viides kaapeliasennuksia ja kuudes luku kaapelipäätteitä ja jatkok-  
sia. Kaapeleille tehtäviä mittauksia ja tarvittavia mittalaitteita kuvataan luvussa  
seitsemän. Luvussa kahdeksan esitellään kaapeloinnissa tarvittavia suunnitel-  
mia, pöytäkirjoja ja dokumentteja. Luku yhdeksän käsittelee kaapeliasennuk-  
sia ja siinä ilmenneitä ongelmia Kauppilan sähköaseman uudistusprojektilla.  
Kymmenes luku on yhteenveto opinnäytetyöstä.

## **2 TYÖN TAUSTA JA TUTKIMUSTEHTÄVÄ**

Tässä luvussa esitellään opinnäytetyön toimeksiantaja Destia Oy, työn koh-  
teenä olevan sähköaseman tilaaja Fingrid Oyj sekä työn tapausesimerkinä  
toimiva Kauppilan sähköasema. Lisäksi luvussa kuvataan työlle annetun toi-  
meksiannon tavoitteita, avataan työn lähtökohtia ja tutkimustehtävää sekä ku-  
vataan opinnäytetyön rajaus ja rakenne.

### **2.1 Toimeksiantajan ja rakennuskohteen esittely**

Opinnäytetyön toimeksiantajana toimii Destia Oy. Destia on infra- ja rakennus-  
alan palveluyhtiö, joka rakentaa, ylläpitää ja suunnittelee liikenneväylien sekä  
liikenne-, energia- ja teollisuusympäristöjen lisäksi kokonaisiasu- ja elinympäristöjä.  
Palvelut ulottuvat kattavasta maanpäällisestä toiminnasta myös maanalaiseen  
rakentamiseen. Destian omistaa ranskalainen Colas Group. (Destia Oy 2023.)

Tässä työssä käytetään tapausesimerkinä Kauppilan kaasueristeisen kytkin-  
laitoksen uusimisprojektia. Hankkeen urakoitsijana toimii Destia Oy ja tilaajana  
on Fingrid Oyj. Fingrid Oyj on kantaverkkoyhtiö, jonka omistajia ovat Suomen  
valtio sekä suomalaiset eläkeyhtiöt. Fingridin lakisääteisenä tehtävänä on vas-  
tata sähkön tuoton ja kulutuksen tasapainosta sekä turvata suomalaisen yh-  
teiskunnan sähkönsaanti kaikissa tilanteissa (Valtiovarainministeriö 2023).

Etelä-Savossa sijaitseva Kauppilan 110 kV:n AIS-kytkinlaitos uudistetaan 110  
kV:n GIS-kytkinlaitokseksi. Urakka sisältää muun muassa:

- uusinnan vaatimat rakennustyöt (pl. kytkinlaitosrakennus ja talotekniset järjestelmät)
- 110 kV:n laitteet ja portaalit

- 110 kV:n kaapeloinnit päätteineen
- maadoitusverkon laajennuksen
- suojaus-, ohjaus- ja valvontajärjestelmät
- apusähköjärjestelmät
- vanhan 110 kV:n laitteiston purkutyöt

Uusi sähköasema rakennetaan vanhan sähköaseman viereen. Urakassa uusia Kauppilan vanha sähköasema kokonaisuudessaan kuusikenttäiseksi kaksikiskorakenteiseksi GIS-kytkinlaitokseksi. Vanha avokytkinlaitos puretaan kokonaisuudessaan ja voimajohtoihin liitytään maakaapeleilla. (Fingrid Oyj 2021a.)

## 2.2 Työn lähtökohdat ja tutkimusongelma

Sähköasemien suunnitteluun ja toteutukseen liittyy useita tekijöitä, kuten energiantarve, sijainti, ympäristöolosuhteet, turvallisuusvaatimukset ja kustannukset. Perinteisenä toteutustapana ovat olleet ilmaeristeiset avokytkinlaitokset, joissa ilma toimii eristeenä komponenttien välillä ja voimajohdot ovat olleet avojohtona. Tämä on edellyttänyt kuitenkin runsaasti avointa tilaa, sillä avokytkinlaitokset koostuvat suurista rakenteista, jotka suojaavat komponentteja ympäristön vaikutuksilta. Vanhoja avokytkinlaitoksia onkin saneerattu 2000-luvulla yhä etenevässä määrin korvaamalla ne kaasueristeisillä GIS-sisäkytkinlaitoksilla (*Gas Insulated Switchgear*). GIS-laitokset mahdollistavat merkittävän tilansäästön verrattuna ilmaeristeisiin avokytkinlaitoksiin. Tämä tekee GIS-laitoksista erityisen sopivia kaupunkiympäristöihin, joissa tila on usein rajallinen. Sisäkytkinlaitoksen etuna on myös se, että sisätiloihin rakennettuna komponentit ovat suojassa ympäristön vaikutuksilta. GIS-laitoksia pidetäänkin näiden ominaisuuksien vuoksi ympäristöystävällisempinä ja huoltovapaimpina ratkaisuinakin kuin avokytkinlaitoksia. (Fingrid Oyj s.a., 90–99; ABB 2000, 128–136.)

GIS-laitosten yleistyessä myös sähköasemien sisäinen 110 kV:n maakaapelointi on lisääntynyt. Sähköasemien sisäisestä maakaapeloinnista on kuitenkin saatavilla melko niukasti tietoa ja esimerkiksi opinnäytteitä. Janne Ala-Kokko tutki vuonna 2018 julkaistussa opinnäytetyössään suurjänniteverkkojen maa-



kaapeloinnin kannattavuutta ja selvitti sen käyttöpotentiaalia avojohdon vaihtoehtona suurjänniteverkoissa tutustumalla Suomen sähköverkon rakenteeseen ja toimitusvarmuuteen. Iira Hämäläisen opinnäytetyö vuodelta 2013 käsitteli puolestaan 110 kV:n kaapeleiden asennusratkaisuja katurakenteessa ja Mika Suomen insinööri työ vuodelta 2010 tutki suurjännitekaapelin kosketussuojan poikkipinta-alan vaikutusta kaapelin kuormitettavuuteen. Tuoreimpina töinä ovat vuodelta 2023 Juhani Mäkisen kandidaattityö, joka tarkasteli 110 kV:n maakaapelointia osana maadoitusjärjestelmää sekä Jere Nevalaisen opinnäytetyö, jossa hän kokosi lyhyen tietopakettin sähkönjakeluverkon maakaapelointiin liittyvistä työvaiheista. Aihetta on siis jonkin verran käsitelty erilaisista näkökulmista, mutta koottua tietoa sähköasemien sisäisestä kaapeloinnista ei juuri löydy. Tämän työn tarkoituksena on koota ja kartoittaa tietoa sähköasemaprojektien 110 kV:n maakaapeloinneista. Työssä kuvataan sähköaseman sisäisiä maakaapelointeja teoreettisella tasolla ja tapausesimerkkinä käytetään edellisessä luvussa kuvattua Kauppilan projektia.

Työtä voidaan luonnehtia teoreettiseksi tutkimukseksi, jossa ei havainnoida tutkimuskohteita välittömästi, vaan kohteesta pyritään hahmottamaan selityksiä ja rakenteita aiemman tutkimuskirjallisuuden sekä tapausesimerkkinä toimivan sähköasemaprojektin uusimiseen liittyvien dokumenttien ja mittausten pohjalta. Ydintehtävänä ja tutkimusongelmana on vastata kysymykseen: *Mitä asioita pitää huomioida, kun lähdetään toteuttamaan sähköaseman sisäisiä maakaapelointeja?*

### **2.3 Työn rajaus ja rakenne**

Työn näkökulma ja aihe on rajattu käsittelemään sähköaseman sisäisiä kaapelointeja. Aseman sisäisillä kaapeloinneilla tarkoitetaan voimajohdoilta tulevia 110 kV:n yhteyksiä, jotka liitetään kaasueristeiseen kytkinlaitokseen maakaapelilla. Maakaapelit ja voimajohdot liitetään toisiinsa käyttäen kaapelipäätteitä.

Työn teoreettinen osuus, eli luvut 3–8, pureutuvat sisäkytkinlaitosten kannalta keskeisten asioiden, kuten kaapelityyppien, maadoitusten, kaapeliasennusten ja -päätteiden sekä sähköasemaprojektiin liittyvien mittausten ja dokumenttien tarkasteluun. Teoreettisen tarkastelun tarkoituksena on tarjota lukijalle riittävä

perusymmärrys työssä käsiteltävistä aiheista. Lähteinä on käytetty alan kirjallisuutta ja julkaisuja, standardeja, aiempia tutkimuksia sekä urakoitsijoiden käytössä olevaa, työtä ohjaavaa materiaalia. Tämän lisäksi työssä kuvataan kaapelointiprosessin rakentamisvaihetta konkreettisella tasolla esittelemällä luvussa 9 Kauppilan sähköaseman uudistusprojektissa tehtyjä kaapeliasennuksia ja mittauksia sekä niiden yhteydessä havaittuja ongelmia. Kauppilan sähköaseman kontekstiin sekä tutkimuksen teoriaan peilaten työn viimeinen luku koostaa tutkimuksen keskeiset havainnot.

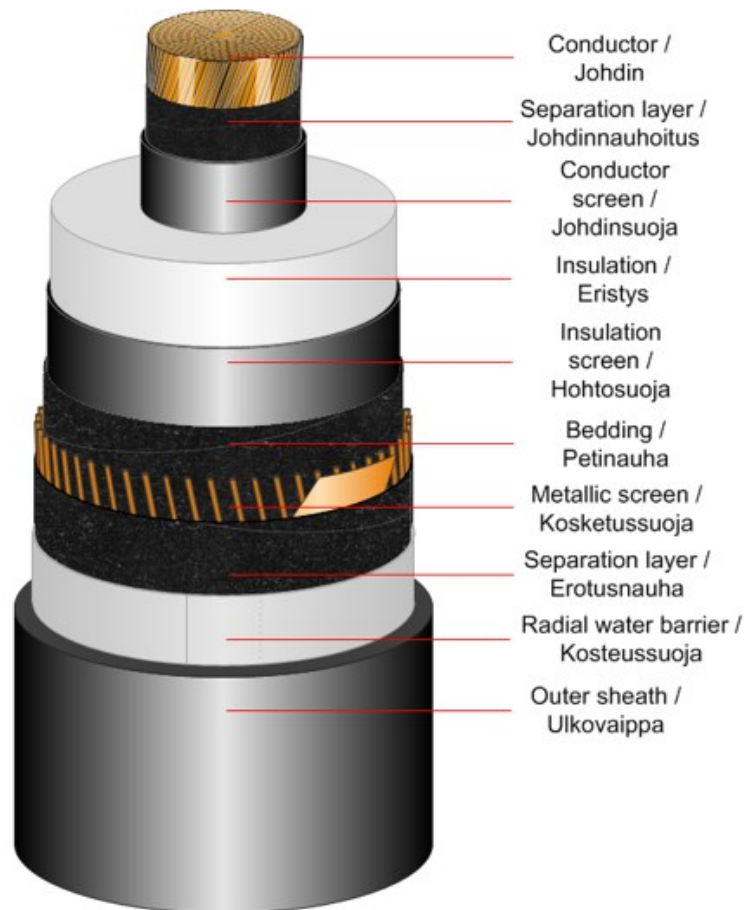
### **3 KAAPELITYYPIT JA KUORMITETTAVUUS**

Mekaanista vahingoittumista, kosteutta sekä korroosiota kestävä tehdasvalmistainen kaapeli koostuu vaipasta ja vaipan sisällä olevasta yhdestä tai useammasta sähköä johtavasta johtimesta. Vaihtosähköasennuksiin käytettävien kaapelien nimellisjännite ilmoitetaan muodossa  $U_0/U$ , missä  $U_0$  on johtimien nimellisjännite suhteessa maahan ja  $U$  johtimien välinen jännite. (Elovaara & Haarla 2011, 303.)

Kaapelityypin ja sen johtimen poikkipinta-alan valintaan vaikuttaa useita tekijöitä. Tärkeimmät tekijät ovat kaapelin taloudellisuus ja kuormitettavuus. Sen lisäksi on huomioitava asennuspaikan mekaaniset vaatimukset ja korroosionkestoisuus. Sähkökojeita ja -johtoja valittaessa on otettava huomioon myös niiden oikosulukestoisuus, jännitteenalenemat sekä mahdolliset kasvuennusteet kulutuksessa ja oikosulkuvirroissa. (Elovaara & Haarla 2011, 316.)

#### **3.1 Voimakaapelin rakenne**

Kuvassa 1 esitetään poikkileikkaus voimakaapelista. Voimakaapeli koostuu johtimesta tai johtimista, johdinsuojasta, johdineristyksestä, hohtosuojasta, kosketussuojasta ja ulkoisista suojakerroksista, kuten vaipasta, armeerauksesta ja korroosiosuojasta.



Kuva 1. Voimakaapelin rakenne (Suomi 2018)

Johdin-, hohto- ja kosketussuojia käytetään vain keski- ja suurjännitekaapeleissa. Pienjännitteillä käytetään tyypillisesti pieniä poikkipinta-aloja, koska suuria jännitteitä ja pientä johdinpinta-alaa käytettäessä sähkökentän voimakkuus kohoaa eristykselle liian suuriin arvoihin.

### 3.1.1 Johdin

Kaapelien johdinmateriaalina käytetään enimmäkseen kuparia tai alumiinia. Erikoistapauksissa, kuten esimerkiksi vetolujuuden lisäämiseksi, voidaan käyttää muita metalleja ja seoksia. Suurjännitekaapeleiden yleisin johdinmateriaali on alumiini ja sitä käytetään erityisesti johdinpoikkipinta-alan kasvaessa. Alumiini on muihin materiaaleihin verrattuna edullisempi ja kevyempi, mutta sillä on kuparia suurempi resistiivisyys. Resisttiivisyydestä johtuen alumiinista valmistettujen kaapelien poikkipinta-ala on noin kaksinkertainen verrattuna virranjohtokyvyltään vastaavaan kuparikaapeliin. Mitä suurempaa taipuisuutta ja liikuteltavuutta kaapeli vaatii, sitä useammasta ja ohuemmasta langasta johti-

met koostuvat. Johtimen pintakentänvoimakkuuden minimoimiseksi ja eristyk-  
selle vaarallisten osittaispurkausten eliminoimiseksi suurjännitekaapelien johti-  
met tehdään usein pyörölangasta pyöreään muotoon. (Elovaara & Haarla  
2011, 307–308.)

### 3.1.2 Johdinsuoja

Johtimien pinnalla sijaitseva johdinsuoja (*conductor screen*) valmistetaan puo-  
lijohtavasta materiaalista. Sen tarkoituksena on poistaa epätasaisuudet johti-  
mien pinnalta ja siten pienentää johdinlangoista aiheutuvia kentänvoimak-  
kuushuippuja. Johdinsuoja lisäksi lieventää johtimesta eristykseen kohdistuvia  
lämpörasituksia esimerkiksi oiko- ja maasuluissa. Johdinsuojan moitteettoman  
toiminnan kannalta sen tulee olla hyvin kiinni eristeessä. Johdinsuojan on seu-  
rattava eristettä lämpö- sekä mekaanisissa rasituksissa. Kaapelin eristysai-  
neen osittaispurkauskestoisuus ja lämpölaajenemisen määrä johdinmateriaa-  
liin verrattuna määrittelee sen, mistä käyttöjännitteestä lähtien johdinsuojaa  
tarvitaan. Muovieristeisillä suurjännitekaapeleilla johdinsuoja on välttämätön,  
koska muovit eivät kestä osittaispurkauksia, eivätkä ne pysty korjaamaan itse-  
ään samalla tavalla kuin öljy- tai massakyllästeiset paperieristeet. Muovikaa-  
peleihin jää valmistuksessa luonnostaan kaasunteloita, joissa osittaispur-  
kauksia syntyy helposti. (Elovaara & Haarla 2011, 308.)

### 3.1.3 Johdineristys

Johtimien tai johdinsuojan päältä mahdolliseen hohtosuojaan saakka ulottu-  
vaa eristystä kutsutaan johdineristykseksi. Johdineristyksen on annettava kaa-  
pelille riittävä jännitekestoisuus ja siirrettävä sekä itsessään että johtimessa  
syntyvä häviölämpö riittävän tehokkaasti pois kaapelista. Johdineristys on  
määräävässä asemassa kaapelin kuormitettavuuden kannalta, sillä liiallinen  
lämpö vanhentaa eristystä ja ääritapauksissa se aiheuttaa läpilyönnin. Voi-  
daan todeta, että 6–10 K:n lämpötilan nousu yli sallittujen rajojen lyhentää  
eristyksen eliniän puoleen. Yliämpö saattaa myös pehmentää eristystä niin,  
että se siirtyy pois paikoiltaan esimerkiksi kaapelin taivutuskohdissa ja aiheut-  
taa oikosulun. Eristyksen elinikää, ts. pitkäaikaista jännitekestoisuutta, lisäävät  
olennaisesti sen homogeenisuus, kuplattomuus ja puhtaus. (Elovaara &  
Haarla 2011, 309.)

### 3.1.4 Hohtosuoja

Hohtosuoja (*core* tai *insulation screen*) rajaa johtimen aiheuttaman sähkökentän kahden sylinteripinnan väliin (Elovaara & Haarla 2011, 310). Homogeenisessä eristeessä esiintyvä kentänvoimakkuus voidaan laskea lausekkeesta 1.

$$E(r) = \frac{U}{r \cdot \ln \frac{r_u}{r_s}} \quad (1)$$

jossa	$r$	keskiviivalta laskettu etäisyys	[mm]
	$r_u$	ulkoelektrodin (vaipan tai hohtosuojan säde)	[mm]
	$r_s$	sisäelektrodin (johtimen tai johdinsuojan säde)	[mm]

Yhtälön mukaan vaihtosähkökaapelin kentänvoimakkuus on korkeimmillaan johdinten pinnalla. Tämän lisäksi kaapelin nimellisjännitteen kasvaessa pienin sallittu poikkipinta-ala, jolla kentänvoimakkuus pysyy hyväksyttävissä rajoissa, kasvaa. Myös eristeen rasitus kasvaa, mikä lisää osittaispurkausten riskiä. Sen seurauksena eristysvahvuutta on kasvatettava, mikä hankaloittaa kaapelin jäähdytysolosuhteita. (Elovaara & Haarla 2011, 310.)

Johtavista metallinauhoista tai puolijohtavasta materiaalista valmistettavan hohtosuojan tulee johdinsuojan tavoin pysyä hyvin kiinni johdineristyksessä. Tämän lisäksi kaapelin helppo asennettavuus edellyttää siltä muun muassa hyvää kuorittavuutta. Kaapeleita asennettaessa on muistettava, että tiettyjen hohtosuojamateriaalien johtavuus pienenee vieraiden aineiden, kuten öljyjen, liuottimien tai rasvojen vaikutuksesta. (Elovaara & Haarla 2011, 310.)

### 3.1.5 Kosketussuoja

Kosketussuoja (*shield* tai *sheath*) toimii häiriösuojana, turvallisuuslaitteena sekä varaus- ja vikavirtojen kulkutienä. Se on valmistettu aina metallista. Kosketussuojan rakenteisiin vaikuttavat kaapelityyppi ja käyttötarkoitus: ne voivat olla vaihekohtaisia tai yhteisiä kaikille vaihejohtimille. Suojan raaka-aineena voidaan käyttää alumiinia, kuparia, lyijyä tai jopa terästä. (Elovaara & Haarla 2011, 310–311.)

Vaipasta (*sheath*) puhuttaessa viitataan vettä läpäisemättömään, metallista valmistettuun sylinterimäiseen komponenttiin kaapelissa, joka tulee eristeen päälle. Vaippa voidaan valmistaa esimerkiksi lyijystä, aallotetusta kuparista tai alumiinista. Sähköisellä suojalla (*shield*) viitataan kaapelin sähköä johtavaan komponenttiin, joka on maadoitettava dielektrisen kentän rajoittamiseksi kaapelin sisäpuolelle. Suojat koostuvat yleensä metalliosasta ja johtavasta (tai puolijohtavasta) puristetusta kerroksesta. Metalliosa voi olla joko teippiä, metallilankoja tai putkea. (Thue 2003, 193.)

### 3.2 Kaapeleiden kuormitettavuus

Kaapelin kuormitettavuudella tarkoitetaan suurinta mahdollista virran tai tehon määrää, joka kaapelilla voidaan siirtää vallitsevissa käyttöolosuhteissa ilman välitöntä tai asteittaista kaapelin vaurioitumista. Jännitteiset tai kuormitusvirtaa kuljettavat kaapelit tuottavat lämpöä. Tämä lämpö johtaa myös lämmönnousuun itse kaapelissa, minkä pitää pysyä sallituissa rajoissa kaapelivaurion estämiseksi, koska kaapelin komponentit kestävät eri tavoin lämpöä. (Anders 2005, 2.)

Tärkeimmät tehtävät kaapeleiden kuormitettavuuslaskennassa ovat johtimien lämpötilan määrittäminen annetulle virralle, tai käänteisesti sallitun kuormitusvirran määrittäminen annetuille johdinlämpötiloille. Jotta kaapelia voidaan kuormittaa tietyllä virralla, täytyy johtimessa syntyvä lämpö ja sen haihtumisnopeus johdinta ympäröivästä materiaalista selvittää laskennallisilla menetelmillä. (Anders 2005, 2.)

Johtimen virtahäviöt, eristyksen dielektriset häviöt sekä virrat vaipassa, koskettussuojassa ja mahdollisessa armeerausessa tuottavat kaapeleissa sisäistä lämpöä. Kaapeleiden ulkoisiin lämmönlähteisiin kuuluvat vierekkäisistä johtimista indusoituvat virrat sekä lähellä olevista sähköjohdoista tai lämpöputkista säteilevä lämpö. Johtimesta poistuvan lämpövirran ollessa yhtä suuri kuin johtimessa tehohäviön takia syntyvä lämpöteho, sen lämpötilan nousu lakkaa. Kaapelinvalmistajilta saatavat kuormitustaulukot ilmoittavat ohjeellisesti kuinka suurella virralla kaapelia voidaan yhtäjaksoisesti kuormittaa niin, ettei se läm-

pene liikaa. (Elovaara & Haarla 2011, 316; Thue 2003, 177.) Kaapelin todellinen kuormitettavuus pitää laskea asennustavan, etäisyyksien ja maaperän perusteella.

Johtimen pinta-alan kasvaessa kaapelin virranjohtokyky eli kuormitettavuus kasvaa, mutta tällöin myös kaapelin jäähtymisominaisuuksia on parannettava. Jos kaapeli on luonnollisesti jäähdytetty, sen kuormituksen kaksinkertaistaminen edellyttää johdinpoikkipinta-alan nelinkertaistamista. (Elovaara & Haarla 2011, 307.)

### 3.3 Lämmön siirtyminen kaapelista ympäristöön

Kaapelissa syntyvän lämmön tulee virrata ulospäin lämpöresistiivisyydeltään erilaisten materiaalien läpi. Näihin materiaaleihin kuuluvat kaapelin eristys, vaipat, ilma, suojaputket, betoni, ympäröivä maaperä sekä lopuksi ympäröivä maa. Lämpö pyrkii poistamaan kosteutta maaperästä, mikä lisää sen resistanssia entisestään verrattuna maaperän luonnonmukaiseen kosteuteen. Maaperän kuivumisnopeuteen vaikuttavia tekijöitä on maaperän tyyppi, rae-koko ja -jakauma, maaperän tiiveys, kaapeleiden hautausvyvyys, lämpövirtauksen kesto, kaapeliojaa ympäröivän maan kosteuden lähteet sekä vapautuvan lämpötehon (W) määrä. Maaperän resistiivisyyden mittaaminen ennen kaapelin kuormittamista voi johtaa optimistisesti alhaisempaan resistanssiarvoon, kuin mitä tilanne on kaapeleiden kuormituksen ja lopullisen käytön aikana. (Thue 2003, 177–178.)

Kaapelin eristeessä syntyy tehohäviöitä eli dielektrisiä häviöitä. Tehohäviötä syntyy dielektrisen jälkivaikutuksen ja molekyylikitkan vuoksi. Häviöitä syntyy myös siksi, etteivät eristeet ole koskaan ideaalisia, vaan niissä on aina jonkin verran johtavuutta. (Aro ym. 2015, 54.)

Mikäli kaapelissa syntyvät dielektriset häviöt jätetään huomiotta, maahan upotetun kaapelin lämmön siirtyminen kaapelista ympäristöön noudattaa differentiaaliyhtälöä 2.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{\rho} \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{1}{\rho} \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) + nRI^2 = c \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (2)$$

jossa	$\rho$	lämpöresistiivisyys	[K·m/W]
	$\theta$	lämpötilaero eli lämpenemä	[Δ°C]
	$R$	johtimen vastus	[Ω]
	$I$	johtimen virta	[A]
	$n$	johtimen määrä kaapelissa	[-]
	$c$	lämpökapasiteetti	[J/K]

Lämpötilajakauman ja yllä mainitun yhtälön analyttisen ratkaisun määrittäminen on vaikeaa, sillä kaapeli sijaitsee useimmiten maan ja ilman rajapinnalla. Kaapelia ympäröivän maan lämmönjohtavuudelle asetetaan usein erikoisvaatimuksia maan sekakoosteisuuden eli heterogeenisyyden vuoksi. (Elovaara & Haarla 2011, 318.)

Virran stationaarisessa tilassa eristeen lämpötilajakauma on logaritminen, ja lämmön virtausta kuvaava yhtälö analoginen Ohmin lain kanssa. Näin ollen staattisessa tilassa lämmönjohtumispiiri voidaan kuvata kuten virran kulku resistanssiverkossa.

Lämmönjohtumista tarkastellessa korvataan

- potentiaaliero sähköverkossa ( $\Delta V$ , [ $\Delta V$ ] = V) johtimen ja ympäristön välisellä lämpötilaerolla ( $\Delta\theta$ , [ $\Delta\theta$ ] = K)
- sähkövirta ( $I$ , [ $I$ ] = A) lämpövirralla ( $\Phi$ , [ $\Phi$ ] = W)
- resistanssi ( $R$ , [ $R$ ] = Ω) lämpöresistanssilla ( $T$ , [ $T$ ] = K/W)
- ominaisvastus eli resistiivisyys ( $\rho$ , [ $\rho$ ] = Ωm) ominaislämpövastuksella ( $\rho$ , [ $\rho$ ] = Km/W)
- virrantiheys ( $J$ , [ $J$ ] = A/m<sup>2</sup>) korvataan lämpövirrantiheydellä ( $S$ , [ $S$ ] = W/m<sup>2</sup>).

Ohmin lakia voidaan kuvata tällöin lämpövirran  $\Phi$  yhtälönä 3.

$$\Delta\theta_{tot} = \Phi \cdot \sum T = (nRI^2 + nP_{hd} + P_{hs} + P_{ha}) \cdot \sum T \quad (3)$$



jossa	$P_{hd}$	vaihejohtimen eristyksessä tapahtuvien dielektristen häviöiden suuruus	[-]
	$P_{hs}$	kaapelin vaipassa tapahtuvien virtalämpöhäviöiden suuruus	[-]
	$P_{ha}$	kaapelin ameerauksessa tapahtuvien virtalämpöhäviöiden suuruus	[-]

Olettaessa vaipan ja armeerauksen häviöt sekä dielektriset häviöt merkitysettömän pieniksi, yllä oleva yhtälö yksinkertaistuu ja myös tarvittavien lämpövastusten määrä pienenee niin, että tarvitaan vain kaapelin sisäinen lämpöresistanssi  $T_{in}$  ja ulkoinen lämpöresistanssi  $T_{ext}$  kaapelin pinnalta laskettuna. Myös metalliosien lämpövastukset jätetään huomiotta, jolloin

$$\Sigma T = T_{in} + T_{ext} \quad (4)$$

missä

$$T_{in} = \frac{\rho_{ins}}{2\pi} \ln \frac{r_{ins}}{r_j} + \frac{\rho_s}{2\pi} \ln \frac{r_{ulk}}{r_{vp}} \quad (5)$$

ja

$$T_{ext} = \frac{\rho_e}{2\pi} \ln \left( \frac{h}{r_{ulk}} + \sqrt{\left( \frac{h}{r_{ulk}} \right)^2 - 1} \right) \approx \frac{\rho_e}{2\pi} \ln \frac{2h}{r_{ulk}} \quad (6)$$

jossa	$\rho_{ins}$	eristeen ominaislämpövastus	[mK/W]
	$\rho_s$	vaipan ominaislämpövastus	[mK/W]
	$\rho_e$	maan ominaislämpövastus	[mK/W]
	$r_j$	vaihejohtimen säde (ml. hohtosuoja)	[mm]
	$r_{ins}$	eristekerroksen ulkopintaan mitattu säde	[mm]
	$r_{vp}$	metallivaipan ulkopintaan mitattu säde	[mm]
	$r_{ulk}$	kaapelin ulkosäde	[mm]
	$h$	kaapelin upotussyvyys maahan	[mm]

Sallitun kuormitusvirran suuruuden yhtälö yksinkertaistuu edellä mainittujen yhtälöiden perusteella muotoon

$$I = \sqrt{\frac{\Delta\theta}{R(T_{in} + T_{ext})}} \quad (7)$$

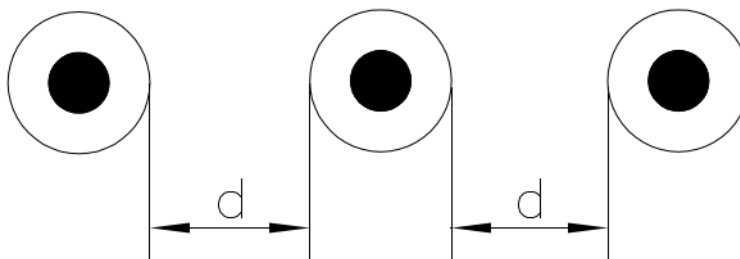
Suureiden ratkaiseminen muuttuu huomattavasti monimutkaisemmiksi, mikäli huomioidaan virran suuruuden muuttuminen ajan mukana. (Elovaara & Haarla 2011, 317–319.)

### 3.4 Kaapeleiden taso- tai kolmioasennus

Asennettaessa yksivaihekaapeleita rinnakkain on virranjako eri kaapeleiden kesken pidettävä mahdollisimman symmetrisenä. Kaapelit on sijoitettava toisiinsa nähden mahdollisimman tarkoituksenmukaisesti tasoon tai kolmioon. (Elovaara & Haarla 2011, 321–322.)

#### 3.4.1 Asentaminen tasoon

Kuormitettavuuserot tasoon (kuva 2) ja kolmioon (kuva 3) asennetuilla kaapeleilla kasvavat kaapelin poikkipinta-alan suurentuessa. Tämä johtuu johdinhäviöiden sekä kosketussuojan tehohäviöiden suhteiden muuttumisesta. Kaapeleiden välinen lämpövaikutus korostuu poikkipinnaltaan pienillä kaapeleilla, joten kuormitettavuuden kannalta tasoasennus on parempi vaihtoehto kolmioasennukseen verrattuna vain poikkipinnaltaan pienillä alumiinijohtimilla. (Ala-Kokko 2018, 27.)

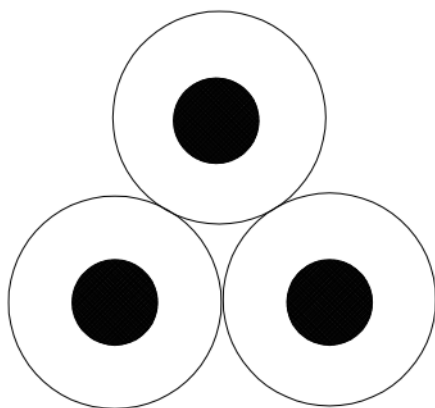


Kuva 2. Kaapeleiden asennus tasoon (mukaillen ABB 2010, 7)

Tasoon asennettuna maakaapelilla on huonompi kuormitettavuus ja se tuottaa ympärilleen suuremman magneettikentän verrattuna vastaavaan kolmioasennukseen. Näiden ominaisuuksien vuoksi tasoasennusta käytetään vain sellaisissa paikoissa, jossa kolmioasennusta ei voida käyttää. Kaapelikaivantoon tasoon asennettujen kaapeleiden magneettikenttä ei tuota ongelmia. Suurilla kuormitusvirroilla anturamuottiasennuksissa se saattaa kuitenkin aiheuttaa ongelmia yhdessä anturan raudoitusten kanssa, sillä mitä suurempi kuormitusvirta kaapelissa kulkee, sitä suuremman virran se indusoi anturamuotin raudoituksiin. Raudoituksissa syntyvien tehohäviöiden lämpövaikutus saattaa siten vaikuttaa kaapeleiden kuormitettavuuteen. Tasoasennuksessa kaapeleiden väliin jätettävä tyhjä tila voi parantaa sen jäähtymisominaisuuksia ja näin parantaa kuormitettavuutta. Etäisyydellä on tasoasennuksessa suurempi merkitys kuormitettavuuteen kuin kolmioasennuksessa. Kuvassa 2 havainnollistetaan suositusta asettaa kaapelit tasoon siten, että kaapeleiden välinen vähimmäisetäisyys on johtimen halkaisija  $d$ . (Ala-Kokko 2018, 27; Hämäläinen 2013, 18.)

### 3.4.2 Asentaminen kolmioon

Kuvassa 3 havainnollistetaan kaapeleiden asentamista kolmiomuodostelman. Kolmioon asennettuna kaapeleiden vaihevirtojen magneettikentät kumoavat toisiaan, joten vaipassa kiertävät virrat pienenevät ja kaapeleiden kuormitettavuus kasvaa verrattuna tasoasennukseen. Kosketussuojien kytkentätavan on tällöin oltava suljettu, eli niiden on oltava maadoitettu kaapelin molemmista päistä. (Hämäläinen 2013, 17.) Vaippojen maadoitustavoista kerrotaan lisää luvussa 4.



Kuva 3. Kaapeleiden asennus kolmiomuodostelmaan (mukaillen ABB 2010, 7)

Kaapeleiden välistä etäisyyttä kasvattamalla magneettikentän vaikutusalue suurenee, mutta sen huippuarvo pysyy ennallaan. Kuormitettavuutta voidaan parantaa etäisyyden kasvattamisella kosketussuojapiirin ollessa avoin tai vuoroteltu. Rajatun asennustilan takia on kuitenkin edullisinta asentaa kaapelit kiinni toisiinsa. (Hämäläinen 2013, 17.)

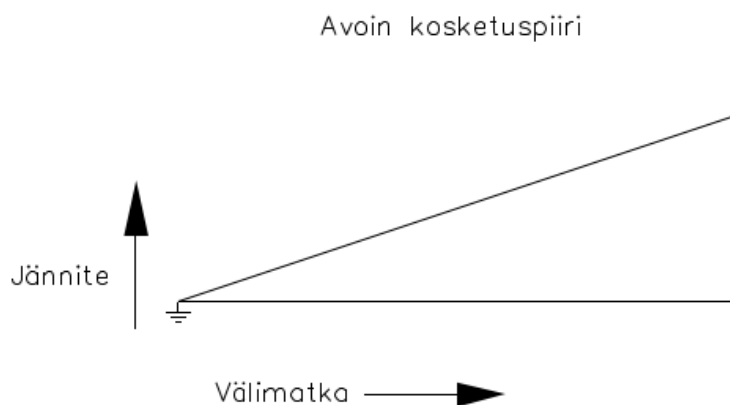
#### 4 KAAPELEIDEN MAADOITUS

Vaipan maadoittaminen (*bonding*) on oleellisesti kaapelin ominaisuuksiin vaikuttava tekijä. Yhdestä pisteestä maadoittaessa vaippaan indusoituu suurilla virroilla, kuten oikosulkutilanteissa, suuri jännite. Jännite kasvaa vaarallisen suureksi asemilla, joissa vaippa on maadoittamatta. Jännitteen rajoittamiseksi vaippa tulee maadoittaa sen molemmista päistä tai vaihtoehtoisesti jakamalla vaippa toisistaan erotettuihin ja riittävän lyhyisiin (yleensä alle 500 metrin mittaisiin) osiin. Kaapelin kuormitettavuutta pienentää molemmista päistään maadoitettuun vaippaan indusoituva virta. Indusoituvan virran syntyminen voidaan estää vaippavuorottelulla (*cross bonding*). Vaippavuorottelukohtiin tarvitaan kuitenkin kaapeliyhteyden hintaa lisäävät erityiset vuorottelukaapit (*joint boxes*). (Elovaara & Haarla 2011, 321–322.)

Magneettikenttä, joka syntyy virran kulkiessa johtimessa, yhdistää metallisen vaipan ja muut vierekkäiset johtimet sähköisesti toisiinsa. Jos vaippa on osa jatkuvaa suljettua virtapiiriä, muuntajailmiö indusoi virran yhdistettyyn vaippaan ja vierekkäisiin johtimiin. Kiertävistä virroista johtuvat resistiiviset häviöt vaipassa johtavat lämpötilan nousuun kaapelissa, mikä vähentää kaapelin kuormitettavuutta ja sen tehokkuutta. Käänteisesti, jos virran kulkua rajoitetaan vaipan maadoittamisella, niitä voidaan vähentää tai ne pystytään eliminoimaan kokonaan. Näin saadaan parannettua kaapelin kuormitettavuutta, mutta tämä johtaa epäedulliseen jännitteen nousuun vaipassa. Tämän seurauksena on kehitetty erityisiä vaipan maadoitustapoja, jotka vähentävät vaippajännitteiden ja vaipassa kiertävien virtojen voimakkuutta. (IEEE Power and Energy Society 2014, 5–6.)

#### 4.1 Avoin kosketuspiiri

Avoimessa kosketuspiirikytkennässä (*single-point bonding*) kaapeliyhteyden kaikkien vaihejohtimien kosketussuojat on kytketty yhteen ja maadoitettu yhdestä yhteisestä kohdasta koko kaapelireitillä (Thue 2003, 194).

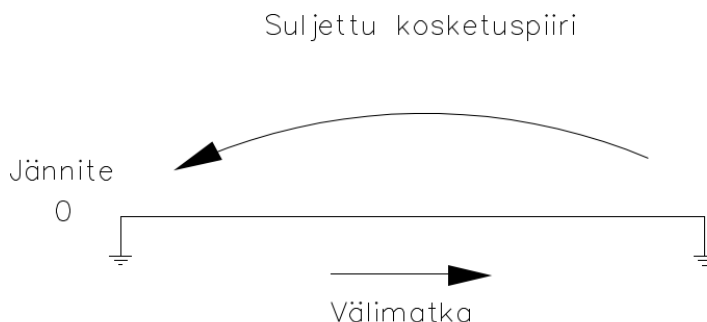


Kuva 4. Avoimen kosketuspiirin periaatekuva (mukailten Thue 2003, 194)

Kaapelin ollessa kuormitettuna vaippaan indusoituu jännite, joka kasvaa lineaarisesti välimatkan kasvaessa maadoituspisteestä (kuva 4). Avoin kosketussuojapiirikytkentä ei sovellu pitkille kaapeliyhteyksille, koska kosketussuojaan indusoitunut jännite voi kasvaa niin suureksi, että se aiheuttaa läpilyönnin kaapelin ulkovaipassa. Avoin kosketussuojapiirikytkentä soveltuu pääasiallisesti alle 600 metrin kaapeliyhteyksille, jolloin jännite ei kasva oikosulun aikana tarpeettoman suureksi. (IEEE Power and Energy Society 2014, 10; Suomi 2010, 10.)

#### 4.2 Suljettu kosketuspiiri

Suljetussa kosketuspiirikytkennässä (*both-end bonding, solid bonding*) kosketussuojat on maadoitettu kahdesta tai useammasta eri kohdasta niin, että ne muodostavat suljetun virtapiirin (Thue 2003, 195). Tätä on havainnollistettu kuvassa 5.



Kuva 5. Suljetun kosketuspiirin periaatekuva (mukaillen Thue 2003, 195)

Suljetussa piirissä magneettivuo indusoi kiertävän virran kosketussuojiiin. Virran suuruus vaipassa on käänteisesti verrannollinen vaipan resistanssiin: virta on sitä suurempi, mitä enemmän vaipassa on metallia. Vaippa ei kuitenkaan ole tällöin jännitteinen. Vaipassa kiertävät virrat aiheuttavat tehohäviöitä, jotka lämmittävät kaapelia ja vähentävät sen kuormitettavuutta. Tehohäviöitä voidaan vähentää asentamalla kaapelit kolmiomuodostelmaan. (Thue 2003, 194; Suomi 2010, 9.)

### 4.3 Maadoitus ylijännitesuojalla

Avointa kosketuspiiriä käytettäessä pääteportaalin puoleinen vaippapiiri jätetään auki. Tällöin avoimeen päähän tarvitaan ylijännitesuoja estämään oikosulun aikaisen vaippapiirijännitteen kasvaminen liian suureksi kaapelieristykseen jännitelujuuden kannalta. Ylijännitesuojat voidaan sijoittaa joko suoraan kaapelipääteiden viereen pääteportaalin vaakaorteen, tai erilliseen vaippamaadoituskoteloon. Kaapelivalmistaja määrittelee vaipan maadoitustavan kaapelityypin ja kuormitettavuuden mukaan.

## 5 KAAPELIASENNUKSET

Maakaapeleiden asentamiseen on useita eri tapoja. Asennustapa vaihtelee sen mukaan, millaiseen maastoon kaapeli asennetaan. Sähköasemien sisäinen maakaapelointi toteutetaan useimmiten asentamalla ne kaapelikaivantoon.

Suurjännitekaapeliasennuksia ohjaa standardi SFS 6001:2018. Standardin mukaan:

”Seuraavista asioista tulee huolehtia kaapelin suojaamiseksi mekaanisilta vaurioilta ennen asentamista ja sen jälkeen:

- a) kaapelin vaurioitumisen välttämiseksi kaapelit asennetaan laite- ja kaapelistandardien tai valmistajan määrittämässä ympäristön lämpötilassa
- b) yksijohtimiset voimakaapelit on asennettava siten, että oikosulkuvirtojen synnyttämät voimat eivät niitä vaurioita
- c) asennustapaa valittaessa on varmistettava, että ulkoiset vaikutukset rajoittuvat hyväksyttävälle tasolle. Ojaan asennettavat kaapelit tulee asentaa määritettyyn syvyyteen ja niiden päälle on asennettava kaapelisuojaus tai varoitusnauha ulkopuolisten aiheuttamien vaurioiden estämiseksi. Maa- ja vesistökaapelit on suojattava mekaanisesti siellä, missä ne nousevat esiin vedestä tai maasta
- d) kaapeleiden maa-asennuksissa kaapeliojan pohjalla ei saa olla kiviä. Täytemaana käytetään hiekkaa tai kivetöntä maata. Tarvittaessa on ryhdyttävä toimenpiteisiin kaapelin suojaamiseksi kemiallisilta vaikutuksilta
- e) yliajavat ajoneuvot eivät saa vahingoittaa ojiin sijoitettuja kaapeleita
- f) maaperän liikkeet ja värinä tulee ottaa huomioon
- g) pystysuuntaisissa asennuksissa ko. asennustapaan soveltuva kaapeli on tuettava riittävän tiheästi sopivilla kiinnikkeillä valmistajan antamien ohjeiden mukaisesti
- h) jos yksijohtimiset kaapelit on asennettu betoniteräksiä sisältävän katon tai seinien läpi, betoniterästen mahdollinen lämpeneminen on otettava huomioon. Tarvittaessa pitää määritellä sopivia rakennetarkaisuja, joilla rajoitetaan lämpenemistä.

Metalliputkiin asennettavat kaapelit on ryhmiteltävä siten, että saman piirin kaikki johtimet sijoitetaan samaan putkeen pyörrevirtojen vähentämiseksi. Maadoitusjohtimen sijoitus tulee tarkkaan harkita. Kaapelit on asennettava siten, että kosketusjännitteet pysyvät sallituissa rajoissa, tai ne osat, joiden kosketusjännite ylittää sallitut rajat, on suojattava kosketamiselta sopivin toimenpitein.” (SFS 6001:2018, 44–45.)

Kuten edellä ilmenee, standardi määrittelee tarkasti maakaapeleiden asennuksessa huomioon otettavia seikkoja.

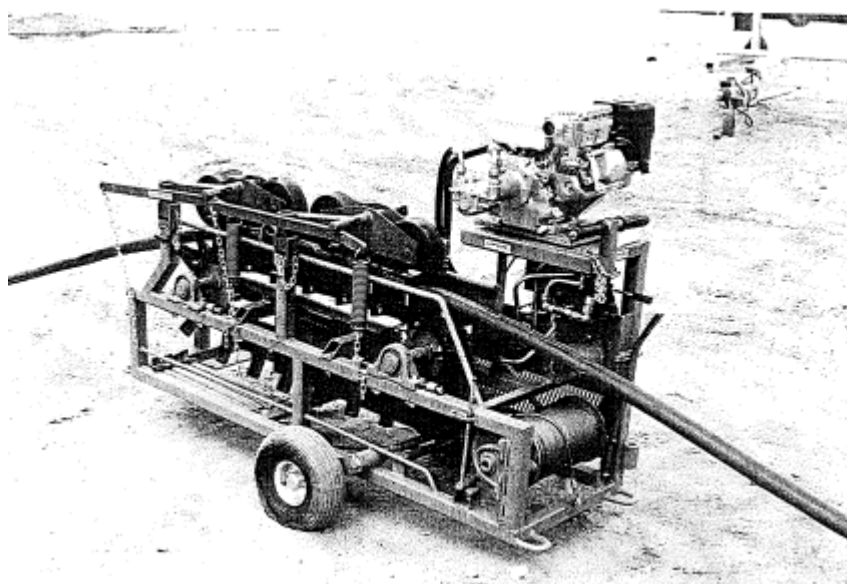
## 5.1 Kaapeleiden käsittely

Maakaapelit toimitetaan kaapelivalmistajalta työmaalle keloissa. Työmaalla käytössä olevan kaluston nostokapasiteetin on oltava oikein mitoitettu, jotta keloja voidaan liikuttaa mahdollisimman vaivattomasti vetovaiheessa. Isojen kelojen käsittelyyn tarvitaan nosturiauto tai kaivinkone sekä kelannostohaarukka, jolla kelaa voidaan siirtää paikasta toiseen.

Vetovaiheessa kaapelien asentamiseen tarvitaan vetokone, kaapelin ohjausrullia sekä kelapukki. Kaapelinvetoon osallistuvaan työryhmään kuuluu kelan päässä oleva jarrumies, kaapelin kulkua ohjaava työpari kaivannolla sekä vetokoneen operaattori. Työryhmällä tulee olla radioyhteys toisiinsa, jotta veto voidaan keskeyttää esimerkiksi vetorullien siirron, kaapelin ohjauksen tai mahdollisten vaaratilanteiden takia.

## 5.2 Vetotavat

Kaapelin purku kelalta toteutetaan useimmiten nostamalla kaapelikela kelapukille ja kiinnittämällä tehdasasenteinen vetopää tai irrotettava vetosukka vetovaijeriin. Vetoon käytetään vinssiä tai erityisesti maakaapeliasennuksiin suunniteltua vetokonetta eli kaapelikoiraa (kuva 6).



Kuva 6. Kaapelikoira (Sumetek Oy 2007, 1)

Kaapelikoira on sähkö- tai polttomoottorikäyttöinen siirrettävä kone, jossa on vaijerivintturi ja vetohihnasto. Hihnastoa käytettäessä kaapeli kiristetään hihnoja vasten mekaanisesti, jolloin ote kaapelista on pitävä. Hihnastolla laitteella voidaan suorittaa kaapelien vetoa ja työntöä avokaivannoissa. Veto- ja työntönopeus sekä vetovoima ovat säädettävissä. Pitkillä kaapelipituuksilla tai mutkaisilla vetoreiteillä voidaan käyttää useampaa kaapelikoiraa ja näin helpottaa kaapelin kulkua. (Sumetek Oy 2007, 4–5.)



Kaapelinvedossa on huomioitava suurin sallittu vetovoima, jonka kaapelinvalmistaja on ilmoittanut. Vetovoiman ylittyessä kaapelin pää saattaa vaurioitua tai kaapeli saattaa venyä käyttökelvottomaksi.

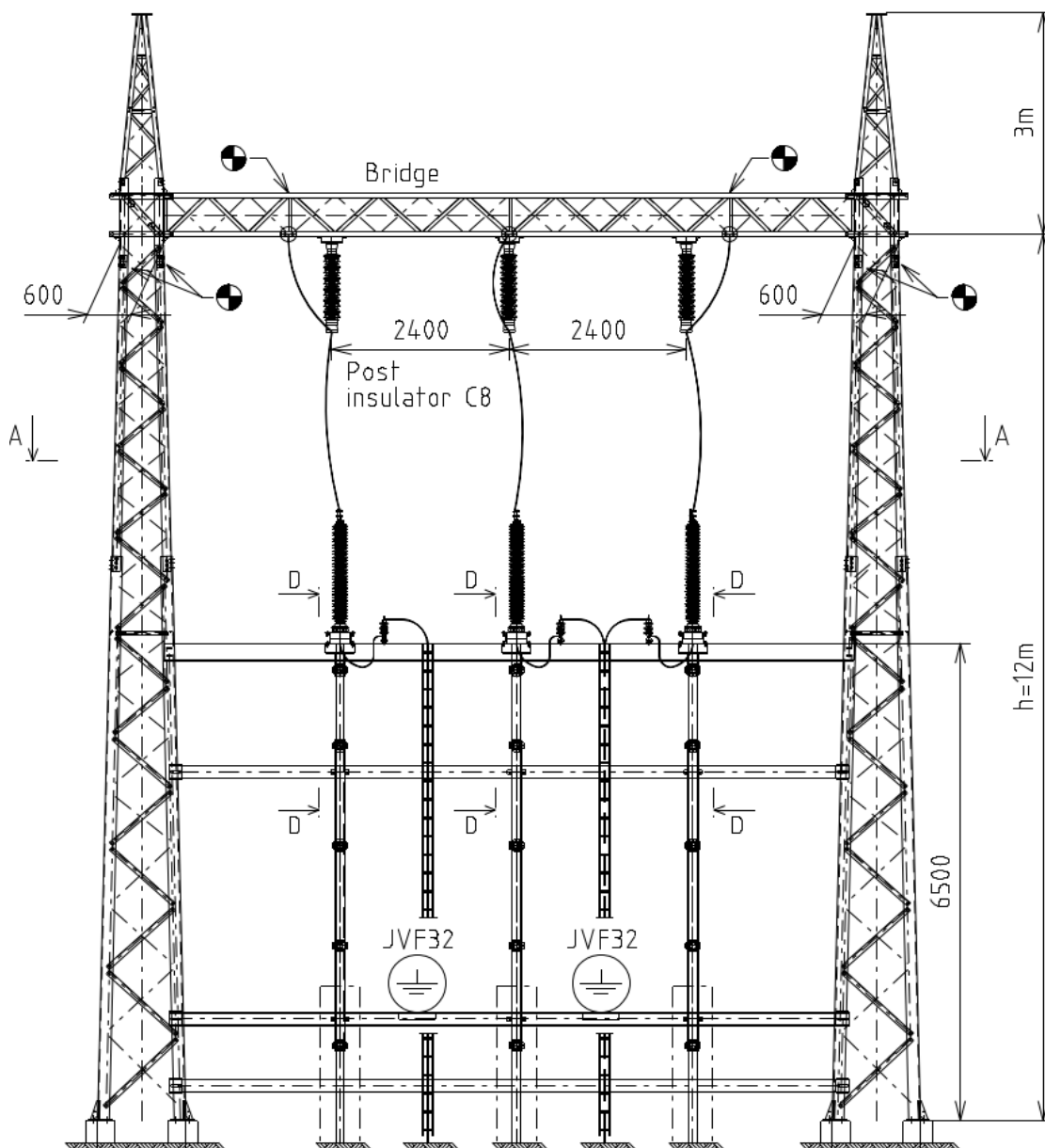
### **5.3 Kaapelien kiinnitys sisällä ja ulkona**

Kaapelikiinnikkeiden tulee täyttää standardin IEC 61914 vaatimukset. Oikeanlaisilla kaapelikiinnikkeillä varmistetaan, että kaapelijärjestelmä täyttää sille asetetun teknisen elinikävaatimuksen, eikä aiheuta vaaratilanteita kaapelijärjestelmän vikatilanteissa. Kaapelikiinnityksellä estetään kaapelin liikkuminen myös vikatilanteissa ja siten kaapelivarusteiden, laitteistojen ja kaapelin itsensä vaurioituminen. (Eurolaite Oy s.a.)

Kiinnikkeiden ja kaapelin tukirakenteiden tulee kestää mitoittavien vikavirtojen aiheuttamat dynaamiset vaikutukset, ja niiden riittävä rakenteellinen kestoisuus tulee osoittaa IEC 61914 mukaisin laskelmin.

### **5.4 Pääteportaalit, -telineet ja -pylväät**

Kaapeleiden ulkopäätteet, tukieristimet sekä ylijännitesuojat asennetaan kuumasinkitystä teräksestä valmistettuun vapaasti seisovaan päätetelineeseen, pääteportaaliin tai voimajohtopylvääseen. Kuvassa 7 on havainnollistava piirroskuva pääteportaalista.



Kuva 7. Pääteportaali (Destia Oy 2022a)

Telineet ja tukirakenteet kiinnitetään perustuksiin telineen korkeussäädön mahdollistavilla ankkuripulteilla. Putkirakenteissa telineissä otetaan huomioon veden pääsyn eristäminen putken sisälle ja kondenssiveden poistumismahdollisuus. Telineessä on valmiina päätteelle menevien maadoituskaapeliin kiinnityspaikat, vaippamaadoitusjohtimien ja -koteloiden tai vaippaylijännitesuojien kiinnityspaikat sekä kiinnityspisteet siirrettäville työmaadoitusvälineille. (Eskola 2023.)

## 5.5 Mahdolliset ongelmat kaapeliasennuksissa

Mahdolliset ongelmat maakaapeleiden asennuksissa voivat tulla esiin vedon aikana, tai asennusten jälkeisissä mittauksissa. Kaapelit voivat vaurioitua ulkoisesti, jos vetojen aikana ei noudateta tarkkaavaisuutta tai vetoja ei olla suunniteltu huolellisesti. Kaapelin ulkovaippa vaurioituu helposti, mikäli siihen osuu vedon aikana teräviä kiviä tai muita esineitä.

Kaapeleiden sisäisiin ongelmiin kuuluvat niin kutsutut vesi- ja sähköpuut. Vesi- puiksi kutsutaan veden ja kosteuden aiheuttamia ongelmia PE-kaapeleille. Niillä tarkoitetaan puumaisten johtavien kanavien syntymistä eristemuoviin kentänvoimakkuusmaksimien alueella, ilman osittaispurkauksia. (Elovaara & Haarla 2011, 60–61.) Osittaispurkausten aiheuttamia eristeen orgaanisen materiaalin hajoamista, ja tästä johtuvien onteloiden syntyä kutsutaan sähköpuiksi. Sähköpuut kasvavat nopeasti (tunneissa tai viikoissa), eivätkä vaadi vettä. Vesipuut sen sijaan syntyvät hitaasti (kuukausissa tai vuosissa), ja niimensä mukaisesti vaativat vettä tai kosteutta syntyäkseen. (Thue 2003, 238.)

Muita vartenotettavia ongelmia kaapeliasennuksissa ovat kaapeleihin kohdistuva ilkivalta tai varkaudet. Kaapeliojat ja -kanavat tulisikin täyttää mahdollisimman pikaisesti asennusten jälkeen, etteivät ne houkuttele paikalle varkaita tai ilkivallan tekijöitä. Kelojen varastointipaikat tulisivat olla aidattuja ja lukittuja sekä kameravalvonnalla varustettuja.

## 6 KAAPELIPÄÄTTEET JA JATKOKSET

Kaapelipäätteiden (*cable terminal*, *sealing end*, *pot head*) pääasiallisia tehtäviä ovat kaapelin pään mekaaninen suojaaminen, kosteuden pitäminen poissa kaapelista, eristettyjen johtimien yhdistäminen näkyvissä oleviin liittimiin sekä homogeenisessä kaapelieristeessä eristeen yli vaikuttavan poikittaisen sähkökentän jakauman muuttaminen pitkittäiseksi. Kaapeli ja pääte muodostavat aina yhden kokonaisuuden, joten päätteen tulee kestää samat sähköiset rasitukset kuin kaapelinkin. (Elovaara & Haarla 2011, 327–328.)

Sähkökentän jakaumaa metallivaipan tai hohtosuojan reunassa on keinotekoisesti tasattava kaapelipäätteitä rakennettaessa, sillä se nousee hyvin suureksi

verrattuna homogeenisen kaapelin sähkökenttään. Tasausmenetelminä voidaan käyttää eristyspaksuuden suurentamista ja eristyksen muotoilua keilaksi, kapasitiivista ohjausta tai resistiivistä ohjausta. Kapasitiivisella ohjauksella tarkoitetaan sylinterimäisten metallikalvojen sijoittamista eristemassaan ja resistiivisellä ohjauksella hohtosuojan katkaisukohdasta lähtien eristyksen päälle kierrettävää puolijohtavaa nauhaa. Suurjännitekaapeleilla (> 110 kV) käytetään pääasiallisesti kapasitiivista sähkökentän ohjausta. (Elovaara & Haarla 2011, 327–328.)

Jatkoksilla yhdistetään toisiinsa kaapelien valmistuspituuksia. Jatkokset tehdään periaatteessa samoin kuin päätteet. Kaapeleissa esiintyy vain säteen suuntaisia rasituksia, mutta jatkoksessa vaikuttaa myös pitkittäiset rasitukset. Tämä muodostuu ongelmaksi etenkin korkeilla jännitteillä. Jatkoksista tulee pitkiä, sillä pitkittäisen rasituksen sallitaan olevan noin seitsemän prosenttia säteen suuntaisesta rasituksesta. (Elovaara & Haarla 2011, 330–331.) Sähköasemilla jatkoksia käytetään harvoin, lähinnä vioittuneiden kaapeleiden korjauksessa tai ulkopuolisten kaapeliyhteyksien uusinnossa.

110 kV:n pääteasennukset saa tehdä vain siihen tarkoitettun koulutuksen ja asennukseen valmistajan sertifioima asentaja. Asennustyössä tulee käyttää päätevalmistajan määrittelemiä työkaluja. Päätevalmistajat myöntävät usein lisätakuun päätteille, mikäli ne on asentanut sertifioitu henkilö. (Fingrid 2020, 2.)

## **7 MITTAUKSET**

Luvussa käsitellään erilaisia mittauksia, joita maakaapeleille ja päätteille on tehtävä ennen niiden käyttöönottoa sekä mittauksissa käytettäviä mittalaitteita. Lisäksi luku perehtyy maadoitussuunniteluun olennaisesti liittyvään maaperän resistiivisyyden mittaukseen.

### **7.1 Tehdastestaukset (FAT)**

Kaapelinvalmistaja suorittaa sähköasemalle tulevalle kaapelille tehdastestin standardien IEC 60840 ja SFS 5702 mukaisesti. Asiakas osallistuu halutes-

saan testeihin. Tehdastestiin kuuluu testinäyte kaapelista, johtimen sekä kosketussuojan eristysresistanssimittaukset, kapasitanssimittaus, jännitetesti kaapelin ulkovaipalle (25kV / 1 min), verkkojännitetesti (160kV / 30 min) sekä osittaispurkaustesti IEC 60885-3 standardin mukaisesti. (Prysmian Group Finland Oy 2023.)

Laitetoimittaja tekee sähköasemille tuleville päätteille tehdastestit IEC-standardin 60840 vaatimusten mukaisesti. Testeihin sisältyvät standardin mukaiset taivutus-, osittaispurkaus-, lämmityssykli-, syöksyjännite-, ja vaihtojännitetestit. (Lerond 2022.)

## 7.2 Käyttöönottomittaukset (SAT)

Maakaapeleiden asennuksen jälkeen urakoitsijan on testattava kaapeleiden kunto IEC-standardin 60840 mukaisesti. Standardin vaatimat testit ovat tasavirtaresistanssin mittaus johtimen ja vaipan väliltä, erityresistanssi ( $10 \text{ kV} \cdot 5 \text{ min}$ ) sekä 24 tunnin jännitekoe. Jännitekokeessa kaapeliin kytketään  $1 \cdot U_0$  vaihtojännite 24 tunniksi. (Fingrid Oyj 2020, 1.)

Edellä mainituista testeistä tärkeimpänä voidaan pitää eristysresistanssin mittaamista. Mittauksesta urakoitsija voi todeta, ettei kaapeli ole vaurioitunut vedon aikana. Mikäli mittauksessa havaitaan suurta ( $> 30 \mu\text{A}$ ) vuotovirtaa ja jännite ei nouse testin vaatimaan  $10 \text{ kV:n}$ , kaapelissa on maavuoto.

## 7.3 Osittaispurkausmittaus

Osittaispurkauksella tarkoitetaan sähköpurkausta, joka oikosulkee johtimien välisen eristyksen vain osittain. Osittaispurkaukset syntyvät sähkökentän voimakkuuden ylittäessä kyseisen eristysosan sähkölujuuden. Niitä esiintyy tasavaihto- ja syöksyjännitteillä niin kaasuissa, nesteissä kuin kiinteissäkin eristeissä sekä rajapinnoilla. Osittaispurkaukset voidaan luokitella sisäisiin purkauksiin eli ontelopurkauksiin, pintapurkauksiin, jotka tapahtuvat eristeen pinnalla sekä koronapurkauksiin johtimen pinnalla. Vaihtojännitteillä osittaispurkausten merkitys on suurin, koska ne toistuvat useimmiten joka jaksolla. (Aro ym. 2015, 80.)

Osittaispurkauksilla on monia epätoivottuja vaikutuksia kaapelin eristeisiin ja ympäristöön. Koronapurkausten aistittavia vaikutuksia ovat valo, ääni ja otsonikaasu. Osittaispurkaukset aiheuttavat tehohäviöitä kaapeleissa sekä suurilla transienttiylijännitteillä kulkuaaltojen vaimenemista ja loivenemista. Kaapelissa mahdollisesti olevissa onteloissa purkaukset synnyttävät ionipommituksien aiheuttamaa eroosiota ja purkauskanavissa ne synnyttävät lämpöä. Osittaispurkauksista syntyy myös erilaisia happoja ja kaasuja, jotka syövyttävät eristeitä. (Aro ym. 2015, 488–489.)

Osittaispurkaukset ovat tavallisesti pieniä, mutta ne vaikuttavat eristyksen elinikään. Maakaapeleissa käytettävät polyetyleenieristeet ovat erityisen herkkiä osittaispurkauksille, eikä niissä voida sallia merkittäviä purkauksia. (Aro ym. 2015, 489.)

Osittaispurkauksia mitataan laitetoimituksiin ja laadunvarmistuksiin liittyvissä testauksissa. Testausten tarkoituksena on varmistaa, että eristysrakenteet täyttävät standardien vaatimat tasot ja että tuotteet kestävät käytössä. Osittaispurkausmittauksilla valvotaan lisäksi eristeiden kuntoa ja tutkitaan eristysrakenteiden elinikää. (Aro ym. 2015, 489.)

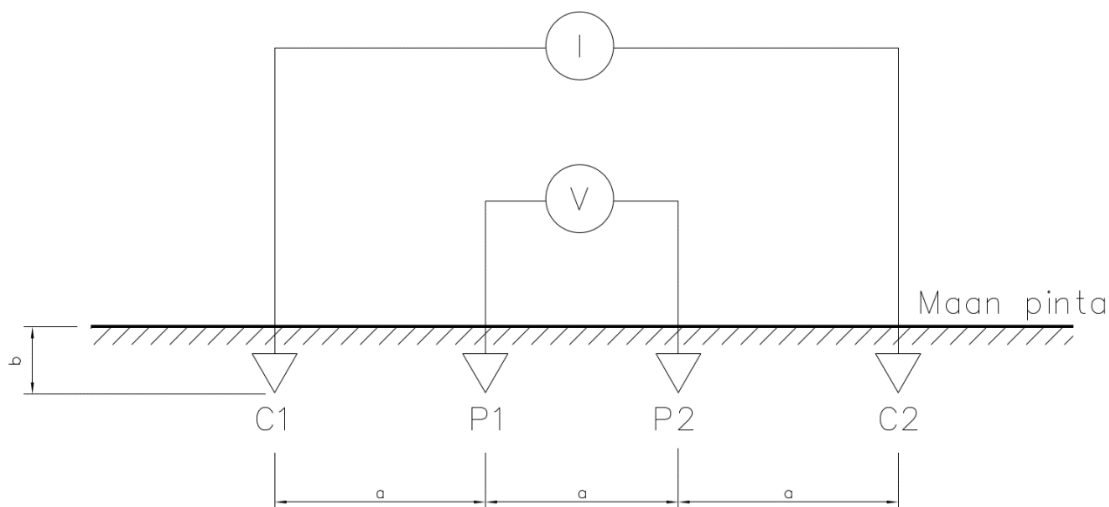
#### **7.4 Maaperän resistiivisyyden mittaaminen**

Maadoitussuunnittelun perustana toimii maan resistiivisyys, ja maadoitukset määrittävät pitkälti sähköasemien, maakaapelointien sekä voimajohtojen turvallisuuden. Resisttiivisyyden mittaamiseen on monia eri menetelmiä. Pääpiirteiltään nämä menetelmät ovat hyvin samankaltaisia: maahan syötetään virtaa, sen yli vaikuttava jännite mitataan ja lasketaan resistanssi, jonka avulla voidaan laskea maan resistiivisyys. Mittausmenetelmien erot liittyvät jännite- ja virtaelektrodien asetteluun sekä lasketun resistanssin käyttöön resistiivisyyden määrittelyssä. Yleisin maan resistiivisyyden mittausmenetelmä on Wenner-menetelmä sekä siitä kehitetty variaatio, jota kutsutaan Schlumberger-menetelmäksi. (Luukkainen 2020, 33.)

##### **7.4.1 Wenner-menetelmä**

Kuvassa 8 on havainnollistettu Wenner-menetelmää. Wenner-menetelmässä käytetään neljää elektrodia C1, C2, P1 ja P2, jotka asetetaan maahan samalle

suoralle, tasaisin välimatkoin  $a$ , syvyydelle  $b$  kuvan 8 mukaisesti (Luukkainen 2020, 34).



Kuva 8. Wenner-menetelmä (mukaillen Luukkainen 2020, 34)

Virta johdetaan elektrodista C1 maan läpi elektrodiin C2. Elektrodien P1 ja P2 välinen jännite mitataan ja lasketaan resistanssi

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

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

$$\rho = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}} \quad (9)$$

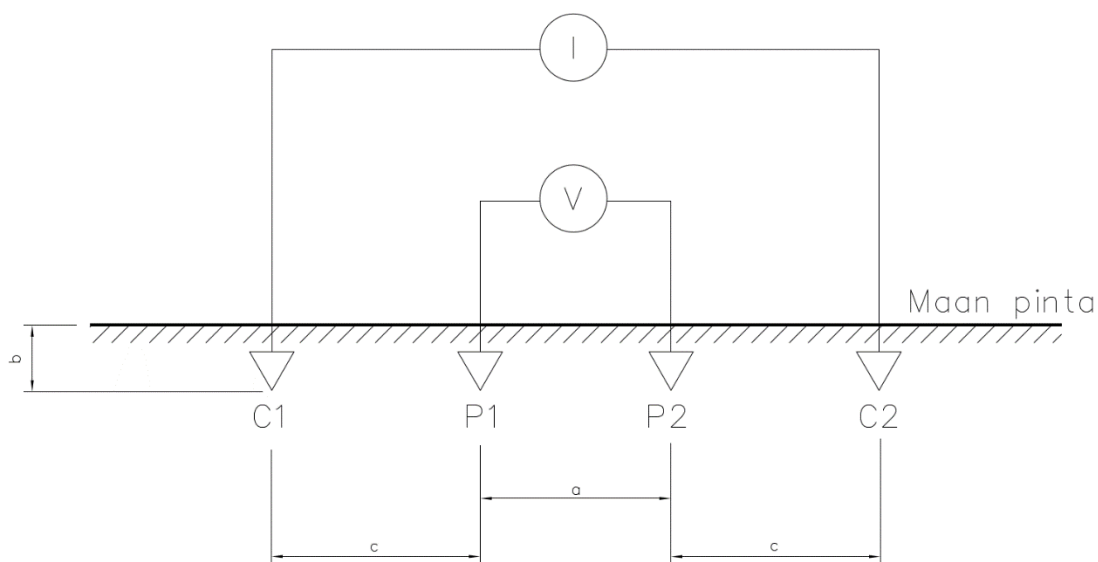
jossa	$\rho$	maaperän resistiivisyys syvyydellä	[ $\Omega\text{m}$ ]
	$a$	elektrodien välinen etäisyys	[mm]
	$b$	elektrodien upotussyvyys	[mm]

Elektrodien välin tulisi olla vähintään kymmenkertainen upotussyvyyteen  $b$  verrattuna. (Luukkainen 2020, 33–34.)

### 7.4.2 Schlumberger-menetelmä

Wenner-menetelmää käytettäessä vanhemmilla mittalaitteilla ongelmaksi muodostuu sisempien elektrodien potentiaalieron pieneneminen elektrodien välistä etäisyyttä kasvattaessa. Uudet mittalaitteet kykenevät kuitenkin hyvin pienien potentiaalierojen mittaamiseen, joten niitä käytettäessä tämä ongelma poistuu. Toinen Wenner-menetelmään liittyvä ongelma on jokaisen elektrodin siirtäminen mittausten välissä. Näiden ongelmien takia on kehitetty Schlumberger-menetelmä. (Luukkainen 2020, 35.)

Schlumberger-menetelmä, jota on havainnollistettu kuvassa 9, muistuttaa hyvin paljon Wenner-menetelmää. Siinä käytetään myös neljää elektrodia C1, C2, P1 ja P2. Elektrodien C1 ja C2 välillä kulkee virta, ja elektrodien P1 ja P2 välillä mitataan potentiaaliero ja lasketaan resistanssi. Merkittävin ero Schlumberger- ja Wenner-menetelmän välillä on se, että Schlumberger-menetelmässä vain virtaelektrodeja C1 ja C2 siirretään, kun jännite-elektrodit P1 ja P2 pysyvät paikallaan koko mittauksen ajan, ja niiden etäisyys  $a$  on vakio. (Luukkainen 2020, 36.)



Kuva 9. Schlumberger-menetelmä (mukaillen Luukkainen 2020, 36)



Schlumberger-menetelmässä resistiivisyys  $\rho$  lasketaan mitatuista resistansseista kaavalla

$$\rho = \frac{\pi c(c + a)}{a} R \quad (10)$$

jossa	$c$	virtaelektrodien etäisyys jännite-elektrodeista	[mm]
	$a$	jännite-elektrodien etäisyys toisistaan	[mm]
	$R$	mitattu resistanssi	[ $\Omega$ ]

Resistiivisyyden laskemiseksi edellä mainitulla kaavalla tarvitaan ehto, jossa elektrodien upotussyvyys  $b$  on merkittävästi pienempi kuin jännite-elektrodien välinen etäisyys. Virtaelektrodien etäisyyden  $c$  tulee myös toteuttaa ehto  $c > 2a$ . Kaavalla voidaan laskea maan resistiivisyys suhteellisen tarkasti syvyydessä, joka on yhtä suuri kuin etäisyys mittauspiirin keskipisteestä virtaelektrodiin. (Luukkainen 2020, 35–36.)

## 7.5 Käytettävät mittalaitteet

**Megger MFM-10** (kuva 10) on mittalaite, jota käytetään kaapelin vaipan vikojen paikallistamiseen. Sillä voidaan testata, esipaikantaa tai paikantaa mahdollisia vaippavikoja. (Perel Oy s.a.)



Kuva 10. Megger MFM-10 (Perel Oy s.a.)

Laitteella pystytään testaamaan kaapeleita automaattisesti ja arvioimaan niistä saatuja mittauksia. Tämä tarjoaa nopean ja luotettavan työkalun kaapelin eristystestaukseen sekä mahdollisten vikojen ennakoivaan paikantamiseen ja paikallistamiseen. Laitteessa on myös bipolaarinen esipaikannustoiminto, joka parantaa galvaanisten ja termoelektristen vaikutusten havaitsemista ja siten esipaikannuksen tarkkuutta ja luotettavuutta. (Perel Oy s.a.)

**Megger MOM2** (kuva 11) on kannettava mikro-ohmimittari. Sitä käytetään resistanssien mittaamiseen katkaisijoiden kontakteista, virtakiskojen liitoksista ja muista korkeiden virtojen liitoksista. Mittalaite käyttää superkondensaattoria korkean lähtövirran synnyttämiseen. Superkondensaattori pystyy varastoi-  
maan erittäin suuren määrän energiaa perinteisiin kondensaattoreihin verratuna ja se pystyy tuottamaan suuren virran purkautuessaan sen erittäin alhaisen sisäisen resistanssin ansiosta. (Megger 2011.)



Kuva 11. Megger MOM2-mikro-ohmimittari (Megger 2011)

Testattaessa kondensaattori purkautuu testikohteen läpi, ja jännitehäviö sekä virran määrä mitataan jatkuvasti ja synkronisesti. Yksittäisistä näytteistä mitattujen resistanssien keskiarvot lasketaan lopullisen arvon saamiseksi. (Megger 2011.)

**Chauvin-Arnoux CA6471** (kuva 12) on maadoitusvastusmittari, jolla voidaan mitata maadoitusvastuksia sekä maaperän resistiivisyyttä. Mittalaitteella on mahdollista laatia syvällisempiä analyysejä sen herkkyuden ja mittatarkkuuden

ansiosta. Laitteella voidaan mitata maapotentiaalin ja maadoitusvastuksen arvoja, jatkuvuutta, maadoitusta sekä maaperän resistiivisyyttä myös huonon maaperän omaavissa kohteissa. Laite valitsee automaattisesti mittaustaajuuden 41–512 Hz väliltä termojännitteistä johtuvien häiriöiden välttämiseksi. Selektiivisen maadoitusvastuksen mittaussuunnitelma mahdollistaa yksittäisen maadoittimen mittaamisen ilman käyttökatkoksia rinnakkaismaadoituksen omaavissa järjestelmissä. Laitetta käytetään yhdessä perinteisten maadoitus-elektrodien tai silmukkavastuspistien kanssa. (Chauvin-Arnoux 2023.)



Kuva 12. Chauvin-Arnoux CA6471 -mittalaite (Chauvin-Arnoux 2008, 1)

## 8 TARVITTAVAT PÖYTÄKIRJAT, SUUNNITELMAT JA DOKUMENTIT

Urakoitsijan on toimitettava laskelmat ja suunnitelmat kaapeliyhteyksien kuormitettavuuksista. Useamman yhteyden järjestelmissä on huomioitava kaapeleiden lämmittävä vaikutus toisiinsa. Urakoitsijan tulee toimittaa aluesuunnitelma, mistä voidaan tarkastella yhteyksien vaihejärjestykset koko yhteyden matkalta sekä kaapeliyhteyksien maadoitussuunnitelma. (Fingrid Oyj 2020, 1.)

Kuukausi ennen kaapelien asennuksia on toimitettava asennussuunnitelma, jossa kuvataan ainakin 1. kaapelireittien suunnitelmien mukaisuuden toteaminen ja tarkastus, 2. suunnitelma kaapelikelojen sijoituksista, vetosuunnat ja

vetokaluston sijainti sekä 3. kaapelin vetovoiman ja taivutussäteiden seuranta ja varmistaminen kaapelivalmistajan ohjeiden mukaisesti vedon aikana. (Fingrid Oyj 2020, 1.)

Urakoitsijan on suunniteltava ja toteutettava kuormitettavuuslaskelmien perusteella kaapelireittisuunnitelma. Suunnitelmassa on esitettävä reitin säteet, kaapelien sijoitukset ja etäisyydet toisistaan, kiinnitykset, vaihejärjestys, leikkaussuunnitelma sekä kaapeleita ympäröivät täyttömateriaalit. Ennen kaapeleiden asentamista on urakoitsijan varmistuttava reitin suunnitelman mukaisuudesta. Asennusten valmistuttua kaapelit kartoitetaan. (Fingrid Oyj 2020, 1.)

Kaapelien asennuksista telineille sekä kaapelikellariin on tehtävä laskelmat, joilla osoitetaan rakennettavien telineiden kesto oikosulussa. Kaapelien kiinnittämisestä on esitettävä laskelmat, joista selviää vähintään minimietäisyys käytetyille kiinnikkeille. Kaapelipäätteiden asentajilla tulee olla voimassa olevat sertifikaatit käytettäville kaapelipäätteille ja päätteiden maadoituksista on esitettävä suunnitelma. (Fingrid Oyj 2020, 1–2.)

Kaikista kaapeleihin tai muihin sähköaseman laitteisiin tehdyistä mittauksista ja koestuksista tulee aina löytyä mittauspöytäkirja. Pöytäkirjasta ilmenee tyyppillisesti kohde- ja projektitiedot, mittauskohde, mittauspäivämäärä, mittauspaikka, mittauksen suorittaja, mittaustulokset sekä mittauslaite ja sen sarjanumero (ks. liite 1). Mittauksen suorittaja allekirjoittaa mittauspöytäkirjan, mikä toimitetaan tilaajalle yhdessä muun sähköasemadokumentaation kanssa.

Urakoitsijan on toimitettava tilaajalle erinäisiä dokumentteja sähköaseman maakaapeloinneista. Huomioitavaa on, että tilaaja ainoastaan kommentoi suunnitelmia. Tilaajan oma tarkastus ja mahdollisen poikkeaman havaitsematta jättäminen ei millään tavoin vähennä tai poista sopimuksessa, laissa ja asetuksissa tai standardeissa määriteltyjä vaatimuksia.

Maakaapelointiin liittyvää dokumentaatiota ovat:

- kuormitusvirran lämpenemätarkastelut
- sähköaseman maadoitusimpedanssin määrittäminen, mikäli maadoitusmittausta ei tehdä ennen käyttöönottoa
- sähköaseman aluepiirustus

- yksityiskohtaisemmat kytkinlaitoskohtaiset sijoituspiirustukset ja leikkauspiirustukset
- sähköasema-alueen kaapelireitti- ja piirustus
- kaasueristeisen kytkinlaitoksen (GIS) ohitus suunnitelma vikatilanteessa

Urakoitsija vastaa kaikkien toimittamiensa dokumenttien ja piirustusten virheistä, ristiriitaisuuksista tai puutteista riippumatta siitä, onko tilaaja hyväksynyt ne vai ei. Urakoitsija vastaa myös, että kaikissa suunnitelmissa noudatetaan sopimuksen eritelmiä ja ohjeita, ellei poikkeamista ole erikseen sovittu projektin aikana. (Fingrid Oyj 2021b, 1–4.)

## **9 KAUPPILAN SÄHKÖASEMAN UUDISTUS**

Tässä luvussa kerrotaan opinnäytetyössä konkreettisenä esimerkkinä käytetystä Kauppilan sähköaseman uudistusprojektin maakaapeloinneista. Luvussa tarkastellaan Kauppilan kaapeliasennuksia ja niihin liittyneitä mittauksia sekä kerrotaan ongelmista, joita havaittiin kaapeloinnin aikana.

### **9.1 Kaapeliasennukset Kauppilassa**

Kauppilan sähköaseman maakaapelointi aloitettiin elokuussa 2023. Kaapeloitavaa kuudelle eri johtolähdölle oli yhteensä noin 1500 metriä. Kaapelityyppi oli Prysmianin valmistamaa HXCHBMMK-W kaapelia, jonka johtimen poikkipinta-ala oli 2000 mm<sup>2</sup> (Destia Oy 2022c, 1). Vedot aloitettiin pisimmästä johtolähdöstä, jonka yhden vaiheen pituus oli 95 metriä. Asennuksissa käytettiin apuna nosturiautoa, kelapukkia, kelannostohaarukkaa, vetokonetta sekä kaapeliohjausrullia. Kaapeleiden vetoon kului seitsemän miehen työryhmältä noin viikko.

### **9.2 Kauppilan sähköasemalla tehdyt mittaukset**

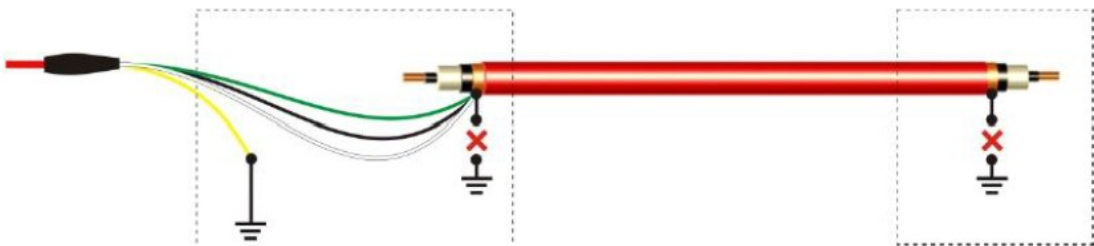
Kauppilan sähköasemalla mitattiin asennettujen maakaapeleiden eristysresistanssit Megger MFM-10 mittalaitteella. Kaapeleihin oli kytketty vedon jälkeen työnaikainen maadoitus kaapelikellarin päässä (kuva 13).

Maadoituksella varmistettiin, ettei mahdollinen kaapeliin indusoitunut latausjännite purkautuisi hengenvaarallisesti. Maadoitukset oli poistettava kaapeleista ennen mittauksia.



Kuva 13. Työnaikaiset kaapelimaadoitukset.

Megger MFM-10 mittalaite kytkettiin kaapeliin käyttäen yksinkertaista kytkentää (kuva 14). Eristysresistanssia mitattaessa jännitteeksi asetettiin 10 kV ja virraksi 30 mA. Testiaika oli yksi minuutti. Jokainen kaapeli mitattiin erikseen samoilla arvoilla ja mittaustulokset tallennettiin ulkoiselle muistitikulle.



Kuva 14. Yksinkertainen mittauskytkentä (Perel Oy s.a.).

Mittaustulokset tuotiin Meggerin EasyProt-ohjelmaan, joka tulostaa jokaisesta tuloksesta oman mittauspöytäkirjansa. Litteessä 1 on yksi Kauppilan aseman erityisresistanssin mittauspöytäkirjoista. Pöytäkirjasta ilmenee projektitiedot,

kaapeliyhteyden nimi, kaapelivalmistaja, kaapelityyppi, kaapelin pituus, mittauksen suorittaja, graafiset mittaustulokset sekä mittauss- ja asetusarvot. Kauppilan sähköasemalla tehdyissä mittauksissa ei ilmennyt mitään normaalia poikkeavaa. Yhdenkään kaapelin vaipan vuotovirta ei noussut yli sallitun tason, joten voidaan todeta, että kaapeleihin ei ole tullut vaurioita vetojen tai asennusten aikana.

### 9.3 Kaupilassa havaitut ongelmat

Kauppilan sähköaseman alkuperäinen kaapelointisuunnitelma on esitetty liitteessä 2. Suunnitelman mukaan yksi johtolähdön reitti oli suunniteltu kulkeväksi vanhan avokytinlaitoksen jännitteisten putkikiskojen alla. Kaapelikaivannon tekeminen putkikiskon alle olisi tuottanut kuitenkin ongelmia, koska varoetäisyydet ison kaivinkoneen kanssa liikkuessa eivät olisi täyttyneet. Lisäksi vaarana oli rinteisellä tontilla apukiskon toisen pään perustusten mahdollinen pettäminen kaivantoa kaivettaessa. Johtolähdölle saatiin suunniteltua sekä rakennettua vaihtoehtoinen reitti, joka kulki putkikiskon vierellä ja kiersi sen perustukset. Tätä varten rakennettiin maa-aineksesta lähdölle oma ”hylly” jonka päällä kaapelit kulkivat perustusten vierestä.

Johtolähdön reittimuutoksen takia myös muita yhteyksiä jouduttiin tiivistämään pienellä alueella, mikä aiheutti ongelmia alkuperäisiin kaapeleiden kuormitettavuuslaskelmiin. Kaapelivalmistajalta saatiin päivitetyt laskelmat, joiden perusteella erillisten kaapeliyhteyksien välisiä etäisyyksiä saatiin tiivistettyä noin kolmasosalla alkuperäisestä.

## 10 YHTEENVETO

Tämän työn tavoitteena oli tuottaa ja koota tietoa sähköasemaprojektien 110 kV:n maakaapeloinneista. Opinnäytetyö tehtiin toimeksiantona Destia Oy:lle. Pää tavoitteena oli kuvata sähköasemien sisäisten 110 kV:n maakaapelointien rakennusprosessia ja esittää siihen liittyviä teknisiä yksityiskohtia sekä käytännön toteutusta vastaten tutkimuksen ydinkysymykseen, *mitä asioita pitää huomioida, kun lähdetään toteuttamaan sähköaseman sisäisiä maakaapelointeja?*

Työ alkoi tutustumalla maakaapelien rakenneosiin ja kaapeleiden kuormitettavuuteen. Kuormitettavuuteen olennaisesti liittyvän kaapelin lämmön siirtymisen laskentaa kuvattiin työssä kattavasti. Lisäksi tutkittiin kaapeleiden vaipan maadoitustapoja sekä kaapeliasennuksiin liittyvää teoriaa ja vaatimuksia alan standardeihin sekä tutkimusartikkeleihin nojaten. Näiden tietojen perusteella muodostettiin käsitys kaapelointiprosessin mahdollisista ongelmista. Ongelmat eivät kuitenkaan aina ole yksiselitteisiä, ja tietyt asiat kävivät ilmi vasta käytännön kaapelointityön edetessä.

Sähköasemien sisällä 110 kV:n kaapeloinnin toteuttaminen tehdään yleensä rajatulla alueella aidatulla tontilla tai sen läheisyydessä kaapelipääteportaalilla, joista osassa sijaitsee käytössä oleva jännitteinen 110 kV:n avokytkinkenttä. Kaapeleita ei myöskään putkiteta koko pituudelta, vaan ne asennetaan betonikanaaliin tai suoraan kaapeliojaan, joka täytetään maa-aineksella. Osa kaapeleista joudutaan asentamaan täyttäen, jolloin ne asennetaan suoraan maahan ilman kaivantoa ja peitetään suojaavalla maa-aineksella.

Rajattu alue, tontin pinnanmuodot sekä mahdolliset jännitteiset osat sähköasema-alueella luovat haasteita maakaapeloinnin toteuttamiselle. Nämä seikat korostavat suunnittelun tarpeellisuutta sekä ajankohtaisten kaapelointisuunnitelmien ja työvaihekohtaisten suunnitelmien tärkeyttä. Esimerkiksi huolimattomasta kaapeleiden käsittelystä aiheutuvat ongelmat saattavat olla taloudellisesti mittavia, joten ammattitaitoisten asentajien käyttäminen on hyvin tärkeää tapausesimerkin mukaisilla projekteilla.

Uusiutuvan energian lisääntymisen sekä vanhojen avokytkinlaitosten tullessa käyttöikänsä päähän maakaapelointi tulee lisääntymään huomattavasti tulevaisuudessa (ks. esim. Fingrid Kantaverkon kehittämissuunnitelma 2022–2031). Tämä opinnäytetyö toimii aineistona ja oppaana tutkimuksen toimeksiantajalle, tarjoten käytännön näkemyksiä ja suosituksia sähköasemarakentamisen monimutkaisista näkökohdista. Lisäksi se voi palvella muita samankaltaisia projekteja toteuttavia yrityksiä sekä henkilöitä, jotka ovat kiinnostuneita aiheesta. Sähköaseman uudistusprojektissa urakoitsijalla tulee olla kokonaiskäsitys projektissa huomioitavista laeista, asetuksista, standardeista ja ohjeista.



Sähköasemien 110 kV:n maakaapelointi on kokonaisuutena varsin laaja aihe, ja tämän opinnäytetyön rajauksen vuoksi monet asiat käsiteltiin vain pintapuolisesti. Sähköasemien sisäisestä maakaapeloinnista tarvitaan edelleen lisää ajankohtaista tietoa ja tutkimusta maakaapeloinnin suunnittelun ja ylläpidon kehittämiseksi sekä sujuvoittamiseksi. Jatkotutkimuksessa sähköaseman sisäisiä maakaapelointeja voisi olla hyödyllistä tarkastella paitsi laajemmin kokonaisuutena myös esimerkiksi tehokkuuden, ympäristön, turvallisuuden ja taloudellisuuden näkökulmista.

## LÄHTEET

ABB. 2010. XLPE Land Cable Systems User's Guide. Rev 5. PDF-dokumentti. Saatavissa: [https://petz.planet.ee/elek-ter/XLPE\\_Land\\_Cable\\_Systems\\_2GM5007GB\\_rev\\_5.pdf](https://petz.planet.ee/elek-ter/XLPE_Land_Cable_Systems_2GM5007GB_rev_5.pdf) [viitattu 4.5.2023].

ABB. 2000. Teknisiä tietoja ja taulukoita. 9. Painos. Vaasa: Suomalaiset ABB-yhtiöt.

Ala-Kokko, J. 2018. Suurjänniteverkon maakaapelointi. Oulun Ammattikorkeakoulu. Sähkötekniikan koulutusohjelma. Opinnäytetyö. PDF-dokumentti. Saatavissa: [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/143720/Ala-Kokko\\_Janne.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/143720/Ala-Kokko_Janne.pdf?sequence=1&isAllowed=y) [viitattu 28.11.2023].

Anders, G.J. 2005. Rating of Electric Power Cables in Unfavorable Thermal Environment. 1. painos. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.

Aro, M., Elovaara, J., Karttunen, M., Nousiainen, K. & Palva, V. 2015. Suurjännitetekniikka. 4. painos. Helsinki: Gaudeamus Helsinki University Press / Otatieto.

Chauvin-Arnoux. 2008. Earth and resistivity tester. User's manual. PDF-dokumentti. Saatavissa: [https://chauvin-arnoux.fi/wp-content/uploads/2014/09/CA\\_6471-eng-manual.pdf](https://chauvin-arnoux.fi/wp-content/uploads/2014/09/CA_6471-eng-manual.pdf) [viitattu 19.12.2023].

Chauvin-Arnoux. 2023. CA6471 Maadoitusvastusmittari maadoitusvastuksen sekä maaperän resistiivisyyden mittaamiseen. WWW-sivu. Saatavissa: <https://chauvin-arnoux.fi/tuote/ca6471-maadoitusvastusmittari-maadoitusvastuksen-seka-maaperan-resistiivisyyden-mittaamiseen/#prettyPhoto> [viitattu 10.12.2023].

Destia Oy. 2023. Tietoa meistä. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.destia.fi/tietoa-meista/historia/> [viitattu 2.2.2023].

Destia Oy. 2022a. General drawing, terminal portal (outdoor termination). PDF-dokumentti. Ei julkisesti saatavissa.

Destia Oy. 2022b. KPP1AE006. PDF-dokumentti. Ei julkisesti saatavissa.

Destia Oy. 2022c. Tilaus 110kV kaapelit ja päätteet. PDF-dokumentti. Ei julkisesti saatavissa.

Elovaara, J. & Haarla, L. 2011. Sähköverkot II – Verkon suunnittelu, järjestelmät ja laitteet. 1. painos. Helsinki: Gaudeamus Helsinki University Press / Otatieto.

Eskola, A. 2023. Projektijohtaja. Sähköpostikeskustelu 18.–20.7.2023. Destia Oy.

Eurolaite Oy. s.a. Kaapelointivarusteet. Kaapelikiinnikkeet. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.eurolaite.fi/sahkotekniikan-tuotteet/kaapelointivarusteet/kaapelikiinnikkeet/> [viitattu 18.10.2023].

Fingrid Oyj. 2020. S22310L1: Suurjännitekaapelien asennus- ja suunnitteluvaatimukset. PDF-dokumentti. Ei julkisesti saatavissa.

Fingrid Oyj. 2021a. Fingridin investoinneilla lisää liityntävalmiuksia ja käyttövarmuutta Jyväskylän ja Joroisten alueen kantaverkkoon. Julkaistu 28.9.2021. Saatavissa: <https://www.epressi.com/tiedotteet/energia/fingridin-investoinneilla-lisaa-liityntavalmiuksia-ja-kayttovarmuutta-jyvaskylan-ja-joroisten-alueen-kantaverkkoon.html> [viitattu 31.1.2024].

Fingrid Oyj. 2021b. S22130E1: Sähköasemadokumentit. PDF-dokumentti. Ei julkisesti saatavissa.

Fingrid Oyj. s.a. Kantaverkon kehittämissuunnitelma 2022–2031. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/kantaverkko/kantaverkon-kehittaminen/kantaverkon-kehittamissuunnitelma-2022-2031.pdf> [viitattu 12.1.2024].

Hämäläinen, I. 2013. 110 kV kaapeleiden asennusratkaisut katurakenteessa. Tampereen Ammattikorkeakoulu. Sähkötekniikka. Opinnäytetyö. PDF-dokumentti. Saatavissa: [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/58293/Hamalainen\\_lira.pdf?se-](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/58293/Hamalainen_lira.pdf?se-) [viitattu 28.11.2023].

IEEE Power and Energy Society. 2014. IEEE Guide for Bonding Shields and Sheaths of Single-Conductor Power Cables Rated 5 kV through 500 kV. Saatavissa: <https://standards.ieee.org/ieee/575/4346/> [viitattu 21.7.2023].

Lerond, T. 2022. Electrical test report – Outdoor termination Flex-Dry FD-123-X. Prysmian Group. PDF-dokumentti. Ei julkisesti saatavissa.

Luukkainen, J. 2020. Voimajohtojen maadoitusmittaukset: maadoitusmittausprosessin kehittäminen. Tampereen yliopisto. Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta. Diplomityö. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/10024/121652/LuukkainenJussi.pdf?sequence=2> [viitattu 8.8.2023].

Megger. 2011. Megger MOM2 Microhmmeter. PDF-dokumentti. Saatavissa: [https://www.perel.fi/files/hierarchy/73425943/mom2\\_ds\\_en\\_v08.pdf](https://www.perel.fi/files/hierarchy/73425943/mom2_ds_en_v08.pdf) [viitattu 9.12.2023].

Mäkinen, J. 2023. Sähköasemien maakaapeloidut lähestymisjohdot 110 kV verkossa: Maakaapeli osana maadoitusjärjestelmää. Tampereen yliopisto. Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta. Kandidaatintyö. PDF-tiedosto. Saatavissa: <http://www.urn.fi/URN:NBN:fi:tuni-202304254361> [viitattu 1.2.2024].

Nevalainen, J. 2023. Sähköverkon maakaapelointi. Hämeen ammattikorkeakoulu. Sähkö- ja automaatiotekniikka. Opinnäytetyö. PDF-tiedosto. Saatavissa: <http://www.urn.fi/URN:NBN:fi:amk-202301171375> [viitattu 1.2.2024].

Perel Oy s.a. Megger MFM-10. WWW-sivu. Saatavissa: <https://www.perel.fi/tuote/v120922471/1012572/megger-mfm-10/148359491/1> [viitattu 27.9.2023].

Prysmian Group Finland Oy. 2023. FAT-Report. PDF-dokumentti. Ei julkisesti saatavissa.

SFS 6001:2018. 2018. Suurjännitesähköasennukset. High-voltage electrical installations. 5. painos. Helsinki: Suomen standardoimisliitto.

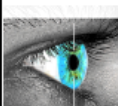
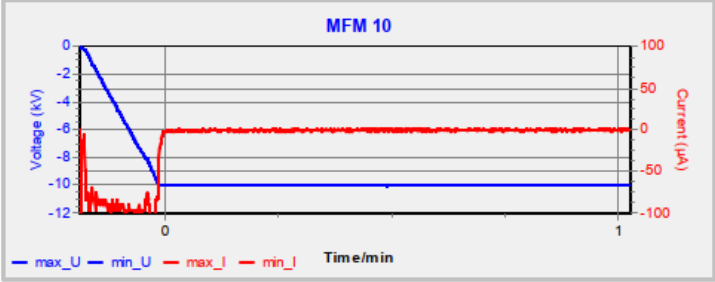
Sumetek Oy. 2007. Kaapelikoira RK-700 käyttöohje. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://product-docs.ramirent.digital/109728-rentalitem-481424-manual-fi-1.pdf> [viitattu 4.9.2023].

Suomi, M. 2010. Kosketussuojan poikkipinnan vaikutus 60–400 kV suurjännitekaapelin kuormitettavuuteen. Metropolia Ammattikorkeakoulu. Tekniikka ja liikenne. Opinnäytetyö. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/12841/Mika%20Suomi.pdf?sequence=1&isAllowed=y> [viitattu 17.4.2023].

Suomi, M. 2018. Power Cable Design. Prysmian Group Finland Oy. PDF-dokumentti. Ei julkisesti saatavissa.

Thue, W.A. 2003. Electrical Power Cable Engineering. 2. painos. CRC Press. E-kirja. Saatavissa: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/xamk-ebooks/detail.action?docID=216100> [viitattu 25.4.2023].

Valtiovarainministeriö. 2023. Fingrid Oyj:n toimintaohje. Talouspoliittinen ministerivaliokunta 19.1.2023. PDF-dokumentti. Saatavissa: [https://valtioneuvosto.fi/documents/10623/144208579/VN\\_20423\\_2022-VM-13+Toimiohje+Fingrid+4034934\\_1\\_1.pdf/f4106e7c-5ad8-9bd0-6881-70c50340d16d/VN\\_20423\\_2022-VM-13+Toimiohje+Fingrid+4034934\\_1\\_1.pdf?t=1676016889623](https://valtioneuvosto.fi/documents/10623/144208579/VN_20423_2022-VM-13+Toimiohje+Fingrid+4034934_1_1.pdf/f4106e7c-5ad8-9bd0-6881-70c50340d16d/VN_20423_2022-VM-13+Toimiohje+Fingrid+4034934_1_1.pdf?t=1676016889623) [viitattu 11.1.2024].

	<b>MFM 10</b> Date of test: 14.09.2023 Starting Measurement: 09:33:20	Megger - MFM 10 V 1.590 SN: 14778430002
<h2 style="text-decoration: underline;">Cable Test Report</h2>		
<b>Project/Cable Information</b>		<b>Note:</b>
Projekt:	Kauppilan sähköaseman uusiminen	
Kaapeliyhteys:	Joutsa, L1	
Kaapelin valmistaja:	Prysmian	
Kaapelityyppi:	HXCHBMMK-W 1x2000/35 110kV SFS	
Kaapelin pituus:	95 m	
Mittauksen suorittaja:	Mikko Snellman	
<div style="text-align: center;">  </div> <p>max. Voltage 0,0 kV  min. Voltage -10,0 kV</p> <p style="text-align: right;">Sheath fault Current &lt; 10 µA</p>		
Test voltage:	-10.0 kV	
Capacity:	0.2 uF	
Test time:	1 min.	
Remaining time:	00:00 min.	
Result:	<b>Test finished</b>	
EasyProt V 1.37	<b>Inspector:</b> torstai 14. syyskuu 2023	

